JOSE CELSO MARINS

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA OPERAÇÃO DE ELEVATÓRIAS EM SISTEMAS
DE ADUÇÃO PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Instituto de Energia e Ambiente da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências

Orientador: Prof. Dr. Renato Carlos Zambon

Versão Revisada

São Paulo

2019

Nome: MARINS, José Celso

Título: Eficiência energética na operação de elevatórias em sistemas de adução para abastecimento de água

Dissertação apresentada ao Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Aprovado em: ____/____/____

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

AGRADECIMENTOS

À minha esposa amada, por compreender, com carinho, o tempo de dedicação necessário para a construção dessa dissertação.

Ao amigo Nilson Alves de Moura, pelo decisivo incentivo inicial para enfrentar este desafio.

Ao Prof. Dr. Renato Carlos Zambon, por exercer a missão de orientar de forma entusiástica, principalmente quando percebe a evolução dos resultados obtidos.

À SABESP por permitir que esta pesquisa fosse realizada.

Aos docentes do IEE pelos conhecimentos adquiridos ao longo desses 2 anos e meio.

Resumo

MARINS, José Celso **Eficiência energética na operação de elevatórias em sistemas de adução para abastecimento de água**. 2019. 139p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

A otimização de sistemas de recursos hídricos tem sido cada vez mais importante, principalmente em regiões metropolitanas que apresentam baixa disponibilidade per capita de água. A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é uma daquelas que apresenta essa baixa disponibilidade. Em pesquisas anteriores foi desenvolvido o modelo SISAGUA de otimização não linear com prioridades preemptivas para o planejamento operacional de sistemas de abastecimento de água formados por múltiplos reservatórios, adutoras, estações de tratamento de água e pontos de atendimento a demanda. Nesse modelo, os custos de adução e de tratamento são considerados pelo valor médio por unidade de volume. Os custos de energia elétrica e produtos químicos no abastecimento de água tratada são significativos, com forte impacto nos custos operacionais e consequentemente nas tarifas. Propiciar a redução do consumo desses insumos, sem causar impacto na otimização da operação dos reservatórios de água bruta para outros objetivos como evitar ou minimizar racionamentos, traz importantes benefícios ao setor de saneamento. Foram estudadas melhorias na representação dos gastos com energia nas adutoras por recalque, sendo possível otimizar a operação com base nas associações de bombas das elevatórias e ainda priorizar a operação em horários onde o preço da energia é mais baixo. As modificações quando testadas nas elevatórias de água bruta da RMSP, em 06 cenários distintos de vazões afluentes e demandas de consumo, proporcionaram, em média, uma redução de R\$ 18.725.000,00 nos custos de energia.

Palavras chaves: Eficiência energética, Recursos hídricos, Reservatórios, Programação não linear, Abastecimento de água

Abstract

MARINS, José Celso. Energy efficiency in operation of pumping stations in water main systems. 2019. Master's Dissertation – Graduate Program in Energy. Institute of Energy and Environment, University of São Paulo, São Paulo, 2019.

Energy efficiency in operation of pumping stations in water main systems.

The optimization of water resources systems has been increasingly important, specially in the metropolitan regions that have low per capita availability of water. The Metropolitan Region of São Paulo (MRSP) is one of those that presents this low available. In previous researches, the SISAGUA optimization model was developed in nonlinear program with preemptive priorities for operational planning of water supply for multiple reservoirs, pipes, treatment plants water and demand nodes. In this model, the energy and treatment costs are considered by the average value per unit volume. Energy costs electrical and chemical products in the treated water supply are significant, with strong impact on operating costs and consequently on tariffs. Encourage reduction consumption of these inputs, without impacting the optimization of the operation of the reservoirs of raw water for other purposes such as avoiding or minimizing rationing, brings important benefits to the sanitation sector. Also have been study improvements in the representation of energy costs, have been possible the optimization the pumping operation, when the concessionary tariff is cheaper than other periods. Those changes when tested in raw water's pumping stations of the MRSP, in 6 inflow scenarios and water demand, provided on average, a reduction U\$ 4.750.000,00 of the energy costs.

Keywords: Energy efficiency, Water resources, Reservoir, Nonlinear program, Water supply

LISTA DE SIGLAS

ABRACEEL	Associação Brasileira de Comercializadores de Energia
ABV	Alto da Boa Vista
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulada
AG	Algoritmo Genético
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Áustria
B	Variáveis otimizadas pelo SISAGUA com nova representação energia
BE	Bélgica
BG	Bulgária
BFT	Bomba Funcionando como Turbina
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CCRBT	Conta Centralizadora dos Recursos de Bandeiras Tarifárias
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH	Suíça
CY	Chipre
CZ	República Checa
DE	Alemanha
DIESSE	Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Sócio Econômicos
DK	Dinamarca
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
EE	Estônia
EL	Grécia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ES	Espanha
ESS	Encargos de Serviço do Sistema

ESS-SE	Encargos de Serviço do Sistema Sudeste
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EurEau	The European Federation of National Water Services
FC	Fator de Carga
FGV	Fundação Getúlio Vargas
FI	Finlândia
FO	Função Objetivo
FP	Fora de Ponta
FR	França
GO	Goiás
HU	Hungria
IE	Irlanda
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
InfoÁGUAS	Sistema de Informações de Águas da CETESB
IQA	Índice de Qualidade da Água
ISO	International Organization for Standardization
IT	Itália
LD	Lógica Difusa
LU	Luxemburgo
MIB	Metilisoborneol
MLT	Média a Longo Termo
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MP	Medida Provisória
MS	Ministério da Saúde
MT	Malta
NL	Holanda
NO	Noruega
NT	Nota Técnica
NT	Presença de Nitrogênio (mg/l) na água bruta
OEP	Otimização por Enxame de Partículas

P	Ponta
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PD	Programação Dinâmica
PL	Programação Linear
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças
PNL	Programação Não Linear
PT	Presença (mg/l) de fósforo na água bruta
REN	Resolução Normativa
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RO	Romênia
RS	Sérvia
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SAMS	<i>Stochastic Analysis Modeling and Simulation</i>
SE	Suécia
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SI	Eslovênia
SIM	Sistema Integrado Metropolitano
SK	Eslováquia
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SSD	Sistema de Suporte à Decisão
TE	Tarifa de Energia
THS	Tarifas Horo Sazonal
TUSD	Tarifa de Utilização de Serviços de Distribuição
TUST	Tarifa de Utilização de Serviços de Transmissão
UK	Reino Unido
VMP	Valores Máximos Permitidos
WHO	<i>World Health Organization</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismo de adsorção de gases	7
Figura 2 - Composição do custo de operação e manutenção de ETA	8
Figura 3 - Curva de custo de tratamento de água em função da capacidade de produção	9
Figura 4 - Composição média das despesas de exploração de serviços de saneamento ...	10
Figura 5 - Composição das tarifas de energia elétrica no ACR	11
Figura 6 - Tarifas aplicadas nos anos de 1970 a 1993, convertidas na moeda R\$/MWh .	12
Figura 7 - Tarifa de energia elétrica no Brasil (1994-2017).....	13
Figura 8 - Posição Brasil preço energia elétrica industrial (maiores economias).....	14
Figura 9 - Comparação de preços (R\$/MWh) ACL x ACR	15
Figura 10 - Cruz de perdas reais de água.....	18
Figura 11 - Índice percentual de perdas de água na distribuição em países europeus	19
Figura 12 - Geração de energia elétrica, turbina interna à adutora.....	20
Figura 13 - Geração de energia elétrica, turbina em by-pass à adutora	20
Figura 14 - Representação de rede de fluxo com nós e arcos	32
Figura 15 - Interface do SISAGUA.....	34
Figura 16 - Curva característica de uma bomba centrífuga	37
Figura 17 - Curva característica de associação de bombas e do sistema.....	37
Figura 18 - Esquema simplificado da afluência e reservatórios do Cantareira.....	44
Figura 19 - Desenho esquemático do sistema Alto Tietê.....	52
Figura 20 - GAMS com nova representação do custo de energia	67
Figura 21 - Vazão afluyente de três cenários e MLT do sistema Cantareira.....	70
Figura 22 - Vazão afluyente de 03 cenários e MLT do sistema Guarapiranga	71
Figura 23 - Vazão afluyente de 03 cenários e MLT do Sistema Alto Tietê	71
Figura 24 - Vazão afluyente de 03 cenários e MLT do Sistema Alto Cotia.....	72
Figura 25 - Solução SISAGUA cenário hidrológico 1950-1952, demanda SIM 59 m³/s	103
Figura 26 - Solução SISAGUA cenário hidrológico 1950-1952, demanda SIM 70 m³/s	104
Figura 27 - Solução SISAGUA cenário hidrológico 1992-1994, demanda SIM 59 m³/s	106
Figura 28 - Solução SISAGUA cenário hidrológico 1992-1994, demanda SIM 70 m³/s	108
Figura 29 - Solução SISAGUA cenário hidrológico 1982-1984, demanda SIM 59 m³/s	110
Figura 30 - Solução SISAGUA cenário hidrológico 1982-1984, demanda SIM 70 m³/s	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custos e despesas no tratamento de água	5
Tabela 2 - Valores de IQA classificados por faixa e estado	6
Tabela 3 - Índice de perdas de água na distribuição	19
Tabela 4 - Geração distribuída com aproveitamento de pressão residual	21
Tabela 5 - Volume total e útil de reservação do sistema Cantareira	44
Tabela 6 - Outorga por faixas de volume acumulado do sistema Cantareira.....	44
Tabela 7 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Santa Inês	46
Tabela 8 - Custo de energia associado à EEAB Santa Inês	46
Tabela 9 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Jaguari Atibainha	47
Tabela 10 - Custo de energia associado à EEAB Jaguari Atibainha	47
Tabela 11 - Parâmetros de qualidade da água bruta do sistema Cantareira	48
Tabela 12 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Guarapiranga.....	49
Tabela 13 - Custo de energia associado à EEAB Guarapiranga	49
Tabela 14 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Taquacetuba.....	50
Tabela 15 - Custo de energia associado à EEAB Taquacetuba	50
Tabela 16 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Capivari	51
Tabela 17 - Custo de energia associado à EEAB Capivari	51
Tabela 18 - Parâmetros de qualidade da água bruta do sistema Guarapiranga	51
Tabela 19 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Taiaçupeba	53
Tabela 20 - Custo de energia associado à EEAB Taiaçupeba	53
Tabela 21 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Biritiba Mirim.....	54
Tabela 22 - Custo de energia associado à EEAB Biritiba Mirim	54
Tabela 23 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Rio Pequeno	55
Tabela 24 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB R. Grande Taiaçupeba	55
Tabela 25 - Custo de energia associado às EEAB Rio Pequeno e Rio Grande Taiaçupeba	56
Tabela 26 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Guaió.....	56
Tabela 27 - Custo de energia associado à EEAB Guaió.....	57
Tabela 28 - Parâmetros de qualidade da água bruta do sistema Alto Tietê	57
Tabela 29 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Km 76.....	58
Tabela 30 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Guaratuba	59
Tabela 31 - Custo de energia associado às EEAB Km 76 e Guaratuba.....	59
Tabela 32 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Ribeirão Estiva.....	60
Tabela 33 - Custo de energia associado à EEAB Ribeirão Estiva.....	60
Tabela 34 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Rio Grande	61
Tabela 35 - Custo de energia associado à EEAB Rio Grande	62
Tabela 36 - Parâmetros de qualidade da água bruta do sistema Rio Grande	62
Tabela 37 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Alto Cotia.....	63
Tabela 38 - Custo de energia associado à EEAB Alto Cotia.....	63
Tabela 39 - Parâmetros de qualidade da água bruta do sistema Alto Cotia.....	64
Tabela 40 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB São Lourenço	65
Tabela 41 - Custo de energia associado à EEAB São Lourenço.....	65
Tabela 42 - Demandas do SIM consideradas nas simulações do SISAGUA	68
Tabela 43 - Elevatórias otimizadas no SISAGUA por associação de bombas	69
Tabela 44 - Volume inicial dos reservatórios considerado nas simulações do SISAGUA.....	70
Tabela 45 - Cantareira com cenário hidrológico 1950-1952 e demanda SIM 59 m ³ /s	74
Tabela 46 - Guarapiranga com cenário hidrológico 1950-1952 e demanda SIM 59 m ³ /s	75

Tabela 47 - Alto Tietê com cenário hidrológico 1950-1952 e demanda SIM 59 m ³ /s	77
Tabela 48 - Cantareira com cenário hidrológico 1950-1952 e demanda SIM 70 m ³ /s	78
Tabela 49 - Guarapiranga com cenário hidrológico 1950-1952 e demanda SIM 70 m ³ /s	80
Tabela 50 - Alto Tietê com cenário hidrológico 1950-1952 e demanda SIM 70 m ³ /s	81
Tabela 51 - Cantareira com cenário hidrológico 1982-1984 e demanda SIM 59 m ³ /s	83
Tabela 52 - Guarapiranga com cenário hidrológico 1982-1984 e demanda SIM 59 m ³ /s	84
Tabela 53 - Alto Tietê com cenário hidrológico 1982-1984 e demanda SIM 59 m ³ /s	86
Tabela 54 - Cantareira com cenário hidrológico 1982-1984 e demanda SIM 70 m ³ /s	87
Tabela 55 - Guarapiranga com cenário hidrológico 1982-1984 e demanda SIM 70 m ³ /s	89
Tabela 56 - Alto Tietê com cenário hidrológico 1982-1984 e demanda SIM 70 m ³ /s	91
Tabela 57 - Cantareira com cenário hidrológico 1992-1994 e demanda SIM 59 m ³ /s	93
Tabela 58 - Guarapiranga com cenário hidrológico 1992-1994 e demanda SIM 59 m ³ /s	94
Tabela 59 - Alto Tietê com cenário hidrológico 1992-1994 e demanda SIM 59 m ³ /s	96
Tabela 60 - Cantareira com cenário hidrológico 1992-1994 e demanda SIM 70 m ³ /s	98
Tabela 61 - Guarapiranga com cenário hidrológico 1992-1994 e demanda SIM 70 m ³ /s	100
Tabela 62 - Alto Tietê com cenário hidrológico 1992-1994 e demanda SIM 70 m ³ /s	101

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	1
2- OBJETIVOS DO TRABALHO	3
3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1- Tratamento de água: tecnologia de processos	4
3.2- Custo e despesas de tratamento de água	5
3.3- Custos de energia: evolução do sistema tarifário, faturamento de energia a consumidores do grupo A e precificação tarifária	10
3.4- Gestão de energia no saneamento básico	16
3.5- Séries históricas e sintéticas de vazão afluente	21
3.6- Operação do sistema de abastecimento de água	22
3.7- Modelos Matemáticos em Sistemas de Abastecimento de Água	23
3.8- Otimização da Operação de Sistemas de Abastecimento	25
4- METODOLOGIA	35
4.1- Custos de tratamento	36
4.2- Custos de energia elétrica	36
5- ESTUDO DE CASO	41
5.1- Sistemas Produtores de Água Tratada	43
5.2- Nova representação dos custos operacionais	66
5.3- Variáveis de entrada no SISAGUA	68
6- RESULTADOS OBTIDOS	72
7- CONCLUSÕES	113
8- DESENVOLVIMENTO DE PESQUISAS FUTURAS	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

1- INTRODUÇÃO

A dificuldade de conciliar o crescimento urbano, na maioria das vezes desordenado, com um abastecimento de água seguro e eficiente, é um grande desafio para as empresas de abastecimento de água no Brasil. A Agência Nacional de Águas - ANA (2017) identificou, última apuração em 2010, que apenas 45% dos municípios possuem abastecimento satisfatório de água, considerando-se a oferta e demanda por habitante de disponibilidade do recurso hídrico nos atuais mananciais. Aproximadamente 46% dos municípios necessitam de ampliação de sua capacidade de produção de água tratada e outros 9% necessitam de novos mananciais. A necessidade de ampliação e manutenção dos sistemas produtores de água tratada e transferência do fluído pelas adutoras e redes de distribuição têm uma relação direta com o consumo de energia elétrica, principalmente nas estações elevatórias de captação de água bruta dos mananciais e nos conjuntos motobombas presentes nos sistemas adutores e nas redes de distribuição.

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS (2017) apontou que os sistemas de abastecimento de água no Brasil consumiram aproximadamente 11,3 TWh, que representa aproximadamente 2,0 % de toda energia elétrica consumida no país. (EPE, 2017)

Os dados históricos SNIS (2017) apontam para uma tendência constante de aumento no consumo de energia, associado ao aumento de consumo per capita de água e também à necessidade de captação de água em reservatórios cada vez mais distantes às regiões metropolitanas, exigindo uma maior necessidade de consumo de energia elétrica na captação e transferência aos grandes centros urbanos. A escassez hídrica impacta diretamente no volume produzido de água tratada, podendo provocar a elevação dos indicadores de consumo específico (kWh/m³).

O uso de ferramentas de otimização para a redução de custos com energia elétrica no abastecimento de água tem sido bastante explorado pelos pesquisadores, face a importância deste custo dentro do processo de captação, tratamento e distribuição de água.

Zahed Filho (1990) afirmou sobre a necessidade de uma operação automática visando obter uma maior confiabilidade e eficiência nos resultados. A automação com eficiência nos resultados traz redução de custos em energia elétrica.

Vicente (2005) propôs um modelo de operação em tempo real do sistema adutor metropolitano de São Paulo, voltado para a redução do consumo de energia elétrica,

confiabilidade operacional, atendimento pleno à demanda de água e controle de pressão no sistema adutor. Utilizou os softwares WaterCAD como simulador hidráulico e da Frontline Systems, Inc. para o processo de otimização dentro de uma periodicidade diária.

Rodrigues (2007) utilizou-se da metodologia de algoritmo genético para otimização de operação automática com inversor de frequência obtendo resultados favoráveis quando comparados à operação de bombas com rotação constante.

Mais recentemente, Brentan (2014) utilizou-se da metodologia de otimização por enxame de partículas (OEP) (em inglês: particle swarm optimization) desenvolvendo um algoritmo híbrido para determinação de rotinas otimizadas para o bombeamento de uma instalação de recalque.

Nas pesquisas citadas, percebe-se que a preocupação em atingir o ponto ótimo de operação em sistemas de abastecimento de água não é recente, mas as prestadoras de serviços de saneamento ainda têm muito a desenvolver para reduzir os custos com energia elétrica. Uma gestão de energia feita de forma continuada, com padrões de apuração de resultados similares a ISO 50.001, renovação de ativos por outros de maior desempenho energético, aproveitamento de oportunidades para aquisição de energia elétrica em Ambiente de Contratação Livre (ACL), ações integradas de redução de perdas de água por vazamento nas redes de distribuição, geração de energia elétrica distribuída com aproveitamento de pressão residual nas adutoras e usinas térmicas de geração de energia tendo como insumo o biogás das Estações de Tratamento de Esgoto - ETE são algumas das opções disponíveis para redução dos custos com energia elétrica.

O abastecimento de água, nas maiores regiões metropolitanas, é feito normalmente com a integração de mais de um sistema produtor de água tratada, visando aumentar a confiabilidade do processo e permitindo a existência de regiões de flexibilidade, que são áreas onde o abastecimento pode ser feito por mais de um sistema. Tal flexibilidade é uma ferramenta importante na gestão de crises hídricas e a utilização de ferramentas de otimização da operação de reservatórios em um sistema de grande escala tem se mostrado um forte aliado ao tomador de decisão. A busca de uma operação ótima de recursos hídricos requer e abrange áreas de hidráulica, hidrologia, meteorologia, economia e meio ambiente. No presente trabalho ao citar-se o termo “economia”, deve-se entender como o custo operacional das estações de tratamento da água (ETA) e do consumo de energia elétrica dos conjuntos

motobombas de captação de água bruta e nas estações elevatórias de água tratada no processo de adução aos reservatórios de distribuição.

O modelo SISAGUA (BARROS *et al.* 2008) foi estruturado para analisar configurações complexas de sistemas de abastecimento de água e auxiliar a busca de alternativas operacionais ótimas para evitar ou minimizar eventuais déficits, distribuir o armazenamento em sistemas com múltiplos reservatórios e minimizar os custos de operação. O modelo considera os custos de tratamento e adução de forma linear, associando um custo constante a cada intervalo de tempo por unidade de volume tratado em cada ETA ou aduzido em cada trecho de adução por recalque.

2- OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo da pesquisa é o aprimoramento de uma ferramenta que possa auxiliar os tomadores de decisão das empresas prestadoras de serviço de abastecimento de água, a definir regras de operação ótimas, aplicadas a múltiplos reservatórios de água bruta, sistemas de adução, compostas de múltiplas estações elevatórias e vários reservatórios de acumulação e distribuição. Formulou-se uma nova função objetivo de minimização dos custos operacionais (energia adicionado ao tratamento) para padrões de demanda conhecidos e sob diversas séries históricas de vazão afluente nos mananciais. As modificações possibilitaram:

- ✓ apresentar soluções com confiabilidade operacional quando testada em um modelo hidráulico representativo de um modelo físico escolhido;
- ✓ demonstrar a oportunidade de redução de consumo de energia elétrica pela implantação de medidas e regras operacionais sem a necessidade de investimentos financeiros para alcançar esta racionalização;
- ✓ melhorar a representação dos custos de energia nas adutoras por recalque;
- ✓ avaliar a operação dos reservatórios de regularização dos sistemas produtores de água, estações de tratamento e principais adutoras do Sistema Integrado Metropolitano (SIM) da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), com apoio do modelo SISAGUA.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foi executado uma avaliação dos custos de tratamento em função da qualidade da água bruta e um estudo da evolução do sistema tarifário de energia, no Brasil e modelos matemáticos de otimização; impactando diretamente no sistema de gestão de energia elétrica no abastecimento de água.

3.1- Tratamento de água: tecnologia de processos

O conjunto de processos e operações utilizados para adequar as características físicas, químicas e biológicas das águas naturais ao consumo humano constitui as ETA. Esses processos visam a remover ou diminuir as concentrações de substâncias encontradas na água bruta até padrões estabelecidos para a água potável, expressos por Valores Máximos Permitidos (VMP), definidos no Brasil pela Portaria n. 518 (Ministério da Saúde (MS), 2004).

Todavia o tratamento de água atendendo critérios estabelecidos na Portaria 518 pode não garantir uma água segura para consumo humano. A *World Health Organization* (WHO, 2008) identificou que a presença de novos contaminantes químicos e microbiológicos levam à necessidade de revisão de legislações e diretrizes pertinentes.

A insegurança proporcionada pelo sistema poluidor moderno leva à necessidade de revisão do tratamento convencional. As operações e processos unitários de coagulação, floculação, sedimentação, filtração rápida e desinfecção com cloro podem ser insuficientes para a remoção da ampla variedade de poluentes existentes na maioria dos mananciais disponíveis, constituindo-se, portanto, em sistemas de tratamento incompatíveis com os níveis de segurança necessários para a garantia da qualidade da água de abastecimento. Assim, os sistemas de separação por membranas vêm se consolidando como opção no tratamento de água para abastecimento, não apenas como tecnologias emergentes para aumentar os níveis de proteção da saúde pública de consumidores, mas também para substituir com vantagens, diversas operações e processos unitários de tratamento. (SCHENEIDER, TSUTIYA, 2001)

Os principais processos de separação por membranas para tratamento de águas são a microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e a osmose reversa, com destaque para a última, que é a mais utilizada entre as tecnologias de separação por membranas e tem a capacidade de separar da água espécies iônicas dissolvidas na massa líquida como: sódio, cloreto, cálcio, magnésio e outros. O principal fator que governa a capacidade de separação é a abertura do poro das membranas, pois o tamanho dos poros por si só representa uma barreira física para

contaminantes que sejam maiores que as aberturas dos mesmos. As membranas de osmose reversa são aquelas que possuem menor diâmetro de poro (DROSTE,1997). A pressão decresce na medida em que as aberturas dos poros aumentam. Desse modo, a osmose reversa trabalha com as maiores pressões, portanto consome mais energia por volume de água tratada (kWh/m^3).

3.2- Custo e despesas de tratamento de água

Os custos e despesas associados ao funcionamento das ETA são essenciais porque asseguram a permanência das instalações no tempo, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Custos e despesas no tratamento de água

Custo de operação e manutenção nas ETA	mão de obra
	produtos químicos
	energia elétrica
	monitoramento de qualidade de água
	manutenção de equipamentos
	perdas de água na limpeza das unidades
	tratamento, aproveitamento e disposição dos resíduos gerados
Despesas	Gastos na estrutura administrativa na ETA

Fonte: Di Bernardo, Sabogal Paz (2008)

Os gastos com mão de obra envolvem o pagamento de salários e encargos trabalhistas das pessoas diretamente relacionadas à produção de água tratada. Os custos dos produtos químicos são gerados pela aquisição daqueles empregados no tratamento, como coagulantes, polímeros, desinfetantes, adsorventes, acidificantes, alcalinizantes e oxidantes. As principais cargas elétricas pertencentes ao processo de tratamento de água são: iluminação e tomadas de uso geral, bombas dosadoras de produtos químicos e bombas para lavagens de filtros, sendo estas últimas as de maior potência elétrica em relação às demais cargas apontadas. Os gastos de monitoramento e controle da água são decorrentes da realização de ensaios de laboratórios para avaliar os riscos (físicos, químicos, microbiológicos e radiológicos) presentes na água bruta, na saída do tratamento e na distribuição. Os gastos com manutenção de equipamentos são devido às atividades realizadas para evitar, prevenir ou reparar danos no sistema. O controle sistemático da manutenção de equipamentos é fundamental na redução de custos de produção de água. A operação das ETA requer, periodicamente, a paralização e posterior limpeza de cada uma das unidades que compõem o sistema. Essa atividade requer o uso de água filtrada no processo, gerando perda já prevista na produção do sistema e representando um custo operacional. Os gastos gerados no tratamento dos resíduos estão associados aos

custos envolvidos na operação e manutenção da estação de tratamento dos resíduos composta pela combinação de unidades de equalização/regularização, adensamento e desaguamento (secagem e incineração, dependendo do caso).

O número de órgãos administrativos num sistema de abastecimento, assim como a função de cada um deles, é decorrente do tamanho e da complexidade da estação. Em sistemas pequenos e simples, somente um órgão administrativo é suficiente para coordenar todos os elementos, materiais e pessoas. O mesmo não acontece com grandes e complexos sistemas, nos quais a variedade de trabalhos a executar e o maior número de elementos exigidos para a administração requerem multiplicidade de órgãos.

O custo de produtos químicos associados ao tratamento de água é diretamente proporcional ao volume do fluido produzido, à tecnologia escolhida para o processo e à qualidade da água bruta captada dos mananciais. O Índice de Qualidade da Água (IQA) foi criado em 1970 nos Estados Unidos, pela National Sanitation Foundation. No Brasil é o principal indicador de qualidade para avaliar a água bruta, visando o uso para o abastecimento após o tratamento. (ANA.a, 2019)

Tabela 2 - Valores de IQA classificados por faixa e estado

Faixas de IQA utilizadas nos estados de: AL, MG, MT, PR, RJ, RN, RS	Faixas de IQA utilizadas nos estados de: BA, CE, ES, GO, MS, PB, PE, SP	Qualidade da água
91-100	80-100	ótima
71-90	52-79	boa
51-70	37-51	razoável
26-50	20-36	ruim
0-25	0-19	péssima

Fonte: ANA.a (2019)

No estudo de caso proposto nesta pesquisa, será utilizada como marco teórico a fonte de dados Sistema de Informações de Águas (InfoÁGUAS) (CETESB, 2019) para apurar: IQA, fósforo, nitrogênio e número de cianobactérias de cada manancial, identificando possíveis degradações do recurso hídrico ao longo dos anos.

A floração de algas é oriunda do despejo de esgoto em mananciais, sem o devido tratamento. Essas algas alimentam-se de fósforo e nitrogênio presentes no esgoto. A água, mesmo após o tratamento, permanece com sabor e odor indesejáveis. Para minimizar o efeito causado pelas cianobactérias, que surgem entre o verão e o outono, recorre-se a uma tecnologia conhecida

como adsorção por carvão ativado, mostrada na Figura 1. Na quantidade adequada, o carvão, adicionado à água coletada, consegue reter em seus poros, como uma esponja, a maior parte das substâncias que provocam o cheiro e o gosto desagradáveis – chamadas de geosmina e Metilisoborneol (MIB).

Figura 1 - Mecanismo de adsorção de gases

Fonte: Ceron (2012)

A presença de cianobactérias na água bruta é uma componente importante no custo de tratamento da água. A Portaria 2.914/2011 do MS determina que se a densidade de cianobactérias exceder 20.000 células.mL⁻¹ deve-se realizar análise de cianotoxinas na água do manancial, no ponto de captação. Segundo Schindler (1977), o crescimento excessivo de cianobactérias pode estar diretamente associado ao enriquecimento do ambiente aquático por nutrientes, principalmente, nitrogênio e fósforo. De acordo com Smith (1983), há uma tendência de ocorrer florações quando a relação NT:PT é menor que 29:1. Segundo Robarts e Zohary (1987) a temperatura possui grande influência sobre as taxas de respiração de crescimento e fotossíntese realizada por cianobactérias. A temperatura ótima é maior que 25° celsius, porém, em algumas espécies a temperatura pode variar.

Segundo Ceron (2012), o sistema de tratamento de água de Porto Alegre, feito pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), investiu mais de 15 milhões de reais em equipamentos para enfrentar a presença do sabor e do cheiro. Por causa das cianobactérias o DMAE aponta que em 2012 o custo tem sido 224% maior devido à necessidade de eliminar as

substâncias indesejáveis. De R\$ 70,00 desembolsados pelo DMAE a cada 1000 m³ nos períodos sem floração, o custo subiu para R\$ 226,80.

Uma das alternativas para minimizar a floração das cianobactérias é a aplicação da pré-oxidação na água bruta antes da coagulação. Este tratamento pode ter um efeito positivo sobre os processos convencionais, com a redução da dose de coagulante e melhorando a qualidade da água tratada. (SUKENIK *et al.*, 1987; STEYNBERG *et al.*, 1996; HENDERSON *et al.*, 2008; CHEN e YEH, 2005; MA *et al.* 2012a; MA *et al.* 2012b)

Existem considerações econômicas e químicas que devem ser feitas a respeito do uso da pré-oxidação: enquanto a aplicação de pré-oxidação pode reduzir a demanda de coagulante, faz-se necessário a determinação de dosagem ideal a partir da qual o custo adicional do oxidante começa a não compensar a economia feita pela redução de doses de coagulantes. (CAPELO NETO; NEYCOMBE, 2017)

Trenepohl *et al.* (2017) desenvolveu pesquisa de custos de operação e manutenção das ETA pertencentes ao sistema de abastecimento do Região Metropolitana de Florianópolis, a Figura 2 mostra os grupos dos custos avaliados.

Figura 2 - Composição do custo de operação e manutenção de ETA

Fonte: Trenepohl *et al.* (2017)

Os custos com pré-oxidação e carvão ativado não foram considerados nos insumos, portanto, para a ETA José Pedro Horstmann com capacidade de 3,0 m³/s, os custos dos insumos do

tratamento de água representaram 45,3%, com variação positiva de 7% no período úmido e variação negativa de mesmo valor para o período seco, portanto o custo dos insumos apresentou variação de R\$ 0,07/m³ a R\$0,11/m³, período avaliado mar/2015 a fev/2016. Com base nesses valores de insumo e na curva da Figura 3 determina-se o custo médio de produtos químicos utilizados no tratamento de água em função da capacidade de produção de cada ETA do estudo de caso e é adicionado o custo de minimização dos impactos da floração de cianobactérias utilizando-se o adicional de custos previstos por (CERON, 2012). Os valores serão corrigidos pelo IGPM para o ano base de 2018.

Figura 3 - Curva de custo de tratamento de água em função da capacidade de produção

Fonte: Trenepohl (2017)

No Brasil, o custo com produtos químicos no tratamento de água é parcela importante dentro da composição média das despesas de exploração (SNIS, 2017). O gráfico da Figura 4 mostra que os custos com produtos químicos representaram 3,4% do total de despesas na exploração dos serviços de empresas prestadoras de serviços de saneamento.

Figura 4 - Composição média das despesas de exploração de serviços de saneamento

Fonte: SNIS (2017)

3.3- Custos de energia: evolução do sistema tarifário, faturamento de energia a consumidores do grupo A e precificação tarifária

Dentre as variáveis utilizadas para a otimização, com minimização dos custos operacionais, o custo de energia é a mais significativa. Portanto, entender como a evolução do sistema tarifário influencia diretamente na precificação é essencial para a minimização dos custos da energia elétrica. A contratação da energia, nas diversas opções que o modelo do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) contempla, é uma componente importante na gestão de custos operacionais de abastecimento de água.

Evolução do sistema tarifário

Até meados de 1990, o regime tarifário que vigorava no SEB era baseado no custo do serviço. Prevvia que as tarifas de energia elétrica cobrada dos consumidores deveriam ser capazes de cobrir os custos associados à geração, à transmissão e à distribuição de energia elétrica, e ainda garantir uma taxa de retorno, previamente fixada, para as empresas concessionárias do SEB. A lei 5.655/71 estabeleceu o regime de remuneração garantida e fixou a taxa de retorno num patamar entre 10 e 12% ao ano, e o decreto-lei 1.383/74, que criou o mecanismo de equalização tarifária entre as concessionárias do setor elétrico. Esta equalização tarifária permitiu que os consumidores de todas as regiões do país gozassem do mesmo nível tarifário numa mesma classe de consumo.

A lei 8.631/93 pôs fim ao mecanismo de equalização tarifária entre as concessionárias do setor, passando os reajustes tarifários serem fixados de forma diferenciada, em função dos custos de cada distribuidora e preparando o setor para as futuras privatizações. A criação da

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 26/12/1996, passou ter a função de regular e fiscalizar a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do Governo Federal. Os princípios fundamentais, desta nova fase, são a modicidade tarifária – tarifa acessível a todos os cidadãos – e o equilíbrio financeiro das empresas. Adotou o modelo regulatório do Preço Teto (do inglês *price-cap*) considerado um regime com alto poder de incentivo, pois não impede que a remuneração do capital varie conforme o desempenho da gestão da empresa. Abre a possibilidade das empresas aumentarem seus lucros ao longo de um período previamente determinado.

A tarifa passa a ser composta pela somatória de duas parcelas acrescidas de tributos, conforme Figura 5.

Figura 5 - Composição das tarifas de energia elétrica no ACR

Fonte: ANEEL (2015)

Mesmo diante desta nova legislação, que favorecia o investimento privado na geração e distribuição de energia o país passou por sua maior crise energética no triênio 2000-2002, causada principalmente pela falta de investimento em geração e superestimação do lastro dos contratos iniciais. (TOLMASQUIM, 2011)

Passada a crise, o SEB necessitava de um novo modelo implantado pela Lei 10.848/04 resgatando o modelo institucional, corrigindo erros de modelos anteriores e trazendo aspectos positivos como o planejamento e a segurança de suprimento para os consumidores cativos, mas elevou substancialmente o controle sobre as empresas dos diferentes segmentos do setor. (BRITO, 2017)

A Resolução Normativa (REN) ANEEL n. 464/2011 definiu que o sistema de bandeiras seria aplicado a partir de 2015. Seus recursos são revertidos à Conta Centralizadora dos Recursos de Bandeiras Tarifárias (CCRBT), sendo repassados aos agentes de distribuição, considerando a diferença entre os custos de geração por fonte termelétrica e as receitas obtidas na tarifa vigente.

Precificação tarifária

Foi demonstrado que a tarifa de energia elétrica no Brasil no período anterior a 1993 era baseada no custo do serviço, com um único preço em todo o país. O período de 1970 a 1990 ficou caracterizado pelo desequilíbrio financeiro, com índices inflacionários altíssimos. Devido a essa instabilidade econômica, Poole, Poole (2001) analisou o preço das tarifas de energia elétrica desse período fazendo uma conversão para a moeda Real com base no seu valor em 1998. Com essa conversão, conforme Figura 6, é possível avaliar o valor da tarifa ao longo dos anos.

Figura 6 - Tarifas aplicadas nos anos de 1970 a 1993, convertidas na moeda R\$/MWh

Fonte: Poole, Poole (2001)

Percebe-se que ao longo desses 23 anos, a tarifa de energia elétrica foi reajustada com índices abaixo da inflação.

A partir de 1993, quando foi alterado o regime de reajuste das tarifas em função dos custos dos serviços de cada concessionária, as tarifas passam a ser reajustadas de forma a

recuperar o seu adequado valor. A Figura 7 apresenta a evolução das tarifas de energia elétrica no Brasil tendo como referência a moeda nacional e o dólar americano.

Figura 7 - Tarifa de energia elétrica no Brasil (1994-2017)

Fonte: elaboração do autor c/ dados EPE (2017); PORTAL BRASIL (2018)

Na segunda metade da década de 1990, ocorrem as privatizações das principais distribuidoras de energia elétrica do país. As tarifas reguladas ainda não dão sinais de recuperação de seu valor agregado, o que passa a ocorrer mais acentuadamente a partir de 2003, logo após o racionamento do SEB. Essa recuperação mostra-se forte e superior à variação do dólar americano. No ano de 2012 o preço médio nacional da tarifa de energia elétrica atinge um pico de R\$ 292,85/MWh, uma das mais altas do planeta. A pressão do mercado, principalmente do setor industrial, sobre o Governo foi muito forte levando a lançar mão de uma medida provisória MP-579/2012, reduzindo preço das tarifas em aproximadamente 20%. Essa redução foi feita de forma “artificial” trazendo sérias consequências financeiras, principalmente às distribuidoras de energia elétrica, obrigando a reajustes extraordinários a partir de 2015, elevando a tarifa a patamares superiores a 2012.

Continuando a análise da evolução do preço das tarifas de energia elétrica, o Brasil é reconhecido como um país, que apesar de ter uma matriz energética essencialmente renovável, graças às usinas hidrelétricas, o preço é um dos mais altos do mundo.

A Agência Internacional de Energia (IEA) realiza, desde 2008, comparação do preço da tarifa de energia elétrica industrial entre as 20 maiores economias globais.

A Figura 8 mostra o posicionamento do Brasil frente a esses países.

Figura 8 - Posição Brasil preço energia elétrica industrial (maiores economias)

Fonte: elaboração do autor com dados (EPE, 2008-2018)

O histórico demonstra que o custo de energia elétrica no Brasil é um dos mais altos, quando comparados às principais economias globais. Em 2012, a tarifa nacional, no segmento industrial, chegou a ser a terceira mais alta. Com a MP – 579/12, que reduziu o preço das tarifas em aproximadamente 20%, a tarifa industrial, em 2013, já não figurava entre as mais altas. Já no ano seguinte as tarifas são novamente reajustadas e já em 2016 o Brasil aparece como a sexta energia elétrica industrial mais alta.

Com propósito de finalização da análise de precificação de energia elétrica, se faz necessária a demonstração de comparação entre a tarifa no ACR e os preços praticados no ACL, conforme se apresenta na Figura 9.

Figura 9 - Comparação de preços (R\$/MWh) ACL x ACR

Fonte: ABRACEEL (2018)

Os dados, apresentados graficamente, mostram claramente que o preço no ACL é inferior ao ACR, mesmo em 2013 quando as tarifas do ACR foram reduzidas por medida provisória. No mesmo gráfico apurou-se a economia acumulada pelos consumidores que totaliza 83 bilhões de reais em 15 anos. Ocorre que a legislação do SEB é bastante restritiva quanto ao ingresso de consumidores no ACL. Num ranqueamento feito pela (ABRACEEL, 2018) mostra que o Brasil é apenas 55º país em liberdade para compra de energia elétrica. Países de menor expressão econômica global tem seu mercado de energia elétrica livre a todas as classes de consumidores. A atual legislação permite que somente consumidores com demanda superior a 3.000 kW possam migrar para o ACL. A portaria 514/2018 do Governo Federal permitiu, a partir de 01/07/2019, que consumidores com demanda a partir de 2500 kW possam migrar para o ACL e a partir de janeiro/2020 aqueles com demanda maior que 2000 kW. Os consumidores com demanda superior a 500 kW e inferior a 3000 kW, podem ingressar ao ACL, desde que comprem energia elétrica de fontes renováveis como: PCH, biomassa, eólica e fotovoltaica e com potência inferior a 50 MW.

Faturamento de energia elétrica a consumidores do grupo A

Os consumidores de energia elétrica podem ser divididos, de acordo com sua finalidade: residência, comércio, indústria, serviço público, e por nível de tensão no qual é feito o atendimento, como alta tensão (acima de 69 kV), média tensão (1 kV até 69 kV) e baixa tensão (abaixo de 1,0 kV).

Dessa forma, a estrutura das tarifas de fornecimento de energia elétrica pode ser desenhada para abranger cada tipo de unidade consumidora classificada pelo nível de tensão. Para os consumidores cativos, que são a maioria, a distribuidora é responsável pelo fornecimento de energia elétrica como um todo, englobando o transporte e o produto (energia elétrica gerada). Porém, para determinados clientes, os livres, com regras apresentadas no item 2.d do capítulo 4, podem escolher o fornecedor do produto energia elétrica, a distribuidora local presta apenas o serviço de transporte. Assim, a tarifa de fornecimento de energia elétrica é formada por duas componentes: a Tarifa de Utilização de Serviços de Distribuição (TUSD) e a Tarifa de Energia (TE).

A TUSD é paga tanto pelos consumidores cativos como pelos livres, pelo uso do sistema de distribuição da empresa de distribuição à qual estão conectados. A TE é cobrada somente aos consumidores cativos, pois os livres compram energia diretamente das comercializadoras de energia elétrica ou dos agentes de geração. Portanto, os consumidores livres continuarão pagando a TUSD ao distribuidor local e deixará de pagar a TE, devido à contratação com outro fornecedor.

Os consumidores do grupo A são faturados no sistema de Tarifas Horo Sazonal THS, que é dividido em duas modalidades, conforme segue:

- Azul: com preço de tarifas diferenciadas para segmento de ponta e fora de ponta, tanto na componente de demanda de potência (kW) e consumo de energia elétrica (kWh). Esta modalidade é apropriada para consumidores que apresentam alto Fator de Carga (FC) no segmento de ponta.
- Verde: com preço de tarifas diferenciadas para segmento de ponta e fora de ponta para a componente de consumo de energia elétrica (kWh) e uma tarifa única para a componente de demanda de potência (kW), sem diferenciação entre ponta e fora de ponta. Esta modalidade é apropriada para consumidores com baixo FC no segmento de ponta.

3.4- Gestão de energia no saneamento básico

O consumo de energia elétrica é indispensável na gestão e operação dos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário e originam uma despesa de exploração significativa. Os custos de energia elétrica, nas empresas prestadoras de serviços de saneamento, representam 13,1% dos custos de exploração, ficando atrás apenas da mão de obra própria e de terceiros SNIS (2017). A gestão dos contratos de fornecimento de energia

elétrica, o uso eficiente de energia elétrica e a redução das perdas de água, além de permitirem maior retorno financeiro pela diminuição dos custos de produção de água, possibilitam o melhor aproveitamento da infraestrutura existente e a postergação da aplicação de recursos para ampliação dos sistemas. Aproveitamento de minigeração de energia elétrica na adução, em pontos onde existe pressão residual e geração com aproveitamento do biogás das ETE, são oportunidades que levam à redução dos gastos totais em energia elétrica.

Gestão de contratos

A gestão dos contratos de fornecimento de energia elétrica (subgrupo A) com definição do sistema tarifária a ser adotado é passo inicial na gestão de energia do processo abastecimento de água. São três opções de modalidades tarifárias: THS azul, THS verde, ACL para aquelas unidades consumidoras com demanda maior que 3.000 kW e consumidores especiais ACL com demanda entre 500 kW e 3.000 kW.

Redução de perdas de água

As perdas de água, na distribuição, se caracterizam como ineficiências técnicas, são inerentes a qualquer sistema de abastecimento de água. É um tema sempre atual devido à escassez hídrica e aos altos custos de energia elétrica, além da sua relação com a saúde financeira dos prestadores de serviço. As perdas reais correspondem ao volume de água perdido nos vazamentos de adutoras, redes de distribuição, ramais prediais e extravasamentos de reservatórios. As perdas aparentes referem-se aos volumes consumidos e não contabilizados pelas companhias, decorrentes, entre outras razões, de fraudes e imprecisão dos hidrômetros. As perdas aparentes também são conhecidas como perdas comerciais (TARDELLI FILHO, 2006). Os custos decorrentes das perdas devem ser minimizados e estar sujeitos a gerenciamento apropriado, pois são repassados ao consumidor.

A maior parte dos volumes perdidos ocorre na distribuição de água, portanto as principais ações ocorrem nessa área. Lambert, Thornton (2002) apresenta a “cruz de perdas reais”, Figura 10, para visualização das ações de controle de perdas e o nível desejável a se atingir.

Figura 10 - Cruz de perdas reais de água

Fonte: Lambert, Thornton (2002)

Se intensificadas as ações de controle de perdas, o volume perdido tende a atingir seu ponto de viabilidade econômica. Para o controle das perdas reais, as ações residem no gerenciamento de pressão, controle ativo dos vazamentos, agilidade e qualidade dos reparos e gerenciamento da infraestrutura.

O gerenciamento de pressões consiste numa importante medida de ação de eficiência energética. O controle e redução de pressões são atingidos pelo correto projeto de setorização dos sistemas de distribuição, pelo controle de bombeamentos, através de inversores de frequência nas estações elevatórias e boosters, implantação de válvulas redutoras de pressão e bombas funcionando como turbinas (BFT).

Conforme será demonstrado na Tabela 3, o Brasil tem índices elevados de perdas na distribuição, quando comparados a países desenvolvidos como Alemanha, Japão, Austrália e Nova Zelândia que já têm índices de perda inferiores a 10%. (SNIS, 2017)

Nos países pertencentes a The European Federation of National Water Services (EurEau), os índices médios de perdas na distribuição, em 2017, são de 23%, demonstrando que alguns países estão distantes dos já citados com perdas inferiores a 10%.

Figura 11 - Índice percentual de perdas de água na distribuição em países europeus

Fonte: EurEau (2017)

O Brasil, vide Tabela 3, tem índices de perdas de água na distribuição superiores à média europeia, mesmo em regiões mais desenvolvidas como Sul/sudeste.

Tabela 3 - Índice de perdas de água na distribuição

Região	Total (%)
Norte	55,1
Nordeste	46,3
Sudeste	34,4
Sul	36,5
Centro-Oeste	34,1
média nacional	38,3

Fonte: SNIS (2017)

Microgeração em pontos com aproveitamento de pressão residual

Desde abril/2012, quando entrou em vigor a REN ANEEL 482/2012, o consumidor de energia elétrica no Brasil pode gerar sua própria energia a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente a rede de distribuidora de sua localidade. Nas linhas de adução e redes de distribuição de água é possível integrar o controle de pressão com geração de energia elétrica. A geração de energia por pressão residual pode ser feita por duas principais formas:

1. Internamente às adutoras, onde a turbina preenche toda a seção circular, controlando a pressão e gerando energia elétrica, tendo como principal vantagem o espaço ocupado e como principal desvantagem, dificuldade de manutenção sem interrupção no abastecimento de água.

Figura 12 - Geração de energia elétrica, turbina interna à adutora

Fonte: Casini (2015)

2. Externamente às adutoras onde a turbina é instalada em by pass da linha principal, apresentando a vantagem de melhor controle de pressão e geração de energia, mais facilidade de serviços de manutenção sem interrupção do abastecimento de água e a principal desvantagem uma maior necessidade de espaço para instalação.

Figura 13 - Geração de energia elétrica, turbina em by-pass à adutora

Fonte: Casini (2015)

Casini (2005) apurou os projetos já em operação na América do Norte, com as respectivas capacidades de geração de energia elétrica:

Tabela 4 - Geração distribuída com aproveitamento de pressão residual

Portland	200 kW
San Antonio	60 kW
Keene	56 kW
Los Angeles	225 kW

Fonte: Casini (2015)

3.5- Séries históricas e sintéticas de vazão afluente

A simulação a partir de séries históricas de vazões tem sido amplamente utilizada por décadas para estudar problemas relacionados ao planejamento e gerenciamento de sistemas de múltiplos reservatórios. Alguns exemplos são: o cálculo da capacidade de um reservatório, confiabilidade de um reservatório de um determinado volume nominal, avaliação da adequação de uma estratégia de gerenciamento de recursos hídricos face a diversos cenários hidrológicos, e avaliação do desempenho de sistemas de irrigação (SALAS *et al.*, 1980).

Ocorre que a série histórica é apenas uma das possíveis realizações de um processo estocástico. Modelos que procuram aproximar este comportamento estocástico, permitem que artificialmente se façam tantos sorteios quanto necessários para o estudo em questão. As séries sintéticas de vazão estão associadas a cada sorteio.

Para este propósito alguns modelos são sugeridos na literatura, como: HEC-4 (US Army Corps of Engineers, 1971), LAST (Lane e Frevert, 1990) e SPIGOT (Grygier e Stedinger, 1990).

O Stochastic Analysis Modeling and Simulation (SAMS) foi desenvolvido em 1996, devido a necessidade de adaptações computacionais do modelo LAST (COLORADO STATE UNIVERSITY, 2007).

O SAMS 2007 contém as seguintes capacidades:

- ✓ Análise de características estocásticas de dados anuais e sazonais.
- ✓ Inclui diversas opções de transformação dos dados originais em normais.

- ✓ Inclui uma série de modelos estocásticos de reservatórios individuais, múltiplos reservatórios e modelos estocásticos desagregados que têm sido utilizados amplamente na literatura hidrológica.
- ✓ Inclui dois tipos de modelagem para geração de dados de sistemas de rede fluvial.
- ✓ Número de amostras que podem ser geradas não tem limite definido.
- ✓ Número de anos que podem ser gerados não tem limite definido.

O objetivo principal da SAMS é gerar dados hidrológicos sintéticos. Não é construído para previsão hidrológica, embora a geração de dados para alguns dos modelos possa ser condicionada às observações históricas mais recentes.

3.6- Operação do sistema de abastecimento de água

A operação dos sistemas de abastecimento de água busca o atendimento confiável das necessidades de consumo, a custos operacionais mínimos, tais como os de consumo de energia, tratamento e manutenção. O atendimento a tal requisito implica num melhor aproveitamento dos reservatórios de regularização de vazões nos mananciais, dos reservatórios de distribuição de água tratada e dos sistemas de adução e distribuição de água. O planejamento, projeto e operação dos diversos componentes particularmente os reservatórios de regularização nos mananciais, possuem grande importância para evitar ou minimizar as falhas de atendimento. É um desafio ao poder público, à sociedade e aos usuários, que buscam gerenciar os recursos hídricos a longo termo de forma a atender diferentes demandas atuais e futuras, de maneira justa e sustentável.

Segundo Cunha (2009), o que acontece na maioria dos sistemas é que as regras operacionais implementadas são de natureza empírica, e visam, principalmente, a garantia da continuidade do abastecimento público, sem priorizar a minimização dos custos de energia elétrica. O trabalho no setor de operações de um sistema de abastecimento requer decisões eficientes e em tempo real.

Segundo Zahed Filho (1990), para que se possa otimizar as regras operacionais de um sistema de abastecimento de água são necessárias a definição clara dos objetivos a serem alcançados, o conhecimento do sistema e de dados previsionais, além da disponibilidade de um modelo de otimização dessas regras.

Nas ocasiões em que há oferta e demandas equilibradas, o objetivo pode ser voltado à minimização dos custos operacionais. Quando o sistema apresenta demanda superior à capacidade de produção, o objetivo passa a ser minimizar os impactos causados pela escassez do recurso oferecido, seja ele hídrico ou estrutural.

O conhecimento da topologia, características hidráulicas, mecânicas, elétricas dos elementos que compõe o sistema, é base fundamental para que o simulador hidráulico utilizado represente da forma adequada o sistema em análise. Já a previsão das demandas e as séries históricas de vazões afluentes nos mananciais permitem que o modelo desenvolvido represente as condições de operação do sistema.

Nas últimas décadas, a complexidade dos sistemas acompanhou o crescimento e a diversificação da demanda e, assim, surgiram dificuldades operacionais. Para gerir os sistemas, houve a necessidade da aplicação da análise de sistemas como ferramenta de apoio para que os operadores possam tomar decisões de forma estruturada. A análise de sistemas de engenharia de recursos hídricos é um campo que vem se aprimorando paralelamente com o aumento da capacidade dos recursos computacionais. Os grandes sistemas com múltiplos reservatórios necessitam de análises complexas, envolvendo muitas variáveis, exigindo o uso de ferramentas computacionais.

3.7- Modelos Matemáticos em Sistemas de Abastecimento de Água

A simulação hidráulica em redes de abastecimento de água utiliza modelos matemáticos que representam as leis físicas que regem o fenômeno do escoamento de fluídos sob pressão. Visa reproduzir a dinâmica de um sistema existente ou proposto. Os modelos consideram o escoamento em regime permanente, utilizam a equação da continuidade nos nós e a equação da energia ao longo dos trechos. São resolvidos, por exemplo, por técnicas de linearização como os métodos de Hardy-Cross ou Newton-Raphson. Davis e Jeppson (1979), Wood (1980), Shawcross (1985), Tanner (1985), Bhave (1988), Hamberg e Oisternier (1988) foram pesquisadores que desenvolveram modelos utilizando esses métodos. Utilizaram basicamente dois procedimentos: primeiramente, calcula a vazão nos trechos e as pressões nos nós para uma determinada configuração do sistema e cenário de atendimento a demanda, admitindo-se regime permanente. No segundo procedimento, admite-se o escoamento, em regime transitório, utilizando as teorias de coluna rígida ou elástica. O segundo procedimento é mais complexo em termos de equacionamento e resolução, porém, menos restritivo para aplicação

em redes de abastecimento de água. Ribeiro (1985) foram alguns dos pesquisadores que utilizaram este procedimento.

Souza (1994) ressalta que os modelos de simulação podem ser utilizados na operação em tempo real, de forma a verificar a resposta do sistema a uma determinada manobra. Os modelos em período estendido devem ser utilizados admitindo-se uma curva de consumo conhecida ou adotada. Vários modelos de simulação para períodos estendidos foram desenvolvidos com a finalidade de auxiliar no planejamento e projetos de sistemas existentes, assim como na operação em tempo real (RAO e BREE, 1977; SOUZA e SILVA, 1987; RAHAL, 1994).

Zongxue *et al.* (1998) apresentou um modelo de simulação combinado a um modelo de riscos que incorporava previsão de demandas. O modelo foi aplicado no sistema de abastecimento de água da cidade de Fukuoka no Japão. No trabalho, o risco de obtenção de uma boa performance foi investigado sob três alternativas: a operação do sistema existente quando a disponibilidade de água do rio Chikugo não era suficiente para suprir a necessidade de atendimento das demandas, redução da água distribuída em diversas porcentagens e o aumento do abastecimento de água quando era implementada a dessalinização da água do mar. O modelo foi composto por três componentes: demanda, simulação e risco.

Apesar do desenvolvimento de modelos simuladores de sistemas de distribuição de água, a quantificação das perdas por vazamento e previsão de demandas são dois problemas que continuam sendo tratados com certa ressalva. Obradovic (2000) ressaltou que ambos os parâmetros são dependentes da pressão e que esta relação ainda não é bem conhecida. Ele propôs um melhoramento no modelo de simulação, caso essa relação passasse a ser conhecida. Soares *et al.* (2002), Soares (2003) e Soares *et al.* (2003) realizaram análises de desempenho de modelos de simulação hidráulica dirigidos pela pressão (MSHDP), admitindo que tanto as demandas como os vazamentos poderiam e deveriam ser explicitados como função das pressões. Esta preocupação também foi demonstrada por Hernandez *et al.* (1999). Utilizando o EPANET, o autor desenvolveu um modelo, denominado HIPERWATER que buscava atingir dois objetivos: minimização de perdas e melhoria no tempo de simulação. O modelo visa a redução de perdas através do controle de pressão do sistema.

A influência das perdas de água nos custos finais da operação de um sistema de distribuição de água foi estudada por Colombo e Karney (2002). Segundo os autores, estes custos dependem de vários fatores que incluem o regime de demanda, a distribuição espacial das

perdas e a complexidade do sistema. Através do simulador hidráulico concluíram que, em geral, os custos de energia têm uma relação polinomial de segunda ordem com as perdas.

3.8- Otimização da Operação de Sistemas de Abastecimento

Os estudos de operação e planejamento de reservatórios tiveram como precursor Rippl em 1883 ao partir de método do diagrama de massas com a finalidade de se determinar os volumes úteis para reservatórios simples. Com o tempo, as técnicas foram aprimoradas para analisar sistemas mais complexos de reservatórios. Os reservatórios de regularização são elementos importantes em sistemas de recursos hídricos e são utilizados para a redistribuição espacial e temporal da disponibilidade de água e para a geração de energia. Segundo Simonovic (1992), na operação de reservatórios de regularização tem-se o objetivo de maximizar os benefícios esperados, sujeito a certas restrições. Tais restrições incluem limites máximos ou mínimos relacionados ao armazenamento para recreação, navegação, controle de cheias, abastecimento público, industrial e irrigação e geração de energia; bem como restrições relacionadas à vazão efluente visando a qualidade da água, preservação de meio ambiente e controle de cheias.

Neste contexto de complexidade, os conflitos de interesse podem dificultar a tomada de decisão. Conforme Labadie (2004), o conflito de interesses se dá quando o foco de um projeto é realizado com considerações inadequadas relacionadas à operação e à manutenção real, e com o aumento da demanda não considerado no projeto inicial. Esses conflitos costumam se agravar no período de secas severas. Com a baixa disponibilidade hídrica, as restrições são determinadas por acordos legais, contratos, regulações federais, pactos interestaduais, e pressões dos interessados, ao passo que diferentes valores causam diferentes percepções sobre o problema ou a realidade.

Conforme Oliveira e Loucks (1997), a necessidade de negociações e subsequentes acordos relacionados ao modo de operação dos sistemas de reservatórios é a principal razão pela qual os sistemas são gerenciados em regras fixas e predefinidas. Essas regras indicam com diferentes níveis de detalhes as ações a serem realizadas pelos operadores como função de um número relativamente pequeno de variáveis, como por exemplo, a época do ano, estado do sistema, e condições hidrológicas futuras esperadas.

Os sistemas de suporte à decisão (SSD) têm se mostrado ferramentas importantes de forma crescente na operação e planejamento de sistemas de recursos hídricos ao emular o comportamento dos sistemas sob determinadas condições (vazões, armazenamento e demanda) e diferentes alternativas de planejamento (REITSMA *et al.*, 1996). Os SSD têm a finalidade de servir como instrumento para entendimento do sistema e auxiliar os tomadores de decisão.

Com o avanço da tecnologia, redução de custos, habilidade computacional e o desenvolvimento de softwares e sistemas operacionais em interface amigável, os SSD têm demonstrado um grande avanço nos campos da pesquisa e prática, desde quando começaram a serem aplicados aos recursos hídricos, na década de 1970 (ITO *et al.*, 2001; LABADIE e SULLIVAN, 1986).

De acordo com Wurbs (1993), os seguintes objetivos têm refletido nas funções de vários modelos de otimização disponíveis na literatura:

Benefícios econômicos e custos:

- ✓ Maximizar abastecimento de água;
- ✓ Minimizar as perdas econômicas devido à escassez de água;
- ✓ Minimizar os custos de bombeamento num sistema de abastecimento de água;
- ✓ Minimizar os danos associados a uma inundação;
- ✓ Maximizar os benefícios líquidos das operações de uso múltiplo.

Disponibilidade de água e confiabilidade:

- ✓ Maximizar a vazão firme, atender as vazões de confiabilidades especificadas, para demandas específicas;
- ✓ Minimizar frequência de escassez;
- ✓ Maximizar a vazão de atendimento à demanda;
- ✓ Maximizar o armazenamento do reservatório no final do horizonte de otimização;
- ✓ Minimizar vertimentos ou perdas por evaporação;
- ✓ Maximizar a disponibilidade de períodos para navegação.

Os modelos de otimização são classificados como estocásticos ou determinísticos; de acordo com o horizonte de planejamento (curto ou longo prazo); em função do período de operação (anual, mensal, diário, horário); quanto os usos e propósitos; quanto a dimensão do sistema; e quanto ao número e tipos de funções objetivo.

Simulações determinísticas que utilizam longas séries hidrológicas representativas para obter uma operação ótima são também classificadas como otimização estocástica implícita. A hidrologia pode ser obtida por uma série sintética de vazões ou uma série histórica observada. As técnicas de regressão são normalmente utilizadas para inferir políticas de operação de reservatórios (RANI, MOREIRA, 2010). A otimização estocástica explícita, por sua vez, requer uma representação probabilística das vazões. Embora a abordagem determinística possa ser formulada de forma a representar melhor o problema, ela pode apresentar certas limitações, quando se trata de situações extremas, como, por exemplo, uma seca severa ou uma cheia intensa. A escolha da metodologia depende do sistema de reservatórios considerado, a disponibilidade de dados e dos objetivos e restrições especificadas (YEH, 1985).

Alguns dos métodos mais utilizados de otimização incluem a programação linear (PL), programação dinâmica (PD), programação não linear (PNL), lógica difusa, redes neurais e algoritmos genéticos.

Programação linear

A PL é comumente utilizada em gestão de recursos hídricos e aborda a solução de um tipo de problema onde as relações entre todas as variáveis são lineares, tanto nas restrições como na função objetivo. A PL lida com a alocação de recursos limitados com relação ao número de atividades. Problemas não lineares podem ser linearizados e resolvidos por processos de iteração ou aproximação (YEH, 1985). Em algumas aplicações a PL é adotada de forma conjunta com a PD, especialmente na condição de curto prazo. A PL pode ser usada em fases preliminares dos estudos identificando a sensibilidade das variáveis e delimitando um conjunto de respostas onde posteriormente o modelo de simulação localizará a solução ótima.

Os algoritmos de otimização da operação de sistemas de reservatórios por PL com restrições probabilísticas foram bem desenvolvidos para o caso de reservatórios simples. Entretanto, há dificuldade no desenvolvimento de algoritmos que garantam a solução ótima e sejam viáveis, na prática, para sistemas com múltiplos reservatórios. Simonovic (1992), afirma que apesar

da PL apresentar limitações num ambiente determinístico, existem importantes aplicações combinados com técnicas adicionais que ampliam a aplicabilidade desta técnica.

Programação dinâmica

A PD é uma técnica matemática de otimização, utilizada para fazer uma sequência de decisões inter-relacionadas. É um procedimento sistemático para determinar a combinação de decisões que maximizam ou minimizam uma certa função. Bellman, em 1957, foi o primeiro a propor tal técnica aplicado dentro de um processo de multiestágios, buscando uma otimização independente da política adotada no estágio anterior. Ficou conhecido como Princípio da Otimalidade de Bellman.

Ao contrário da PL, a PD permite que a função objetivo e as equações de restrição tenham qualquer forma, o que torna a aplicação mais genérica. Entretanto, não é possível obter uma metodologia padronizada, como na PL. Para cada situação, precisa-se desenvolver equações adaptadas às condições do sistema. Uma dificuldade da PD consiste em reconhecer quando um problema pode ser solucionado por esta técnica. O estudo e leitura de casos já estudados é importante para desenvolver essa sensibilidade prática.

Para a maioria dos problemas de reservatório, se a PD é aplicada para determinar as descargas do reservatório, a variável de estado é o armazenamento, a variável de decisão é a liberação de água, e o estágio é representado pelo período de tempo (SIMONOVIC, 1992). Pode ser aplicada tanto em otimizações determinísticas como em estocásticas e considera apenas um número finito de estágios.

A primeira aplicação de PD em recursos hídricos foi realizada por Halls e Buras (1961) apud Sharif Wardlaw (2000). Para sistemas de múltiplos reservatórios, esta técnica fica limitada pela grande demanda de recursos computacionais.

Talukdar *et al.* (2012) abordaram a PD estocástica multi-objetivo para examinar a operação do projeto Sardar Sarovar no rio Narmada, Índia. Os objetivos foram maximizar a meta de liberação anual, maximizar a produção hidrelétrica e maximizar a confiança da produção do sistema.

Programação não linear

A não linearidade na operação de reservatórios ocorre devido a relações complexas entre diferentes variáveis físicas e hidrológicas e por causa de objetivos específicos que devem ser

atendidos pelos sistemas. Esses problemas podem ser simplificados e resolvidos por PL, também a PD consegue lidar com a não linearidade, porém existe uma classe de problemas que são melhores resolvidos pela PNL.

Loucks e Beek (2005) apresenta um exemplo de PNL que considera um rio que irá fornecer uma certa quantidade de água para três indústrias. Assume-se que o problema é determinar a quantidade de água para cada empresa, com o objetivo de obter a maximização da rede de benefícios. A vazão a ser disponibilizada para cada indústria é uma restrição ou limite para a vazão disponível no rio. O exemplo é desprovido de equação matemática complexa para a solução do problema, mas geralmente, a PNL envolve equações mais complexas, envolvendo um processo de otimização que ocupa mais memória e maior tempo de processamento. A PNL pode efetivamente lidar com uma função objetivo não separável e restrições não lineares que muitas técnicas de programação não podem (YEH, 1985).

Inclui a programação quadrática, geométrica, e programação separável como casos especiais que podem ser usados de forma iterativa como um programa principal como subprograma de outros de maior escala. Técnicas de pesquisa também têm sido utilizadas em conjunto com a simulação, a fim de avaliar as funções dos sistemas alternativos de desempenho (MAASS et. al., 1962 apud. (YEH, 1985). Para um sistema de reservatórios, o número de restrições é grande porque lida com subsistemas semelhantes repetidos no tempo ou local.

A PNL passou a ganhar mais espaço na análise de sistemas de recursos hídricos com o desenvolvimento da tecnologia computacional e algoritmos eficazes para grande escala.

Lógica difusa

A LD é uma abordagem desenvolvida para lidar com a falta de precisão e incertezas nas variáveis do modelo, até mesmo nos objetivos. Pode ser utilizada para problemas de difícil compreensão devido à subjetividade e/ou falta de informação. Ao invés de usar equações matemáticas complexas, a LD utiliza descrições linguísticas para definir a relação entre a informação de entrada e saída da decisão.

Loucks e Beek (2005) apresenta um exemplo de aplicação de LD considerando um intervalo de temperaturas adequadas para a prática de natação numa piscina. Neste tipo de problema subjetividade (sentimento) de quem é questionado é alta. Diante disso é difícil fixar qual é a temperatura ideal para a prática do esporte.

O conceito foi introduzido em 1965, o ponto central da teoria dos conjuntos *fuzzy* é a função de pertinência que representa numericamente o grau em que o elemento pertence a um conjunto. Se um elemento pertence a um conjunto *fuzzi* em algum grau, o valor da sua função de pertinência pode ser qualquer número entre 0 e 1. Mas se os valores forem 0 ou 1, apenas, a teoria se reduz à teoria clássica de conjuntos (ZADEH, 1965)

O objetivo e restrições são caracterizados por suas funções de pertinência. A decisão em ambiente difuso pode ser vista como a intersecção das restrições difusas e da função objetivo (RANI, MOREIRA, 2010).

Rede neural

A rede neural é um método computacional inspirado por estudos ligados ao cérebro e ao sistema nervoso de organismos biológicos. Tipicamente, é composto por um conjunto de unidades de processamento (neurônios, funções de ativação), operam com o princípio de aprender a partir de um conjunto de treinamentos. Existe uma variedade de modelos de aprendizagem.

Sua utilidade é vantajosa quando existe a necessidade de um grande número de soluções num curto espaço de tempo (LOUCKS e BECK, 2005). Assim, a rede neural é usada, como um aproximador universal: mapeamento de rede neural de entrada-saída é relacionado a um mapeamento não linear desconhecido de interesse através de treinamento da rede. Para executar o treinamento, é preciso ter um conjunto de pares de entrada-saída que é representante do mapeamento desconhecido que se aproxima (RANI, MOREIRA, 2010).

French et. al. (1992) apud. Chandramouli e Raman (2001) desenvolveu uma rede neural de três camadas para prever a intensidade da chuva em tempo e espaço. Após treinar os padrões de entrada a rede neural foi utilizada para prever a precipitação utilizando os atuais campos como dados de entrada. Mostrou que a rede neural é capaz de aprender uma relação completa descrevendo a evolução da chuva em tempo e espaço.

Algoritmo genético (AG)

A abordagem da computação evolucionária foi experimentada para superar as complexidades, como, múltiplos objetivos, descontinuidade e discretização que limitam as aplicações dos métodos de otimização analíticos de sistemas de reservatórios.

Os AG são sistemas adaptativos dos algoritmos evolucionários baseados conceitualmente na evolução natural e adaptação. Os estudos de AG originaram em 1975, com Holland (OLIVEIRA, LOUCKS, 1997) que baseou sua pesquisa no Princípio de Darwin. Desde então os AG têm sido aplicados em vários casos relacionados aos recursos hídricos: modelos de água subterrânea, otimização de redes de adução, métodos de chuva-vazão, modelos de amortecimento de cheias em reservatórios.

Os AG lidam com conjuntos de soluções múltiplas discretas, ao invés de uma única solução e uma resposta diferencial da superfície sobre essa solução. Não garantem, porém, que cada nova solução será melhor que as outras as quais são derivadas, elas apenas garantem que a probabilidade de serem melhores, é maior.

Goldeberg (1989) apud Wardlaw, Sharif (1999) identifica as seguintes diferenças entre os AG e os demais métodos de otimização:

- Trabalham com a codificação de um conjunto de parâmetros, e não com parâmetros isolados;
- Buscam uma população de pontos e não um único;
- Utilizam a informação da função objetivo diretamente e não exigem seus derivativos ou outras informações auxiliares;
- Utilizam regras de transição probabilísticas e não determinísticas.

Entre as desvantagens de AG, pode-se citar sua incapacidade de identificar, claramente, sua solução única, ou seja, a solução que dará o máximo desempenho do sistema.

Como citei no capítulo 1 desta pesquisa e agora com mais detalhes Brentam (2014) utilizou a metodologia OEP para comparar ao AG tomando como referência três pesquisas realizadas por diferentes autores.

Quando o OEP foi comparado a pesquisa de Rodrigues (2007) o modelo teve o mesmo desempenho do AG. Como vantagem do OEP em relação ao AG foi a redução do esforço computacional comparado ao exigido do AG.

No segundo caso, comparando com o autor Ribeiro (2007) os resultados mostraram um ganho maior no custo operacional quando comparado via AG. Nesta avaliação o AG mostrou-se mais vantajoso em relação ao OEP no ponto de vista computacional, fazendo 8000 avaliações na função objetivo, contra 249.600 realizadas no OEP.

No terceiro caso, (Carrijo, 2004) apresentou-se o melhor resultado do ponto de vista de custo operacional, 67,5%. Porém, o resultado pelo OEP apresentou um cenário de rotações muito baixa dos conjuntos motobombas e a pesquisa não avaliou os impactos negativos desta constatação.

ACQUANET

O AcquaNet é um SSD composto de um banco de dados para armazenar as informações da rede de fluxo, uma base de modelos e uma interface de comunicação com o usuário (PORTO *et al.* 2003). Mistura características dos modelos de simulação e otimização e pode incorporar as características estocásticas das vazões de entrada (PORTO e AZEVEDO, 1997). A operação dos reservatórios é feita utilizando-se o conceito de volume meta ao qual se atribui uma prioridade e as perdas por evaporação são levadas em conta por meio de iterações.

O sistema adota o intervalo de análise mensal e pode ser um instrumento de gerenciamento e também de planejamento, para análise de impacto das propostas alternativas para a implantação de projetos de aproveitamento de recursos hídricos e também pode servir no processo de seleção inicial de alternativas com base na análise econômica, em um nível simplificado, com inclusão direta de dados de custos e benefícios, em lugar da especificação relativa das prioridades.

Figura 14 - Representação de rede de fluxo com nós e arcos

Fonte: Carvalho *et al.* (2009)

Conforme Figura 14, o modelo considera que os arcos são limitados por uma capacidade de transporte mínima e máxima, que a soma dos quantitativos dos fluxos que chegam a um nó é igual à soma dos quantitativos dos fluxos que saem do mesmo nó, e, ainda, que cada arco pode ser associado a um custo pelo transporte do fluxo. A formulação do modelo de otimização a ser resolvido é linear e apresentada pelas equações abaixo:

$$\text{Min } \sum c_{ij} \cdot x_{ij} \quad (1)$$

$$L_{ij} \leq x_{ij} \leq U_{ij} \quad (2)$$

$$\sum x_{ij} = \sum x_{jk} \quad (3)$$

Onde: c_{ij} é o custo do transporte de uma unidade de fluxo através do arco ij ;

x_{ij} é a quantidade de fluxo que passa pelo arco ij ;

L_{ij} é a capacidade mínima do arco ij

U_{ij} é a capacidade máxima do arco ij

A equação (1) representa a função objetivo que minimiza o custo do transporte do fluxo pelos arcos e a equação (2) refere-se à restrição da capacidade da rede, enquanto a equação 3 representa a restrição de conservação de massa. Devido à sua grande eficiência utilizou-se o algoritmo denominado Out-of-Kilter: trata-se de um algoritmo de programação linear primal-dual, desenvolvido especialmente para a solução eficiente de problemas de minimização de custos em rede de fluxo. (ROBERTO, 2002)

O atendimento às demandas é feito de acordo com um valor de prioridade atribuída pelo usuário, que varia de 1 a 99, sendo 99 a prioridade máxima, as prioridades P e o custo C estão relacionados pela equação $C = 10P - 1000$, isto significa que os valores de C são sempre negativos e ao atender uma prioridade o modelo estará diminuindo os custos da rede de um valor C por unidade de vazão fornecida. A operação dos reservatórios é feita com o conceito de volume meta, ao qual se atribui uma prioridade, sempre que o volume armazenado for menor que o volume meta, o reservatório guardará água, desde que as outras prioridades sejam menores. O volume armazenado acima do nível meta tem custo zero, ou seja, é livre para atender a quaisquer demandas por menor que sejam as prioridades. A otimização do modelo é feita em intervalos mensais, de forma sequencial, podendo ser feito em intervalos mais curtos. A otimização é efetuada sequencialmente a cada intervalo de tempo, portanto não se garante o ótimo global para um horizonte de planejamento com n intervalos à frente.

SISAGUA

O modelo SISAGUA (BARROS *et al.* 2008) é um modelo matemático de otimização desenvolvido para o planejamento operacional de sistemas de abastecimento de água. O SISAGUA utiliza a técnica da programação não linear inteira mista (PNLIM) e é uma

ferramenta eficiente para o planejamento da operação de sistemas de produção de água, interligados a sistemas complexos de adução de água na qual emprega o pacote de otimização GAMS (*General Algebraic Modeling System*). Dentre as funções do modelo, uma das mais importantes, é permitir análises complexas de sistema de adução de água envolvendo diversos tipos de problemas, como por exemplo, a relação entre a adução e as regras operativas de sistemas de reservatórios, impactos de expansão na rede de adução, impactos de regras de racionamento no atendimento aos pontos de demanda entre outras aplicações.

O modelo possui uma interface de fácil uso, o que facilita a interação do usuário com os dados de entradas e os resultados gráficos. O SISAGUA foi estruturado para analisar qualquer tipo de problema, permitindo a criação de topologias para o sistema a ser estudado. Dessa forma, o modelo pode ser aplicado a qualquer configuração de adução e de produção de água. A Figura 15 apresenta uma imagem de interface com a configuração de um exemplo de aplicação.

Figura 15 - Interface do SISAGUA

Fonte: Barros *et al.* (2008, p. 247-256)

A otimização do SISAGUA é realizada em uma sequência de três etapas, cada uma com sua função objetivo, que utiliza o conceito de prioridades preemptivas, desenvolvido originalmente para problemas de PL. Na primeira etapa, o modelo evita ou minimiza o racionamento determinando as vazões de atendimento em cada ponto de demanda. Na

segunda, busca maximizar os volumes disponíveis nos reservatórios ao longo do horizonte de planejamento. Na terceira, o objetivo do modelo é minimizar os custos operacionais.

É importante observar que as restrições à captação, também chamadas de regras de racionamento com relação à oferta, visam essencialmente preservar o armazenamento nos reservatórios como forma de segurança em períodos mais secos e evitar falhas de maior intensidade no futuro. Não necessariamente a restrição à captação implica em racionamento no atendimento à demanda.

As funções objetivo são apresentadas a seguir:

$$FO\ 1: \min \sum_i d_i \sum_k (1 - XN_{k,i})^2 \cdot D_{k,i} \cdot Cusd_{k,i} \quad (4)$$

na qual: $D_{k,i}$ = demanda planejada no nó k , intervalo de tempo i ; $Cusd_{k,i}$ = custo ou peso de não atendimento a demanda no nó k no intervalo de tempo i ; $XN_{k,i}$ = relação entre a demanda atendida e a projetada no nó k , no intervalo de tempo i (adimensional); i = índice de intervalo de tempo; k = índice de nós de demanda; d_i = duração dos intervalos de tempo (s).

$$FO\ 2: \min \sum_i d_i \sum_m (St_{m,1} - S_{m,i})^2 \cdot Cusv_{m,i} / St_{m,i} \quad (5)$$

na qual: $St_{m,i}$ = volume meta no nó reservatório produtor m , intervalo de tempo i (m³); $S_{m,i}$ = volume no nó reservatório produto m , intervalo de tempo i (m³); $Cusv_{m,i}$ = custo ou peso de desvio em relação ao volume meta no intervalo de tempo i ; m = índice de nós reservatórios produtores.

$$FO\ 3: \min \sum_i d_i \sum_a QA_{a,i} \cdot Cusa_{a,i} \quad (6)$$

na qual: $QA_{a,i}$ = Vazão no trecho a , intervalo de tempo i (m³/s); $Cusa_{a,i}$ = Custos unitários de adução nos trechos nos intervalos de tempo i (R\$/m³); a = índice de trechos.

Além das funções objetivo, a otimização está sujeita a um conjunto de restrições que incluem: limites inferiores e superiores das variáveis, equação da continuidade para cada nó, equação da continuidade para cada reservatório e regras operativas dos reservatórios.

4- METODOLOGIA

A principal contribuição desta pesquisa está em definir uma melhor representação dos custos de energia elétrica associados ao processo de recalque de água e dos custos de tratamento para definição de regras operacionais. Os fundamentos matemáticos possibilitam uma redução nos

custos de operação quando são inseridas as referidas variáveis nas funções objetivos de minimização, implementando melhorias na formulação original do modelo SISAGUA.

4.1- Custos de tratamento

Os custos variáveis no tratamento de água foram estabelecidos em função da qualidade da água bruta, que foram apuradas pelo aplicativo InfoÁGUAS. Variações sazonais e correlações com vazões afluentes e níveis nos reservatórios de regularização foram avaliados, de forma a melhorar a representação do custo unitário por metro cúbico de água tratada, atualmente considerado constante. Os custos específicos de insumos serão apurados por referências bibliográficas, item 1 do capítulo 3, portanto não serão utilizados os custos efetivos de tratamento da SABESP.

4.2- Custos de energia elétrica

Com relação aos custos de energia elétrica esta pesquisa fez uma melhor representação em relação à utilizada no SISAGUA (FO 3). Foi considerado as particularidades da energia elétrica consumida em função do volume de água recalcado, quantidade de bombas operando simultaneamente e os preços tarifários associados aos horários de consumo.

Os principais equipamentos de uma elevatória são a bomba e o motor que juntos são denominados de conjunto motobomba (CMB).

As bombas mais utilizadas, nos sistemas de abastecimento, são as centrífugas que aceleram a massa líquida através da força centrífuga fornecida pelo giro do rotor, transformando a energia cinética internamente em energia de pressão, através da carcaça da bomba. São projetadas para elevar uma determinada vazão a uma certa altura manométrica, em condições de máxima eficiência. À medida que o par Q e H se afasta das condições ótimas de operação, o rendimento da bomba tende a cair.

Figura 16 - Curva característica de uma bomba centrífuga

Fonte: Tsutiya (2005)

O mais comum é haver duas ou mais bombas que podem operar individualmente ou associadas em paralelo, sendo que cada bomba fica responsável por uma parcela da vazão.

Como ilustra a Figura 17, o ponto de intersecção da curva das bombas em operação simultânea com a curva do sistema elevatório será o ponto de operação do sistema, fornecendo a vazão total de recalque.

Figura 17 - Curva característica de associação de bombas e do sistema

Fonte: Tsutiya (2005)

O motor elétrico é a máquina destinada a transformar energia elétrica em mecânica. É o mais utilizado para acionamento de bombas, pela sua simplicidade, confiabilidade e menor custo.

(TSUTIYA, 2005).

Os motores de indução com rotor em gaiola são amplamente utilizados nos sistemas de bombeamento, com mais de 90% da totalidade. Já motores com potência superior a 15.000 cv, utiliza-se do tipo síncronos que apresentam a vantagem de trabalhar com velocidades maiores de rotação, podendo chegar a 3.600 rpm (LOBOSCO e DIAS, 1988 apud. TSUTIYA, 2005).

O custo de energia elétrica é a associação da potência do motor pelo tempo em funcionamento e a tarifa aplicada.

No Brasil, as modalidades tarifárias são definidas pela REN ANEEL n. 414, datada de 09/09/2010. A seguir são apresentadas, algebricamente, as estruturas tarifárias para consumidores de energia do subgrupo A:

- ✓ Elevatórias com demanda menor que 3.000 kW as opções são A4 azul ou verde;
- ✓ Elevatórias com demanda maior que 3.000 kW as opções são A2 azul ou ACL;

Portanto, tem-se:

a- A4 azul

$$Ce_a = \left(\left(\sum_{i=1}^n P_b \cdot (tp_b \cdot pea_p + tf_b \cdot pea_f) \right) + (PM_p \cdot pda_p) + (PM_f \cdot pda_f) \right) \quad (7)$$

Na qual:

Ce_a = Custo de energia da elevatória na modalidade A4 azul, R\$

P_b = Potência absorvida da rede de alimentação, em cada ponto de operação b da elevatória, kW

b = quantidade de CMB operando em simultaneidade, unidades

PM_p = maior valor de P_n no segmento de ponta, kW

PM_f = maior valor de P_n no segmento fora de ponta, kW

tp_i = tempo de operação em cada ponto de operação i , no segmento de ponta, hora

tf_i = tempo de operação em cada ponto de operação i , no segmento fora de ponta, hora

pea_p = preço de energia A4 azul no segmento de ponta, R\$/kWh

pea_f = preço de energia A4 azul no segmento fora de ponta, R\$/kWh

pda_p = preço de demanda A4 azul no segmento de ponta, R\$/kWh

pda_f = preço de demanda A4 azul no segmento fora de ponta, R\$/kWh

b- A4 verde

$$Ce_b = \left(\sum_{i=1}^n P_b \cdot ((tp_b \cdot peb_p) + (tf_b \cdot peb_f)) \right) + (PM \cdot pdb_f) \quad (8)$$

na qual:

Ce_b = Custo de energia da elevatória na modalidade A4 verde, R\$

PM = Maior valor de P_i em todo período, kW

peb_p = preço de energia A4 verde no segmento de ponta, R\$/kWh

peb_f = preço de energia A4 verde no segmento fora de ponta, R\$/kWh

pdb_f = preço de demanda A4 verde no segmento fora de ponta, R\$/kW

A minimização dos custos de energia elétrica para estações elevatórias com demanda inferior a 3.000 kW, se dará entre essas duas estruturas tarifárias. Os contratos de fornecimento de energia elétrica no ACR têm prazo de vigência mínimo de 12 meses, a avaliação pode ser mensal, mas a minimização é a condição compilada anualmente.

c- A2 azul

$$Ce_c = \left(\left(\sum_{i=1}^n P_b \cdot ((tp_b \cdot pec_p) + (tf_b \cdot pec_f)) \right) + (PM_p \cdot pdc_p) + (PM_f \cdot pdc_f) \right) \quad (9)$$

na qual:

Ce_c = Custo de energia da elevatória na modalidade A2 azul, R\$

pec_p = preço de energia A2 azul no segmento de ponta, R\$/kWh

pec_f = preço de energia A2 azul no segmento fora de ponta, R\$/kWh

pdc_p = preço de demanda A2 azul no segmento de ponta, R\$/kWh

pdc_f = preço de demanda A2 azul no segmento fora de ponta, R\$/kW

d- ACL

$$Ce_d = \left(\left(\sum_{i=1}^n P_b \cdot ((tp_b \cdot ped) + (tf_b \cdot ped)) \right) + (PM_p \cdot pdd_p) + (PM_f \cdot pdd_f) \right) \quad (10)$$

na qual:

Ce_d = Custo de energia da elevatória na modalidade ACL, R\$

ped = preço de energia ACL, R\$/kWh

pdd_p = preço de demanda A2 azul no segmento de ponta, R\$/kWh

pdd_f = preço de demanda A2 azul no segmento fora de ponta, R\$/kW

A minimização dos custos de energia elétrica para estações elevatórias com demanda superior a 3.000 kW, se dará entre essas duas estruturas tarifárias. Os contratos de fornecimento de energia elétrica no ACL têm prazo de vigência mínimo de 60 meses, a avaliação pode ser mensal, mas a minimização é a condição compilada quinquenalmente. Percebe-se que a avaliação deve ser criteriosa, pois, serão decisões que só poderão sofrer reversão após cinco anos, avaliar as previsões de preço futuro de energia no ACR comparado ao ACL é tão importante quanto à avaliação dos preços atuais.

A estação elevatória normalmente opera nos dois segmentos (ponta e fora de ponta), o segmento de ponta representa 9,2% do tempo total de análise e consequentemente o segmento fora de ponta tem 90,8% do total.

Algebricamente, apresenta-se:

$$\sum_{b=1}^n tp_b \leq 0,092 \quad (11)$$

É importante entender que tp_b é menor ou igual a 9,2% porque o otimizador pode minimizar o custo de energia optando em não operar a elevatória durante todo o segmento de ponta.

$$\sum_{b=1}^n tf_b \leq 1 - 0,092 \quad (12)$$

De forma similar, o tf_b é menor ou igual a 90,8% porque o otimizador pode minimizar o custo de energia optando em não operar a elevatória durante todo o segmento fora de ponta.

Os custos de energia dar-se-á pela minimização das equações (7) a (12) associados às características técnicas de cada elevatória. No entanto a elevatória tem características restritivas determinadas pela demanda de consumo do sistema de abastecimento de água e eventuais regras de racionamento para evitar consequências futuras de desabastecimento. Portanto a equação (13) impõe condições restritivas à minimização das equações (7) a (12).

$$Q_m \cdot (\sum_{b=1}^n (tp_b + tf_b)) = \sum_{i=1}^n Q_b \cdot (tp_b + tf_b) \quad (13)$$

Onde:

Q_m = vazão média de operação da elevatória, determinada pelas funções objetivo do SISAGUA, m³/s

Q_b = vazão de recalque em cada ponto b do sistema, m³/s

No segmento de ponta o valor unitário de energia tem preço mais elevado em todas as estruturas tarifárias e sendo este um período de 9,2% do total do período, considera-se uma restrição de vazão mínima ($Q_{\min}$) no segmento, dada em função da capacidade de reservação

do sistema. Isto evitará que o SISAGUA minimize a operação da elevatória no segmento de ponta, não representando a realidade da demanda de consumo do sistema.

O modelo matemático de otimização a ser utilizado será o SISAGUA que utiliza programação não linear inteira mista, para o planejamento da operação de sistemas de distribuição de água com múltiplos reservatórios. Os objetivos do modelo levam em consideração o atendimento das demandas, o armazenamento da água nos reservatórios dos mananciais e a minimização do custo de operação.

Os custos de energia de captação e transposição de reservatórios serão calculados, no ambiente ACR, com base nas tarifas reguladas pela ANEEL para cada distribuidora da RMSP, não considerando os contratos de fornecimento de energia elétrica celebrados entre a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) e as distribuidoras. O mesmo ocorre para o ambiente ACL, onde será utilizado o preço médio estimado pela ABRACEEL (2018).

As variáveis de potência que servirão de base para cálculo do custo de energia no SISAGUA são as necessárias para superar a altura manométrica total. Os rendimentos dos motores e as perdas de transformações elétricas não foram considerados, assim todas as estações estão sob o mesmo desempenho energético.

5- ESTUDO DE CASO

A SABESP, maior concessionária de saneamento básico do Brasil, fornece água tratada, na RMSP, a mais de 20 milhões de pessoas. Conta com oito sistemas produtores de água tratada que operam de forma parcialmente integrada.

A otimização dos reservatórios dos mananciais é feita de forma primária para garantir a disponibilidade do abastecimento de água e maximizar a segurança hídrica da RMSP.

Os custos com energia elétrica para recalque de água e produtos químicos são componentes importantes na composição dos custos operacionais.

As séries históricas de vazões naturais de cada reservatório de água bruta serão utilizadas de forma a avaliar a otimização sob diversos cenários hidrológicos.

Para determinação dos custos dos produtos químicos no tratamento de cada reservatório, a qualidade da água bruta, já apurada pelo InfoÁGUAS, será considerada para a diferenciação de tais custos.

Esta pesquisa avaliará exclusivamente a otimização da intensidade energética (kWh/m^3) de recalque da água bruta captada de cada manancial pertencente aos oito sistemas produtores. As elevatórias de água tratada que recalcam aos centros de reservação não farão parte desta otimização.

Para avaliar e definir os contratos de fornecimento de energia elétrica, com vistas ao estudo de caso desta pesquisa, serão utilizadas as tarifas ano base 2018 do subgrupo A das quatro principais distribuidoras de energia que atendem a RMSP – ENEL- São Paulo, EDP, Elektro e CPFL Piratininga, adicionando nesta análise os custos de TE no ACL (ABRACEEL, 2018). O Setor de Saneamento, de acordo com o Decreto 7.891, de 23/01/2013, da lei 12.783 de 11/01/2013, goza de desconto tarifário de 15% sobre as componentes TUST/TUSD e TE. Para o ACL, o desconto tarifário só existe na componente de TUST/TUSD. Portanto, as modalidades de contrato definidas neste estudo, para cada estação elevatória não são as efetivamente contratadas pela SABESP com as distribuidoras ou geradoras de energia elétrica. Os preços de TE para clientes ACL especial não foram contemplados, pela inexistência de preços médios nos órgãos reguladores e associações do SEB.

Como demanda de atendimento mensal de água, serão consideradas as vazões de captação dos reservatórios de regularização de água bruta apurados nos boletins de mananciais da (SABESP, 2018), e outras demandas estimadas para apurar o comportamento das soluções de otimização. Os nós de demandas foram estimados em função da população setorizada da RMSP (Prefeitura de São Paulo, 2019).

Portanto, o SISAGUA, incluindo as modificações propostas em sua formulação, buscará a otimização do processo priorizando sequencialmente a minimização dos custos de racionamento, mantendo os reservatórios próximos a meta de volume reservado e por fim minimizar os custos de operação.

Como resultados, serão avaliados indicadores de segurança hídrica, como eventuais déficits, distanciamento dos volumes armazenados dos limites mínimos impostos na forma de restrições, custos de tratamento e adução, intensidade energética utilizada pelo sistema.

As seguintes variáveis serão estudadas para os sistemas produtores:

- ✓ Volume de reservado de água bruta;
- ✓ Qualidade da água bruta;
- ✓ Potência elétrica de recalque de água bruta;
- ✓ Potência elétrica de recalque de transposições entre reservatórios de água bruta;

- ✓ Energia elétrica consumida versus vazão recalçada;
- ✓ Limites estabelecidos por outorga de captação de água bruta;
- ✓ Produtos químicos versus qualidade de água bruta;
- ✓ Produtos químicos versus volume de água tratada.

5.1- Sistemas Produtores de Água Tratada

Neste ITEM, são apresentados de forma simplificada as principais características dos sistemas produtores de água tratada da RMSP, com destaque para as características dos reservatórios, das estações elevatórias de água bruta e da qualidade de água bruta.

Cantareira

O sistema produtor de água Cantareira, esquema simplificado apresentado na Figura 18, é o maior da RMSP, com capacidade de 33 m³/s. Para ter essa capacidade de produção, o sistema faz a transposição entre duas bacias hidrográficas, interligando a bacia do Rio Piracicaba com a bacia do Alto Tietê. Dos 33 m³/s, somente 2 m³/s são oriundos da bacia do Alto Tietê, pelo rio Juqueri. Dos 31 m³/s, produzidos na bacia do rio Piracicaba, 22 m³/s vêm dos reservatórios Jaguari-Jacareí, cujas bacias estão inseridas majoritariamente no estado de Minas Gerais. As nascentes dos principais tributários do rio Cachoeira estão localizadas naquele estado, fazendo com que 45% da área produtora de água para o sistema esteja em território mineiro.

Figura 18 - Esquema simplificado da afluição e reservatórios do Cantareira

Fonte: ANA/DAEE (2017)

Na Tabela 5 é apresentada a capacidade de reservação de água bruta do sistema Cantareira, com destaque para a significativa diferença entre o volume total para o volume útil.

Tabela 5 - Volume total e útil de reservação do sistema Cantareira

Reservatório	Volume total (hm³)	Volume útil (hm³)
Jaguari-Jacaré	1047,49	808,04
Cachoeira	116,57	69,65
Atibainha	295,46	96,26
Paiva Castro	32,93	7,61
Total	1492,45	981,56

Fonte: ANA/DAEE (2017)

Entre outubro/2013 a setembro/2015 foram observadas vazões afluentes naturais excepcionalmente baixas para essa época. Em virtude desta excepcionalidade, a ANA e o DAEE autorizaram a SABESP a realizar o bombeamento de volumes dos reservatórios Jaguarí-Jacaré e Atibainha situados em cotas abaixo do volume útil. Com isso a outorga do sistema foi alterada em 29/05/2017 conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Outorga por faixas de volume acumulado do sistema Cantareira

Faixa	Volume útil acumulado	Q Outorga (m³/s)
1 – normal	$V_u > 60\%$	33,0
2 – atenção	$40\% < V_u < 60\%$	31,0
3 – alerta	$30\% < V_u < 40\%$	27,0
4 - restrição	$20\% < V_u < 30\%$	23,0
5 - especial	$V_u < 20\%$	15,5

Fonte: ANA/DAEE (2017)

Em 30/10/2017 a ANA publicou a resolução 1.931/2017 que autorizou a interligação entre o reservatório da Usina Hidroelétrica-UHE Jaguari e o reservatório Atibainha do sistema Cantareira. A vazão média anual de captação no reservatório UHE Jaguari é de 5,13 m³/s, podendo atingir captação de até 8,5 m³/s. A vazão máxima de captação no reservatório Atibainha é de 12,2 m³/s. A transposição é feita nos dois sentidos, conforme a necessidade hidrológica das bacias envolvidas e as respectivas necessidades de uso da água. Desde o início da transposição, em janeiro/2018, do Jaguari-CESP aos reservatórios do Cantareira, o volume de água transferido tem sido importante para regularização dos níveis de armazenamento, pois mesmo tendo passado o pior momento da crise hídrica, no triênio 2013-2015, com a necessidade de uso de água do volume morto dos reservatórios, as atuais vazões naturais afluentes continuam inferiores às vazões de MLT. Marins et. al. (2019) estudaram esta nova elevatória de transposição no SISAGUA, com dados de vazão afluente de extrema seca ocorridas entre out/2013 a set/2016, constatando que a contribuição do Jaguari-CESP para o manancial do Atibainha, se em operação naquele período, teria reduzido os déficits de abastecimento e não teria sido necessário o uso de água do volume morto.

Abaixo são mostradas as características técnicas das duas estações elevatórias de água bruta:

EEAB Santa Inês: localizada no município de Mairiporã, faz a captação de água na represa de Paiva Castro com o recalque à represa de Águas Claras e esta transfere por gravidade à ETA Guaraú. Nas variáveis de energia e hidráulica da Tabela 7 não foi considerado a variação na pressão de sucção da elevatória, visto que a represa Paiva Castro com volume de reservado sempre acima de 90% mantém a pressão de sucção estável na estação.

Tabela 7 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Santa Inês

		1 grupo operando		2 grupos operando		3 grupos operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)
CMB1	20000	14.833,3	11,5	29666,6	22,3	44500,0	33,2
CMB2	20000	consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)	
CMB3	20000	0,3583		0,3695		0,3723	
CMB4	20000	AMT (mca)		AMT (mca)		AMT (mca)	
		114,35		117,94		118,83	

Fonte: elaboração do autor

Esta estação, com demanda contratada superior a 3.000 kW e com curva de carga pouco flexível por estar diretamente associado ao abastecimento de água pela ETA Guaraú deve ter contrato de fornecimento de energia elétrica na estrutura tarifária ACL, dentro da área de concessão da Elektro. A Tabela 8 mostrará os custos de energia a serem aplicados no SISAGUA.

Tabela 8 - Custo de energia associado à EEAB Santa Inês

Energia ponta (R\$/kWh)	Energia fora ponta (R\$/kWh)	Energia por volume (R\$/m³)
0,41	0,28	0,11

Fonte: Elektro/ABRACEEL (2018)

A EEAB Jaguari Atibainha localizada no município de Igaratá, faz a captação de água na represa de Jaguari, de propriedade da CESP, com o recalque à represa de Atibainha, de propriedade da SABESP integrando o sistema Cantareira neste ponto. Temos uma pequena variação na pressão de sucção em função do volume reservado na represa Jaguari-CESP, porém esta variação ainda não foi efetivamente determinada por tratar-se de uma elevatória que não operou sob as diversas condições de volume reservado, portanto na Tabela 9 não será considerada a variação da pressão de sucção. Não será considerado a variação do volume armazenado no reservatório, pois a gestão é feita pela companhia geradora de energia elétrica e não pela SABESP, neste estudo, foi considerada uma vazão de captação de 8,5 m³/s para o período seco e de 1,75 m³/s para o período úmido, desta forma atendendo a outorga de 5,13 m³/s.

Tabela 9 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Jaguari Atibainha

		1 grupo operando		2 grupos operando		3 grupos operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)
CMB1	5.000,00	3.680,00	1,90	7.360,00	3,73	11.040,00	5,59
CMB2	5.000,00	consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)	
CMB3	5.000,00	0,5380		0,5481		0,5486	
CMB4	5.000,00	AMT (mca)		AMT (mca)		AMT (mca)	
CMB5	5.000,00	171,71		174,93		175,09	
CMB6	5.000,00	4 grupos operando		5 grupos operando			
		P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)		
		14.720,00	7,38	18.400,00	8,94		
		consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)			
		0,5540		0,5717			
		AMT (mca)		AMT (mca)			
		176,83		182,47			

Fonte: elaboração do autor

Esta estação, com demanda contratada superior a 3.000 kW e com curva de carga que pode ser bastante flexível em função dos cenários de hidrologia do sistema Cantareira deve ter contrato de fornecimento de energia elétrica na estrutura tarifária THS azul, dentro da área de concessão da Elektro. A Tabela 10 mostra os custos de energia aplicados no SISAGUA.

Tabela 10 - Custo de energia associado à EEAB Jaguari Atibainha

Energia ponta (R\$/kWh)	Energia fora ponta (R\$/kWh)	Energia por volume (R\$/m³)
0,85	0,44	0,26

Fonte: Elektro (2018)

O tratamento de água do sistema Cantareira é feito pela ETA Guaraú, com capacidade nominal de 33 m³/s. A fim de determinar o custo dos produtos químicos em função da qualidade da água bruta dos mananciais são demonstrados na Tabela 11 os dados obtidos no período de maio/2014 a maio/2018 do aplicativo InfoÁGUAS.

Tabela 11 - Parâmetros de qualidade da água bruta do sistema Cantareira

Parâmetros	Média	Amostras
IQA	83,8	22
Fósforo total (mg/l)	0,0214	22
Nitrogênio total (mg/l)	1,08	22
NT:FT<29:1 Smith	73,5	22
N. cianobactérias	3013	22

Fonte: CETESB (2019)

Os parâmetros apurados indicam que a qualidade da água bruta está preservada nos mananciais, a proliferação de cianobactérias é baixa confirmada pela razão NT:FT (Smith, 1986) acima de 29, indicando baixa proliferação. Diante dessas constatações será utilizada a metodologia apresentada por Trenepohl (2017), conforme segue:

Na Figura 3, a equação $y = 0,381 \cdot x^{-0,315}$ do custo de tratamento da água em função da capacidade de produção obtém-se que o custo total de tratamento da ETA Guaraú é de R\$ 0,13/m³, considerando que o produto químico representa 45,3% com variação positiva de 7% no período úmido e variação negativa de mesmo valor para o período seco, portanto o valor a ser aplicado no SISAGUA será de R\$ 0,05/m³ para o período seco e de R\$ 0,06/m³ no úmido.

Guarapiranga

O sistema produtor Guarapiranga, localizado nas proximidades da Serra do Mar, é o terceiro maior da RMSP em volume útil de reservação e tem como seus principais afluentes os rios Embu-Guaçu, Embu-Mirim e Parelheiros. O reservatório recebe duas contribuições adicionais: do braço Taquacetuba da represa Billings, com outorga média anual de 2,1 m³/s e do Rio Capivari com outorga média anual de 1,3 m³/s. Essas transposições são realizadas por intermédio de estações elevatórias de água bruta. A capacidade útil de reservação é de 171,19 hm³, não existindo relevância entre o volume útil e total. A capacidade de produção deste sistema é de 16m³/s, conforme anexo do ofício/SUP/1450/2015, datado de 31/07/2015 da Secretaria de Recursos Hídricos e Saneamento do Estado de São Paulo.

A EEAB Guarapiranga, localizada na zona sul do município de São Paulo, faz a captação de água na represa do Guarapiranga com o recalque direto à ETA RCSJ. Esta elevatória conta com 2 inversores de frequência nos CMB3 e CMB4, portanto estes 02 motores têm sua velocidade de rotação variável em função da demanda exigida pelos operadores da ETA. Portanto em cada condição apresentada na Tabela 12. Há 02 CMB fazendo o ajuste operacional para atender a demanda necessária de transferência. Os inversores atuam para

atingir o ponto ótimo de desempenho energético da estação. Não se considera variação na pressão de sucção da elevatória, visto que o canal de sucção existente na sucção da elevatória mantém a pressão de sucção estável.

Tabela 12 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Guarapiranga

		3 grupos operando		4 grupos operando		5 grupos operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)
CMB1	4.000,00	7.056,70	9,00	10.754,70	13,00	13.703,10	16,00
CMB2	4.000,00	consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)	
CMB3	4.000,00	0,2178		0,2298		0,2379	
CMB4	4.000,00	AMT (mca)		AMT (mca)		AMT (mca)	
CMB5	4.000,00	69,51		73,34		75,93	
CMB6	4.000,00						

Fonte: elaboração do autor

Esta estação, com demanda contratada superior a 3.000 kW e com curva de carga pouco flexível por estar diretamente associado ao abastecimento de água pela ETA ABV deve ter contrato de fornecimento de energia elétrica na estrutura tarifária ACL, dentro da área de concessão da ENEL. A Tabela 13 mostrará os custos de energia a serem aplicados no SISAGUA.

Tabela 13 - Custo de energia associado à EEAB Guarapiranga

Energia ponta (R\$/kWh)	Energia fora ponta (R\$/kWh)	Energia por volume (R\$/m³)
0,30	0,21	0,07

Fonte: ABRACEEL/ENEL (2018)

A EEAB Taquacetuba, localizada no extremo sul da cidade de São Paulo, faz a captação de água do braço do Taquacetuba da represa Billings. Esta elevatória tem uma capacidade de transferência de 4,1 m³/s, porém, a outorga anual é limitada em 2,1 m³/s, portanto é possível operar na capacidade máxima de transferência, desde que a média anual não ultrapasse a vazão média anual outorgada de 2,1 m³/s. Neste estudo foi considerado uma vazão de retirada de 4,0 m³/s para o período seco e total restrição para o período úmido. Não será levado em consideração variação na pressão de sucção da elevatória, visto que a torre de equilíbrio existente na sucção da elevatória mantém a pressão de sucção estável.

Tabela 14 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Taquacetuba

		1 par operando		2 pares operando		3 pares operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)
CMB1	1.400,00	1.288,00	1,20	2.576,00	2,10	3.864,00	3,00
CMB2	1.400,00	consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)	
CMB3	1.400,00	0,2981		0,3407		0,3578	
CMB4	1.400,00	AMT (mca)		AMT (mca)		AMT (mca)	
CMBS1	350,00	95,16		108,75		114,19	
CMBS2	350,00	4 pares operando					
CMBS3	350,00	P(kW)	Q(m³/s)				
CMBS4	350,00	5.300,00	4,10				
		consumo específico (kWh/m³)					
		0,3591					
		AMT (mca)					
		114,60					

Fonte: elaboração do autor

Esta estação, com demanda contratada superior a 3.000 kW e com curva de carga que pode ser bastante flexível em função dos cenários de hidrologia do sistema Guarapiranga deve ter contrato de fornecimento de energia elétrica na estrutura tarifária THS verde, dentro da área de concessão da ENEL. A Tabela 15 mostrará os custos de energia a serem aplicados no SISAGUA.

Tabela 15 - Custo de energia associado à EEAB Taquacetuba

Energia ponta (R\$/kWh)	Energia fora ponta (R\$/kWh)	Energia por volume (R\$/m³)
1,01	0,38	0,16

Fonte: ENEL (2018)

A EEAB Capivari, localizada no extremo sul da cidade de São Paulo, faz a captação do Rio Capivari, por intermédio de um pequeno reservatório de regularização da pressão de sucção. Sua outorga anual é limitada em 1,35 m³/s. Na tabela 16 foram apresentadas as variáveis de energia e hidráulica da elevatória.

Tabela 16 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Capivari

		1 CMB operando		2 CMB operando		3 CMB operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)
CMB1	300,00	221,70	0,81	442,40	1,20	644,40	1,35
CMB2	300,00	consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)	
CMB3	300,00	0,0760		0,1024		0,1326	
		AMT (mca)		AMT (mca)		AMT (mca)	
		24,27		32,68		42,32	

Fonte: elaboração do autor

Esta estação, com demanda contratada inferior a 3.000 kW e com curva de carga que pode ser bastante flexível em função dos cenários de hidrologia do sistema Guarapiranga deve ter contrato de fornecimento de energia elétrica na estrutura tarifária THS verde, dentro da área de concessão da ENEL. A Tabela 17 mostra os custos de energia a serem aplicados no SISAGUA.

Tabela 17 - Custo de energia associado à EEAB Capivari

Energia ponta (R\$/kWh)	Energia fora ponta (R\$/kWh)	Energia por volume (R\$/m³)
1,01	0,38	0,06

Fonte: ENEL (2018)

O tratamento de água do sistema Guarapiranga é feito pela ETA ABV, com capacidade nominal de 16 m³/s. Para se determinar o custo dos produtos químicos em função da qualidade da água bruta dos mananciais se apresentam na Tabela 18 os dados obtidos no período de maio/2014 a maio/2018 do aplicativo InfoÁGUAS.

Tabela 18 - Parâmetros de qualidade da água bruta do sistema Guarapiranga

Parâmetros	Média	Amostras
IQA	75,5	15
Fósforo total (mg/l)	0,1081	26
Nitrogênio total (mg/l)	2,2393	14
NT:FT<29:1 Smith	32,5	14
N. cianobactérias	58134	18

Fonte: CETESB (2019)

Os parâmetros apurados indicam que a qualidade da água bruta não se encontra preservada nos mananciais, a proliferação de cianobactérias é alta confirmada pela razão NT:FT (Smith,

A EEAB Taiapuêba, localizada no município de Suzano, faz a captação diretamente da represa Taiapuêba com recalque da água bruta à ETA. Nas variáveis de energia e hidráulica da Tabela 19 não foi considerado a variação na pressão de sucção da elevatória, visto que o volume útil armazenado da represa está na maior parte do tempo acima de 80%, conforme série histórica de vazão afluente e respectivas transferências de outras represas.

Tabela 19 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Taiapuêba

		2 CMB operando		3 CMB operando		4 CMB operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)
CMB1	3.000,00	4.354,60	7,30	6.625,20	10,80	8.783,40	13,80
CMB2	3.000,00	consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)	
CMB3	3.000,00	0,1657		0,1704		0,1768	
CMB4	3.000,00	AMT (mca)		AMT (mca)		AMT (mca)	
CMB5	3.000,00	52,88		54,38		56,43	
CMB6	3.000,00	5 CMB operando					
		P(kW)	Q(m3/s)				
		11.233,00	17,50				
		consumo específico (kWh/m³)					
		0,1783					
		AMT (mca)					
		56,91					

Fonte: elaboração do autor

Esta estação, com demanda contratada superior a 3.000 kW e com curva de carga pouco flexível por estar diretamente associado ao abastecimento de água pela ETA Taiapuêba deve ter contrato de fornecimento de energia elétrica na estrutura tarifária ACL, dentro da área de concessão da EDP São Paulo. A Tabela 20 mostrará os custos de energia a serem aplicados no SISAGUA.

Tabela 20 - Custo de energia associado à EEAB Taiapuêba

Energia ponta (R\$/kWh)	Energia fora ponta (R\$/kWh)	Energia por volume (R\$/m³)
0,42	0,28	0,07

Fonte: ABRACEEL/EDP (2018)

A EEAB Biritiba Mirim, localizada no município de Biritiba Mirim, faz a captação do Rio Biritiba e para operar conta com a contribuição de água proveniente da barragem Ponte Nova, conforme Figura 16 e seu recalque é direcionado ao dique que transfere, por gravidade, à

represa Jundiaí. Não será levada em consideração qualquer variação na pressão de sucção da elevatória pois a contribuição da água proveniente da barragem ponte nova mantém a pressão estável na sucção da estação. A captação não é regular ao longo do ano, sofrendo forte restrição no período de estiagem, portanto, neste estudo, consideraremos para o período úmido uma vazão de captação de 6,5 m³/s e para o seco de 2,0 m³/s.

Tabela 21 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Biritiba Mirim

		1 CMB operando		2 CMB operando		3 CMB operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m ³ /s)	P(kW)	Q(m ³ /s)	P(kW)	Q(m ³ /s)
CMB1	1.100,00	809,60	2,00	1.619,20	3,76	2.428,80	5,00
CMB2	1.100,00	consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)	
CMB3	1.100,00	0,1124		0,1196		0,1349	
CMB4	1.100,00	AMT (mca)		AMT (mca)		AMT (mca)	
CMB5	1.100,00	35,89		38,18		43,07	
CMB6	1.100,00	4 CMB operando		5 CMB operando			
		P(kW)	Q(m ³ /s)	P(kW)	Q(m ³ /s)		
		3.238,40	6,30	4.048,00	7,73		
		consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)			
		0,1428		0,1454			
		AMT (mca)		AMT (mca)			
		45,57		46,42			

Fonte: elaboração do autor

Esta estação, com demanda contratada superior a 3.000 kW e com curva de carga que pode ser bastante flexível em função dos cenários de hidrologia do sistema Alto Tietê deve ter contrato de fornecimento de energia elétrica na estrutura tarifária THS verde, dentro da área de concessão da EDP. A Tabela 22 mostra os custos de energia aplicados no SISAGUA.

Tabela 22 - Custo de energia associado à EEAB Biritiba Mirim

Energia ponta (R\$/kWh)	Energia fora ponta (R\$/kWh)	Energia por volume (R\$/m ³)
2,00	0,45	0,08

Fonte: EDP (2018)

A EEAB Rio Pequeno, localizada no município de São Bernardo do Campo, com as variáveis de energia e hidráulicas apresentadas na Tabela 23, faz a captação do Rio Pequeno com recalque para o braço do Rio Grande da Billings e uma outra elevatória com capacidade máxima de 3,2 m³/s faz a transferência de água à represa de Taiaçupeba do Sistema Alto

Tietê. A elevatória com dados apresentados na Tabela 24 tem o fornecimento de energia elétrica feito por moto geradores a gás natural.

Tabela 23 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Rio Pequeno

		1 CMB operando		2 CMB operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)
CMB1	350,00	257,60	1,83	515,20	3,41
CMB2	350,00	consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)	
CMB3	350,00	0,0391		0,0420	
CMB4	350,00	AMT (mca)		AMT (mca)	
		12,49		13,39	

Fonte: Elaboração do autor

Tabela 24 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB R. Grande Taiaçupeba

		1 CMB operando		2 CMB operando		3 CMB operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)
CMB1	1.250,00	1.177,60	1,08	2.355,20	1,50	3.532,80	2,64
CMB2	1.250,00	consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)	
CMB3	1.250,00	0,3029		0,4361		0,3717	
CMB4	1.250,00	AMT (mca)		AMT (mca)		AMT (mca)	
CMBS1	350,00	75,52		108,75		92,68	
CMBS2	350,00	4 CMB operando					
CMBS3	350,00	P(kW)	Q(m3/s)				
CMBS4	350,00	4.710,40	2,98				
		consumo específico (kWh/m³)					
		0,4394					
		AMT (mca)					
		109,55					

Fonte: elaboração do autor

A regra operacional e condições de outorga determinam que as duas elevatórias devem operar em simultaneidade, portanto, na otimização feita no SISAGUA considera-se uma única elevatória, somando-se a potência dos motores e utilizando-se a vazão da EEAB Rio Grande Taiaçupeba, com os custos das tarifas de gás natural apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Custo de energia associado às EEAB Rio Pequeno e Rio Grande Taiaçupeba

Energia (R\$/kWh)	Energia por volume (R\$/m³)
0,70	0,336

Fonte: COMGAS (2018)

A EEAB Guaió localizada no município de Suzano, faz a captação do Rio Guaió com recalque para a represa Taiaçupeba, com capacidade de 1,0 m³/s, porém, com forte restrição dessa capacidade no período de estiagem. Para as otimizações realizadas no SISAGUA consideramos uma vazão de captação de 0,9 m³/s para o período úmido e total restrição para o período seco. As variáveis de energia e hidráulica são apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Guaió

		1 CMB operando		2 CMB operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)
CMB1	1.000,00	736,00	0,36	1.472,00	0,64
CMB2	1.000,00	consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)	
CMB3	1.000,00	0,5663		0,6429	
		AMT (mca)		AMT (mca)	
		180,75		205,19	
		3 CMB operando			
		P(kW)	Q(m³/s)		
		2.208,00	0,90		
		consumo específico (kWh/m³)			
		0,6807			
		AMT (mca)			
		217,26			

Fonte: elaboração do autor

Esta estação, com demanda contratada inferior a 3.000 kW e com curva de carga que pode ser bastante flexível em função dos cenários de hidrologia do sistema Alto Tietê deve ter contrato de fornecimento de energia elétrica na estrutura tarifária THS verde, dentro da área de concessão da EDP. A Tabela 27 mostra os custos de energia aplicados no SISAGUA.

Tabela 27 - Custo de energia associado à EEAB Guaió

Energia ponta (R\$/kWh)	Energia fora ponta (R\$/kWh)	Energia por volume (R\$/m³)
2,00	0,45	0,39

Fonte: EDP (2018)

O tratamento de água do sistema Alto Tietê é feito pela ETA Taiaçupeba, com capacidade nominal de 15 m³/s. A fim de se determinar o custo dos produtos químicos em função da qualidade da água bruta dos mananciais apresenta-se na Tabela 28 os dados obtidos no período de maio/2014 a maio/2018 do aplicativo InfoÁGUAS.

Tabela 28 - Parâmetros de qualidade da água bruta do sistema Alto Tietê

Parâmetros	Média	Amostras
IQA	83,0	19
Fósforo total (mg/l)	0,0356	43
Nitrogênio total (mg/l)	0,8205	43
NT:FT<29:1 Smith	52	19
N. cianobactérias	20409	41

Fonte: CETESB (2019)

Os parâmetros apurados indicam que a qualidade da água bruta está parcialmente preservada nos mananciais, a proliferação de cianobactérias está no limite máximo permitido pela Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde, a razão NT:FT (Smith, 1986) está em 52:1, e das 19 amostras 06 delas, no período úmido, estão abaixo de 29 indicando a tendência de proliferação, confirmada nas amostras apuradas de cianobactérias acima de 20.000 células em 12 das 41 amostras. Diante dessas constatações será utilizada a metodologia apresentada por Trenepohl (2017), acrescida das conclusões de Ceron (2012) para o período úmido, conforme segue:

Na Figura 3, a equação $y = 0,381 \cdot x^{-0,315}$ do custo de tratamento da água em função da capacidade de produção se tem que o custo total de tratamento da ETA Taiaçupeba é de R\$ 0,16/m³, considerando que o produto químico representa 45,3% com variação positiva de 7% no período úmido e variação negativa de mesmo valor para o período seco e o total acrescidos de 224% (CERON, 2012), o valor a ser aplicado no SISAGUA será de R\$ 0,07/m³ para o período seco e de R\$ 0,25/m³ no úmido.

Rio Claro

O sistema produtor Rio Claro, localizado nos municípios de Salesópolis, Biritiba Mirim e Bertioga, a 70 km do município de São Paulo numa área de proteção ambiental de propriedade da SABESP é o segundo mais antigo sistema produtor de água da RMSP, inaugurado em 1939 (SABESP, 2019). Formado pela represa do Ribeirão do Campo e por uma pequena reversão do Rio Guaratuba. Seu volume útil de reservação é de 13,67 hm³, não existindo relevância entre o volume total e útil. Não consideraremos a variação do volume armazenado em função da vazão afluente e captada, visto que a série histórica de vazões mostra uma regularidade que mantém os níveis de armazenamento sempre muito próximos da totalidade. Sua capacidade de produção é de 4,0 m³/s.

A EEAB km 76, localizada no município de Biritiba Mirim, faz a captação da represa do Ribeirão do Campo com recalque para a ETA Casa Grande. Faz-se necessário destacar que a transferência de água bruta da EEAB km 76 à ETA é apenas parcial, portanto a maior parte da água bruta a ser tratada chega por gravidade. Na Tabela 29 não foi considerada a variação da pressão de sucção da elevatória, visto que o volume útil armazenado da represa está na maior parte do tempo acima de 80%, conforme série histórica de vazão afluente.

Tabela 29 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Km 76

		1 CMB operando		2 CMB operando		3 CMB operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m ³ /s)	P(kW)	Q(m ³ /s)	P(kW)	Q(m ³ /s)
CMB1	450,00	331,20	0,55	662,40	1,09	993,60	1,47
CMB2	450,00	consumo específico (kWh/m ³)		consumo específico (kWh/m ³)		consumo específico (kWh/m ³)	
CMB3	450,00	0,1673		0,1688		0,1878	
CMB4	450,00	AMT (mca)		AMT (mca)		AMT (mca)	
		53,39		53,88		59,92	

Fonte: elaboração do autor

A EEAB Rio Guaratuba, localizada no município de Biritiba Mirim, faz captação direta do leito do rio Guaratuba, contribuindo com a represa do Ribeirão do Campo. Nas variáveis de energia e hidráulica da Tabela 30 não são levadas a crivo possível variação na pressão de sucção da elevatória, pois o canal de captação mantém a pressão estável.

Tabela 30 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Guaratuba

		1 CMB operando		2 CMB operando		3 CMB operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)
CMB1	200,00	147,20	0,26	294,40	0,42	441,60	0,58
CMB2	200,00	consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)	
CMB3	200,00	0,1555		0,1947		0,2115	
CMB4	200,00	AMT (mca)		AMT (mca)		AMT (mca)	
CMB5	200,00	49,62		62,14		67,50	
		4 CMB operando		5 CMB operando			
		P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)		
		588,80	0,70	736,00	0,86		
		consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)			
		0,2330		0,2391			
		AMT (mca)		AMT (mca)			
		74,36		76,32			

Fonte: elaboração do autor

A regra operacional determina que as duas elevatórias operam sempre em simultaneidade, portanto, na otimização feita no SISAGUA considera-se uma única elevatória, somando-se a potência dos motores e utilizando-se a vazão da EEAB Km 76.

Estas duas estações, com demanda contratada inferior a 3.000 kW e com curva de carga pouco flexível por estar diretamente associado ao abastecimento de água pela ETA Casa Grande deve ter contrato de fornecimento de energia elétrica na estrutura tarifária THS azul, dentro da área de concessão da EDP São Paulo. A Tabela 31 mostra os custos de energia aplicados no SISAGUA.

Tabela 31 - Custo de energia associado às EEAB Km 76 e Guaratuba

Energia ponta (R\$/kWh)	Energia fora ponta (R\$/kWh)	Energia por volume (R\$/m³)
1,21	0,46	0,25

Fonte: EDP (2018)

O tratamento de água do sistema Rio Claro é feito pela ETA Casa Grande, com capacidade nominal de 4 m³/s. Não se pode determinar o custo dos produtos químicos em função da qualidade da água bruta dos mananciais através do aplicativo InfoÁGUAS, que não tem pontos de coleta do manancial por considerá-lo preservado.

Na Figura 3, a equação $y = 0,381.x^{-0,315}$ do custo de tratamento da água em função da capacidade de produção se vê que o custo total de tratamento da ETA Casa Grande é de R\$ 0,24/m³, considerando que o produto químico representa 45,3% com variação positiva de 7% no período úmido e variação negativa de mesmo valor para o período seco, o valor a ser aplicado no SISAGUA será de R\$ 0,10/m³ para o período seco e de R\$ 0,12/m³ no úmido.

Ribeirão da Estiva

O sistema produtor Ribeirão da Estiva, situado no município de Rio Grande da Serra, é o menor sistema da RMSP, formado pela captação direta do rio Ribeirão da Estiva, sem reservatório de regularização. Sua capacidade de produção é de apenas 0,1 m³/s e não sofre restrições ao longo do ano.

A EEAB Ribeirão da Estiva faz a captação através de um canal entre o rio Ribeirão da Estiva e o ponto de sucção dos CMB, este canal mantém a pressão de sucção da elevatória estável não trazendo influências as variáveis de energia e hidráulica da Tabela 32.

Tabela 32 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Ribeirão Estiva

		1 CMB operando		2 CMB operando		3 CMB operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m ³ /s)	P(kW)	Q(m ³ /s)	P(kW)	Q(m ³ /s)
CMB1	20,00	14,72	0,05	29,44	0,08	44,16	0,11
CMB2	20,00	consumo específico (kWh/m ³)		consumo específico (kWh/m ³)		consumo específico (kWh/m ³)	
CMB3	20,00	0,0909		0,1022		0,1168	
		AMT (mca)		AMT (mca)		AMT (mca)	
		29,00		32,63		37,29	

Fonte: elaboração do autor

Esta estação, com demanda contratada inferior a 3.000 kW e com curva de carga pouco flexível por estar diretamente associado ao abastecimento de água pela ETA Ribeirão Estiva deve ter contrato de fornecimento de energia elétrica na estrutura tarifária THS azul, dentro da área de concessão da ENEL. A Tabela 33 mostra os custos de energia aplicados no SISAGUA.

Tabela 33 - Custo de energia associado à EEAB Ribeirão Estiva

Energia ponta (R\$/kWh)	Energia fora ponta (R\$/kWh)	Energia por volume (R\$/m ³)
0,77	0,38	0,05

Fonte: ENEL (2018)

O tratamento de água do sistema Ribeirão da Estiva é feito pela ETA Ribeirão da Estiva, com capacidade nominal de 0,1 m³/s. Não é possível determinar o custo dos produtos químicos em função da qualidade da água bruta do ponto de captação através do aplicativo InfoÁGUAS, que não tem ponto de coleta na captação da elevatória.

Na Figura 3, a equação $y = 0,381 \cdot x^{-0,315}$ do custo de tratamento da água em função da capacidade de produção se considera que o custo total de tratamento da ETA Ribeirão da Estiva é de R\$ 0,78/m³, considerando que o produto químico representa 45,3% $\pm$ 7% do total, o valor a ser aplicado no SISAGUA será de R\$ 0,32/m³ para o período seco e de R\$ 0,37/m³ no úmido.

Rio Grande

O sistema produtor Rio Grande, localizado no município de São Bernardo do Campo, é formado pelo braço do Rio Grande da represa Billings. O volume útil de armazenamento é de 13,67 hm³, não existindo relevância entre o volume total e útil. Nesta pesquisa, não será considerada a variação dos níveis de armazenamento do reservatório, pois a vazão afluyente da Billings mantém o volume armazenado sempre superior a 90 %. A capacidade de produção é de 5,5 m³/s.

A EEAB Rio Grande faz a captação da água bruta diretamente da represa com recalque à ETA. Na Tabela 34 não se considera variação na pressão de sucção da elevatória pois o nível do reservatório não sofre significativas variações de volume armazenado.

Tabela 34 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Rio Grande

		4 CMB operando		6 CMB operando		7 CMB operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)
CMB1	2.200,00	5.888,00	3,50	8.537,60	4,10	10.156,80	4,50
CMB2	2.200,00	consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)	
CMB3	2.200,00	0,4673		0,5784		0,6270	
CMB4	2.200,00	AMT (mca)		AMT (mca)		AMT (mca)	
CMB5	2.200,00	149,14		184,61		200,10	
CMB6	1.400,00						
CMB7	1.400,00						
CMB8	1.400,00						

Fonte: elaboração do autor

Esta estação, com demanda contratada superior a 3.000 kW e com curva de carga pouco flexível por estar diretamente associado ao abastecimento de água pela ETA Rio Grande deve ter contrato de fornecimento de energia elétrica na estrutura tarifária ACL, dentro da área de concessão da ENEL. A Tabela 35 apresenta os custos de energia a serem aplicados no SISAGUA.

Tabela 35 - Custo de energia associado à EEAB Rio Grande

Energia ponta (R\$/kWh)	Energia fora ponta (R\$/kWh)	Energia por volume (R\$/m³)
0,28	0,39	0,18

Fonte: ABRACEEL/ENEL (2018)

O tratamento de água do sistema Rio Grande é feito pela ETA Rio Grande, com capacidade nominal de 5,5 m³/s. Para se determinar o custo dos produtos químicos em função da qualidade da água bruta dos mananciais conforme se apresenta na Tabela 36 os dados obtidos no período de maio/2014 a maio/2018 do aplicativo InfoÁGUAS.

Tabela 36 - Parâmetros de qualidade da água bruta do sistema Rio Grande

Parâmetros	Média	Amostras
IQA	82	18
Fósforo total (mg/l)	0,0356	32
Nitrogênio total (mg/l)	1,3076	21
NT:FT<29:1 Smith	75	17
N. cianobactérias	40010	40

Fonte: CETESB (2019)

Os parâmetros apurados indicam que a qualidade da água bruta não se encontra preservada nos mananciais, devido à alta proliferação de cianobactérias. A média dos valores da razão NT:FT (Smith, 1986) está em 75, acima de 29, não indicando alta proliferação, mas as amostras apuradas de quantidade de cianobactérias confirmam a presença acima dos limites estabelecidos pela Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde. Diante dessas constatações, utilizar-se-á a metodologia apresentada por Trenepohl (2017), acrescida das conclusões de Ceron (2012) conforme segue:

Na Figura 3, a equação $y = 0,381 \cdot x^{-0,315}$ do custo de tratamento da água em função da capacidade de produção se vê que o custo total de tratamento da ETA Rio Grande é de R\$ 0,22/m³, considerando que o produto químico representa 45,3% com variação positiva de 7% no período úmido e variação negativa de mesmo valor para o período seco e o total acrescidos

de 224% (CERON, 2012) , o valor a ser aplicado no SISAGUA será de R\$ 0,30/m³ para o período seco e de R\$ 0,34/m³ no úmido.

Alto Cotia

O sistema produtor Alto Cotia, localizado no município de Cotia, é o mais antigo da RMSP inaugurado em 1917. A represa Pedro Beicht é formada pela afluição dos rios Capivari e Cotia do Peixe. A captação é feita na Represa Cachoeira da Graça que recebe o fluido da represa Pedro Beich por um canal natural, por gravidade. O volume útil de armazenamento é de 16,50 hm³, sem relevância entre o volume total e útil. A capacidade de produção é 1,2 m³/s.

A EEAB Alto Cotia faz a captação no canal natural, com recalque diretamente à ETA. Na tabela 37 Não se considera a variação na pressão de sucção da elevatória, pois o canal natural mantém a pressão de sucção estável.

Tabela 37 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB Alto Cotia

		1 CMB operando		2 CMB operando		3 CMB operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m ³ /s)	P(kW)	Q(m ³ /s)	P(kW)	Q(m ³ /s)
CMB1	117,00	86,11	0,49	172,22	0,90	258,34	1,20
CMB2	117,00	consumo específico (kWh/m ³)		consumo específico (kWh/m ³)		consumo específico (kWh/m ³)	
CMB3	117,00	0,0488		0,0532		0,0598	
		AMT (mca)		AMT (mca)		AMT (mca)	
		15,58		16,97		19,09	

Fonte: elaboração do autor

Esta estação, com demanda contratada inferior a 3.000 kW e com curva de carga pouco flexível por estar diretamente associado ao abastecimento de água pela ETA Alto Cotia tem contrato de fornecimento de energia elétrica na estrutura tarifária THS azul, dentro da área de concessão da ENEL. A Tabela 38 mostra os custos de energia aplicados no SISAGUA.

Tabela 38 - Custo de energia associado à EEAB Alto Cotia

Energia ponta (R\$/kWh)	Energia fora ponta (R\$/kWh)	Energia por volume (R\$/m ³)
0,77	0,38	0,03

Fonte: ENEL (2018)

O tratamento de água do sistema Alto Cotia é feito pela ETA Alto Cotia, com capacidade nominal de 1,2 m³/s. Para se determinar o custo dos produtos químicos em função da

qualidade da água bruta dos mananciais se apresenta na Tabela 39 os dados obtidos no período de maio/2014 a maio/2018 do aplicativo InfoÁGUAS.

Tabela 39 - Parâmetros de qualidade da água bruta do sistema Alto Cotia

Parâmetros	Média	Amostras
IQA	79,3	13
Fósforo total (mg/l)	0,0296	24
Nitrogênio total (mg/l)	0,577	22
NT:FT<29:1 Smith	50,3	12
N. cianobactérias	15406	17

Fonte: CETESB (2019)

Os parâmetros apurados indicam que a qualidade da água bruta se encontra relativamente preservada nos mananciais, devido à média proliferação de cianobactérias e os valores de IQA estar um pouco abaixo de 80. A média dos valores da razão NT:FT (Smith, 1986) está em 50,3, acima de 29, indicando baixa proliferação, as amostras apuradas de quantidade de cianobactérias estão dentro dos limites estabelecidos pelo CONAMA. Diante dessas constatações, se utilizará a metodologia apresentada por Trenepohl (2017), conforme segue:

Na Figura 3, a equação $y = 0,381 \cdot x^{-0,315}$ do custo de tratamento da água em função da capacidade de produção se tem que o custo total de tratamento da ETA Alto Cotia é de R\$ 0,35/m³, considerando que o produto químico representa 45,3% $\pm$ 7% do total, o valor a ser aplicado no SISAGUA será de R\$ 0,15/m³ para o período seco e de R\$ 0,17/m³ no úmido.

São Lourenço

O sistema São Lourenço é o mais novo sistema produtor de água da RMSP, inaugurado em abril/2018, a represa da Cachoeira do França, localizada no município de Juquitiba a 70 km da capital, é formada pelo Rio Juquitiba e demais afluentes. O volume útil de armazenamento é de 88,82 hm³, sem relevância entre o volume útil e total. Neste estudo não consideraremos a variação do volume armazenado em função da vazão afluente e da captação uma vez que o reservatório é compartilhado entre uma usina hidroelétrica pertencente ao Grupo Votorantim e à SABESP e as regras de compartilhamento ainda não foram definidas. A ETA está localizada no município de Vargem Grande Paulista distante 36 km em linha reta do ponto de captação. A capacidade de produção é de 6,4 m³/s, com vazão outorgada de 4,7 m³/s.

A EEAB São Lourenço faz a captação de água bruta da represa por intermédio de uma elevatória de baixa carga, com bombas submersas, que recalca para um reservatório a

montante da elevatória de alta carga, reservatório que tem como principal função aumentar e regularizar a pressão de sucção da elevatória. Portanto na Tabela 40 não foi considerada a variação da pressão de sucção da elevatória de alta carga.

Tabela 40 - Variáveis de energia e hidráulica associadas à EEAB São Lourenço

		1 CMB operando		2 CMB operando		3 CMB operando	
Motores	Potência (cv)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)	P(kW)	Q(m³/s)
CMB1	9.100,00	7.139,20	1,75	14.278,40	3,38	21.417,60	4,81
CMB2	9.100,00	consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)		consumo específico (kWh/m³)	
CMB3	9.100,00	1,1332		1,1734		1,2369	
CMB4	9.100,00	AMT (mca)		AMT (mca)		AMT (mca)	
CMBS 1	600,00	339,30		351,35		370,34	
CMBS 2	600,00	4 CMB operando					
CMBS 3	600,00	P(kW)	Q(m3/s)				
CMBS 4	600,00	28.556,80	6,00				
CMBS 5	600,00	consumo específico (kWh/m³)					
		1,3221					
		AMT (mca)					
		395,85					

Fonte: elaboração do autor

Esta estação, com demanda contratada superior a 3.000 kW e com curva de carga pouco flexível por estar diretamente associado ao abastecimento de água pela ETA Vargem deveria estar na estrutura tarifária ACL, mas por estar no início de operação e ainda não ter atingido a sua capacidade nominal de produção o contrato de fornecimento de energia elétrica deve ser o THS azul, instalação localizada na área de concessão da CPFL Piratininga. A Tabela 41 mostra os custos de energia a serem aplicados no SISAGUA.

Tabela 41 - Custo de energia associado à EEAB São Lourenço

Energia ponta (R\$/kWh)	Energia fora ponta (R\$/kWh)	Energia por volume (R\$/m³)
0,97	0,48	0,66

Fonte: CPFL (2018)

O tratamento de água do sistema São Lourenço é feito pela ETA Vargem Grande, com capacidade nominal de 6,0 m³/s. Não se pode determinar o custo dos produtos químicos em função da qualidade da água bruta do ponto de captação através do aplicativo InfoÁGUAS,

que realizou uma única coleta em 25/06/2014. Portanto considera-se que a água se encontra devidamente preservada nos mananciais, sem significativa proliferação de cianobactérias.

Na Figura 3, a equação $y = 0,381 \cdot x^{-0,315}$ do custo de tratamento da água em função da capacidade de produção, o custo total de tratamento da ETA Vargem Grande é de R\$ 0,22/m³, considerando que o produto químico representa 45,3% com variação positiva de 7% no período úmido e variação negativa de mesmo valor para o período seco, o valor a ser aplicado no SISAGUA será de R\$ 0,09/m³ para o período seco e de R\$ 0,11/m³ no úmido.

5.2- Nova representação dos custos operacionais

A equação (6) é a terceira função objetivo do SISAGUA. Determinada em função do custo de tratamento da água e do consumo de energia elétrica das estações elevatórias. Nos trechos onde existem as ETAs o custo é apurado pelo preço específico de tratamento (R\$/m³) associado ao volume tratado em um determinado período. Nos trechos de recalque, o custo de energia elétrica é calculado com base no consumo específico da capacidade nominal da estação elevatória associado à tarifa de energia elétrica (R\$/m³) e o volume recalcado num determinado período. A tarifa de energia elétrica utilizada é a calculada pela média ponderada entre os segmentos de P e FP.

O item 2 do capítulo 3, demonstrou que o custo específico de tratamento da água é inversamente proporcional à qualidade da água bruta, notadamente pela proliferação de cianobactéria; e inversamente proporcional à capacidade nominal de tratamento. Também tem uma pequena sensibilidade relativa às estações climáticas seca e úmida. O SISAGUA na sua concepção original permite que o cadastramento do custo específico de tratamento de água seja feito por ciclos, podendo considerar custos diferenciados a cada período da simulação. Portanto não existe a necessidade de se elaborar uma nova representação aos custos de tratamento de água, pois na atual concepção é possível mensurar as diferenciações de custos de cada ETA desta pesquisa.

Com relação aos custos específicos de energia elétrica a representação feita pelo SISAGUA mostra limitações:

- ✓ Não permite fazer a otimização da operação nos segmentos de P e FP, que têm tarifas diferenciadas;
- ✓ Estabelece uma única razão de energia por volume a cada ciclo, porém, as estações elevatórias têm um consumo específico a cada associação de operações de bombas;

- ✓ Não separa a operação em diferentes arranjos de bombas e horários de tarifas diferenciadas de cada estação elevatória, indicando apenas a vazão média recalculada a cada intervalo de tempo.

Para minimizar essas limitações, foi desenvolvido no GAMS uma nova representação dos custos de energia elétrica, com a possibilidade de se fazer a otimização considerando cada consumo específico de associação de bombas, e o custo de energia diferenciado nos segmentos de P e FP. A Figura 20 mostra algumas modificações realizadas na estrutura do SISAGUA, para contemplar a nova representação proposta. Nota-se que a cada associação de bombas existe uma potência elétrica e uma vazão correspondente, possibilitando o SISAGUA determinar o custo otimizado das estações elevatórias sob diversas associações de bombas.

Figura 20 - GAMS com nova representação do custo de energia

```

Table      p(tb,b) potencia para cada arranjo de bombas nas elevatorias
$ondelim
t,b1,b2,b3,b4,b5,b6
t1,14833000,29666700,44500000,0,0,0
t5,7056000,10754700,13703100,0,0,0
t8,3680000,7360000,11040000,14720000,18400000,0
t12,1288000,2576000,3864000,5300000,0,0
t14,221700,442400,644400,0,0,0
t16,7139200,14278400,21417600,28556800,0,0
t24,736000,1472000,2208000,0,0,0
t26,1435200,2612800,4048000,5225600,0,0
t28,4354600,6625200,8783400,11233000,0,0
t47,809600,1619200,2428800,3238400,4048000,0
$offdelim

Table      q(tb,b) vazão para cada arranjo de bombas nas elevatórias
$ondelim
t,b1,b2,b3,b4,b5,b6
t1,11.5,22.3,33.2,0,0,0
t5,9,13,16,0,0,0
t8,1.9,3.73,5.59,7.38,8.94,0
t12,1.2,2.1,3.0,4.1,0,0
t14,0.81,1.2,1.35,0,0,0
t16,1.75,3.38,4.81,6.0,0,0
t24,0.36,0.64,0.90,0,0,0
t26,1.08,1.50,2.64,2.98,0,0
t28,7.3,10.8,13.8,17.5,0,0
t47,2.0,3.76,5.0,6.3,7.73,0
$offdelim

```

Fonte: elaboração do autor no ambiente de programação do GAMS

5.3- Variáveis de entrada no SISAGUA

Para analisar as modificações trazidas pela nova representação dos custos de energia elétrica, será utilizada a configuração simplificada do SIM da RMSP. Para cada sistema produtor de água foi mensurado um nó de demanda de consumo e outros que podem ser atendidos simultaneamente por 02 ou mais sistemas. Serão consideradas 02 demandas totais do SIM: 59 m³/s (demanda atual) e 70 m³/s (demanda em 2013, antes da crise hídrica da RMSP). A Tabela 42 mostra as demandas por região a serem consideradas no SISAGUA. Nesta configuração simplificada não foram consideradas as estações elevatórias existentes no sistema adutor. Portanto, neste estudo, não foi considerado o custo de energia elétrica para atendimento às demandas à jusante das ETAs.

Tabela 42 - Demandas do SIM consideradas nas simulações do SISAGUA

Sistema produtor de água	cenário 1		cenário 2	
	nó exclusivo (m ³ /s)	nó compartilhado (m ³ /s)	nó exclusivo (m ³ /s)	nó compartilhado (m ³ /s)
Cantareira	13,70		16,28	
Guarapiranga	9,54		11,33	
Alto Tietê	7,20		8,55	
Rio Claro	0,85		1,01	
Rio Grande	3,87		4,60	
Ribeirão da Estiva	0,03		0,04	
Alto Cotia	0,21		0,25	
São Lourenço	2,16		2,57	
Cantareira-Alto Tietê		3,92		4,66
Cantareira - Alto Tietê-Rio Claro		2,75		3,27
Cantareira-Guarapiranga		8,00		9,50
Cantareira-São Lourenço		2,00		2,38
Guarapiranga-Alto Cotia		0,50		0,59
Rio Claro - Alto Tietê		4,10		4,87
Alto Cotia - São Lourenço		0,32		0,38
Ribeirão da Estiva - Rio Claro		0,12		0,14
totalização (m ³ /s)	59,27		70,41	

Fonte: elaboração autor com dados (Prefeitura São Paulo, 2019)

No item 1 do capítulo 5 foram apresentadas as principais características técnicas das estações elevatórias de água bruta do SIM, e suas variáveis sob a nova representação dos custos de energia elétrica foram cadastradas pelo GAMS, na Tabela 43 foram indicadas aquelas que

serão analisadas por associação de bombas, escolhidas por serem mais significativas na gestão dos volumes armazenados dos mananciais. Nas demais, mantivemos o parâmetro original do custo de energia do SISAGUA.

Tabela 43 - Elevatórias otimizadas no SISAGUA por associação de bombas

Estação Elevatória de Água Bruta	Sistema Produtor de Água
Santa Inês	Cantareira
Jaguari-Atibainha	Cantareira
Guarapiranga	Guarapiranga
Taquacetuba	Guarapiranga
Capivari	Guarapiranga
Taiacupeba	Alto Tietê
Biritiba Mirim	Alto Tietê
Guaió	Alto Tietê
Rio Pequeno	Alto Tietê
São Lourenço	São Lourenço

Fonte: elaboração do autor

Foi avaliado o comportamento do volume armazenado dos reservatórios relacionados na Tabela 44, os demais serão cadastrados no SISAGUA como fonte, sem considerar o volume armazenado, vide justificativas no item 1 do capítulo 5. O volume inicial armazenado dos reservatórios foi considerado pela média dos valores no início de outubro dos anos de 2015 a 2018.

Tabela 44 - Volume inicial dos reservatórios considerado nas simulações do SISAGUA

Reservatório	Volume útil (hm³)	Volume útil inicial armazenado (hm³)
Cantareira	981,56	419,11
Alto Tietê	560,61	211,45
Guarapiranga	171,18	111,27
Alto Cotia	16,50	11,60

Fonte: (SABESP, 2019)

Para analisar a nova representação do custo de energia para a função objetivo 3 do SISAGUA foram realizadas 6 simulações com intervalos mensais de 24 meses e com início no mês de outubro, quando se inicia o período úmido na RMSP. Essas simulações têm como principais características, três cenários hidrológicos distintos de cada sistema produtor e duas demandas totais para o SIM. Os cenários hidrológicos escolhidos são dos biênios 1950-1952, 1982-1984 e 1992-1994.

A Figura 21 mostra as vazões afluentes do Sistema Cantareira, o biênio 1950-1952 está 10,26% acima da média a longo termo (MLT), o 1982-1984 está 92,08% acima e o 1992-1994 com um cenário 13,52% abaixo da MLT.

Figura 21 - Vazão afluente de três cenários e MLT do sistema Cantareira

Fonte: SABESP (2019)

A Figura 22 mostra as vazões afluentes do Sistema Guarapiranga, o biênio 1950-1952 está 10,22% abaixo da MLT, o 1982-1984 está 47,74% acima e o 1992-1994 com um cenário 1,68% abaixo da MLT.

Figura 22 - Vazão afluente de 03 cenários e MLT do sistema Guarapiranga

Fonte: SABESP (2019)

A Figura 23 mostra as vazões afluentes do Sistema Alto Tietê, o biênio 1950-1952 está 11,06% acima da MLT, o 1982-1984 está 33,38% acima e o 1992-1994 com um cenário 18,67% abaixo da MLT.

Figura 23 - Vazão afluente de 03 cenários e MLT do Sistema Alto Tietê

Fonte: SABESP (2019)

A Figura 24 mostra as vazões afluentes do Sistema Alto Cotia, o biênio 1950-1952 está 3,02% abaixo da MLT, o 1982-1984 está 58,50% acima e o 1992-1994 com um cenário 9,95% abaixo da MLT.

Figura 24 - Vazão afluente de 03 cenários e MLT do Sistema Alto Cotia

Fonte: SABESP (2019)

Os cenários hidrológicos escolhidos próximos e significativamente acima da MLT têm a finalidade de melhor avaliar o impacto na otimização com a alteração na representação do custo de energia elétrica. Em cenários hidrológicos de baixas vazões afluentes a função objetivo 3 do SISAGUA tem pequena relevância na otimização, considerando o conceito de prioridades preemptivas.

6- RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo mostra as diferenças nos resultados da otimização do sistema quando o SISAGUA é submetido à nova representação proposta do custo de energia elétrica. Também mostra as diferenças de compilação dos custos de energia elétrica diante de tais modificações comparadas à formulação original do SISAGUA.

Para que essa comparação seja feita, o processamento no SISAGUA foi executado com os mesmos dados nas variáveis de entrada na condição original e com a nova representação de custo de energia elétrica.

A Tabela 45 apresenta a solução otimizada para o Sistema Cantareira com a representação original do SISAGUA comparada com a resultante da nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 45 - Cantareira com cenário hidrológico 1950-1952 e demanda SIM 59 m³/s

SISTEMA CANTAREIRA					volume (hm³)	volume (B)(hm³)
mês/ano	Custo energia	custo energia (B)	Qatend (m³/s)	Qaten(B) (m³/s)	930,00	930,00
out/50	R\$7.567.385,28	R\$6.326.105,50	21,96	21,96	951,96	951,96
nov/50	R\$8.801.032,32	R\$8.122.674,82	27,24	27,24	979,76	979,76
dez/50	R\$9.435.772,32	R\$8.851.304,18	28,42	28,42	1059,94	1059,94
jan/51	R\$7.762.033,03	R\$6.589.678,43	22,63	22,63	1210,52	1210,52
fev/51	R\$7.878.170,17	R\$7.150.453,26	25,95	26,03	1358,58	1358,39
mar/51	R\$8.810.630,71	R\$8.447.547,47	30,46	30,46	1482,00	1482,00
abr/51	R\$7.272.457,34	R\$6.565.821,70	25,98	25,98	1482,00	1482,00
mai/51	R\$7.513.750,30	R\$6.783.669,18	25,98	25,98	1482,00	1482,00
jun/51	R\$7.927.507,58	R\$7.454.587,39	28,32	28,32	1482,00	1482,00
jul/51	R\$7.751.203,20	R\$7.106.758,57	26,80	26,80	1482,00	1482,00
ago/51	R\$10.245.005,00	R\$8.163.181,96	26,80	25,72	1482,00	1482,00
set/51	R\$13.147.142,40	R\$11.496.572,93	25,40	25,02	1482,00	1482,00
out/51	R\$7.671.720,16	R\$6.360.114,91	22,06	22,06	1482,00	1482,00
nov/51	R\$7.754.227,20	R\$7.215.937,34	27,70	27,70	1482,00	1482,00
dez/51	R\$8.810.630,71	R\$8.447.547,47	30,46	30,46	1482,00	1482,00
jan/52	R\$8.810.630,71	R\$8.447.547,47	30,46	30,46	1482,00	1482,00
fev/52	R\$8.244.750,02	R\$7.904.986,54	30,46	30,46	1482,00	1482,00
mar/52	R\$8.810.630,71	R\$8.447.547,47	30,46	30,46	1482,00	1482,00
abr/52	R\$7.272.457,34	R\$6.565.821,70	25,98	25,98	1482,00	1482,00
mai/52	R\$7.513.750,30	R\$6.783.669,18	25,98	25,98	1482,00	1482,00
jun/52	R\$7.272.457,34	R\$6.565.821,70	25,98	25,98	1482,00	1482,00
jul/52	R\$7.346.289,60	R\$6.554.105,66	25,40	25,40	1482,00	1482,00
ago/52	R\$13.293.640,20	R\$10.573.749,74	27,70	26,21	1482,00	1482,00
set/52	R\$6.722.885,95	R\$4.903.500,67	22,28	21,60	1482,00	1482,00
MÉDIA/SOMA	R\$203.636.159,92	R\$181.828.705,22	26,70	26,55		

Fonte: elaboração do autor com resultados apurados pelo SISAGUA

Com um cenário hidrológico de vazão afluyente 10,26% acima da MLT e com demanda no SIM de 59 m³/s, o Sistema Cantareira opera com uma vazão de retirada média próxima de 26,6 m³/s atendendo na totalidade seu nó de demanda exclusivo e grande parte dos nós que compartilha com outros sistemas produtores. Com a vazão afluyente superior à retirada e com a contribuição da transposição da elevatória Jaguari Atibainha que operou por oito meses nesta configuração, os níveis de armazenamento atingiram sua meta já no quinto mês permanecendo assim até o término. A vazão efluente média foi da ordem de 13 m³/s, 10 m³/s acima da efluência mínima requerida deste sistema produtor. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Santa Inês e Jaguari Atibainha. Apesar do custo de

energia calculado sob a nova representação ter sido 11% menor que os valores originais obtidos pelo SISAGUA, esta mudança de resultado na função objetivo 3 não interfere no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com relação ao custo de tratamento na ordem de R\$ 92.000.000,00, calculado sobre a vazão de retirada do sistema, apresenta praticamente o mesmo valor nas duas representações.

A Tabela 46 apresenta a solução otimizada para o Sistema Guarapiranga com a representação original do SISAGUA comparada com a nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 46 - Guarapiranga com cenário hidrológico 1950-1952 e demanda SIM 59 m³/s

SISTEMA GUARAPIRANGA					volume (hm³)	volume (B)(hm³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m³/s)	Qaten(B) (m³/s)	111,30	111,30
out/50	R\$2.352.087,40	R\$2.153.653,95	16,00	16,00	110,63	110,63
nov/50	R\$1.592.913,60	R\$1.552.571,22	10,73	10,73	114,06	114,06
dez/50	R\$1.487.093,40	R\$1.429.787,75	9,54	9,54	121,59	121,59
jan/51	R\$2.261.972,70	R\$2.285.057,70	15,33	15,33	142,27	142,27
fev/51	R\$1.343.270,70	R\$1.291.507,31	9,54	9,54	156,81	156,80
mar/51	R\$1.779.048,96	R\$1.429.787,75	9,54	9,54	168,89	168,88
abr/51	R\$2.145.315,46	R\$1.251.147,27	9,54	9,54	171,20	171,20
mai/51	R\$2.032.923,36	R\$1.614.507,14	9,54	9,54	171,20	171,20
jun/51	R\$2.369.637,50	R\$2.008.767,22	9,56	9,56	171,20	171,20
jul/51	R\$3.221.901,80	R\$1.828.695,48	9,54	9,54	171,20	171,20
ago/51	R\$1.497.002,00	R\$2.220.572,02	9,61	9,61	171,20	171,20
set/51	R\$1.622.073,60	R\$2.831.433,85	10,95	10,56	171,20	171,20
out/51	R\$1.515.212,40	R\$1.460.088,78	9,75	9,75	171,20	171,20
nov/51	R\$1.347.632,64	R\$1.236.474,08	9,54	9,54	171,20	171,20
dez/51	R\$1.277.406,00	R\$1.219.846,37	9,54	9,54	171,20	171,20
jan/52	R\$1.277.406,00	R\$1.219.846,37	9,54	9,54	171,20	171,20
fev/52	R\$1.864.514,12	R\$1.141.499,25	9,54	9,54	171,20	171,20
mar/52	R\$1.277.406,00	R\$1.219.846,37	9,54	9,54	171,20	171,20
abr/52	R\$1.439.337,60	R\$1.921.449,92	9,54	9,54	171,20	171,20
mai/52	R\$1.277.406,00	R\$1.219.846,37	9,54	9,54	171,20	171,20
jun/52	R\$1.437.056,64	R\$1.180.672,81	9,54	9,54	171,20	171,20
jul/52	R\$1.662.502,40	R\$1.488.210,86	10,85	10,59	171,20	171,20
ago/52	R\$1.487.093,40	R\$1.739.339,36	9,54	9,95	171,20	171,20
set/52	R\$1.635.033,60	R\$1.874.879,41	11,05	11,73	171,20	171,20
MÉDIA/SOMA	R\$41.203.247,28	R\$38.819.488,58	10,29	10,31		

Fonte: elaboração do autor com resultados apurados pelo SISAGUA

Com um cenário hidrológico de vazão afluyente 10,22% abaixo da MLT e com demanda no SIM de 59 m³/s o Sistema Guarapiranga opera com uma vazão de retirada média próxima de 10,30 m³/s atendendo na totalidade seu nó de demanda exclusivo e com pequena contribuição aos nós que compartilha com outros sistemas produtores. Com a vazão afluyente média ligeiramente superior à retirada e com a contribuição da transposição das elevatórias Taquacetuba e Capivari que operaram por 16 meses nesta configuração, os níveis de armazenamento atingiram sua meta no sétimo mês permanecendo assim até o término. A vazão efluente média foi da ordem de 1,30 m³/s. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Guarapiranga, Taquacetuba e Capivari. Apesar do custo de energia calculado sob a nova representação ter sido 5,8% menor que os valores originais obtidos pelo SISAGUA, esta mudança de resultado na função objetivo 3 não interfere no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com relação ao custo de tratamento na ordem de R\$ 153.000.000,00, de alto custo em função da baixa qualidade da água bruta, calculado sobre a vazão de retirada do sistema, apresenta praticamente o mesmo valor nas duas representações.

A Tabela 47 apresenta a solução otimizada para o Sistema Alto Tietê com a representação original do SISAGUA comparada com a nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 47 - Alto Tietê com cenário hidrológico 1950-1952 e demanda SIM 59 m³/s

SISTEMA ALTO TIETÊ					volume (hm³)	volume (B)(hm³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m³/s)	Qaten(B) (m³/s)	211,40	211,40
out/50	R\$5.382.480,06	R\$4.904.067,39	8,20	8,20	260,04	259,99
nov/50	R\$5.209.629,70	R\$4.746.580,54	8,20	8,20	293,39	293,28
dez/50	R\$5.382.480,06	R\$4.904.067,39	8,20	8,20	343,10	342,94
jan/51	R\$5.522.271,66	R\$5.206.288,62	8,20	8,20	432,72	432,51
fev/51	R\$5.304.733,96	R\$5.612.738,41	10,67	10,59	513,50	513,43
mar/51	R\$1.492.577,94	R\$2.056.431,63	10,52	10,52	560,15	560,15
abr/51	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
mai/51	R\$2.129.010,00	R\$2.051.917,25	15,00	15,00	560,15	560,15
jun/51	R\$1.739.180,16	R\$1.648.658,11	12,66	12,66	560,15	560,15
jul/51	R\$2.304.901,04	R\$2.112.011,53	13,56	13,56	560,15	560,15
ago/51	R\$2.063.613,24	R\$2.766.672,78	11,86	12,94	560,15	560,15
set/51	R\$3.557.577,02	R\$3.866.997,92	12,00	12,78	560,15	560,15
out/51	R\$2.546.960,10	R\$2.316.968,55	14,94	15,00	560,15	560,15
nov/51	R\$1.780.392,96	R\$1.779.381,86	12,96	13,28	560,15	560,15
dez/51	R\$1.492.577,94	R\$1.385.303,41	10,52	10,52	560,15	560,15
jan/52	R\$1.492.577,94	R\$1.385.303,41	10,52	10,52	560,15	560,15
fev/52	R\$1.396.714,09	R\$1.296.329,48	10,52	10,52	560,15	560,15
mar/52	R\$1.492.577,94	R\$1.385.303,41	10,52	10,52	560,15	560,15
abr/52	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
mai/52	R\$2.129.010,00	R\$2.051.917,25	15,00	15,00	560,15	560,15
jun/52	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
jul/52	R\$2.290.707,64	R\$2.097.406,50	13,46	13,46	560,15	560,15
ago/52	R\$1.935.872,64	R\$2.633.266,39	10,96	12,04	560,15	560,15
set/52	R\$2.417.662,08	R\$2.242.562,54	15,00	15,00	560,15	560,15
MÉDIA/SOMA	R\$65.245.428,20	R\$64.408.243,26	12,02	12,15		

Fonte: elaboração do autor com resultados apurados pelo SISAGUA

Com um cenário hidrológico de vazão afluyente 11,06% acima da MLT e com demanda no SIM de 59 m³/s, o Sistema Alto Tietê opera com uma vazão de retirada média próxima de 12,07 m³/s atendendo na totalidade seu nó de demanda exclusivo e com alta contribuição aos nós que compartilha com outros sistemas produtores. Com a vazão afluyente média bem superior à retirada e com a contribuição da transposição das elevatórias Guaió, Rio Pequeno e Biritiba Mirim que operaram por 10 meses nesta configuração, os níveis de armazenamento atingiram sua meta no sexto mês permanecendo assim até o término. A vazão efluente média foi da ordem de 8,5 m³/s, com vazão mínima efluente de 1,44 m³/s. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Taiacupeba, Guaió, Rio Pequeno e Biritiba

Mirim. O custo de energia calculado sob a nova representação está muito próximo dos valores originais obtidos pelo SISAGUA, e como nos outros sistemas produtores esta mudança de resultado na função objetivo 3 não interfere no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com relação ao custo de tratamento na ordem de R\$ 112.000.000,00 de alto custo em função da baixa qualidade da água bruta devido a notada proliferação de cianobactérias na estação chuvosa, apresenta praticamente o mesmo valor nas duas representações.

Na Tabela 48 será feito novamente a comparação das otimizações realizadas no Sistema Cantareira com o mesmo cenário hidrológico 1950-1952, porém, com uma demanda SIM 18,6% superior, 70 m³/s.

Tabela 48 - Cantareira com cenário hidrológico 1950-1952 e demanda SIM 70 m³/s

SISTEMA CANTAREIRA					volume (hm³)	volume (B)(hm³)
mês/ano	Custo energia	custo energia (B)	Qatend (m³/s)	Qaten(B) (m³/s)	930,00	930,00
out/50	R\$9.820.729,46	R\$9.378.450,03	29,75	29,75	931,10	931,10
nov/50	R\$10.414.863,36	R\$10.325.500,85	33,00	33,00	943,95	943,95
dez/50	R\$10.760.418,24	R\$10.668.090,77	33,00	33,00	1011,87	1011,87
jan/51	R\$9.663.102,38	R\$10.543.592,04	29,21	32,79	1144,84	1135,24
fev/51	R\$8.813.191,08	R\$9.580.108,42	29,53	32,90	1284,25	1266,50
mar/51	R\$9.756.810,96	R\$9.293.426,50	29,53	29,53	1417,42	1399,68
abr/51	R\$9.057.370,75	R\$13.045.557,46	31,66	31,66	1482,00	1482,00
mai/51	R\$9.544.392,00	R\$9.552.719,24	33,00	33,00	1482,00	1482,00
jun/51	R\$10.254.781,44	R\$9.706.637,52	31,66	31,66	1482,00	1482,00
jul/51	R\$12.722.963,76	R\$11.307.096,83	31,66	31,13	1482,00	1482,00
ago/51	R\$15.463.307,60	R\$14.423.795,63	31,90	31,66	1482,00	1482,00
set/51	R\$14.328.472,32	R\$13.700.627,71	29,62	29,62	1471,06	1471,06
out/51	R\$9.832.223,44	R\$9.293.426,50	29,53	29,53	1451,06	1451,06
nov/51	R\$9.516.476,16	R\$8.994.981,89	29,53	29,53	1450,88	1450,88
dez/51	R\$9.832.223,44	R\$9.293.426,50	29,53	29,53	1474,79	1474,79
jan/52	R\$9.544.392,00	R\$9.552.719,24	33,00	33,00	1482,00	1482,00
fev/52	R\$8.931.384,00	R\$8.939.176,41	33,00	33,00	1482,00	1482,00
mar/52	R\$9.544.392,00	R\$9.552.719,24	33,00	33,00	1482,00	1482,00
abr/52	R\$9.237.888,00	R\$9.245.947,82	33,00	33,00	1482,00	1482,00
mai/52	R\$9.787.875,76	R\$8.480.096,48	31,66	30,80	1482,00	1482,00
jun/52	R\$9.237.888,00	R\$9.245.947,82	33,00	33,00	1482,00	1482,00
jul/52	R\$13.852.544,16	R\$11.482.790,29	31,76	30,15	1482,00	1482,00
ago/52	R\$14.624.558,00	R\$13.908.632,79	29,00	29,00	1482,00	1482,00
set/52	R\$14.462.841,60	R\$11.680.630,85	30,10	28,30	1482,00	1482,00
MÉDIA/SOMA	R\$259.005.089,92	R\$251.196.098,83	31,23	31,31		

Fonte: elaboração do autor com resultados apurados pelo SISAGUA

Tendo uma demanda do SIM superior à configuração anterior com dados apresentados na Tabela 45, nesta nova configuração a vazão de retirada do Sistema Cantareira é 17,5% maior, aumentando proporcionalmente ao incremento da demanda total do sistema. O Cantareira atende totalmente seu nó de demanda exclusivo e grande parte dos nós que compartilha com outros sistemas produtores. A vazão média afluente é agora 51% superior a vazão de retirada e tendo a contribuição da elevatória Jaguari Atibainha que operou 16 meses, os níveis de armazenamento atingiram sua meta no sétimo mês do período de análise, porém, sob uma demanda de atendimento maior apresentou oscilação de volume armazenado, mas termina o ciclo de 24 meses no volume útil máximo. A vazão efluente reduziu para 10 m³/s, 7 m³/s acima da mínima do sistema. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Santa Inês e Jaguari/Atibainha. O custo de energia calculado sob a nova representação teve uma menor redução, não linear, em relação aos valores originais obtidos pelo SISAGUA, de 11% para 5% e esta mudança de resultado na função objetivo 3, como da primeira configuração, não interfere no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com o aumento da vazão de retirada houve um incremento linear de 18% no custo de tratamento que atingiu R\$ 108.000.000,00.

Na Tabela 49 será feita a comparação das otimizações realizadas no Sistema Guarapiranga com o mesmo cenário hidrológico 1950-1952 e com uma demanda SIM de 70 m³/s.

Tabela 49 - Guarapiranga com cenário hidrológico 1950-1952 e demanda SIM 70 m³/s

SISTEMA GUARAPIRANGA					volume (hm³)	volume (B)(hm³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m³/s)	Qaten(B) (m³/s)	111,30	111,30
out/50	R\$2.298.393,50	R\$2.358.670,65	15,60	15,60	111,70	111,70
nov/50	R\$1.803.513,60	R\$1.787.668,40	12,35	12,35	110,93	110,93
dez/50	R\$1.863.352,40	R\$1.846.981,47	12,35	12,35	110,93	110,93
jan/51	R\$1.834.430,00	R\$1.878.836,91	12,13	12,56	140,16	139,02
fev/51	R\$1.558.561,70	R\$1.528.877,91	11,32	11,32	150,39	149,25
mar/51	R\$1.725.435,40	R\$1.692.573,39	11,32	11,32	157,70	156,56
abr/51	R\$3.349.123,20	R\$3.309.474,27	11,32	11,32	167,37	166,23
mai/51	R\$3.381.189,24	R\$3.419.279,36	11,33	11,32	171,20	170,60
jun/51	R\$3.286.241,28	R\$3.338.070,16	11,53	11,52	171,20	171,20
jul/51	R\$3.085.698,72	R\$3.135.113,25	11,43	11,96	171,20	171,20
ago/51	R\$3.477.650,80	R\$3.438.508,16	11,45	11,45	171,20	171,20
set/51	R\$3.349.123,20	R\$3.309.474,27	11,32	11,32	170,24	170,24
out/51	R\$1.725.435,40	R\$1.692.573,39	11,32	11,32	166,04	166,04
nov/51	R\$1.670.025,60	R\$1.638.218,91	11,32	11,32	163,00	163,00
dez/51	R\$1.725.435,40	R\$1.692.573,39	11,32	11,32	162,55	162,55
jan/52	R\$1.725.435,40	R\$1.692.573,39	11,32	11,32	165,84	165,84
fev/52	R\$1.504.853,00	R\$1.594.760,29	12,01	12,80	171,20	171,20
mar/52	R\$1.608.139,00	R\$1.704.217,10	12,01	12,80	171,20	171,20
abr/52	R\$3.188.160,00	R\$2.943.391,01	11,50	11,50	171,20	171,20
mai/52	R\$1.887.561,52	R\$2.202.511,56	11,33	12,19	171,20	171,20
jun/52	R\$1.556.496,00	R\$1.535.025,24	12,01	12,01	171,20	171,20
jul/52	R\$1.929.873,92	R\$2.595.926,82	11,33	12,84	171,20	171,20
ago/52	R\$3.705.280,80	R\$3.696.749,65	13,15	13,15	171,20	171,20
set/52	R\$2.627.043,84	R\$3.418.497,01	12,89	14,69	171,20	171,20
MÉDIA/SOMA	R\$55.866.452,92	R\$57.450.545,96	11,87	12,15		

Fonte: elaboração do autor com resultados apurados pelo SISAGUA

Tendo uma demanda do SIM superior à otimização anterior conforme dados apresentados na Tabela 46, a vazão de retirada do Sistema Guarapiranga é 16,5% maior, com incremento levemente inferior ao aumento da demanda total do sistema. O Guarapiranga atende totalmente seu nó de demanda exclusivo e pequena parte dos nós que compartilha com outros sistemas produtores. A vazão média afluente é agora 9,5% inferior a vazão de retirada e tendo a contribuição da elevatórias Taquacetuba que operou por 11 dos 12 meses possíveis e Capivari que operou por 21 meses durante o ciclo da otimização de 24 meses, os níveis de armazenamento atingiram sua meta no oitavo mês do período de análise, porém, sob uma demanda de atendimento maior apresentou oscilação no volume armazenado, mas termina o ciclo de 24 meses no volume útil máximo. A vazão efluente reduziu para 0,40 m³/s. Os

valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Guarapiranga, Taquacetuba e Capivari. O custo de energia calculado sob a nova representação foi superior em 2,8% em relação aos valores originais obtidos pelo SISAGUA, porém, a vazão de retirada do sistema otimizado pela nova representação do custo de energia elétrica foi 2,4% superior a representação original e a elevatória Taquacetuba na nova representação operou com uma vazão média de 1,63 m³/s enquanto que na representação original com 1,41 m³/s. A mudança de resultado na função objetivo 3, como da primeira configuração, os valores não interferem no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com o aumento da vazão de retirada houve um incremento linear de 16% no custo de tratamento que atingiu R\$ 178.000.000,00.

Na Tabela 50 foi feita a comparação das otimizações realizadas no Sistema Alto Tietê com o mesmo cenário hidrológico 1950-1952 e com uma demanda SIM de 70 m³/s.

Tabela 50 - Alto Tietê com cenário hidrológico 1950-1952 e demanda SIM 70 m³/s

SISTEMA ALTO TIETÊ					volume (hm ³)	volume (B)(hm ³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m ³ /s)	Qaten(B) (m ³ /s)	211,40	211,40
out/50	R\$5.709.496,00	R\$4.377.214,75	10,50	10,50	257,73	245,63
nov/50	R\$5.526.144,00	R\$4.236.646,99	10,50	10,50	288,83	265,01
dez/50	R\$5.709.496,00	R\$4.377.214,75	10,50	10,50	336,23	300,31
jan/51	R\$7.218.629,34	R\$6.199.920,82	14,51	10,50	412,80	387,56
fev/51	R\$6.583.308,50	R\$5.753.144,38	15,00	11,63	486,58	469,44
mar/51	R\$7.288.177,00	R\$6.870.246,14	15,00	15,00	554,60	537,40
abr/51	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
mai/51	R\$2.129.010,00	R\$2.051.917,25	15,00	15,00	560,15	560,15
jun/51	R\$2.226.268,80	R\$2.104.062,65	15,00	15,00	560,15	560,15
jul/51	R\$2.509.286,00	R\$2.326.454,02	15,00	15,00	560,15	560,15
ago/51	R\$3.808.490,92	R\$3.419.846,03	14,76	15,00	560,15	560,15
set/51	R\$5.080.320,00	R\$4.885.445,80	15,00	15,00	559,37	559,32
out/51	R\$2.308.837,70	R\$2.161.677,76	15,00	15,00	560,15	560,15
nov/51	R\$2.192.832,00	R\$2.064.716,09	15,00	15,00	560,15	560,15
dez/51	R\$2.129.010,00	R\$2.051.917,25	15,00	15,00	560,15	560,15
jan/52	R\$2.129.010,00	R\$2.051.917,25	15,00	15,00	560,15	560,15
fev/52	R\$1.992.270,00	R\$1.811.457,20	15,00	14,21	560,15	560,15
mar/52	R\$2.129.010,00	R\$1.935.787,07	15,00	14,21	560,15	560,15
abr/52	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
mai/52	R\$2.129.010,00	R\$2.051.917,25	15,00	15,00	560,15	560,15
jun/52	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
jul/52	R\$2.495.092,60	R\$2.395.956,69	14,90	15,00	560,15	560,15
ago/52	R\$4.883.600,80	R\$4.204.578,90	15,00	15,00	560,15	560,15
set/52	R\$2.152.656,00	R\$2.051.600,57	15,00	15,00	560,15	560,15
MÉDIA/SOMA	R\$84.511.875,66	R\$75.341.708,50	14,40	14,04		

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Tendo uma demanda do SIM superior à otimização anterior conforme dados apresentados na Tabela 47, a vazão de retirada do Sistema Alto Tietê é 17,5% maior, aumentando proporcionalmente ao incremento da demanda total do sistema. O Alto Tietê atende totalmente seu nó de demanda exclusivo e significativa parte dos nós que compartilha com outros sistemas produtores. A vazão média afluenta é agora 58,0% superior a vazão de retirada e tendo a contribuição da elevatórias Guaió que operou por 03 meses dos 12 possíveis, Rio Pequeno por 09 meses e Biritiba Mirim que operou por 15 meses possíveis, os níveis de armazenamento atingiram sua meta no sétimo mês do período de análise, permanecendo no seu volume útil máximo até o final do ciclo. A vazão efluente reduziu para 6,00 m³/s, com mínimo de 1,44 m³/s. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Taiaçupeba, Guaió, Rio Pequeno e Biritiba Mirim. O custo de energia calculado sob a nova representação foi inferior em 10,8% em relação aos valores originais obtidos pelo SISAGUA, porém, a vazão de retirada do sistema otimizado pela nova representação do custo de energia elétrica foi 2,0 % inferior a representação original e a elevatória Biritiba Mirim na nova representação operou com uma vazão média de 1,60 m³/s enquanto que na representação original com 2,16 m³/s. A mudança de resultado na função objetivo 3, tem pouca interferência no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com o aumento da vazão de retirada houve um incremento de 24%, não linear devido à alta diferença de custo específico entre período seco e úmido no tratamento. O custo total de tratamento da água foi de R\$ 139.000.000,00.

Nesta nova etapa, foram mantidas as demandas do SIM em 59 m³/s e 70 m³/s, porém, alterando o cenário hidrológico para o biênio 1982-1984.

A Tabela 51 apresenta a solução otimizada para o Sistema Cantareira com a representação original do SISAGUA comparada com a nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 51 - Cantareira com cenário hidrológico 1982-1984 e demanda SIM 59 m³/s

SISTEMA CANTAREIRA					volume (hm ³)	volume (B)(hm ³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m ³ /s)	Qaten(B) (m ³ /s)	930,00	930,00
out/82	R\$9.435.772,32	R\$9.037.152,85	28,42	28,42	991,17	991,17
nov/82	R\$8.833.504,90	R\$8.453.878,56	27,35	27,35	1046,14	1046,14
dez/82	R\$8.127.612,17	R\$7.751.870,11	23,90	23,90	1249,84	1249,84
jan/83	R\$8.810.630,71	R\$8.542.794,92	30,46	30,46	1482,00	1482,00
fev/83	R\$7.958.519,68	R\$7.716.587,34	30,46	30,46	1482,00	1482,00
mar/83	R\$8.810.630,71	R\$8.542.794,92	30,46	30,46	1482,00	1482,00
abr/83	R\$7.272.457,34	R\$6.997.534,71	25,98	25,98	1482,00	1482,00
mai/83	R\$7.513.750,30	R\$7.229.706,00	25,98	25,98	1482,00	1482,00
jun/83	R\$7.272.457,34	R\$6.997.534,71	25,98	25,98	1482,00	1482,00
jul/83	R\$7.513.750,30	R\$7.229.706,00	25,98	25,98	1482,00	1482,00
ago/83	R\$7.513.750,30	R\$7.229.706,00	25,98	25,98	1482,00	1482,00
set/83	R\$7.272.457,34	R\$6.997.534,71	25,98	25,98	1482,00	1482,00
out/83	R\$8.810.630,71	R\$8.542.794,92	30,46	30,46	1482,00	1482,00
nov/83	R\$8.527.690,37	R\$8.268.455,72	30,46	30,46	1482,00	1482,00
dez/83	R\$8.810.630,71	R\$8.542.794,92	30,46	30,46	1482,00	1482,00
jan/84	R\$8.810.630,71	R\$8.542.794,92	30,46	30,46	1482,00	1482,00
fev/84	R\$8.244.750,02	R\$7.994.116,53	30,46	30,46	1482,00	1482,00
mar/84	R\$8.810.630,71	R\$8.542.794,92	30,46	30,46	1482,00	1482,00
abr/84	R\$8.179.449,98	R\$7.888.674,91	29,22	29,22	1482,00	1482,00
mai/84	R\$8.450.836,06	R\$8.150.413,35	29,22	29,22	1482,00	1482,00
jun/84	R\$8.625.185,86	R\$7.942.502,17	29,80	29,40	1482,00	1482,00
jul/84	R\$11.908.578,60	R\$10.174.214,43	29,00	27,92	1482,00	1482,00
ago/84	R\$8.392.991,26	R\$8.094.800,16	29,02	29,02	1482,00	1482,00
set/84	R\$7.703.558,78	R\$7.422.171,99	27,52	27,52	1482,00	1482,00
SOMA/MEDIA	R\$201.610.857,18	R\$192.833.329,77	28,48	28,42		

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Com um cenário hidrológico de vazão afluyente 92,04% acima da MLT e com demanda no SIM de 59 m³/s o Sistema Cantareira opera com uma vazão de retirada média próxima de 28,45 m³/s, 7,0% acima da otimização de 1950-1952, atende na totalidade seu nó de demanda exclusivo e grande parte dos nós que compartilha com outros sistemas produtores. Com a vazão afluyente 190% superior à retirada e com a contribuição da transposição da elevatória Jaguari Atibainha que operou por quatro meses, com vazão de apenas 1,76 m³/s nesta otimização, os níveis de armazenamento atingiram sua meta já no quarto mês permanecendo assim até o término. A vazão efluente média foi da ordem de 45 m³/s, 42 m³/s acima da efluência mínima deste sistema produtor. Trata-se de um cenário hidrológico extremamente

favorável. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Santa Inês e Jaguari/Atibainha. Apesar do custo de energia calculado sob a nova representação ter sido 4,35% menor que os valores originais obtidos pelo SISAGUA, esta mudança de resultado na função objetivo 3 não interfere no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com relação ao custo de tratamento na ordem de R\$ 99.000.000,00, calculado sobre a vazão de retirada do sistema, apresenta praticamente o mesmo valor nas duas representações.

A Tabela 52 apresenta a solução otimizada para o Sistema Guarapiranga com a representação original do SISAGUA comparada com a nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 52 - Guarapiranga com cenário hidrológico 1982-1984 e demanda SIM 59 m³/s

SISTEMA GUARAPIRANGA					volume (hm ³)	volume (B)(hm ³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m ³ /s)	Qaten(B) (m ³ /s)	111,30	111,30
out/82	R\$1.487.093,40	R\$1.429.787,75	9,54	9,54	114,01	114,01
nov/82	R\$1.577.880,00	R\$1.535.950,25	10,61	10,61	120,85	120,85
dez/82	R\$2.092.723,10	R\$2.114.496,99	14,06	14,06	144,38	144,38
jan/83	R\$1.277.406,00	R\$1.219.846,37	9,54	9,54	171,20	171,20
fev/83	R\$1.153.863,00	R\$1.101.870,19	9,54	9,54	171,20	171,20
mar/83	R\$1.277.406,00	R\$1.219.846,37	9,54	9,54	171,20	171,20
abr/83	R\$1.236.384,00	R\$1.180.672,81	9,54	9,54	171,20	171,20
mai/83	R\$1.277.406,00	R\$1.219.846,37	9,54	9,54	171,20	171,20
jun/83	R\$1.236.384,00	R\$1.180.672,81	9,54	9,54	171,20	171,20
jul/83	R\$1.277.406,00	R\$1.219.846,37	9,54	9,54	171,20	171,20
ago/83	R\$1.277.406,00	R\$1.219.846,37	9,54	9,54	171,20	171,20
set/83	R\$1.236.384,00	R\$1.180.672,81	9,54	9,54	171,20	171,20
out/83	R\$1.277.406,00	R\$1.219.846,37	9,54	9,54	171,20	171,20
nov/83	R\$1.236.384,00	R\$1.180.672,81	9,54	9,54	171,20	171,20
dez/83	R\$1.277.406,00	R\$1.219.846,37	9,54	9,54	171,20	171,20
jan/84	R\$1.277.406,00	R\$1.219.846,37	9,54	9,54	171,20	171,20
fev/84	R\$1.195.362,00	R\$1.141.499,25	9,54	9,54	171,20	171,20
mar/84	R\$1.283.618,96	R\$1.222.917,18	9,54	9,54	171,20	171,20
abr/84	R\$1.236.384,00	R\$1.180.672,81	9,54	9,54	171,20	171,20
mai/84	R\$1.277.406,00	R\$1.219.846,37	9,54	9,54	171,20	171,20
jun/84	R\$2.663.850,24	R\$2.413.211,99	9,54	9,54	171,20	171,20
jul/84	R\$2.625.296,96	R\$2.376.467,35	9,54	9,54	171,20	171,20
ago/84	R\$1.308.984,98	R\$1.237.364,17	9,57	9,57	171,20	171,20
set/84	R\$1.236.384,00	R\$1.180.672,81	9,54	9,54	171,20	171,20
SOMA/MEDIA	R\$34.303.630,64	R\$32.636.219,28	9,77	9,77		

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Com um cenário hidrológico de vazão afluyente 47,74% acima da MLT e com demanda no SIM de 59 m³/s o Sistema Guarapiranga opera com uma vazão de retirada média de 9,77 m³/s, 5,2% abaixo da otimização de 1950-1952, atende na totalidade seu nó de demanda exclusivo e pequena parte dos nós que compartilha com outros sistemas produtores. Com a vazão afluyente 183% superior à retirada e com a contribuição da transposição da elevatória Taquacetuba que operou por apenas 03 meses, com baixa vazão e a Capivari por 05 meses nesta otimização, os níveis de armazenamento atingiram sua meta já no quarto mês permanecendo assim até o término. A vazão efluente média foi da ordem de 7,0 m³/s. Trata-se de um cenário hidrológico extremamente favorável. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Guarapiranga, Taquacetuba e Capivari. Apesar do custo de energia calculado sob a nova representação ter sido 4,9% menor que os valores originais obtidos pelo SISAGUA, esta mudança de resultado na função objetivo 3 não interfere no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com relação ao custo de tratamento na ordem de R\$ 145.000.000,00, calculado sobre a vazão de retirada do sistema, apresenta praticamente o mesmo valor nas duas representações.

A Tabela 53 apresenta a solução otimizada para o Sistema Alto Tietê com a representação original do SISAGUA comparada com a nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 53 - Alto Tietê com cenário hidrológico 1982-1984 e demanda SIM 59 m³/s

SISTEMA ALTO TIETÊ					volume (hm³)	volume (B)(hm³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m³/s)	Qaten(B) (m³/s)	211,40	211,40
out/82	R\$5.382.480,06	R\$4.904.067,39	8,20	8,20	274,77	274,72
nov/82	R\$5.209.629,70	R\$4.746.580,54	8,20	8,20	334,04	333,93
dez/82	R\$5.382.480,06	R\$4.904.067,39	8,20	8,20	420,44	420,28
jan/83	R\$6.322.458,06	R\$5.877.416,84	8,20	8,20	488,90	488,69
fev/83	R\$1.606.900,58	R\$1.495.105,99	8,27	8,93	560,15	560,15
mar/83	R\$1.492.577,94	R\$1.385.303,41	10,52	10,52	560,15	560,15
abr/83	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
mai/83	R\$2.129.010,00	R\$2.051.917,25	15,00	15,00	560,15	560,15
jun/83	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
jul/83	R\$2.129.010,00	R\$2.051.917,25	15,00	15,00	560,15	560,15
ago/83	R\$2.129.010,00	R\$2.051.917,25	15,00	15,00	560,15	560,15
set/83	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
out/83	R\$1.492.577,94	R\$1.385.303,41	10,52	10,52	560,15	560,15
nov/83	R\$1.444.646,02	R\$1.340.816,44	10,52	10,52	560,15	560,15
dez/83	R\$1.492.577,94	R\$1.385.303,41	10,52	10,52	560,15	560,15
jan/84	R\$1.492.577,94	R\$1.385.303,41	10,52	10,52	560,15	560,15
fev/84	R\$1.396.714,09	R\$1.296.329,48	10,52	10,52	560,15	560,15
mar/84	R\$1.492.577,94	R\$1.385.303,41	10,52	10,52	560,15	560,15
abr/84	R\$1.615.541,76	R\$1.518.849,24	11,76	11,76	560,15	560,15
mai/84	R\$1.669.143,84	R\$1.569.243,16	11,76	11,76	560,15	560,15
jun/84	R\$1.657.791,36	R\$1.702.485,55	8,86	9,26	560,15	560,15
jul/84	R\$1.826.342,44	R\$2.440.229,79	9,66	10,74	560,15	560,15
ago/84	R\$1.697.530,64	R\$1.599.412,97	11,96	11,96	560,15	560,15
set/84	R\$1.849.080,96	R\$1.764.330,97	13,46	13,46	560,15	560,15
SOMA/MEDIA	R\$57.092.579,29	R\$54.199.273,43	11,34	11,43		

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Com um cenário hidrológico de vazão afluente 33,38% acima da MLT e com demanda no SIM de 59 m³/s o Sistema Alto Tietê opera com uma vazão de retirada média de 11,38 m³/s, 5,7% abaixo da otimização de 1950-1952, atende na totalidade seu nó de demanda exclusivo e parte dos nós que compartilha com outros sistemas produtores. Com a vazão afluente 141% superior à retirada e com a contribuição da transposição da elevatória Guaió que operou em único mês, a Rio Pequeno por 04 meses e a Biritiba Mirim por 7 meses nesta otimização, os níveis de armazenamento atingiram sua meta já no quinto mês permanecendo assim até o término. A vazão efluente média foi da ordem de 9,2 m³/s. Trata-se de um cenário hidrológico extremamente favorável. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das

elevatórias Taiacupeba, Guaió, Rio Pequeno e Biritiba Mirim. Apesar do custo de energia calculado sob a nova representação ter sido 5,07% menor que os valores originais obtidos pelo SISAGUA, esta mudança de resultado na função objetivo 3 não interfere no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. O custo de tratamento foi de R\$ 104.700.000,00, sem diferença significativa entre as duas representações.

Sob o mesmo cenário hidrológico de 1982-1984 e com demanda SIM 70 m³/s, será avaliado as alterações de otimização quando sistema de abastecimento é submetido a uma demanda 18% maior.

A Tabela 54 apresenta a solução otimizada para o Sistema Cantareira com a representação original do SISAGUA comparada com a nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 54 - Cantareira com cenário hidrológico 1982-1984 e demanda SIM 70 m³/s

SISTEMA CANTAREIRA					volume (hm ³)	volume (B)(hm ³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m ³ /s)	Qaten(B) (m ³ /s)	930,00	930,00
out/82	R\$10.760.418,24	R\$10.698.706,02	33,00	33,00	978,90	978,90
nov/82	R\$10.414.863,36	R\$10.355.132,94	33,00	33,00	1019,23	1019,23
dez/82	R\$10.760.418,24	R\$10.698.706,02	33,00	33,00	1198,55	1198,55
jan/83	R\$10.705.465,68	R\$10.617.272,41	32,81	32,81	1435,96	1435,96
fev/83	R\$8.621.316,00	R\$8.656.492,21	33,00	33,00	1482,00	1482,00
mar/83	R\$9.544.392,00	R\$9.583.334,49	33,00	33,00	1482,00	1482,00
abr/83	R\$9.237.888,00	R\$9.275.579,91	33,00	33,00	1482,00	1482,00
mai/83	R\$9.544.392,00	R\$9.583.334,49	33,00	33,00	1482,00	1482,00
jun/83	R\$9.237.888,00	R\$9.275.579,91	33,00	33,00	1482,00	1482,00
jul/83	R\$9.544.392,00	R\$9.583.334,49	33,00	33,00	1482,00	1482,00
ago/83	R\$9.544.392,00	R\$9.583.334,49	33,00	33,00	1482,00	1482,00
set/83	R\$9.237.888,00	R\$9.275.579,91	33,00	33,00	1482,00	1482,00
out/83	R\$9.544.392,00	R\$9.583.334,49	33,00	33,00	1482,00	1482,00
nov/83	R\$9.237.888,00	R\$9.275.579,91	33,00	33,00	1482,00	1482,00
dez/83	R\$9.544.392,00	R\$9.583.334,49	33,00	33,00	1482,00	1482,00
jan/84	R\$9.544.392,00	R\$9.583.334,49	33,00	33,00	1482,00	1482,00
fev/84	R\$8.931.384,00	R\$8.967.825,33	33,00	33,00	1482,00	1482,00
mar/84	R\$9.544.392,00	R\$9.583.334,49	33,00	33,00	1482,00	1482,00
abr/84	R\$9.237.888,00	R\$9.275.579,91	33,00	33,00	1482,00	1482,00
mai/84	R\$9.544.392,00	R\$9.583.334,49	33,00	33,00	1482,00	1482,00
jun/84	R\$11.794.636,80	R\$11.518.625,29	33,00	33,00	1482,00	1482,00
jul/84	R\$15.694.686,80	R\$15.399.796,61	32,70	32,70	1482,00	1482,00
ago/84	R\$10.527.501,87	R\$8.673.993,07	32,38	30,80	1482,00	1482,00
set/84	R\$8.566.041,60	R\$8.321.001,21	30,60	30,60	1482,00	1482,00
SOMA/MEDIA	R\$238.865.700,59	R\$236.535.461,08	32,85	32,79		

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Tendo uma demanda do SIM superior à otimização anterior com dados apresentados na Tabela 51 nesta nova otimização a vazão de retirada do Sistema Cantareira é 15,5% maior, aumento proporcionalmente pouco inferior ao incremento da demanda total do sistema. O Cantareira atende totalmente seu nó de demanda exclusivo e grande parte dos nós que compartilha com outros sistemas produtores. A vazão média afluente é agora, 148% superior à vazão de retirada e tendo a contribuição da elevatória Jaguari Atibainha que operou 7 meses, os níveis de armazenamento atingiram sua meta no quinto mês do período de análise, permanecendo assim até final do período de 24 meses. A vazão efluente reduziu para 41,92 m³/s, 38 m³/s acima da mínima do sistema. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Santa Inês e Jaguari/Atibainha. O custo de energia calculado sob a nova representação teve uma menor redução, não linear, em relação aos valores originais obtidos pelo SISAGUA, de 4,35% para 0,98% e esta alteração de resultado na função objetivo 3, como da primeira otimização, não interfere no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com o aumento da vazão de retirada houve um incremento linear de 15% no custo de tratamento que atingiu R\$ 114.000.000,00.

A Tabela 55 apresenta a solução otimizada para o Sistema Guarapiranga com a representação original do SISAGUA comparada com a nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 55 - Guarapiranga com cenário hidrológico 1982-1984 e demanda SIM 70 m³/s

SISTEMA GUARAPIRANGA					volume (hm³)	volume (B)(hm³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m³/s)	Qaten(B) (m³/s)	111,30	111,30
out/82	R\$1.863.352,40	R\$1.846.981,47	12,35	12,35	106,48	106,48
nov/82	R\$1.803.513,60	R\$1.787.668,40	12,35	12,35	108,81	108,81
dez/82	R\$1.863.352,40	R\$1.846.981,47	12,35	12,35	136,93	136,93
jan/83	R\$1.888.793,40	R\$1.875.700,88	12,54	12,54	165,88	165,88
fev/83	R\$1.752.565,50	R\$1.781.482,69	14,49	14,49	171,20	171,20
mar/83	R\$1.605.461,00	R\$1.704.217,10	11,99	12,80	171,20	171,20
abr/83	R\$1.553.904,00	R\$1.535.025,24	11,99	12,01	171,20	171,20
mai/83	R\$1.605.461,00	R\$1.585.955,86	11,99	12,01	171,20	171,20
jun/83	R\$1.553.904,00	R\$1.535.025,24	11,99	12,01	171,20	171,20
jul/83	R\$1.605.461,00	R\$1.585.955,86	11,99	12,01	171,20	171,20
ago/83	R\$1.796.402,40	R\$1.637.199,39	11,85	11,59	171,20	171,20
set/83	R\$1.553.904,00	R\$1.535.025,24	11,99	12,01	171,20	171,20
out/83	R\$1.605.461,00	R\$1.704.217,10	11,99	12,80	171,20	171,20
nov/83	R\$1.553.904,00	R\$1.649.488,69	11,99	12,80	171,20	171,20
dez/83	R\$1.605.461,00	R\$1.704.217,10	11,99	12,80	171,20	171,20
jan/84	R\$1.605.461,00	R\$1.704.217,10	11,99	12,80	171,20	171,20
fev/84	R\$1.502.347,00	R\$1.594.760,29	11,99	12,80	171,20	171,20
mar/84	R\$1.725.435,40	R\$1.692.573,39	11,32	11,32	169,94	169,94
abr/84	R\$1.870.128,00	R\$1.731.596,47	12,86	12,60	171,20	171,20
mai/84	R\$1.746.163,12	R\$1.686.204,35	11,38	11,38	171,20	171,20
jun/84	R\$3.349.123,20	R\$3.309.474,27	11,32	11,32	169,46	169,46
jul/84	R\$3.460.243,80	R\$3.419.279,36	11,32	11,32	168,47	168,47
ago/84	R\$2.519.901,59	R\$2.796.325,79	11,54	12,41	171,20	171,20
set/84	R\$1.907.193,60	R\$1.773.473,47	13,15	12,89	171,20	171,20
SOMA/MEDIA	R\$44.896.897,41	R\$45.023.046,19	12,11	12,32		

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Tendo uma demanda do SIM superior à otimização anterior conforme dados apresentados na Tabela 52, a vazão de retirada do Sistema Guarapiranga é 25,0% maior, com incremento superior ao aumento da demanda total do sistema de abastecimento. O Guarapiranga atende totalmente seu nó de demanda exclusivo e uma parte dos nós que compartilha com outros sistemas produtores. A vazão média afluente é agora 47,74% superior à vazão de retirada e tendo a contribuição da elevatórias Taquacetuba que operou por 3 dos 12 meses possíveis e Capivari que operou por 12 meses durante o ciclo da otimização de 24 meses, os níveis de armazenamento atingiram sua meta no sexto mês do período de análise, porém, permanecendo assim até o termino do ciclo de 24 meses no volume. A vazão efluente reduziu

para 5,80 m³/s. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Guarapiranga, Taquacetuba e Capivari. O custo de energia calculado sob a nova representação foi superior em 0,28% em relação aos valores originais obtidos pelo SISAGUA, porém, a vazão de retirada do sistema otimizado pela nova representação do custo de energia elétrica foi 1,7% superior a representação original e a elevatória Taquacetuba na nova representação operou com uma vazão média de 0,46 m³/s enquanto que na representação original com 0,42 m³/s. A mudança de resultado na função objetivo 3, como da primeira otimização, os valores não interferem no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com o aumento da vazão de retirada houve um incremento linear de 25% no custo de tratamento que atingiu R\$ 182.000.000,00.

A Tabela 56 apresenta a solução otimizada para o Sistema Alto Tietê com a representação original do SISAGUA comparada com a nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 56 - Alto Tietê com cenário hidrológico 1982-1984 e demanda SIM 70 m³/s

SISTEMA ALTO TIETÊ					volume (hm ³)	volume (B)(hm ³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m ³ /s)	Qaten(B) (m ³ /s)	211,40	211,40
out/82	R\$5.664.502,92	R\$5.227.653,93	10,18	10,51	269,45	268,53
nov/82	R\$5.482.595,81	R\$5.059.775,57	10,18	10,51	323,56	321,76
dez/82	R\$5.664.502,92	R\$5.227.653,93	10,18	10,51	404,65	401,92
jan/83	R\$6.604.480,92	R\$6.201.003,38	10,18	10,51	467,79	464,14
fev/83	R\$5.965.735,38	R\$5.601.279,75	10,18	10,51	553,12	548,65
mar/83	R\$2.129.010,00	R\$1.935.787,07	15,00	14,21	560,15	560,15
abr/83	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
mai/83	R\$2.129.010,00	R\$2.051.917,25	15,00	15,00	560,15	560,15
jun/83	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
jul/83	R\$2.129.010,00	R\$2.051.917,25	15,00	15,00	560,15	560,15
ago/83	R\$2.129.010,00	R\$2.051.917,25	15,00	15,00	560,15	560,15
set/83	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
out/83	R\$2.129.010,00	R\$1.935.787,07	15,00	14,21	560,15	560,15
nov/83	R\$2.060.640,00	R\$1.873.622,14	15,00	14,21	560,15	560,15
dez/83	R\$2.129.010,00	R\$1.935.787,07	15,00	14,21	560,15	560,15
jan/84	R\$2.129.010,00	R\$1.935.787,07	15,00	14,21	560,15	560,15
fev/84	R\$1.992.270,00	R\$1.811.457,20	15,00	14,21	560,15	560,15
mar/84	R\$2.129.010,00	R\$2.051.917,25	15,00	15,00	560,15	560,15
abr/84	R\$2.258.357,76	R\$2.072.701,74	13,76	13,76	560,15	560,15
mai/84	R\$2.333.287,84	R\$2.141.471,93	13,76	13,76	560,15	560,15
jun/84	R\$4.772.597,76	R\$4.429.863,59	12,76	11,84	560,15	560,15
jul/84	R\$4.916.754,44	R\$4.031.845,94	12,66	12,30	560,15	560,15
ago/84	R\$2.361.674,64	R\$3.046.142,96	13,96	15,00	560,15	560,15
set/84	R\$2.344.049,28	R\$2.188.001,98	15,00	15,00	560,15	560,15
SOMA/MÉDIA	R\$75.635.449,68	R\$70.821.360,22	13,66	13,52		

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Tendo uma demanda do SIM superior à otimização anterior com dados apresentados na Tabela 53, nesta nova otimização a vazão de retirada do Sistema Alto Tietê é 19,5% maior, aumento proporcionalmente um pouco superior ao incremento da demanda total do sistema. O Alto Tietê atende totalmente seu nó de demanda exclusivo e boa parte dos nós que compartilha com outros sistemas produtores. A vazão média afluyente é agora, 98% superior à vazão de retirada e tendo a contribuição da elevatória Guaió que operou por somente 2 meses, da Rio Pequeno e Biritiba Mirim que operaram por 11 meses, os níveis de armazenamento atingiram sua meta no sexto mês do período de análise, permanecendo assim até final do período de 24 meses. A vazão efluente reduziu para 7,80 m³/s, 6,36 m³/s acima da mínima do sistema. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Taiaçupeba, Guaió, Rio Pequeno e Biritiba Mirim. O custo de energia calculado sob a nova

representação teve uma maior redução, não linear, em relação aos valores originais obtidos pelo SISAGUA, de 5,0% para 6,4% e esta alteração de resultado na função objetivo 3, como na primeira otimização, não interfere no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com o aumento da vazão de retirada houve um incremento de 26%, não linear devido à alta diferença de custo específico entre período seco e úmido no tratamento. O custo total de tratamento da água foi de R\$ 133.200.000,00.

Trata-se da última etapa de avaliação das possíveis alterações nas otimizações realizadas pelo SISAGUA quando alteramos a representação do custo do consumo de energia na função objetivo 3, com cenário hidrológico 1992-1994 e demandas do SIM do SIM em 59 m³/s e 70 m³/s.

A Tabela 57 apresenta a solução otimizada para o Sistema Cantareira com a representação original do SISAGUA comparada com a nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 57 - Cantareira com cenário hidrológico 1992-1994 e demanda SIM 59 m³/s

SISTEMA CANTAREIRA					volume (hm³)	volume (B)(hm³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m³/s)	Qaten(B) (m³/s)	930,00	930,00
out/92	R\$9.193.113,38	R\$8.528.214,78	27,58	27,58	967,44	967,44
nov/92	R\$8.073.478,66	R\$7.135.157,38	24,64	24,64	1039,82	1039,82
dez/92	R\$8.073.816,50	R\$7.006.293,70	23,71	23,71	1104,75	1104,75
jan/93	R\$8.076.130,30	R\$7.023.298,40	23,72	23,73	1160,30	1160,26
fev/93	R\$6.835.513,44	R\$5.714.282,75	21,96	21,96	1280,04	1280,00
mar/93	R\$6.061.106,69	R\$4.319.550,32	16,75	16,83	1384,24	1383,98
abr/93	R\$12.102.701,18	R\$10.441.820,16	21,67	21,03	1459,49	1460,88
mai/93	R\$9.236.721,94	R\$6.171.499,80	26,17	24,42	1482,00	1482,00
jun/93	R\$8.207.443,58	R\$7.833.135,74	29,32	29,32	1482,00	1482,00
jul/93	R\$14.565.690,20	R\$11.558.041,50	28,80	27,00	1482,00	1482,00
ago/93	R\$14.046.110,00	R\$10.852.346,24	27,00	25,20	1482,00	1482,00
set/93	R\$7.272.457,34	R\$6.565.821,70	25,98	25,98	1482,00	1482,00
out/93	R\$8.069.349,60	R\$7.540.378,54	27,90	27,90	1482,00	1482,00
nov/93	R\$7.265.583,36	R\$6.040.658,88	21,75	21,75	1477,10	1477,10
dez/93	R\$7.645.764,98	R\$6.428.133,73	22,23	22,23	1482,00	1482,00
jan/94	R\$8.810.630,71	R\$8.447.547,47	30,46	30,46	1482,00	1482,00
fev/94	R\$8.244.750,02	R\$7.904.986,54	30,46	30,46	1482,00	1482,00
mar/94	R\$8.810.630,71	R\$8.447.547,47	30,46	30,46	1482,00	1482,00
abr/94	R\$7.272.457,34	R\$6.565.821,70	25,98	25,98	1482,00	1482,00
mai/94	R\$8.242.884,00	R\$7.769.942,06	28,50	28,50	1482,00	1482,00
jun/94	R\$9.310.033,73	R\$7.215.257,66	24,90	23,79	1482,00	1482,00
jul/94	R\$13.001.245,45	R\$10.933.543,20	26,80	25,72	1482,00	1482,00
ago/94	R\$12.552.193,06	R\$11.604.495,27	23,09	23,11	1479,87	1479,84
set/94	R\$11.800.577,66	R\$10.754.534,02	21,85	21,86	1468,86	1468,79
MEDIA/SOMA	R\$222.770.383,86	R\$192.802.309,02	25,49	25,15		

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Com um cenário hidrológico de vazão afluyente 13,52% acima da MLT e com demanda no SIM de 59 m³/s o Sistema Cantareira opera com uma vazão de retirada média próxima de 25,30 m³/s atendendo na totalidade seu nó de demanda exclusivo e grande parte dos nós que compartilha com outros sistemas produtores. Com a vazão afluyente superior à retirada e com a contribuição da transposição da elevatória Jaguari Atibainha que operou por 16 meses nesta otimização, o nível de armazenamento atingiu sua meta no oitavo mês permanecendo próximo ao armazenamento máximo até o término do ciclo de 24 meses. A vazão efluente média foi da ordem de 5,96 m³/s, 2,96 m³/s acima da efluência mínima deste sistema produtor. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Santa Inês e Jaguari/Atibainha.

Apesar do custo de energia calculado sob a nova representação ter sido 13,5% menor que os valores originais obtidos pelo SISAGUA, esta mudança de resultado na função objetivo 3 não interfere no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com relação ao custo de tratamento na ordem de R\$ 87.800.000,00, calculado sobre a vazão de retirada do sistema, apresenta praticamente o mesmo valor nas duas representações.

A Tabela 58 apresenta a solução otimizada para o Sistema Guarapiranga com a representação original do SISAGUA comparada com a nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 58 - Guarapiranga com cenário hidrológico 1992-1994 e demanda SIM 59 m³/s

SISTEMA GUARAPIRANGA					volume (hm ³)	volume (B)(hm ³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m ³ /s)	Qaten(B) (m ³ /s)	111,30	111,30
out/92	R\$1.599.435,50	R\$1.553.722,08	10,38	10,38	111,76	111,76
nov/92	R\$1.929.744,00	R\$1.933.155,23	13,32	13,32	120,12	120,12
dez/92	R\$2.117.628,50	R\$2.144.416,34	14,25	14,25	127,62	127,62
jan/93	R\$2.116.557,30	R\$2.140.366,94	14,24	14,23	127,91	127,95
fev/93	R\$2.124.607,70	R\$2.199.498,66	16,00	16,00	144,48	144,52
mar/93	R\$2.352.087,40	R\$2.434.996,86	16,00	16,00	166,58	166,62
abr/93	R\$3.805.761,02	R\$3.682.438,11	16,00	16,00	171,20	171,20
mai/93	R\$1.515.212,40	R\$1.503.031,03	9,75	9,90	171,20	171,20
jun/93	R\$1.236.384,00	R\$1.180.672,81	9,54	9,54	171,20	171,20
jul/93	R\$2.413.734,96	R\$2.566.712,18	9,54	10,26	171,20	171,20
ago/93	R\$2.781.135,14	R\$2.952.761,18	11,34	12,06	171,20	171,20
set/93	R\$1.236.384,00	R\$1.180.672,81	9,54	9,54	171,20	171,20
out/93	R\$1.293.340,10	R\$1.434.683,81	9,66	11,00	171,20	171,20
nov/93	R\$1.439.337,60	R\$1.383.872,23	9,54	9,54	165,01	165,01
dez/93	R\$1.487.093,40	R\$1.429.787,75	9,54	9,54	159,94	159,94
jan/94	R\$1.487.093,40	R\$1.429.787,75	9,54	9,54	170,95	170,95
fev/94	R\$1.195.362,00	R\$1.141.499,25	9,54	9,54	171,20	171,20
mar/94	R\$1.277.406,00	R\$1.219.846,37	9,54	9,54	171,20	171,20
abr/94	R\$1.236.384,00	R\$1.180.672,81	9,54	9,54	171,20	171,20
mai/94	R\$1.956.761,04	R\$1.758.381,08	9,54	9,54	171,20	171,20
jun/94	R\$1.885.731,84	R\$1.694.229,50	9,54	9,54	171,20	171,20
jul/94	R\$2.265.641,56	R\$2.044.175,10	9,54	9,54	171,20	171,20
ago/94	R\$3.283.763,60	R\$3.225.025,18	10,00	10,00	170,95	170,95
set/94	R\$3.196.324,80	R\$3.140.315,79	10,14	10,14	169,68	169,67
MEDIA/SOMA	R\$47.232.911,26	R\$46.554.720,84	11,07	11,19		

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Com um cenário hidrológico de vazão afluyente 1,68% abaixo da MLT e com demanda no SIM de 59 m³/s o Sistema Guarapiranga opera com uma vazão de retirada média próxima de 11,10 m³/s atendendo na totalidade seu nó de demanda exclusivo e com pequena contribuição aos nós que compartilha com outros sistemas produtores. Com a vazão afluyente média 9,0% superior à retirada e com a contribuição da transposição das elevatórias Taquacetuba que operou por 8 meses de 12 possíveis e Capivari que operou por 18 meses nesta otimização, os níveis de armazenamento atingiram sua meta no sétimo mês permanecendo próximo de sua totalidade armazenada até o término. A vazão efluente média foi da ordem de 1,68 m³/s. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Guarapiranga, Taquacetuba e Capivari. O custo de energia calculado sob a nova representação foi apenas 1,48% menor que os valores originais obtidos pelo SISAGUA, esta mudança de resultado na função objetivo 3 não interferiu no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com relação ao custo de tratamento na ordem de R\$ 165.000.000, de alto custo em função da baixa qualidade da água bruta, calculado sobre a vazão de retirada do sistema, apresenta praticamente o mesmo valor nas duas representações.

A Tabela 59 apresenta a solução otimizada para o Sistema Alto Tietê com a representação original do SISAGUA comparada com a nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 59 - Alto Tietê com cenário hidrológico 1992-1994 e demanda SIM 59 m³/s

SISTEMA ALTO TIETÊ					volume (hm³)	volume (B)(hm³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m³/s)	Qaten(B) (m³/s)	211,40	211,40
out/92	R\$5.382.480,06	R\$4.904.067,39	8,20	8,20	249,87	249,81
nov/92	R\$5.209.629,70	R\$4.746.580,54	8,20	8,20	301,35	301,25
dez/92	R\$5.382.480,06	R\$4.904.067,39	8,20	8,20	354,55	354,39
jan/93	R\$6.322.458,06	R\$5.877.416,84	8,20	8,20	417,92	417,71
fev/93	R\$5.710.988,07	R\$5.308.988,55	8,20	8,20	468,15	467,89
mar/93	R\$7.061.650,34	R\$6.620.125,66	13,40	13,32	523,20	523,10
abr/93	R\$4.185.590,11	R\$4.993.169,71	8,49	9,13	551,64	552,17
mai/93	R\$2.123.509,39	R\$3.130.986,73	12,28	13,89	560,15	560,15
jun/93	R\$1.601.804,16	R\$1.505.399,86	11,66	11,66	560,15	560,15
jul/93	R\$1.779.745,24	R\$2.469.690,19	9,86	10,94	560,15	560,15
ago/93	R\$1.779.745,24	R\$2.469.690,19	9,86	10,94	560,15	560,15
set/93	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
out/93	R\$1.839.464,64	R\$1.548.879,61	12,96	11,62	560,15	560,15
nov/93	R\$3.148.160,26	R\$2.764.211,16	14,94	14,94	560,15	560,15
dez/93	R\$2.387.619,10	R\$2.219.945,68	14,94	15,00	560,15	560,15
jan/94	R\$1.492.577,94	R\$1.385.303,41	10,52	10,52	560,15	560,15
fev/94	R\$1.396.714,09	R\$1.296.329,48	10,52	10,52	560,15	560,15
mar/94	R\$1.492.577,94	R\$1.385.303,41	10,52	10,52	560,15	560,15
abr/94	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
mai/94	R\$2.060.014,01	R\$1.882.477,14	12,48	12,48	560,15	560,15
jun/94	R\$2.258.357,76	R\$2.974.139,43	13,76	14,87	560,15	560,15
jul/94	R\$2.063.613,24	R\$2.766.672,78	11,86	12,94	560,15	560,15
ago/94	R\$4.973.528,04	R\$4.755.983,07	13,06	13,05	559,35	559,33
set/94	R\$4.965.748,42	R\$4.763.291,18	14,17	14,15	555,18	555,16
MEDIA/SOMA	R\$78.739.735,88	R\$78.644.765,32	11,51	11,73		

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Com um cenário hidrológico de vazão afluyente 18,67% abaixo da MLT e com demanda no SIM de 59 m³/s o Sistema Alto Tietê opera com uma vazão de retirada média próxima de 11,60 m³/s atendendo na totalidade seu nó de demanda exclusivo e com baixa contribuição aos nós que compartilha com outros sistemas produtores. Com a vazão afluyente média 39% superior à retirada e com a contribuição da transposição das elevatórias Guaió que operou por três meses, Rio Pequeno que operou por nove meses e Biritiba Mirim que operou por dezessete meses nesta otimização, o nível de armazenamento atingiu sua meta no oitavo mês permanecendo próximo de sua totalidade de armazenamento útil até o término da otimização. A vazão efluente média foi da ordem de 3,1 m³/s, com vazão mínima efluente de 1,44 m³/s. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Taiacupeba, Guaió,

Rio Pequeno e Biritiba Mirim. O custo de energia calculado sob a nova representação está muito próximo dos valores originais obtidos pelo SISAGUA, e como nos outros sistemas produtores esta mudança de resultado na função objetivo 3 não interfere no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. O custo de tratamento na ordem de R\$ 112.000.000,00, sem significativa diferença entre as duas representações.

Sob o mesmo cenário hidrológico de 1992-1994 e com demanda SIM 70 m³/s, será avaliado as alterações de otimização quando sistema de abastecimento é submetido a uma demanda 18% maior.

A Tabela 60 apresenta a solução otimizada para o Sistema Cantareira com a representação original do SISAGUA comparada com a nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 60 - Cantareira com cenário hidrológico 1992-1994 e demanda SIM 70 m³/s

SISTEMA CANTAREIRA					volume (hm ³)	volume (B)(hm ³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m ³ /s)	Qaten(B) (m ³ /s)	930,00	930,00
out/92	R\$10.760.418,24	R\$10.668.090,77	33,00	33,00	952,92	952,92
nov/92	R\$10.276.574,98	R\$10.048.349,38	32,51	32,51	1004,90	1004,90
dez/92	R\$9.978.067,32	R\$9.544.960,93	30,30	30,29	1052,21	1052,23
jan/93	R\$9.704.750,64	R\$9.216.905,33	29,35	29,35	1092,68	1092,69
fev/93	R\$8.449.528,30	R\$7.933.819,00	28,14	28,23	1197,47	1197,27
mar/93	R\$8.403.242,64	R\$7.456.918,38	24,85	24,85	1279,98	1279,78
abr/93	R\$13.343.377,54	R\$12.375.708,48	26,10	26,12	1343,74	1343,49
mai/93	R\$14.259.846,54	R\$13.423.998,70	27,74	27,75	1378,72	1378,44
jun/93	R\$13.711.213,44	R\$12.869.467,20	27,42	27,43	1415,49	1415,16
jul/93	R\$14.722.315,71	R\$14.044.670,43	29,34	29,34	1414,05	1413,72
ago/93	R\$13.516.540,86	R\$12.412.218,76	25,17	25,18	1418,95	1418,59
set/93	R\$12.993.177,60	R\$11.890.179,07	24,85	24,85	1460,81	1460,45
out/93	R\$9.256.453,44	R\$8.613.238,31	27,80	27,80	1465,79	1465,43
nov/93	R\$9.443.485,44	R\$8.994.981,89	29,53	29,53	1440,73	1440,36
dez/93	R\$9.756.810,96	R\$9.293.426,50	29,53	29,53	1426,08	1425,71
jan/94	R\$9.756.810,96	R\$9.293.426,50	29,53	29,53	1460,44	1460,07
fev/94	R\$8.931.384,00	R\$8.939.176,41	33,00	33,00	1482,00	1482,00
mar/94	R\$9.544.392,00	R\$9.552.719,24	33,00	33,00	1482,00	1482,00
abr/94	R\$9.237.888,00	R\$9.245.947,82	33,00	33,00	1482,00	1482,00
mai/94	R\$12.846.366,00	R\$10.997.540,86	33,00	31,81	1482,00	1482,00
jun/94	R\$14.406.854,40	R\$13.807.608,77	29,90	29,90	1482,00	1482,00
jul/94	R\$14.669.098,50	R\$13.968.149,25	29,15	29,15	1478,11	1478,11
ago/94	R\$14.842.343,67	R\$14.206.215,12	29,75	29,75	1458,15	1458,15
set/94	R\$14.404.055,04	R\$13.799.379,46	29,89	29,89	1426,29	1426,29
MEDIA/SOMA	R\$277.214.996,20	R\$262.597.096,54	29,41	29,37		

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Tendo uma demanda do SIM superior à otimização anterior com dados apresentados na Tabela 57, nesta nova otimização a vazão de retirada do Sistema Cantareira é 16,2% maior, aumento proporcionalmente pouco inferior ao incremento da demanda total do sistema. O Cantareira atende totalmente seu nó de demanda exclusivo e grande parte dos nós que compartilha com outros sistemas produtores. A vazão média afluyente é agora, 26,5% superior a vazão de retirada e tendo a contribuição da elevatória Jaguari Atibainha que operou 7 meses, o nível de armazenamento atingiu sua meta no decimo sétimo mês do período de análise, permanecendo próximo da totalidade de armazenamento até final do período de 24 meses. A vazão efluente reduziu para 4,3 m³/s, 1,3 m³/s acima da mínima do sistema. Os valores

otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Santa Inês e Jaguari/Atibainha. O custo de energia calculado sob a nova representação teve uma menor redução, não linear, em relação aos valores originais obtidos pelo SISAGUA, de 13,5% para 5,3% e esta alteração de resultado na função objetivo 3, como da primeira otimização, não interfere no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com o aumento da vazão de retirada houve um incremento linear de 17% no custo de tratamento que atingiu R\$ 102.200.000,00.

A Tabela 61 apresenta a solução otimizada para o Sistema Guarapiranga com a representação original do SISAGUA comparada com a nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 61 - Guarapiranga com cenário hidrológico 1992-1994 e demanda SIM 70 m³/s

SISTEMA GUARAPIRANGA					volume (hm³)	volume (B)(hm³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m³/s)	Qaten(B) (m³/s)	111,30	111,30
out/92	R\$1.863.352,40	R\$1.846.981,47	12,35	12,35	106,48	106,48
nov/92	R\$1.867.536,00	R\$1.859.728,06	12,84	12,84	116,09	116,09
dez/92	R\$2.225.551,90	R\$2.273.066,85	15,06	15,06	121,43	121,41
jan/93	R\$2.352.087,40	R\$2.434.996,86	16,00	16,00	117,01	117,00
fev/93	R\$2.124.607,70	R\$2.199.498,66	16,00	16,00	133,58	133,57
mar/93	R\$2.352.087,40	R\$2.434.996,86	16,00	16,00	155,67	155,66
abr/93	R\$3.955.651,20	R\$4.028.055,91	16,00	16,00	161,25	161,23
mai/93	R\$3.897.829,00	R\$3.926.086,33	14,59	14,60	159,27	159,24
jun/93	R\$3.801.556,80	R\$3.833.422,40	14,81	14,81	163,52	163,48
jul/93	R\$3.485.952,60	R\$3.448.246,35	11,51	11,51	163,35	163,31
ago/93	R\$4.044.181,70	R\$4.095.904,36	15,68	15,67	156,04	156,04
set/93	R\$3.955.651,20	R\$4.028.055,91	16,00	16,00	171,20	171,20
out/93	R\$1.957.082,40	R\$1.954.114,88	13,05	13,05	171,20	171,20
nov/93	R\$1.670.025,60	R\$1.638.218,91	11,32	11,32	160,39	160,39
dez/93	R\$1.725.435,40	R\$1.692.573,39	11,32	11,32	150,56	150,56
jan/94	R\$1.725.435,40	R\$1.692.573,39	11,32	11,32	156,80	156,80
fev/94	R\$1.504.853,00	R\$1.594.760,29	12,01	12,80	171,20	171,20
mar/94	R\$1.608.139,00	R\$1.704.217,10	12,01	12,80	171,20	171,20
abr/94	R\$1.556.496,00	R\$1.535.025,24	12,01	12,01	171,20	171,20
mai/94	R\$3.343.750,80	R\$3.162.099,59	12,03	12,14	171,20	171,20
jun/94	R\$3.508.531,20	R\$3.488.637,93	12,55	12,55	171,20	171,20
jul/94	R\$3.524.515,80	R\$3.491.325,46	11,80	11,80	171,20	171,20
ago/94	R\$3.460.243,80	R\$3.419.279,36	11,32	11,32	167,42	167,42
set/94	R\$3.349.123,20	R\$3.309.474,27	11,32	11,32	163,10	163,10
MEDIA/SOMA	R\$64.859.676,90	R\$65.091.339,82	13,29	13,36		

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Tendo uma demanda do SIM superior à otimização anterior conforme dados apresentados na Tabela 58, a vazão de retirada do Sistema Guarapiranga é 19,8% maior, com incremento superior ao aumento da demanda total do sistema de abastecimento. O Guarapiranga atende totalmente seu nó de demanda exclusivo e uma parte dos nós que compartilha com outros sistemas produtores. A vazão média afluyente é agora 9,0% inferior a vazão de retirada e tendo a contribuição da elevatórias Taquacetuba que operou por 10 dos 12 meses possíveis e Capivari que operou por 21 meses durante o ciclo da otimização de 24 meses, o nível de armazenamento atingiu sua meta no décimo segundo mês do período de análise, permanecendo próximo ao volume útil máximo até o termino do ciclo de 24 meses . A vazão

efluente reduziu para 0,70 m³/s. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Guarapiranga, Taquacetuba e Capivari. O custo de energia calculado sob a nova representação foi superior em 0,36% em relação aos valores originais obtidos pelo SISAGUA. A alteração insignificativa no resultado da função objetivo 3, como da primeira otimização, os valores não interferem no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com o aumento da vazão de retirada houve um incremento linear de 18,5% no custo de tratamento que atingiu R\$ 196.500.000,00.

A Tabela 62 apresenta a solução otimizada para o Sistema Alto Tietê com a representação original do SISAGUA comparada com a nova representação do custo de energia elétrica por associação de bombas (B).

Tabela 62 - Alto Tietê com cenário hidrológico 1992-1994 e demanda SIM 70 m³/s

SISTEMA ALTO TIETÊ					volume (hm ³)	volume (B)(hm ³)
mês/ano	custo energia	custo energia (B)	Qatend (m ³ /s)	Qaten(B) (m ³ /s)	211,40	211,40
out/92	R\$6.649.474,00	R\$6.199.920,82	10,50	10,50	246,11	246,05
nov/92	R\$6.435.936,00	R\$6.000.819,56	10,50	10,50	293,96	293,85
dez/92	R\$6.649.474,00	R\$6.199.920,82	10,50	10,50	343,39	343,23
jan/93	R\$6.649.474,00	R\$6.199.920,82	10,50	10,50	400,59	400,38
fev/93	R\$6.161.763,88	R\$5.752.277,45	11,71	11,62	442,32	442,27
mar/93	R\$7.288.177,00	R\$6.870.246,14	15,00	15,00	493,09	492,99
abr/93	R\$4.908.462,62	R\$4.702.001,78	13,75	13,73	507,89	507,80
mai/93	R\$5.039.243,48	R\$4.824.960,48	13,52	13,51	521,11	521,01
jun/93	R\$4.891.153,25	R\$4.684.150,04	13,62	13,60	528,99	528,88
jul/93	R\$5.248.880,00	R\$5.047.540,07	15,00	15,00	523,25	523,09
ago/93	R\$5.248.880,00	R\$5.047.540,07	15,00	15,00	517,52	517,31
set/93	R\$5.080.320,00	R\$4.885.445,80	15,00	15,00	537,38	537,11
out/93	R\$7.288.177,00	R\$6.870.246,14	15,00	15,00	559,77	559,45
nov/93	R\$3.203.660,16	R\$2.838.531,77	15,00	15,00	560,15	560,15
dez/93	R\$2.411.271,20	R\$2.219.945,68	15,00	15,00	560,15	560,15
jan/94	R\$2.129.010,00	R\$2.051.917,25	15,00	15,00	560,15	560,15
fev/94	R\$1.992.270,00	R\$1.811.457,20	15,00	14,21	560,15	560,15
mar/94	R\$2.129.010,00	R\$1.935.787,07	15,00	14,21	560,15	560,15
abr/94	R\$2.060.640,00	R\$1.986.022,97	15,00	15,00	560,15	560,15
mai/94	R\$2.219.740,64	R\$2.930.311,40	12,96	14,04	560,15	560,15
jun/94	R\$3.524.705,28	R\$3.110.667,96	15,00	15,00	560,15	560,15
jul/94	R\$5.248.880,00	R\$5.047.540,07	15,00	15,00	559,78	559,72
ago/94	R\$5.248.880,00	R\$5.047.540,07	15,00	15,00	553,78	553,67
set/94	R\$5.080.320,00	R\$4.885.445,80	15,00	15,00	547,45	547,29
MEDIA/SOMA	R\$112.787.802,52	R\$107.150.157,23	13,86	13,83		

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Tendo uma demanda do SIM superior à otimização anterior com dados apresentados na Tabela 59, nesta nova otimização a vazão de retirada do Sistema Alto Tietê é 19,3% maior, aumento proporcionalmente um pouco superior ao incremento da demanda total do sistema. O Alto Tietê atende totalmente seu nó de demanda exclusivo e boa parte dos nós que compartilha com outros sistemas produtores. A vazão média afluyente é agora, 16,9% superior à vazão de retirada e tendo a contribuição da elevatória Guaió que operou por sete meses de doze possíveis, da Rio Pequeno que operou por dezessete meses e Biritiba Mirim que operou por vinte e um meses, o nível de armazenamento atingiu sua meta no décimo quarto mês do período de análise, permanecendo próximo da sua totalidade até final do período de vinte e quatro meses. A vazão efluente reduziu para 2,40 m³/s, 0,96 m³/s acima da mínima do sistema. Os valores otimizados de custo de energia são a somatória das elevatórias Taiaçupeba, Guaió, Rio Pequeno e Biritiba Mirim. O custo de energia calculado sob a nova representação teve uma maior redução, não linear, em relação aos valores originais obtidos pelo SISAGUA, de 0,12% para 5,0% e esta alteração de resultado na função objetivo 3, como na primeira otimização, não interfere no resultado de otimização das outras duas funções objetivo. Com o aumento da vazão de retirada houve um incremento de 21%, não linear devido à alta diferença de custo específico entre período seco e úmido no tratamento. O custo total de tratamento da água foi de R\$ 135.800.000,00.

Os resultados obtidos das otimizações realizadas pelo SISAGUA demonstraram que a variação do consumo de energia quando representada por associação de bombas é diferente da representação original que é uma relação linear diretamente proporcional à vazão de operatória da estação elevatória. Com isso, será apresentado o comportamento das elevatórias São Lourenço, Guarapiranga, e Biritiba Mirim quando operam sob duas condições de vazão de recalque.

A Estação Elevatória São Lourenço, com dados técnicos apresentados na Tabela 41, ao transferir água para a ETA Vargem Grande, abastece reservatório de água bruta com capacidade de armazenamento de 75.000 m³, esta reservação é suficiente para abastecer a ETA por 4 horas com vazão de 4,7 m³/s, permitindo que o SISAGUA faça a otimização da elevatória sem restrição de uma vazão mínima no segmento de ponta.

Para analisar o comportamento do consumo de energia, por associação de bombas, quando otimizado pelo SISAGUA, foi utilizado o cenário hidrológico 1950-1952, com as demandas SIM de 59 m³/s e 70 m³/s.

A Figura 25 mostra a operação otimizada por associação de bombas comparada ao sistema original do SISAGUA de custo por volume recalcado.

Figura 25 - Solução SISAGUA cenário hidrológico 1950-1952, demanda SIM 59 m³/s

Fonte: elaboração do autor, com dados do SISAGUA

O gráfico mostra que quando se calcula o custo de energia por volume transferido, forma original do SISAGUA, a potência média de 11.973,5 kW é suficiente para transferir uma vazão média de 2,66 m³/s por 24 meses. O custo específico de recalque é calculado sobre capacidade nominal da elevatória, vide Tabela 42. Sob essas condições o custo de energia para o ciclo de 24 meses importa em R\$ 110.197.227,82, para um consumo estimado de 209,9 GWh.

Quando a otimização é feita por associação de bombas, nota-se que é possível ter mais de uma relação de consumo de energia elétrica por volume aduzido, vide Tabela 41. Neste caso, a solução apresentada pelo SISAGUA admite que a elevatória São Lourenço opere por 41,9 % do tempo com apenas uma bomba, arranjo este com melhor desempenho de consumo específico (1,1332 kWh/m³), enquanto que no pior desempenho de consumo específico

(1,3221 kWh/m³), com 04 bombas operando simultaneamente, a operação neste arranjo foi de apenas 5 % do período de 24 meses de estudo. Com relação ao segmento de ponta, que no gráfico da Figura 25 é representando nos últimos 9,2 % do tempo, a capacidade de armazenamento de água bruta e a vazão média de retirada da estação permitiram que a elevatória não operasse em tal período, beneficiando-se por não consumir energia elétrica em horário com preços mais elevados, vide Tabela 42, tal medida não trouxe restrições ao abastecimento do SIM. Diante dessa otimização escalonada por períodos de operação em cada associação de bombas e podendo optar por uma operação reduzida em horários onde a tarifa de energia elétrica é mais alta, o consumo de energia para o ciclo de 24 meses foi de 199,0 GWh, com custo estimado em R\$ 95.530.914,11. Neste caso, percebe-se que a representação por arranjo de bombas tem um consumo de energia 5,2% inferior à representação original do SISAGUA e 13,3% menor no custo de energia elétrica.

Considerando o mesmo cenário hidrológico de 1950-1952, com incremento de 18% da demanda SIM, com 70 m³/s de vazão, a Figura 26 faz a comparação da otimização por associação de bombas com a representação diretamente proporcional ao volume transferido.

Figura 26 - Solução SISAGUA cenário hidrológico 1950-1952, demanda SIM 70 m³/s

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Com a elevação da vazão média de operação da elevatória de 2,66 m³/s para 3,49 m³/s, a forma original do SISAGUA de apurar o custo de energia elétrica otimiza uma potência média de 15.709,7 kW, com um consumo de energia da ordem de 275,5 GWh, que importa num custo de R\$ 144.664.308,16. Percebe-se que o incremento de 31,20% na vazão de operação aumenta os valores de consumo e custo de energia elétrica, esta variação do consumo e custo de energia é linear na representação original do SISAGUA.

Ao analisar o comportamento das mesmas variáveis na nova representação dos custos de energia, nota-se que com o incremento na vazão média de operação, o consumo de energia aumenta para 269,9 GWh, elevação de 35,6% e no custo o mesmo incremento porcentual, importando em R\$ 129.537.722,45. Com a elevação da vazão de operação, temos um aumento não linear de perda de carga nas adutoras, sendo necessário uma maior potência elétrica para recalque do volume a ser transferido.

A Estação Elevatória de Água Bruta Guarapiranga, com dados técnicos apresentados na Tabela 12, faz captação de água diretamente do manancial para atender à ETA ABV, sem a presença de reservatório intermediário. A ausência desta possibilidade de armazenamento não permite que se faça minimização na operação da estação no segmento de ponta, com tarifas de energia elétrica mais altas. Apesar disso, após o processo de tratamento de água existe reservatório de capacidade útil de 20.000 m³ que permite que se use na otimização uma redução de 2 m³/s na vazão de operação no segmento de ponta. Essa restrição foi inserida nas condições de operação da estação elevatória.

Para analisar o comportamento do consumo de energia, por associação de bombas, quando otimizado pelo SISAGUA, foi utilizado o cenário hidrológico 1992-1994, com as demandas SIM de 59 m³/s e 70 m³/s.

Figura 27 - Solução SISAGUA cenário hidrológico 1992-1994, demanda SIM 59 m³/s

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

O gráfico mostra que quando se calcula o custo de energia por volume transferido, forma original do SISAGUA, a potência média de 9.124,6 kW é suficiente para transferir uma vazão de 11,07 m³/s por 24 meses de otimização. O custo específico de recalque é calculado sobre capacidade nominal da elevatória, vide Tabela 13. Sob essas condições o custo de energia para o ciclo de 24 meses importa em R\$ 34.894.966,10, para um consumo estimado de 159,9 GWh.

Quando a otimização é feita por associação de bombas, nota-se que é possível ter mais de uma relação de consumo de energia elétrica por volume aduzido, vide Tabela 12. Neste caso, a solução apresentada pelo SISAGUA admite que a elevatória Guarapiranga opere por 48,9% do tempo com 03 bombas simultaneamente, arranjo este com melhor desempenho de consumo específico (0,2178 kWh/m³), enquanto que no pior desempenho de consumo específico (0,2379 kWh/m³), com 05 bombas operando simultaneamente, a operação neste

arranjo foi de apenas 15,4 % do ciclo de 24 meses de estudo. Com relação ao segmento de ponta, que no gráfico da Figura 27 é representado nos últimos 9,2% do período, a pequena capacidade de armazenamento de água tratada e a vazão média de retirada da estação fizeram com que a elevatória operasse na ponta por 6,3% do tempo com 03 bombas em simultaneidade, 0,9% com 04 bombas e 1,1% com 05 bombas, atendendo a restrição de redução máxima de 2 m³/s da vazão de operação no segmento de ponta. Diante dessa otimização escalonada por períodos de operação em cada associação de bombas e necessidade de operar na ponta onde a tarifa de energia elétrica é mais alta, o consumo de energia para o ciclo de 24 meses foi de 159,8 GWh, com custo estimado em R\$ 34.651.280,58. Neste caso, percebe-se que a representação por arranjo de bombas tem um consumo de energia praticamente igual à representação original do SISAGUA e o mesmo ocorre no custo de energia elétrica.

Considerando o mesmo cenário hidrológico de 1992-1994, com incremento de 18% da demanda SIM, com 70 m³/s de vazão, a Figura 28 fará a comparação da otimização por associação de bombas com a representação diretamente proporcional ao volume transferido.

Figura 28 - Solução SISAGUA cenário hidrológico 1992-1994, demanda SIM 70 m³/s

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Com a elevação da vazão média de operação da elevatória de 11,07 m³/s para 13,29 m³/s, a forma original do SISAGUA de apurar o custo de energia elétrica otimiza uma potência média de 10.957,3 kW, com um consumo de energia da ordem de 192,1 GWh, que importa num custo de R\$ 41.930.881,40. Percebe-se que o incremento de 20,0% na vazão de operação aumenta os valores de consumo e custo de energia elétrica, esta variação do consumo e custo de energia é linear na representação original do SISAGUA.

Ao analisar o comportamento das mesmas variáveis na nova representação dos custos de energia, nota-se que com o incremento na vazão média de operação, o consumo de energia aumenta para 195,3 GWh, elevação de 22,2% e no custo o mesmo incremento percentual de 22,4%, importando em R\$ 42.413.866,29. Com a elevação da vazão de operação, temos um aumento não linear de perda de carga nas adutoras, sendo necessário uma maior potência elétrica para recalque do volume a ser transferido. Percebe-se que nesta elevatória, o custo de energia na

representação por associação de bombas é levemente superior à representação original do SISAGUA.

A Estação Elevatória Biritiba Mirim, com dados técnicos apresentados na Tabela 21, pertence ao Sistema Produtor de Água Alto Tietê e sua função é auxiliar na regularização dos reservatórios. Não tem uma operação ligada diretamente ao abastecimento de água, mas sim operar quando as vazões naturais afluentes do sistema produtor não são suficientes para atingir o volume meta do reservatório. Diante dessa regra operacional, não é necessário impor restrições de operação no segmento de ponta, permitindo ao SISAGUA realizar a otimização sem operação mínima no referido período.

Para analisar o comportamento do consumo de energia, por associação de bombas, quando otimizado pelo SISAGUA, foi utilizado o cenário hidrológico 1982-1984, com as demandas SIM de 59 m³/s e 70 m³/s.

Figura 29 - Solução SISAGUA cenário hidrológico 1982-1984, demanda SIM 59 m³/s

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Diante do cenário hidrológico de 1982-1984, favorável com vazão afluente média 33% acima da MLT e demanda SIM 59 m³/s, a otimização da elevatória, apresentada pelo SISAGUA, determinou a operação por 26,3% do ciclo de 24 meses, na representação por associação de bombas e de 29,1%, na condição de representação original do SISAGUA.

Para atender a demanda média de vazão de 5,93 m³/s, a potência média de 2.959,9 kW é suficiente na forma original de otimização do SISAGUA e para a demanda de 2,0 m³/s, uma potência média de 1.032,7 kW. Sob essas condições o custo de energia para o ciclo de estudo importa em R\$ 7.313.906,52, para um consumo estimado de 12,3 GWh.

Quando a otimização é feita por associação de bombas, nota-se que é possível ter mais de uma relação de consumo de energia elétrica por volume aduzido, vide Tabela 21. Neste caso, a

solução apresentada pelo SISAGUA para atender os 02 níveis de vazão de operação, admite que a elevatória Biritiba Mirim opere por 6,7% do tempo com apenas uma bomba, arranjo este com melhor desempenho de consumo específico (0,1124 kWh/m³), enquanto que no pior desempenho de consumo específico (0,1454 kWh/m³), com 05 bombas operando simultaneamente, a operação neste arranjo foi de 13 % do ciclo de 24 meses de estudo, lembrando que a elevatório operou na sua totalidade por apenas 26,1% do tempo. Com relação ao segmento de ponta, que no gráfico da Figura 29 é representado nos últimos 9,2% do período, a otimização realizada pelo SISAGUA evitou a operação em tal período. Diante dessa otimização escalonada por períodos de operação em cada associação de bombas e podendo optar por uma operação reduzida em horários onde a tarifa de energia elétrica é mais alta, o consumo de energia para o ciclo de 24 meses foi de 12,1 GWh, com custo estimado em R\$ 5.444.300,52. Neste caso, percebe-se que a representação por arranjo de bombas tem um consumo de energia 1,0% inferior à representação original do SISAGUA e 25,5% menor no custo de energia elétrica. A diferença em relação ao custo de energia é devido à ausência de operação na ponta na representação por arranjo de bombas e a diferença de 4,5 vezes entre a o preço da tarifa de ponta em relação à fora de ponta, na distribuidora EDP.

Considerando o mesmo cenário hidrológico de 1982-1984, com incremento de 18% da demanda SIM, com 70 m³/s de vazão, a Figura 30 mostrará a comparação da otimização por associação de bombas com a representação diretamente proporcional ao volume transferido.

Figura 30 - Solução SISAGUA cenário hidrológico 1982-1984, demanda SIM 70 m³/s

Fonte: elaboração do autor com dados do SISAGUA

Com a elevação da vazão média de operação da elevatória de 5,73 m³/s para 6,50 m³/s e de 2,0 m³/s para 1,90 m³/s, a forma original do SISAGUA de apurar o custo de energia elétrica otimiza uma potência média de 3.356,4 kW para atender a maior vazão e 829,6 kW para atender a menor, a elevatória nas condições originais de otimização do SISAGUA operou por 45,8% do período de 24 meses do estudo. Nessas condições o consumo de energia foi da ordem de 15,8 GWh, que importa num custo de R\$ 9.367.727,78. Percebe-se que o incremento de 13,4% na vazão de operação e de 57,4% no tempo de operação da elevatória

aumentaram os valores de consumo em 28,5% e o custo de energia elétrica na mesma proporção, confirmando que a variação do consumo e custo de energia é linear na representação original do SISAGUA.

Ao analisar o comportamento das mesmas variáveis na nova representação dos custos de energia, nota-se que com o incremento na vazão média de operação e aumento no tempo de operação da elevatória, o consumo de energia aumenta para 15,6 GWh, elevação de 28,9% e no custo de energia elétrica mesmo incremento porcentual, importando em R\$ 7.031.708,85.

7- CONCLUSÕES

O custo específico de tratamento é inversamente proporcional à qualidade da água bruta nos mananciais, notadamente quando identificamos alta proliferação de cianobactérias, sendo necessárias medidas corretivas para eliminar odor e gosto na água. As ETAs com maior capacidade de produção de água têm um custo específico inferior às estações de menor porte e ainda temos uma pequena dependência dos custos de tratamento em relação ao período do ano. O período úmido tem um custo específico pouco superior ao período seco. A preservação dos mananciais evitando a presença de altas taxas de concentração de nitrogênio e fósforo e consequentemente a proliferação de algas é determinante para minimizar os custos do tratamento de água. O custo específico diretamente proporcional ao volume tratado num determinado período é adequado para a representação dos custos de tratamento, não sendo necessário desenvolver uma nova representação dos custos de tratamento da função objetivo 3 do SISAGUA. No entanto, o conhecimento dos dados de qualidade da água bruta e capacidade de produção são importantes fatores para se mensurar com precisão a relação (R\$/m³) de custos de tratamento. O SISAGUA aceita o cadastramento de custos específicos diferenciados por intervalo de tempo o que é suficiente para a representação dos custos de tratamento de água. Neste estudo de caso, cada ETA teve mais de um custo específico determinado pela capacidade de produção, ciclicamente pelo período do ano (úmido ou seco) e qualidade da água bruta nos mananciais, com dados obtidos de qualidade oriundos do aplicativo InfoÁGUAS.

No SISAGUA, o custo específico de energia elétrica é tratado de forma similar ao do tratamento da água numa relação linear de (R\$/m³) do volume recalado numa estação elevatória num determinado período. O custo específico é calculado pela relação de energia consumida para atender a vazão nominal da estação, multiplicado pela tarifa média de energia. Tendo a vazão de retirada otimizada no SISAGUA o custo de energia é linearmente

proporcional ao volume transferido pela estação elevatória num determinado período. Quando a elevatória tem ao longo de um determinado período de estudo mais de um valor nominal de vazão de operação, é possível cadastrar mais de um custo específico, calculado em função das diversas capacidades nominais de operação.

Os resultados obtidos, nesta pesquisa, demonstraram que o consumo de energia elétrica de uma determinada estação elevatória deixa de ser constante por unidade de volume quando submetido a mais de um nível de vazão de operação. Isto porque tem-se um consumo específico diferente a cada associação de bombas. Quando opera-se com uma maior quantidade de bombas em simultaneidade, as perdas de carga nas adutoras aumentam, fazendo com que o consumo específico de energia elétrica tenha um incremento com características não lineares.

Notou-se também, que quando utiliza-se a tarifa média de energia elétrica para calcular o custo de energia elétrica, na forma original do SISAGUA, não é possível avaliar se a estação elevatória pôde minimizar sua operação no segmento de ponta, período que a tarifa de energia elétrica é mais cara que nas 21 horas restantes do dia.

Esta pesquisa desenvolveu uma nova representação dos custos de energia com base na associação de bombas e sendo possível identificar um consumo específico para cada arranjo de bombas de uma estação elevatória. A nova formulação é linear por partes, desagregando a vazão por frações de tempo com diferentes arranjos do sistema de bombeamento e, para cada um deles, nos horários de tarifas diferenciadas de energia. Nesta nova forma de representar o custo de energia elétrica na função objetivo 3 do SISAGUA, é possível otimizar o custo de energia elétrica no segmento de ponta, pois as tarifas são cadastradas individualmente nos segmentos de ponta e fora de ponta.

Com as alterações efetuadas na representação do custo de energia elétrica, realizadas diretamente no GAMS, o SIM da RMSP foi otimizado em três cenários hidrológicos distintos ocorridos nos biênios 1950-1952, 1982-1984 e 1992-1994 e para cada um destes cenários, duas demandas de consumo, 59 m³/s e 70 m³/s. Para avaliar os possíveis impactos nas otimizações realizada pelo SISAGUA, com a alteração da representação da função objetivo 3, utiliza-se os sistemas produtores de água Cantareira, Guarapiranga e Alto Tietê, por serem responsáveis por mais de 80% da demanda de abastecimento do SIM. Os demais sistemas produtores também fizeram parte da otimização realizada pelo SISAGUA, mas não entraram na discussão dos resultados.

As otimizações realizadas no SISAGUA nos três cenários hidrológicos, com demanda SIM de 59 m³/s mostraram uma diferença média de 5,28% entre a representação original comparada com a nova representação por associação de bombas. Com a demanda de 70 m³/s essa diferença reduz para 2,45%. Esses resultados mostram que existe uma diferença na representação dos custos de energia, mas é menos significativa quando a demanda do sistema de abastecimento atinge valores próximos a sua capacidade nominal. Diante de diferenças menores que 10% na forma de representar o custo de energia elétrica na função objetivo 3 do SISAGUA, as otimizações realizadas demonstram insignificantes alterações na otimização das funções objetivo de minimização do déficit de atendimento aos nós de consumo e maximizar os volumes disponíveis nos reservatórios ao longo do horizonte de estudo.

Quando se avalia as diferenças na representação por bombas comparada à representação original do SISAGUA de forma individualizada nota-se que os valores podem ser mais significativos e trazer contribuições adicionais à gestão de energia elétrica dos sistemas de abastecimento de água.

A estação São Lourenço quando submetida a uma vazão de operação de 2,66 m³/s o custo de energia representado por associação de bombas é 13,5% inferior à representação original do SISAGUA. A nova representação permite que com esta vazão e condições operacionais a estação não opere no segmento de ponta, representando com maior precisão o custo de energia elétrica nos 24 meses utilizados como horizonte de planejamento. Quando a vazão de operação tem um incremento de 31% nota-se que o incremento no consumo de energia resulta proporcionalmente superior ao incremento de vazão, devido à elevação das perdas da carga nas adutoras.

A estação Guarapiranga tem restrições de operação no segmento de ponta, não podendo ter significativa redução na operação neste horário. Devido a essas restrições operacionais o custo de energia não apresenta significativas diferenças entre a representação por associação de bombas e a original do SISAGUA. Quando submetida a uma vazão de operação superior, o incremento no custo de energia elétrica mostra aumento proporcionalmente superior à vazão, devido à elevação das perdas de carga nas adutoras.

Com relação à elevatória Biritiba Mirim, nota-se uma diferença de 25,5% na representação dos custos de energia representados por arranjo de bombas quando comparados pela representação original, principalmente em função dos altos custos de tarifa de energia elétrica no segmento de ponta na distribuidora EDP.

Esta análise individualizada das estações elevatórias demonstra que o cálculo do custo de energia traz os seguintes benefícios, que a representação original não permite avaliar:

- ✓ Otimizar a operação das elevatórias nos segmentos de ponta e fora de ponta;
- ✓ Avaliar de forma consistente a escolha da opção tarifária a ser formalizada no contrato de fornecimento de energia elétrica;
- ✓ Avaliar os benefícios de gestão da demanda de consumo do sistema de forma evitar a elevação do consumo de energia elétrica em situações de altas perdas de carga nas adutoras.

8- DESENVOLVIMENTO DE PESQUISAS FUTURAS

A pesquisa desenvolvida nesta dissertação possibilitou avanços na otimização e representação dos custos de energia. No entanto, existem oportunidades de avanços que podem ser alcançados em novas pesquisas científicas:

- ✓ Otimizar a operação de elevatórias de transposição entre mananciais que mesmo em cenários hidrológicos favoráveis operam de forma intensa, para atender a função objetivo de maximização dos níveis de armazenamento e neste estudo de caso trouxe como consequência de alto extravazamento dos reservatórios;
- ✓ Inserir na otimização de associação de bombas: as curvas de rendimento da bomba, do motor e a curva de carga do sistema, com isso o SISAGUA teria condições de fazer uma otimização mais apurada do sistema de abastecimento;
- ✓ A variação de velocidade de rotação do motor, feita por inversores de frequência, pode trazer redução no consumo de energia elétrica e maior controle da vazão e pressão de recalque e esta variável de rotação pode ser incrementado à curva da bomba e motor, nas elevatórias providas de inversores de frequência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRACEEL - Associação Brasileira de Comercializadores de Energia. Tudo o que você precisa saber sobre a reforma do setor elétrico a energia do futuro é livre. p.7 Brasília – DF. 2018.

ABRACEEL - Associação Brasileira de Comercializadores de Energia. Brasil é o 55. Em liberdade de escolha do fornecedor de energia. Disponível em:
http://www.abraceel.com.br/zpublisher/materias/clipping_txtn.asp?id=23032, Acesso em 27/07/2019.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Conjuntura Brasil Recursos Hídricos 2017**. p. 71, Brasília, 2017

ANA.a – Agência Nacional de Águas. Portal da Qualidade das Águas. Disponível em http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx#_ftn1, acesso em 28/07/2019.

ANA – Agência Nacional de Águas. Resolução n. 1.931, datada de 30/10/2017. Disponível em <http://agevap.org.br/gtaoh/resolucao-ana-1931-2017.pdf> , acesso em 30/07/2019.

ANA/DAEE – Resolução Conjunta n 925/2017, datada de 29/05/2017. Disponível em <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2017/925-2017.pdf>, acessado em 28/07/2019.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Composição da tarifa de energia elétrica. 2015. Disponível em http://www.aneel.gov.br/entendendo-a-tarifa/-/asset_publisher/uQ5pCGhnyj0y/content/composicao-da-tarifa/654800?inheritRedirect=false. Acesso em 24/06/2019.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa 414, de 09/09/2010. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>. Acesso em 20/07/2019.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. REN Resolução Normativa 464/2011. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2011464.pdf>, acesso em 18/03/2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Nota Técnica 29/2015/SGT/ANEEL. Disponível em http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/007/documento/nt29_rte_simplificada.pdf, acesso em 18/03/2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. REN Resolução Normativa 482/2012. Disponível <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> , acesso em 18/03/2018.

BARROS, M.T.L; ZAMBON, R.C.; DELGADO, D.M.; BARBOSA, P.S.F; YEH, W.W.-G. 2008. Planning and Operation of Large-Scale Water Distribution System with Preemptive Priorities. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 134, n. 3, p. 247-256, 2008.

BHAVE, P. R. Extended Period simulation of water systems-direction solution. p. 1146 – 1159. **Journal of Environmental Engineering v. 114 n. 5.** October 1988.

BRASIL. Decreto-lei 1383/74, de 26/12/1974. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/1965-1988/Del1383.htm. Acesso em 20/07/2019.

BRASIL. Lei 5.655/1971, de 20/05/1971. Disponível em <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1970-1979/lei-5655-20-maio-1971-357738-publicacaooriginal-1-pl.html>. Acesso em 24/06/2019.

BRASIL. Lei 8.631/93, de 04/03/1993. Disponível em <https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/104155/lei-8631-93>. Acesso em 20/07/2019.

BRASIL. Lei 10.848/2004, de 15/03/2004. Disponível em <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2004/lei-10848-15-marco-2004-531234-norma-pl.html>. Acesso em 24/06/2019.

BRASIL. Medida Provisória n. 579/2012, de 11/09/2012. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Mpv/579.htm. Acesso em 20/07/2019.

BRENTAN, B. MELO. **PSO Com Refinamento Para Definição de Manobras Visando à Redução do Custo Energético no Bombeamento de Água.** 2014. p. 104 Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

BRITO, E. H. G. **Tarifas de distribuição de energia elétrica no Brasil: aperfeiçoamento da metodologia tarifária a partir de parâmetros de continuidade do serviço, sustentabilidade econômico-financeira e simplicidade regulatória.** 2017. p. 36, Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo

CAPELO NETO, J.; NEYCOMBE, G. Oxidação de cianobactérias e seus metabólitos em sistemas de tratamento de água: o estado da arte. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 5, Rio de Janeiro, set-out/2017.

CARRIJO, I.B. **Extração de Regras Operacionais Ótimas de Sistemas de Distribuição de Água através de Algoritmos Genéticos Multiobjetivo e Aprendizado de Máquina**. 2004. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

CARVALHO, M. A.; MELLO JUNIOR, A. V.; SHARDONG, A. ; PORTO, R. L. L **Sistema de Suporte de Apoio à Decisão para alocação de água em irrigação**. *Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 1, p. 10-17, 2009.

CASINI, M. Harvesting energy from in pipe hydro systems at urban and building scale. **International Journal of Smart Grid and Clean Energy**. Set/2015

CERON, L. C. O Custo da água: Do esgoto às torneiras. **Revista TAE**. Ago/2012. Disponível em <http://www.revistatae.com.br/4586-noticias/>, acesso em 23/06/2019.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **InfoÁGUAS**. Disponível em <http://cetesb.sp.gov.br/infoaguas/>, acesso em 01/06/2019.

CHANDRAMOULI, V.; RAMAN, H.; Multireservoir Modeling with Dynamic Programming and Neural Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 127, n. 2, p. 89-98, 2001.

CHEN, J. J.; YEH, H. H. The mechanisms of potassium permanganate on algae removal. **Water Research**, v. 39, p. 4420-4428, 2005.

COLOMBO, A. F.; KARNEY, B. W. Energy and Costs of Leaky Pipes: Toward Comprehensive Picture. 2002. 441-450 p. **Journal of Water Resources Planning and Management**. vol. 128

COLORADO STATE UNIVERSITY. Stochastic Analysis Modeling and Simulation. 2007. Disponível em: <http://www.sams.colostate.edu/>. Visualizado em 28/07/2019.

COMGAS Tarifas de gás natural canalizado industrial homologadas em 2018. Disponível em: <https://www.comgas.com.br/tarifas/industrial/>, acessado em 31/07/2019.

CPFL Piratininga. Tarifas de energia elétrica homologadas em 2018. Disponível em: <https://www.cpflempresas.com.br/institucional/tarifas.aspx?emp=CPFL>, acessado em 31/07/2019.

CUNHA, A. A. R. **Otimização energética em tempo real da operação de sistemas de abastecimento de água**. 2009. p.6. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica. Sistema Alto Tietê, disponível em: http://www.daee.sp.gov.br/index.php?option=com_content&id=853:barragens-e-sistema-produtor-alto-tiete, visualizado em 31/03/2019

DAVIS, A. L.; JEPPSON R. W. Developing a computer program for distribution system analysis. p. 236-241 **Journal of the American Water Works Association**. May/1979

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água. volume 1, p. 123, LDibe Editora, 2008

DROSTE, R. L. Theory and practice of water and wastewater treatment. **John Wiley & Sons, Inc**, p. 800, 1997.

EDP São Paulo. Tarifas de energia elétrica homologadas em 2018. Disponível em <http://www.edp.com.br/distribuicao-sp/saiba-mais/informativos/tabela-de-fornecimento-de-media-e-alta-tensao>, acessado em 30/07/2019.

ELEKTRO. Tarifas de energia elétrica homologadas em 2018. Disponível em <https://www.elektro.com.br/sua-casa/tarifas-taxas-e-tributos>, acessado em 30/07/2019.

ENEL São Paulo. Tarifas de energia elétrica homologadas em 2018. Disponível em <https://www.eneldistribuicaosp.com.br/corporativo-poder-publico/tarifa-de-energia-eletrica>, acessado em 30/07/2019.

EPE -Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017, ano base 2016**. p.52-53,86. Rio de Janeiro, 2017.

EurEau-The European Federation of Nation Water Services, **Europe's water in figures**. p. 15, Bruxelas – Bélgica, 2017.

GRYGIER, J.C.; STENDINGER, J.R. SPIGOT, A Synthetic Streamflow Generation Software Package, technical description, version 2.5, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, 1990.

HAMBERG, D.; OSTERMEIER, A. Schematic Models for distribution system design. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v.114. p.120-140.march/1988.

HENDERSON, R.; PARSONS, S. A.; JEFFERSON, B. *The impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae*. **Water Research**, v. 42, p. 1827-1845, 2008.

HERNANDEZ, V.; MARTINEZ, F.; VIDAL, A. M.; ALONSO, J. M.; ALVARRUIZ, F.; GUERRERO, D.; RUIZ, P. A.; VERCHER, J. HIPERWATER: A high performance computing EPANET-Based demonstrator for water network simulation and leakage minimization. 1999. 141-153 p. **Water Industry Systems: modeling and optimization applications**. Volume 1. England.

ITO, K.; XU, Z. X.; JINNO, K.; KOJIRI, T.; KAWAMURA, A. Decision Support System for Surface Water Planning in River Basins. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 127, n. 4, p. 272-276, 2001.

LABADIE, J.W. Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art-Review. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 130, n. 2, p. 93-111,2004.

LABADIE, J.W.; SULLIVAN, C.H.; Computerized Decision Support Systems for Water Managers. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 112, n. 3, p. 299-307, 1986.

LAMBERT, A.; THORNTON, J. **Avaliação de perdas reais**. São Paulo: Consultoria à SABESP, p. 67. 2002.

LANE, W.L.; FREVERT, D.K. Applied Stochastic Techniques, personal computer version 5.2, users manual, Bureau of Reclamation, U.S. Dept. of Interior, Denver, Colorado, 1990.

LOUCKS, D.P.; BEEK, E.V. Water Resources Systems Planning and Management. UNESCO, p. 83-84, 135-137, 2005.

MA, M; LIU, R.; LIU, H.; QU, J.; JEFFERSON, W. *Effect of moderate pre-oxidation on the removal of pre-chlorination on microcystis aeruginosa removal by alum coagulation:*

Significance of the released intracellular organic matter. Separation and Purification Technology, v.86, p.19-25, 2012a.

MA, M; LIU, R.; LIU, H.; QU, J.; *Effect of moderate pre-oxidation on the removal of microcystis aeruginosa by KMnO₄-Fe(II) process: significance of the in-situ formed Fe(III).* **Water Research**, v.46, p.73-81, 2012b.

MARINS J. C.; CHANG A. I. C.; ZAMBON R. C.; YEH W. Facing the drought and the new water supply planning challenges in the metropolitan region of São Paulo. **World Environmental and Water Resources Congress**. 2019. Disponível em <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784482339.012>, acessado em 31/07/2019.

MME – Ministério de Minas e Energia. Portaria n. 514, de 27/12/2018. Disponível em <https://www.abragel.org.br/co-informacoes-sobre-os-novos-requisitos-de-demanda-para-consumidores-livres-portaria-mme-no-514-2018/>, acessado em 30/07/2019.

MS – Ministério da Saúde. Portaria 2.914, de 12/12/2011. Disponível em http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html, acessado em 30/07/2019.

MS – Ministério da Saúde. **Norma de Qualidade da Água para Consumo Humano**. Portaria n. 518/2004, de 25/03/2004. p. 7. Brasília, 2004.

OBRADOVIC, D. Modelling of Demand and losses in real-life water distribution systems. 2000. 131-139 p. **Urban Water**, vol. 2

OLIVEIRA, R.; LOUCKS, D. P. Operation rules for multireservoir systems. **Water Resources Research**. v. 33, n. 4, p. 839-852, 1997.

POOLE, A. D.; POOLE, J. B. N. Instituto Nacional de Eficiência Energética INEE – Acompanhamento dos preços da eletricidade no Brasil. p.16, 18. Rio de Janeiro-RJ, 2001

PORTAL BRASIL – Cotação dólar 1994 – 2017. Disponível em http://www.portalbrasil.net/indices_dolar.htm, acesso em 18/03/2018.

PORTAL BRASIL – Cotação dólar 1996 – 2006. Disponível em

PORTO, R.L.L.; AZEVEDO L.G.T. Sistema de suporte à decisão de recursos hídricos. In: Porto R.L.L. Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1997. cap. 2. p. 43-95.

PORTO, R.L.L.; ROBERTO A.N.; SCHARDONG, A.; MELLO JUNIOR, A.V. Sistema de Suporte de suporte à decisão para análise de sistemas de recursos hídricos. In: R.C.V. Métodos Numéricos em Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH. 2003. cap 2. p. 93-240.

Prefeitura São Paulo. Dados Demográficos. Disponível em https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/subprefeituras/subprefeituras/dados_demo_graficos/index.php?p=12758. Acessado em 20/07/2019.

RAHAL, H. Water distribution network steady state simulation AQUANET model.

International Conference on Hydraulic Engineering Software. 1994. v 1 p. 395 – 402.

RANI, D.; MOREIRA, M.M. Simulation Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation. **Water Resources Management**, v. 24, n. 6, p. 1107-1138, 2010.

RAO, H. S.; BREE, W. D. Extended period simulation of water systems-part.A. p. 97-108, 1977. **Journal of the Hydraulics Division.** v.103. n. HY2. February.

REITSMA, R.; ZIGURS, I; LEWIS, C.; WILSON, V.; SLOANE, A. Experiment With Simulation Models in Water Resources Negotiations. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 122, n. 1, p. 64-70, 1996.

RIBEIRO, C. R. **Controle de escoamentos em instalações de condutos forçados.** 1985. p.182. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

RIBEIRO, L. C. **Modelo Hídrico Multiobjetivo para Obtenção de Roteiros Operacionais de Bombas de Rotação Variável em Instalações hidráulicas.** 2007. Tese de Doutorado. FEC. UNICAMP.

ROBARTS, R. D.; ZOHARY, T. *Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria.* **New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research**, v. 21, p. 391-399, 1987.

RODRIGUES, W. **Crítérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequencia em Sistemas de Bombeamento de Água.** 2007.p. 8. Tese de Doutorado. FEC. UNICAMP.

ROBERTO, A.N. **Modelos de rede de fluxo para alocação de água entre múltiplos usos em uma bacia hidrográfica.** 2002. Dissertação de Mestrado. São Paulo, Escola Politécnica da USP.

SABESP Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Boletim de mananciais. Disponível em <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=553>, acessado em: 30/07/2019.

SABESP Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Dados dos Sistemas Produtores de Água. Disponível em <http://mananciais.sabesp.com.br/HistoricoSistemas?SistemaId=1>, acessado em: 31/04/2019.

SALAS, J.D.; DELEUR, V.; YEVIEVICH, V.; LANE, W. Applied Modeling of Hydrologic Time Series. **Water Resources Publication**. 1st edition, p. 484, 1980.

SCHINDLER, D. W. *Evolution of phosphorus limitation in lakes: natural mechanisms compensate for deficiencies of nitrogen and carbon in eutrophied lakes*. **Science** v. 195, 1977.

SHARIF, M.; WARDLAW, R. Multireservoir System Optimization Using Genetic Algorithm: Case Study. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 14, n. 4, p. 255-263, 2000.

SHAWCROSS, J. F. Modeling complex water distribution systems. Computer applications in water resources. p. 438-447. 1985. **H.C. Torno**. New York.

SCHENEIDER, R.P.; TSUITYA, M.T. Membranas Filtrantes para o Tratamento de Água, Esgoto e Água de Reuso. 1 ed. São Paulo. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. p. 234, 2001.

SIMONOVIC, S. P. Reservoir systems analysis: Closing gap between theory and practice. p. 121-135, 262-280. 1992. **Journal of Water Resources Planning and Management**. v. 118.n. 3, may.

SMITH, V. H. *Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton*. **Science**. v.221 p.669-670, 1983.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto - 2017**. p. 41, 50, 65 Brasília, 2017.

SOARES, A. K.; REIS, L. R. F.; SILVA, F. G. B. Modelos de simulação hidráulica dirigidos pela pressão (MSHDP) com suporte do EPANET. 2002. 15p. **Seminário de Planejamento, projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água. O Estado da Arte e Questões Avançadas**. João Pessoa – PR

SOARES, A. K. **Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento Considerando Vazamentos e Demandas Dirigidas pela Pressão.** 2003. 153p. Dissertação Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

SOARES, A. K.; REIS, L. R. F.; CARRIJO, I. B. Head-driven simulation model (HDSM) for water distribution system calibration. 2003. 197-208p. **Proceedings of the International Conference on Computing and Control for the Water Industry.** London-UK.

SOUZA, R. S. **Aspectos computacionais da análise de redes de distribuição de água com componentes hidráulicos em regime permanente.** 1994. p. 236. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

SOUZA, R. S.; SILVA, U. L. Planejamento e análise de sistemas de abastecimento de água. **Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, III.** Anais v.1 p. 149-161. 1987. Salvador-BA.

STEYNBERG, M. C.; GUGLIELMI, M. M.; GELDENHUYS, J. C.; PIETERSE, A. J. H. *Chlorine and chlorine dioxide: pre-oxidants used as algaecide in potable water plants.* **Journal Water SRT – Aqua.** v. 45. n.4 p. 162-170, 1996.

SUKENIK, A.; WYMAN, K. D.; BENNETT, J.; FALKOWSKI, P. G. *Light-saturated photosynthesis – limitation by electron transport or carbon fixation?* *Biochimica et Biophysica Acta.* v. 891, p. 205-215, 1987.

TALUKDAR, B.; DEB, D.; SRIVASTAVA, D. Development of Multiobjective Stochastic Dynamic Programming (MOSDP) Reservoir Operation Model. **World Environmental and Water Resources Congress 2012,** p. 985-997, 2012.

TANNER, T. L. Adapting a pipe network analysis computer program. p. 430-437.1985. **Computer application in resources water. H.C. Torno.** New York.

TARDELLI FILHO, J. Controle e redução de perdas. In: TSUTYA, M. T. **Abastecimento de água.** 3ª. edição São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006, p. 457 - 525

TOLMASQUIM, M. T. Novo modelo do Setor Elétrico Brasileiro. p. 20. Rio de Janeiro – RJ. Synergia, EPE. 2011.

TRENNEPOHL, F. G.; SOARES, A. S.; KOSSATZ, B. Levantamento dos custos de operação e manutenção (O&M) de ETA da Região Metropolitana de Florianópolis (SC). **Congresso ABES FENASAN**. 2017.

TSUTIYA, M. T. Abastecimento de Água. p. 242, 249. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2005.

US ARMY, 1971

VICENTE, R. V. **Modelo de Operação para Centros de Controle de Sistemas de Abastecimento de Água Estudo de Caso: Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo**. 2005. p. 129. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

WARDLAW, R.; SHARIF, M. Evaluation of Genetic Algorithms for Optimal Reservoir System Operation. **Journal of Water Planning and Management**, v. 125, n. 1, p. 25-33, 1999.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. Guidelines for drinking-water (electronic resources): incorporating 1st and 2nd addenda. 3rd ed. Vol. 1 p. 668. 2008

WOOD, D. J. User's Manual – Computer Analysis of flow in pipe networks including extended periods simulations. 1980. University of Kentucky, Lexington, Ky.

WURBS, R.A. Reservoir System Simulation and Optimization Models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 119, n. 4, p. 455-472, 1993.

YEH, W. Reservoir Management and Operation Models: A State-of-the-Art Review. **Water Resources Research**, v. 21, n. 12, p. 1797-1818, 1985.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. 1965. volume 8, issue 3 p. 338-353. **Information and Control. Elsevier Journals & Books**.

ZAHED FILHO, K. **Algumas Metodologias para o Dimensionamento e Operação de Reservatórios**. 1984. p. 70-73, 258 Dissertação (Mestrado). – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária-Escola Politécnica da Universidade e São Paulo.

ZAHED FILHO, K. **Previsão de Demanda de Consumo em Tempo Real no Desenvolvimento Operacional de Sistemas de Distribuição de Água**. 1990. p. 78, 135, 140

Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ZONGXUE, X.; JINNO, K.; KAUAMURA, A.; TAKESAKI, S.; ITO, K. Performance risk analysis for Fukuoka water supply system. 1998. p. 13-30. **Water Resources Management**, v. 12.