



GOVERNO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL

Francisca Nara da Conceição Moreira

**DIMENSIONAMENTO DO VOLUME ÚTIL DE RESERVAÇÃO DE ÁGUA
CONSIDERANDO O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO HORÁRIO DE
PONTA DO SETOR ELÉTRICO**

Belém
2018

Francisca Nara da Conceição Moreira

**DIMENSIONAMENTO DO VOLUME ÚTIL DE RESERVAÇÃO DE ÁGUA
CONSIDERANDO O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO HORÁRIO DE
PONTA DO SETOR ELÉTRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia Hídrica.

Linha de Pesquisa: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira

Belém
2018

Francisca Nara da Conceição Moreira

**DIMENSIONAMENTO DO VOLUME ÚTIL DE RESERVAÇÃO DE ÁGUA
CONSIDERANDO O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO HORÁRIO DE
PONTA DO SETOR ELÉTRICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia Hídrica.

Linha de Pesquisa: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira

Data de aprovação: _____ / _____ / 2018

Banca Examinadora:

_____ - Orientador

Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira
Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento
Universidade Federal do Pará

_____ - Membro externo

Prof. Dr. Augusto da Gama Rego
Doutor em Engenharia de Recursos Naturais
Instituto Federal do Pará – IFPA, Campus Tucuruí.

_____ - Membro interno

Prof. Dr. Lindemberg Lima Fernandes
Doutor em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido
Universidade Federal do Pará

_____ - Membro interno

Prof. Dra. Aline Christian Pimentel Almeida Santos
Doutora em Engenharia de Recursos Naturais
Universidade Federal do Pará

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Moreira, Francisca Nara da Conceição, 1988-
Dimensionamento do volume útil de reservação de água
considerando o consumo de energia elétrica no horário de
ponta do setor elétrico /Francisca Nara da Conceição
Moreira.- 2018.

Orientador: José Almir Rodrigues Pereira

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará.
Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2018

1. Engenharia de abastecimento de água 2. Energia
elétrica- Consumo I. Título

CDD 22.ed.628.1



**DIMENSIONAMENTO DO VOLUME ÚTIL DE RESERVAÇÃO DE
ÁGUA CONSIDERANDO O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO
HORÁRIO DE PONTA DO SETOR ELÉTRICO**

AUTORA:

FRANCISCA NARA DA CONCEIÇÃO MOREIRA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL.

APROVADO EM: 07 / 02 / 2018.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira
Orientador (UFPA)

Prof. Dr. Lindemberg Lima Fernandes
Membro Interno (UFPA)

Prof. Dra. Aline Christian Pirmentel Almeida Santos
Membro Externo (UFPA)

Prof. Dr. Augusto da Gama Rego
Membro Externo (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

DEDICATÓRIA

A minha família que, apesar de não poder estar presente, certamente torce muito por mim, em especial minha irmã Marta, que intensamente me ajudou nesse passo tão importante de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Como diz Fernando Anitelli “Sonho parece verdade quando a gente esquece de acordar”. Hoje, vivo uma realidade que parece um sonho, mas foi preciso muito esforço, determinação, paciência, perseverança, ousadia e maleabilidade para chegar até aqui, e nada disso eu conseguiria sozinha. Minha eterna gratidão a todos aqueles que colaboraram para que este sonho pudesse ser concretizado.

Grata a Deus pelo dom da vida, pelo seu amor infinito, sem Ele nada sou. Agradeço aos meus pais, Manoel Santana e Maria Roseli. Obrigada por cada incentivo e orientação, pelas orações em meu favor, pela preocupação para que estivesse sempre andando pelo caminho correto.

À Universidade Federal do Pará. Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Obrigado pela oportunidade de participar de um programa que vem ganhando cada vez mais importância pela sua formação de Mestres em Engenharia em uma região tão carente como é a Amazônia.

Ao meu professor e orientador José Almir Rodrigues Pereira. Obrigada pela oportunidade, pela orientação, pela confiança em mim depositada, e pelo apoio e incentivo em minhas atividades acadêmicas.

À toda equipe do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) da UFPA pela estrutura fornecida, momentos de aprendizado e pela incondicional colaboração em todas as atividades deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Obrigada pela Bolsa de Mestrado, muito útil para a permanência na pesquisa.

Por fim, à todos aqueles que, mesmo não citados aqui, saibam que sua contribuição foi de suma importância para o desenvolvimento desse trabalho. À todos deixo aqui meus eternos agradecimentos!

“Que Deus me dê serenidade para aceitar as coisas que não posso mudar, coragem para mudar as que posso e sabedoria para distinguir entre elas.”

(Reinhold Niebuhr)

RESUMO

Determinação do volume útil de reservação para eficiência hidroenergética em sistemas de abastecimento de água. A pesquisa foi realizada no sistema de bombeamento e reservação de água do Setor Guanabara, Ananindeua, Belém, Pará. Para isto, o trabalho foi dividido em três etapas, a saber, na primeira foram verificadas as condições de projeto e operacionais do Setor Guanabara para avaliação do desempenho hidroenergético. Na segunda Etapa foram determinados três (3) volumes teórico úteis de reservação, considerando diferentes métodos. Na terceira Etapa, considerando quatro (4) diferentes volume úteis, de projeto e três (3) teóricos, foram realizadas simulações hidroenergética para verificar o volume útil mais eficiente em termos hidroenergéticos. Para tanto, foi considerado a mesma curva de consumo e vazão média de bombeamento, porém, diferentes volumes úteis nas simulações. Na pesquisa foi verificado que o volume útil do reservatório elevado do Setor Guanabara não permite a redução do bombeamento de água no posto horário de ponta, o que, naturalmente, influencia no valor da despesa de energia elétrica e que o reservatório elevado estava sendo utilizado como “caixa de passagem”. Assim, foram estudadas três alternativas para modificar a atual situação operacional da unidade de reservação do Setor Guanabara, visando a redução do consumo e despesa de energia elétrica. No dimensionamento dos volumes úteis pelos 3 métodos estudados, foram obtidos 808,96 m³ com o Método da CETESB (1987), 936,77 m³ com os procedimentos recomendados na NBR 12.217 (1994) e 1.411,10 m³ quando foi utilizada o método proposto por Gomes (2012). Nas simulações realizadas no *Epanet 2.0* resultou despesa de energia elétrica em R\$ 25.789,54/mês para o volume útil do reservatório elevado projetado. De R\$ 26.363,87/mês para o volume útil do reservatório elevado CETESB (1987). De R\$ 26.191,71/mês para o volume útil do reservatório elevado NBR 12.217 (1994). E para o Método proposto por Gomes (2012) resultou em despesa mensal de R\$ 14.698,95/mês. Contudo, a utilização do volume útil do reservatório dimensionado pelo Método de Gomes foi cerca de 66,39% superior ao da NBR 12.217 (1994), cerca de 64,56% superior ao de projeto e 57,33% superior ao CETESB (1987). Desse modo, o maior valor do volume impactará no valor a ser investido para a implantação do reservatório elevado. Por essa razão, na pesquisa foi estudada a economia com despesa de energia elétrica ao longo de 10 anos. Assim, considerando o Método de Gomes (2012) estimou-se economia de R\$ 1.379.131,30 (78,19%) em relação ao Método da NBR 12.217 (1994) e de R\$ 1.399.789,40 (79,36%) em relação ao Método da CETESB (1987).

Palavras-chave: Eficiência Hidroenergética, Posto horário de Ponta, *Epanet 2.0*.

ABSTRACT

Determination of the useful volume of reservation for hydroenergetic efficiency in water supply systems. The research was carried out in the Guanabara, Ananindeua, Belém, Pará Pumping and Water Reservation System. For this, the Guanabara Sector's design and operational conditions were verified for hydroenergetic performance evaluation. In the second step three (3) useful theoretical reservation volumes were determined, considering different methods. In the third stage, considering four (4) different useful project volumes and three (3) theoretical, hydroenergetic simulations were performed to verify the most efficient useful volume in hydroenergetic terms. For that, the same consumption curve and mean pumping rate were considered, but different useful volumes in the simulations. In the research it was verified that the useful volume of the high reservoir of the Guanabara Sector does not allow the reduction of water pumping at peak hours, which, naturally, influences the value of electric energy expenditure and that the high reservoir was being used as "junction box". Thus, three alternatives were studied to modify the current operating situation of the Guanabara Sector Reservation Unit, aiming at reducing electricity consumption and expenditure. In the sizing of the useful volumes by the 3 methods studied, 808.96 m³ were obtained with the CETESB Method (1987), 936.77 m³ with the procedures recommended in NBR 12.217 (1994) and 1.411,10 m³ when the proposed method was used by Gomes (2012). In the simulations carried out in *Epanet 2.0* resulted in an electric energy expense of R\$ 25.789,54/month for the useful volume of the projected high reservoir. From R\$ 26.363,87/month for the useful volume of the high reservoir CETESB (1987). From R\$ 26.191,71/month to the useful volume of the high reservoir NBR 12.217 (1994). And for the method proposed by Gomes (2012) resulted in monthly expenses of R\$ 14.698,95/month. However, the utilization of the useful volume of the reservoir as measured by the Gomes Method was about 66,39% higher than that of NBR 12.217 (1994), about 64,56% higher than that of the project and 57,33% higher than CETESB (1987). In this way, the higher value of the volume will impact the value to be invested for the implantation of the raised reservoir. For this reason, in the research was studied the economy with expenditure of electric energy over 10 years. Accordingly, considering the Gomes Method (2012), savings of R \$ 1.379.131,30 (78,19%) were estimated in relation to NBR 12.217 (1994) and R \$ 1.399.789,40 (79,36%) in relation to the CETESB Method (1987).

Key words: Efficiency Hydroenergetic, Timetable Point, *Epanet 2.0*.

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	XI
LISTA DE TABELA.....	XII
LISTA DE SIGLAS.....	XIII
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 GERAL	15
2.2 ESPECÍFICOS	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
3.1 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	16
3.1.1 SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA.....	19
3.1.1.1 UNIDADE DE RESERVAÇÃO DE ÁGUA	27
3.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	39
3.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	42
3.3.1 AÇÕES PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	51
3.3.2 TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA	53
3.4 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA EM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	57
3.5 TÉCNICAS DE DIMENSIONAMENTO DE VOLUME ÚTIL DE RESERVAÇÃO	60
3.5.1 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DO VOLUME ÚTIL BASEADO NA NBR 12217 ABNT (1994).....	60
3.5.2 MÉTODO PROPOSTO PELA CETESB (1987).....	61
3.5.3 MÉTODO DO VOLUME ÚTIL BASEADO NOS VOLUMES DIFERENCIAIS (GOMES, 2012).....	65
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	66
4.1 ÁREA DE ESTUDO	66
4.2 ETAPAS DA PESQUISA	68
4.2.1 ETAPA 1 – AVALIAR O DESEMPENHO HIDROENERGÉTICO CONSIDERANDO VOLUME ÚTIL DE PROJETO E OPERAÇÃO DO SETOR GUANABARA	68
4.2.2 ETAPA 2 – DETERMINAÇÃO DO VOLUME TEÓRICO ÚTIL DE RESERVAÇÃO, CONSIDERANDO 3 DIFERENTES MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTOS.....	71
4.2.2.1 POR MEIO DE RECOMENDAÇÕES DA NBR 12217 (1994).....	72
4.2.2.2 POR MEIO DO MÉTODO DOS VOLUMES DIFERENCIAIS CETESB (1987).....	73
4.2.2.3 POR MEIO DO MÉTODO DOS VOLUMES DIFERENCIAIS GOMES (2012).....	74
4.2.3 ETAPA 3 – SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE OPERAÇÃO DO BOMBEAMENTO DE ÁGUA TRATADA PARA DETERMINAR O VOLUME IDEAL DE RESERVAÇÃO SETOR GUANABARA.....	75
4.2.4 TRATAMENTO DE DADOS.....	80

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
5.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO OPERACIONAL DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO E RESERVAÇÃO DE ÁGUA DO SETOR GUANABARA	81
5.1.1 AVALIAÇÃO DAS VARIAÇÕES DAS VAZÕES HIDRÁULICAS	85
5.1.1.1 VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO AO RESERVATÓRIO APOIADO	86
5.1.1.2 VAZÃO BOMBEADA PARA O RESERVATÓRIO ELEVADO.....	90
5.1.1.3 VAZÃO DE SAÍDA PARA A REDE DE DISTRIBUIÇÃO	93
5.1.1.4 COMPARAÇÃO DOS VOLUMES ÚTIL DE PROJETO E MONITORADO NO SETOR GUANABARA	95
5.2 DETERMINAÇÃO DO VOLUME ÚTIL DE RESERVAÇÃO, CONSIDERANDO DIFERENTES MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTOS	104
5.2.1 VOLUME TEÓRICO ÚTIL DE RESERVAÇÃO EMPREGANDO O MÉTODO DA CETESB (1987).....	104
5.2.2 DETERMINAÇÃO DO VOLUME TEÓRICO ÚTIL DE RESERVAÇÃO EMPREGANDO A NBR 12217 (1994). 107	
5.2.3 DETERMINAÇÃO DO VOLUME TEÓRICO ÚTIL DE RESERVAÇÃO EMPREGANDO O MÉTODO DOS VOLUMES DIFERENCIAIS GOMES (2012)	109
5.3 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE OPERAÇÃO DO BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA DETERMINAR O VOLUME ÚTIL MAIS EFICIENTE HIDROENERGETICAMENTE AO SETOR GUANABARA	112
5.3.1 ESTABELECIMENTO DAS CONDIÇÕES DE SIMULAÇÕES	112
5.3.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES HIDROENERGÉTICAS	114
5.3.3 DETERMINAÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO HIDROENERGÉTICO	121
6 CONCLUSÃO	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
ANEXOS	137

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Partes constitutivas de um sistema de abastecimento de água.....	16
Figura 2. Sistema de bombeamento e reservação de água	19
Figura 3 - a) Estação elevatória do tipo poço seco. b) Estação elevatória do tipo poço úmido.	20
Figura 4. Exemplo de localização de estação elevatória no SAA.	20
Figura 5. Válvula Gaveta dotados de flanges.....	21
Figura 6. Modelo de um Conjunto motor e bomba.	22
Figura 7. Principais componentes de uma bomba.	23
Figura 8. Curvas características esquemáticas de uma bomba.....	24
Figura 9. Curva de uma bomba com diâmetros diferentes do impelidor	25
Figura 10. Reservatório de posição a montante.	28
Figura 11. Reservatório de posição a jusante.....	29
Figura 12. Reservatório de posição intermediária.....	29
Figura 13. Posição dos reservatórios em relação ao terreno	29
Figura 14. Volumes existentes em reservatórios de água.	31
Figura 15. Elementos de uma unidade de reservação.	33
Figura 16. Níveis operacionais de um reservatório.....	34
Figura 17. Tubulação de entrada de água no reservatório.....	35
Figura 18. Unidades consumidoras de energia elétrica no SAA.	41
Figura 19. Relação entre redução das perdas de água e eficiência energética.	45
Figura 20. Curva nos postos horários ponta e fora de ponta.	56
Figura 21. Curva de consumo e adução contínua.....	61
Figura 22. Diagrama de massa para adução contínua.	62
Figura 23. Localização do Setor Guanabara no município de Ananindeua, Pará.....	66
Figura 24. Configuração a do Setor de Abastecimento de Água do Guanabara.	67
Figura 25. Dados utilizados no dimensionamento pela NBR 12217 (1994).....	72
Figura 26. Dados utilizados no Método da CETESB (1987).	74
Figura 27. Dados utilizados no Método dos volumes diferenciais de GOMES (2012).	74
Figura 28. Sistematização para a simulação hidroenergética no software <i>Epanet 2.0</i>	76
Figura 29. Esquema obtido no resultado final desta metodologia.	80
Figura 30. Volumes existentes e projetados para o Reservatório e Apoiado.	81
Figura 31. Representação esquemática do Setor Guanabara.....	81
Figura 32. Medidas do reservatório apoiado do Setor Guanabara.	82
Figura 33. Visão dos conjuntos motor e bomba e do CCM ao fundo.	82
Figura 34. Vista do reservatório elevado. Figura 35. Cotas Reservatórios Setor Guanabara	84
Figura 36. Entrada da Subadutora no R.A. Figura 37. Registro na entrada do R.A.....	86
Figura 38. Volume de água utilizado na operação do reservatório apoiado do 37º setor.	89

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Parâmetros para a determinação do volume para combate a incêndio	32
Tabela 2. Resumo das pesquisas de registro de melhoria de eficiência dos SAA's no Mundo.	50
Tabela 3. Modalidades Tarifária, Convencional, Azul e Verde.	55
Tabela 4. Método dos volumes diferenciais.	64
Tabela 5. Método dos volumes diferenciais.	65
Tabela 6. Cenários de simulações hidroenergéticas.	76
Tabela 7. Dados de vazões hidráulicas utilizados no trabalho.	85
Tabela 8. Horas de bombeamento por operação dos conjuntos motor e bomba.	91
Tabela 9. Volume de água bombeado e consumo de energia elétrica.	92
Tabela 10. Volume útil de reservação e parâmetros de projeto executivo.	95
Tabela 11. Volume útil de reservação projeto e existente no Setor Guanabara.	95
Tabela 12. Cálculo de volume útil utilizado do reservatório apoiado no Setor Guanabara.	98
Tabela 13. Cálculo de volume útil utilizado do reservatório elevado no Setor Guanabara.....	101
Tabela 14. Valores hidroenergéticos dos volumes de operação do Setor Guanabara.	101
Tabela 15. Comparação dos dados de projeto e de operação - Setor Guanabara.	102
Tabela 16. Resumo dos indicadores de linha base do Setor Guanabara.....	103
Tabela 17. Determinação do volume útil de reservação - Método da CETESB (1987).....	106
Tabela 18. Cálculo de volume útil de reservação – Métodos dos volumes diferenciais (GOMES, 2012).	111
Tabela 19. Volumes úteis de reservação utilizados nas simulações hidroenergética.	112
Tabela 20. Dados obtidos para as simulações hidroenergética do Volume Útil de reservação.....	112
Tabela 21. Tarifas Celpe a partir de 07/08/2015 Resolução Homologatória 1.930/2015 da ANEEL (Anexo B).....	113
Tabela 22. Resultado de Simulação hidroenergética para o Volume Útil de Projeto (1996).....	114
Tabela 23. Resultado de Simulação hidroenergética para o Volume Útil - CETESB (1987).....	116
Tabela 24. Resultado de Simulação hidroenergética para o Volume Útil da ABNT NBR (1994).	118
Tabela 25. Resultado de Simulação hidroenergética para o Volume Útil - Gomes (2012) (VT ₃).	119
Tabela 26. Comparação de Indicadores de desempenho operacional.	121
Tabela 27. Comparação dos resultados de volume útil e despesa.	122
Tabela 28. Comparação de economia em função do Volume Útil de Gomes (2012).	122

LISTA DE SIGLAS

ΣQ	Somatória das vazões diárias
AAT	Adutora de Água Tratada
ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APA	Área de Proteção Ambiental
ASE	Alliance to Save Energy
AWWA	American Water Works Association
CEC	Califórnia Energy Commission
CELPA	Centrais Elétricas do Pará
CEN	Consumo Específico de Energia Elétrica Normalizado
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo
CMB	Conjuntos Motor e Bomba
COSANPA	Companhia de Saneamento do Pará
EAB	Elevatórias de Água Bruta
EAT	Elevatórias de Água Tratada
ETA	Estação de Tratamento de Água
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
ha	hectare
Ham	Altura Manométrica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Iren	Agência Internacional para as Energias Renováveis
ITB	Instituto Trata Brasil
KWh	Quilowatt Hora
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
MME	Ministério de Minas e Energia
MWh	Megawatt Hora
NPSH	Net Positive Suction Head
P	população da área abastecida
PDSAA	Plano Diretor de Sistema de Abastecimento de Água
PNAD	Pesquisa Nacional de Amostra por Domicílios
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
Procel Sanear	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica para o Saneamento
q	Consumo médio diário per capita
Q_{Tm}	Consumo médio teórico de água
RAP	Reservatório Apoiado
ReCESA	Rede Nacional de Capacitação Tecnológica em Saneamento Ambiental
REL	Reservatório Elevado
RMB	Região Metropolitana de Belém
SAA	Sistemas de Abastecimento de Água
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UN-BR	Unidade de Negócios BR
USEPA	U. S. Environmental Protection Agency
VR	Volume útil de reservação
VT	Volume útil total
Q	Vazão média horária

1 INTRODUÇÃO

Na maioria dos sistemas de abastecimento de água (SAA) é elevado o consumo de energia elétrica. Dados da *Alliance to Save Energy* (ASE, 2017) revelam que entre 2 e 3% do consumo de energia mundial é utilizada no bombeamento e tratamento de água para fins residenciais e industriais.

No Brasil, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica para o Saneamento (Procel Sanear, 2016) estima que o bombeamento e o tratamento de água e esgoto representam mais de 2% do consumo de energia elétrica, o equivalente a 7 bilhões de kWh/ano. Isto tem preocupado os prestadores desses serviços (GOMES, 2012). O Procel Sanear, esse programa foi criado com a finalidade de promover o uso eficiente de energia elétrica e água em sistemas de saneamento ambiental.

De acordo com Mamade (2014), a despesa com energia elétrica nos SAA's tem sido um dos grandes desafios para as concessionárias do setor de saneamento. O consumo elevado de energia nesses SAA's ocorre por diversas causas, como, problemas na rotina operacional e nos equipamentos do sistema, volume perdido de água, utilização de equipamentos no horário de ponta do sistema elétrico, dentre outros.

Apesar da falta de dados oficiais dos anos 2016 e 2017, as informações do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) mostraram que as despesas com energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento atingiram montante de R\$ 5,14 bilhões no ano de 2015, sendo que desse total 11,6 milhões de MWh/ano foram consumidos nos SAA's (BRASIL, 2017).

Neste contexto, Mamade et al. (2015) e Cherchi et al. (2015) ressaltam a importância da eficiência energética para reduzir as despesas de energia elétrica com a manutenção dos equipamentos na operação dos SAA's. Gonçalves et al. (2013) enfatizam que nove de cada dez quilowatts-hora produzidos, são destinados aos conjuntos motor e bomba (CMB's) dos SAA's.

Diante dessa realidade, existe a necessidade de realizar ações para buscar a eficiência hidroenergética realizando o ajuste operacional. Principalmente porque no posto horário de ponta as tarifas de energia elétrica são mais onerosas. Nesta conjuntura, uma das medidas a ser considerada e verificada é o volume útil de reservação nos SAA's.

Além disso, Cherchi et al. (2015) destacam três principais alterações operacionais do SAA, que podem reduzir os custos de energia elétrica: a alteração do sistema bombeamento - reservação, a utilização de variadores de rotação nos conjuntos motor e bomba (CMB's) e alteração operacionais na estação de tratamento de água (ETA).

À vista disso, o SAA para ser equilibrado deve possuir todas as unidades funcionando de forma eficiente, contudo, sempre observando que, normalmente, o volume bombeado de água é encaminhado para armazenamento, daí a importância das ações de eficiência energética serem realizadas de forma sistêmica na elevação e reservação de água (MATROSOV et al., 2015; RONGA et al., 2017; ZENG et al., 2017).

Um dos principais problemas em relação à utilização dos reservatórios de armazenamento de água é a operação inadequada da unidade de bombeamento, que, com diversas partidas durante o dia, objetiva manter o reservatório sempre no nível máximo, não permitindo a variação entre o nível máximo e mínimo, que é desejável.

Tsutiya (2006) e Wallace et al. (2016) destacam o reservatório elevado como uma unidade de grande importância no SAA, pois é possível regularizar a vazão na rede de distribuição e evitar tensões cíclicas. Além disso, proporciona maior estabilidade no fornecimento de água, e armazena água no horário de ponta do sistema elétrico, reduzindo os custos com energia elétrica (PULEO et al., 2014; BOLOGNESIA, 2014).

Com o custo de energia elétrica crescente nos SAA's (GOMES, 2012) é necessário estudos que relacione o volume útil de reservação com o consumo de energia elétrica no sistema, especialmente, no posto horário de ponta em que o bombeamento de água resulta em altos custos de energia elétrica, pois, a tarifa é mais onerosa.

Contudo, nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) não são considerados o consumo e o custo de energia elétrica no dimensionamento dos reservatórios, dos SAA's. Por conseguinte, isto tem contribuído para altos custos de energia elétrica, com relação direta na despesa para os prestadores dos serviços de abastecimento de água.

Portanto, faz-se necessário otimizar o volume útil de reservação, planejamento dos CMB's e, conseqüentemente, o controle dos níveis dos reservatórios, a fim de reduzir o funcionamento das bombas nos horários de alto custo de energia elétrica, garantindo o atendimento da demanda minimizando o custo da energia elétrica. Tais metas revelam a importância deste trabalho, o qual pode proporcionar tanto economia significativa, como também melhor uso do sistema elétrico brasileiro.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Analisar a importância do dimensionamento do volume útil da unidade reservação para a rotina operacional de bombeamento de água, considerando o consumo e a despesa de energia elétrica no posto horário de ponta.

2.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar as informações e indicadores de desempenho operacional, para identificar o comportamento hidroenergético do Sistema de bombeamento e reservação de água do Setor Guanabara;
- Determinar o volume teórico útil de reservação, considerando parâmetros de dimensionamento estabelecidos no método dos volumes diferenciais da CETESB (1987), nas recomendações da ABNT NBR 12217 (1994) e na proposta de Gomes (2012);
- Simular no software *Epanet 2.0* o consumo e a despesa de energia elétrica no horário de ponta, considerando a mesma condição de operação para o volume útil de reservação projetado e para os três volumes determinados teoricamente.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

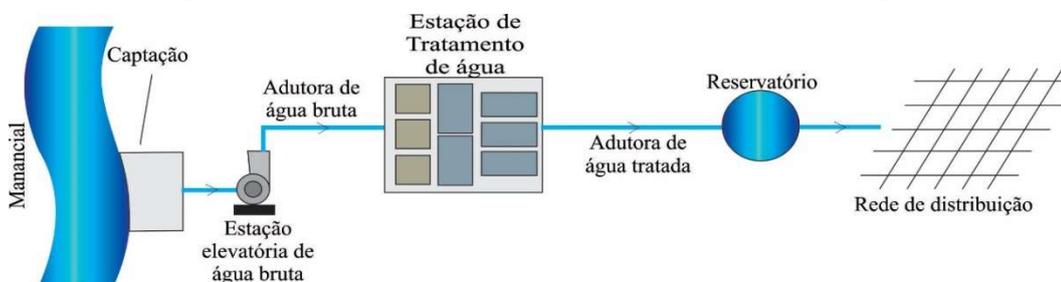
Nesse capítulo é apresentada a base teórica relevante ao tema dessa dissertação, bem como, os principais conceitos e elementos que justificam a abordagem do problema da pesquisa.

3.1 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O SAA pode ser concebido e projetado para atender pequenos povoados ou grandes cidades, de acordo com suas características e porte de suas instalações. Caracteriza-se pela retirada da água da natureza, adequação de sua qualidade, transporte e fornecimento às populações em quantidade compatível com suas necessidades (FUNASA, 2016).

A concepção do SAA é variável e depende do porte da cidade, topografia, sua posição em relação aos mananciais, etc (RODRIGO et al., 2007). De forma convencional, o SAA é constituído por: manancial, captação, estação elevatória de água bruta, adutora de água bruta, estação de tratamento de água, adutora de água tratada, unidade de reservação e rede de distribuição, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1. Partes constitutivas de um sistema de abastecimento de água.



Fonte: Autora (2017).

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

A finalidade da captação é retirar água do manancial, em quantidade suficiente para atender ao nível de demanda. As adutoras são as canalizações principais destinadas a conduzir água entre as unidades de um sistema de abastecimento que antecedem a rede de distribuição.

E a etapa de tratamento é realizada para atender finalidades, como: remoção/diminuição de micro-organismos, substâncias tóxicas, remoção/correção de cor, turbidez, odor, sabor, ferro e manganês, dentre outros.

Rede de distribuição é a unidade do sistema constituída por tubulações que conduz a água para os pontos de consumo. Distinguem-se por dois tipos de tubulações: as principais e as secundárias. As tubulações principais formam os anéis que alimentam os distribuidores que são as tubulações secundárias.

De acordo com Amilkar (2017), as áreas de abastecimento de água tem pelo menos uma zona de pressão, que é servida por meio de linhas de distribuição, podem ser por gravidade ou recalque. Essa área de abastecimento pode ser por um centro de reservação, reservação associado à elevatória, ou bombeamento direto.

Para elaboração e implantação dos projetos de sistemas para abastecimento público de água, é aconselhável a utilização de critérios e recomendações disponíveis nas Normas Brasileira da ABNT, tais como:

- a. NBR 12211 (1992) - Estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água;
- b. NBR 12212 (1992) - Projeto de poço para captação de água subterrânea;
- c. NBR 12213 (1992) - Projeto de captação de água de superfície para abastecimento público;
- d. NBR 12214 (1992) - Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público;
- e. NBR 12215 (1991) - Projeto de adutora de água para abastecimento público;
- f. NBR 12216 (1992) - Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público;
- g. NBR 12217 (1994) - Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público;
- h. NBR 12218 (1994) - Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público.

Como já comentado, o SAA é responsável por consumir parte relevante de energia elétrica gerada (LUZ, 2016), sendo esse consumo maior no sistema de bombeamento de água.

Portanto, para esse trabalho, interessa especialmente a NBR 12217 (1994), que versa sobre as condições exigíveis para projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público, além de consultas as NBR 12211 (1992) e NBR 12214 (1992). Assim, a proposta deste estudo interessa as unidades de bombeamento e reservação de água do SAA.

Atualmente, em muitos municípios são observados problemas na operação do SAA, ocasionando transtornos de qualidade, quantidade e regularidade na água fornecida para os usuários, bem como, prejudicando a sustentabilidade econômico-financeira dos prestadores dos serviços de abastecimento de água.

Vale ressaltar que a operação adequada dos SAA's é a principal ação de gestão para os prestadores dos serviços de abastecimento de água, e tem influência na qualidade do sistema (PEREIRA; CONDURÚ, 2014). Porém, são comuns problemas, como:

Na rotina operacional, no caso, acionamento e desligamento dos CMB's, falta de manutenção dos níveis de reservatório;

- a. Baixa eficiência dos equipamentos eletromecânicos; Perdas de volume de água;
- b. Consumo elevado de energia elétrica no horário de ponta e;
- c. Perda de faturamento na prestação do serviço de abastecimento de água.

Segundo Barreto (2006), o controle operacional de um SAA ocorre quando se tem efetivamente o monitoramento e o controle dos parâmetros hidráulicos (vazão, pressão e níveis de água) e elétricos (tensão, corrente, potência elétrica, demanda elétrica, consumo de energia elétrica e fator de potência) de todas as unidades que compõe o sistema.

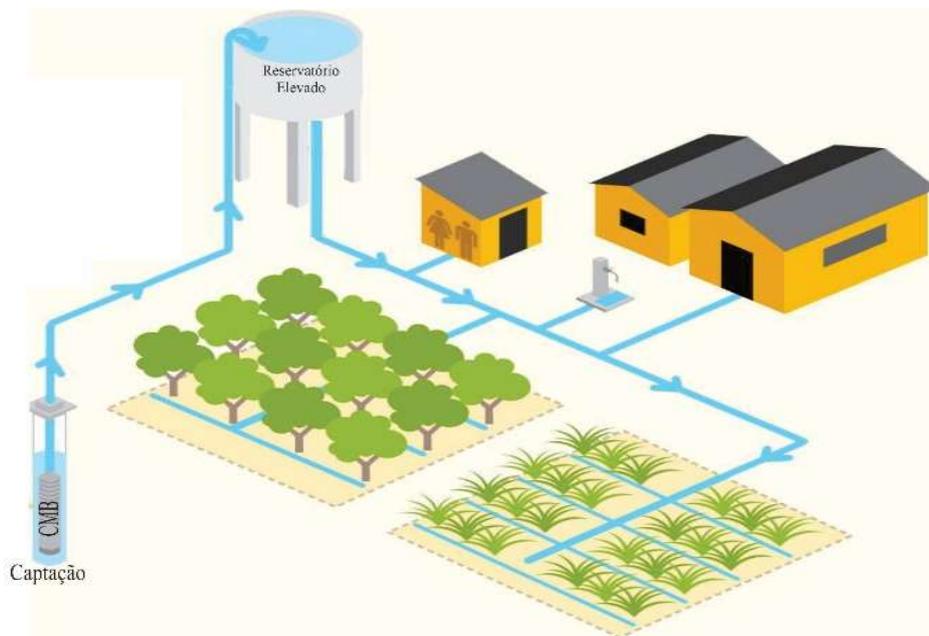
De acordo com Tsutiya (2006), as despesas com energia elétrica em empresas de saneamento situam-se na faixa de 10 a 20%, sendo, a segunda maior despesa após a de recursos humanos. Estima-se que os CMB's utilizados em estações elevatórias de água são responsáveis por cerca de 90% das despesas com energia elétrica, além disso, Almeida (2010) resalta que é consumido aproximadamente 0,67 kWh por m³ de água produzida.

Por outro lado, na maioria dos SAA é elevado o consumo de energia elétrica, por conseguinte, dados da *Alliance to Save Energy* (ASE, 2017) revelam que entre 2 e 3% do consumo de energia mundial é utilizada no bombeamento e tratamento de água para fins residenciais e industriais.

Apesar da falta de dados oficiais dos anos 2016 e 2017, as informações do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) mostraram que as despesas com energia elétrica dos prestadores de serviço de saneamento atingiram montante de R\$ 5,14 bilhões somente no ano de 2015, sendo que desse total 11,6 milhões de MWh/ano foram consumidos nos SAA's (BRASIL, 2017).

Assim, o sistema de bombeamento e reservação no SAA são unidades dependentes, por conseguinte, a eficiência da reservação está relacionada ao bom desempenho dos sistemas de bombeamento. Portanto, essas unidades precisam ser observadas de forma conjunta, uma vez que, o impacto na eficiência hidroenergética ocorre em todo o sistema de abastecimento de água. Na Figura 2 é representado um sistema de bombeamento e reservação de água.

Figura 2. Sistema de bombeamento e reservação de água



Fonte: Rayma Bombas Hidráulicas (2017).

3.1.1 Sistema de bombeamento de água

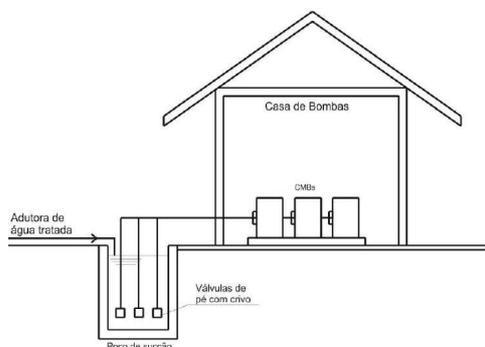
A água até chegar aos domicílios, já percorreu longo caminho, pois, teve de ser captada, transportada do manancial para estação de tratamento, depois distribuída ao consumidor final. O transporte da água pode ser realizado por gravidade, aproveitando a topografia favorável do terreno, porém, quando isso não é possível, utiliza-se unidade de elevação ou estação elevatória de água, a qual é definida por ReCESA (2008) como:

Conjunto de bombas e acessórios que eleva a água de um ponto mais baixo para um mais alto. As elevatórias podem estar localizadas antes, dentro ou depois da estação de tratamento de água. Podem ser elevatórias de água bruta ou tratada, quando conduzem água bruta ou tratada, respectivamente. Quando a elevatória localiza-se entre um trecho e outro da rede de distribuição, ela recebe o nome de *booster*.

De acordo com Azevedo Netto e Fernandez (2015), a estação elevatória de água pode ser classificada quanto ao tipo de água transportada, por sua vez, pode ser elevatória de água tratada ou elevatória de bruta. E quanto à instalação da bomba, podendo ser estação elevatória de poço seco ou estação elevatória de poço úmido.

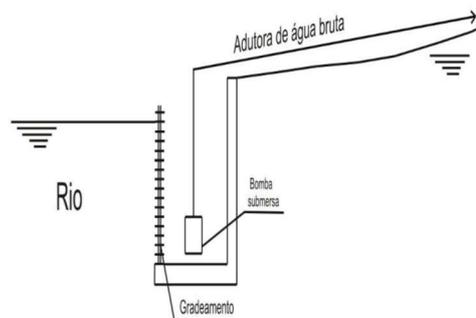
A elevatória de poço seco é denominada quando as bombas estão localizadas fora da água, conforme mostrada na Figura 3a. Enquanto que a elevatória de poço úmido é designada quando as bombas são do tipo submersas, conforme mostrada na Figura 3b.

Figura 3 - a) Estação elevatória do tipo poço seco.



Fonte: Tsutiya (2006).

b) Estação elevatória do tipo poço úmido.

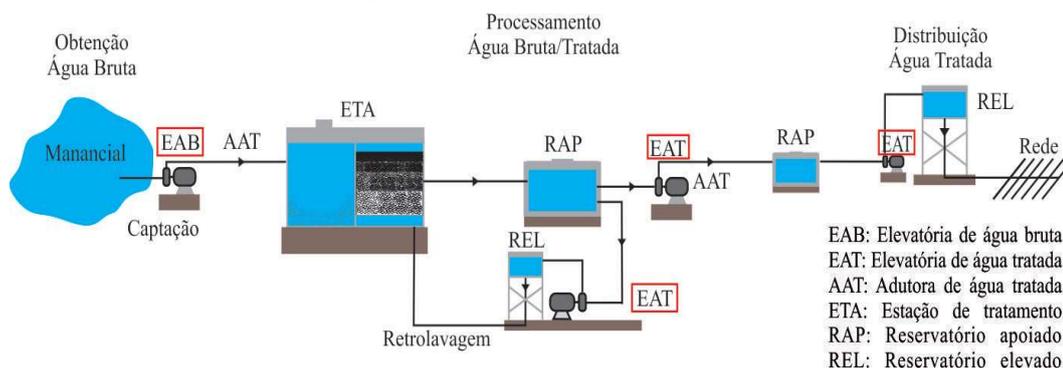


Fonte: Tsutiya (2006).

As estações elevatórias de água tratada são compostas por conjunto de tubulações de sucção e de recalque, válvulas, registros, conexões, poço úmido e seco, motor e bomba hidráulica, que variam conforme o porte do sistema, características da área, regime de trabalho entre outros fatores.

Nos SAA's, os CMB's podem ser instalados na captação, tratamento, elevatórias de água tratada e distribuição de água, ou em outras situações o bombeamento pode ocorrer direto para adutoras, reservatórios ou rede de distribuição, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4. Exemplo de localização de estação elevatória no SAA.



Fonte: Pereira e Condurú (2014).

Por outro lado, o uso intensivo de elevatórias nos SAA's tem elevado o gasto com energia elétrica, operação, instalação e manutenção de equipamentos, como já comentado nos itens anteriores. As técnicas de operação e manutenção adequada das estações elevatórias contribuem para que não haja falta de água para a população, proporcionando mais qualidade de vida para todos.

Portanto, cabe aos pesquisadores aprimorar estas técnicas na tentativa de reduzir o consumo de energia elétrica dos sistemas de distribuição de água potável, e conseqüentemente buscando uma melhor eficiência na operação das elevatórias de água.

A seguir são descritos as partes que compõem uma estação elevatória de água, tais como, válvula de pé com crivo, filtro de sucção, válvula de retenção, registro, chave de nível bóia pêra, bem como, poço úmido, poço seco, tubulações de sucção e recalque, válvulas, conexões, e os CMB's.

As válvulas de pé com crivo, são colocadas na extremidade inferior da tubulação de sucção para impedir que a água succionada retorne à fonte quando ocorre a parada do funcionamento da bomba, evitando que esta trabalhe a seco, perdendo a escorva (PORTO, 2004). Em relação ao filtro de sucção, normalmente são acoplados à válvula de pé, que impede a entrada de partículas de diâmetro superior ao seu espaçamento.

No que tange a válvula de retenção, são utilizadas para efetuar manobras ou interromper o fluxo de água (Figura 5), normalmente em estações elevatórias são do tipo de gaveta e dotados de flanges (MACINTYRE, 1997). Além disso, são válvulas de sentido único colocada na tubulação de recalque para evitar fluxo no sentido inverso.

Figura 5. Válvula Gaveta dotados de flanges.



Fonte: Hidrotec Hidráulica (2017).

Por outro lado, o registro dispositivo para controle da vazão sistema hidráulico, assim como, o manômetro analógico mostrado na Figura 6a, é um exemplo de instrumento utilizado para medição de pressão relativa à pressão atmosférica (BAPTISTA, 2004). Também existe manômetro correto para cada aplicação industrial e cada requisito de medição.

O vacuômetro analógico também é utilizado para medição de pressões negativas nos sistemas de abastecimento de água. Os manômetros e vacuômetro são conectados junto a saída e a entrada da bomba, respectivamente por meio de uma tubulação de diâmetro reduzido (LINSINGEN, 2001).

A chave de nível bóia pêra, é utilizada para medição de nível nos mais diversos tipos de líquidos. Sua principal aplicação se faz em reservatórios ou poços, no controle de nível, acionando e desligando comandos de bombas (THOMAZINI et al., 2007).

O poço úmido é definido como o compartimento da estação elevatória destinado a acumulação da água a ser recalçada pelos CMB's, os quais podem estar instalados no próprio poço úmido acima ou abaixo do nível de água (CORBO et al., 1998). Enquanto que, o poço seco é o local utilizado para abrigar os CMB's, o barrilete, o painel de comando e o gerador de energia elétrica.

Conjunto motor e bomba

Os CMB's são equipamentos também utilizados no bombeamento de água e responsáveis por transformação da energia elétrica em energia mecânica e energia mecânica em energia hidráulica nas bombas, as quais a partir de disso, possibilitam o bombeamento de água entre os níveis requeridos. Na Figura 6 é mostrado modelo de um CMB.

Figura 6. Modelo de um Conjunto motor e bomba.



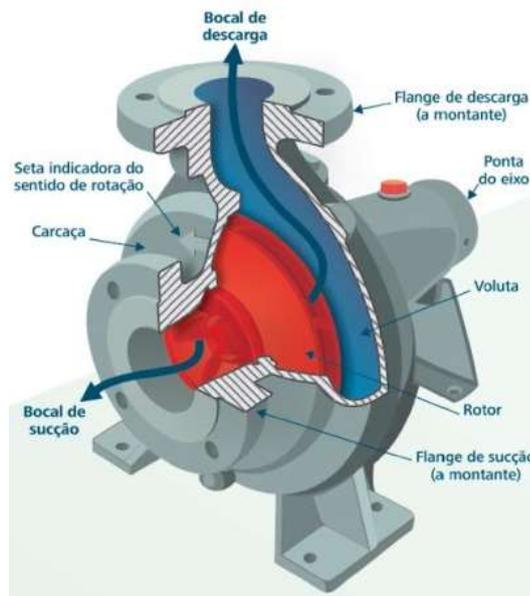
Fonte: KSB Bombas Hidráulicas S.A. (2016).

De acordo com Reis Junior (2012), o trabalho realizado pelas bombas pode ser proveniente de diversas fontes, porém, devido a sua eficiência, o motor elétrico predomina em estações de bombeamento de fluidos. Vale ressaltar que o termo bomba, utilizado é referente ao deslocamento do fluido água, haja vista que, de acordo como fluido os equipamento recebem denominações diferentes Gomes (2009).

As bombas classificam-se em duas categorias: as volumétricas ou de deslocamento positivo, e as turbobombas. As bombas volumétricas possuem uma ou mais câmaras, sobre as quais algum elemento móvel atua aumentando a pressão e provocando o movimento do líquido. As mais comuns no bombeamento de água são as de êmbolo e de diafragma.

As turbobombas caracterizam-se pela presença de rotor, por meio de sua aceleração, é transferida a potência de acionamento; a sucção, por onde o fluido entra no conjunto; e a descarga, pelo qual o fluido sai. É oportuno observar ser comum a utilização das bombas centrífugas nos SAA's. Neste sentido, na Figura 7 são mostrados os principais componentes de uma bomba.

Figura 7. Principais componentes de uma bomba.



Fonte: KSB Bombas Hidráulicas S/A (2017).

Dessa forma, a automação é uma forma de controle e operação dos CMB's, que dentre suas utilidades destaca-se o acionamento e desligamento dos CMB's, evitando assim os picos de consumo de energia elétrica; a emissão de alertas em casos de pane no sistema, além da facilidade na operação e manutenção dos equipamentos.

Curva Característica da Bomba

A bomba é um dos dispositivos de transferência de energia de fluido mais antigo que se conhece, se caracteriza principalmente pelos valores de sua altura manométrica e de vazão. Essa relação é denominada curva característica principal. A esta curva se juntam outras grandezas como o diâmetro do rotor, a velocidade de rotação, a potência motriz, o rendimento, além de grandezas relativas à sua altura de aspiração.

O sistema de bombeamento desempenha função de fundamental importância para recalque de água. Nesse sentido, as bombas cedem parte da energia de uma fonte motora a um fluido, a fim de transportá-lo de um ponto a outro (BOASZCZYK, 2012; PULEO, 2014). Esta energia pode ser fornecida pelo aumento de velocidade, pressão ou ambos Brustolini (2012).

De acordo com Dacach (1975), as curvas características das bombas constituem-se numa relação entre a vazão recalçada com a altura manométrica, tendo como referência as curvas de eficiência da bomba, com a potência absorvida, com o rendimento e às vezes com a altura máxima de sucção.

Para Tisutya (2006) as curvas características constituem-se no retrato de funcionamento das bombas nas mais diversas situações, a curva característica principal de uma bomba fornecida pelo fabricante permite relacionar: Curva vazão x altura manométrica ($Q \times H_m$); vazão x potência (CV); vazão x rendimento (%); vazão x NPSHReq. (m).

Segundo Europump (2004), as bombas são capazes de trabalhar com variados valores de vazão, potência absorvida, rotação e rendimento. Conforme Lengsfeld et al. (1991) os parâmetros mais importantes para o dimensionamento da bomba para um sistema é a altura manométrica total (H_m) e a vazão (Q).

Na Figura 8 são mostradas curvas características típicas de uma bomba fornecida pelo fabricante. As curvas em função da vazão são apresentadas esquematicamente, para uma determinada velocidade de rotação (DA SILVA; MARCOS, 2003). Essas curvas constituem em subsídio indispensável para que o projetista possa selecionar a unidade que melhor satisfaz as necessidades de um projeto de elevatória.

Figura 8. Curvas características esquemáticas de uma bomba

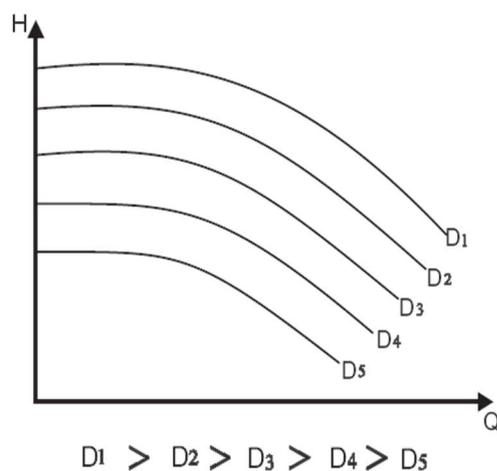


Fonte: KSB (2017).

As curvas características são fornecidas pelos fabricantes das bombas, por meio dos gráficos cartesianos, os quais podem representar o funcionamento médio de um modelo fabricado em série, bem como, o funcionamento de uma bomba específica, cujas curvas foram levantadas em laboratório.

Também pode ser fornecido pelos catálogos do fabricante um ou mais de um gráfico de uma curva, conforme mostrado na Figura 9, a capacidade da bomba varia de acordo com o diâmetro do impelidor, para um mesmo equipamento.

Figura 9. Curva de uma bomba com diâmetros diferentes do impelidor



Fonte: Mecfluquimica (2017).

A capacidade de uma bomba é a quantidade de fluido que esta consegue descarregar por unidade de tempo, por conseguinte, a vazão do fluido que a bomba fornece a tubulação. Alguns elementos podem influenciar nesse fator, tais como: rotação do impelidor da bomba, natureza do fluido e seu diâmetro. Fabricantes de bombas fornecem gráficos que mostram a faixa de vazão em que se pode operar a bomba.

Segundo Gomes (2012) e Menke (2015), o dimensionamento dos CMB's devem ser realizados a partir dos requisitos de vazão e altura manométrica dos sistemas, do que decorre a necessidade de executar medições das grandezas hidráulicas como etapa fundamental.

As seleções dos CMB's determinaram as condições posteriores de operação e, neste sentido, dominaram as decisões de controle operacional (BARBOSA, 2001). Desta forma, projetos de estações elevatórias de água e seleções de bombas têm recebido ampla cobertura na literatura como, Ormsbee e Wood (1986), Lansley (1989) e Alperovits e Shamir (1997).

Segundo Sahoo (2009), a maioria dos sistemas de bombeamento funciona fora de seu ponto de rendimento ótimo. Para antecipar o crescimento da carga, o usuário final e o fornecedor costumam adicionar de 10 a 50 % de margens de segurança.

O mesmo autor comenta ainda que bombas sobredimensionadas operam longe do seu ponto de máximo rendimento, fato que demonstra a necessidade de se realizar dimensionamento adequado dos CMB's.

Assim, recomenda-se que não seja utilizado acréscimo na potência no dimensionamento de motores com fator de serviço maior do que a unidade para acionamento de bomba hidráulica, tendo em vista que o superdimensionamento pode acarretar redução de rendimento do sistema e maior custo inicial. O dimensionamento que considera, simultaneamente, os dois fatores de segurança, implica em superdimensionamento.

Obtenção da Curva Característica do Sistema

Ao projetar uma bomba, fixa primeiramente nos valores de vazão (Q) e altura manométrica (H_{am}). Este deverá representar o melhor desempenho da bomba. Naturalmente, pode operar atendendo diferentes partes de H_{am} e Q, existindo, entretanto, uma interdependência bem definida entre esses valores (BARBOSA, 2001).

A curva característica do sistema é determinada a partir da fórmula geral da altura manométrica total. Assim, a curva pode ser separada em parte estática, que são os parâmetros que independem da vazão e parte dinâmica (MATTOS, 1998). A construção da curva característica da instalação pode ser de forma que se:

- a. Fixam-se várias vazões, estando entre elas a vazão zero e a provável vazão da instalação;
- b. Calculam-se as alturas manométricas para cada uma das vazões estabelecidas.

Para o bombeamento de água, é necessário vencer tanto a altura geométrica, quanto às perdas de carga. A energia ao líquido na forma de energia por unidade de peso de fluido bombeado denomina-se altura manométrica que consiste na soma do desnível geométrico com as perdas de carga podendo ser calculada por meio da equação 1 de Macintyre (1980).

$$H_{am} = H_g + H_f + H_{fd} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

H_{am} : Altura manométrica;

H_g : Altura geométrica (m);

H_f : Perdas de cargas localizadas (m);

H_{fd} : Perdas de Carga distribuídas (m).

De acordo com Gomes (2012) e Salvino (2015), a altura estática ou altura geométrica de elevação (H_g), representa a diferença entre os dois níveis de que o fluido precisa vencer. Em termos energéticos, significa a diferença de energia potencial que separa a superfície livre do reservatório inferior e a descarga do recalque.

E as perdas de carga podem ser contínuas em condutos de seção constante em regime permanente e uniforme e escoamento incompressível. Nesse sentido, para obter as perdas de carga existem diversas fórmulas, como, a) Fórmula racional ou universal; b) Fórmula de Hazan – Willians; c) Fórmula de Flamant; d) Fórmula de Fair – Whipple – Hisiao; e) Fórmula para tubos de PVC; f) Fórmula de Darcy – Weisbach.

3.1.1.1 Unidade de reservação de água

São unidades destinadas para compensar as variações horárias de vazão. Constituem em elementos importantes no SAA (XAVIER, 2014), pois além de atenderem às diversas finalidades, são elementos visíveis e de maior destaque no sistema.

Segundo Tsutiya (2006), Azevedo Netto e Fernandez (2015) e NBR 12217 (1994), os reservatórios de distribuição de água são dimensionados e implementados para operar com algumas finalidades, tais como:

- a. Receber vazão constante, igual à demanda média do dia de maior consumo de sua área de influência, acumular água durante as horas em que a demanda é inferior à média e fornecer as vazões complementares quando a vazão de demanda for superior à média;
- b. Segurança ao abastecimento, fornecer água por ocasião de interrupções no funcionamento normal da adução, como consequência da ruptura da adutora, paralisação da captação ou estação de tratamento, faltas de energia elétrica, etc;
- c. Regulariza pressão, uma vez que, a localização dos reservatórios de distribuição tem influência nas condições de pressão da rede, principalmente, reduzindo as variações de pressões. Reserva de água para incêndio e para suprir as vazões extras.

Além disso, Tsutyia (2006), Gomes (2012), Pereira e Condurú (2014) destacam outras vantagens possibilitadas com o sistema de reservação de água, como o bombeamento de água: o reservatório permite armazenar água por período de tempo, como por exemplo, no posto horário de ponta, deslocando o bombeamento de água para os demais horários do dia. Isto diminui sensivelmente os custos de energia elétrica.

Ademais, manutenção no rendimento dos CMB's: com valores de altura manométrica e vazão aproximadamente constante, os CMB's poderão operar próximos ao seu ponto de rendimento máximo.

Por outro lado, a utilização de unidades de reservação de água apresentam algumas desvantagens, tais como: o custo elevado de implantação. A localização, uma vez que, para atender as variações de pressões na rede, o reservatório deve ser localizado em cota adequada. Impacto ambiental, o qual pode ocorrer dependendo da localização de implementação do reservatório seja ele, elevado, apoiado ou semienterrado.

Classificação dos reservatórios

Os reservatórios de distribuição de água podem ser classificados quanto a sua posição no solo e/ou a sua localização no sistema, forma; e material de construção.

No que tange a localização do reservatório no sistema, a NBR 12218 ABNT (1994), recomenda que deve ser localizado de modo a abastecer as redes de distribuição com os limites de pressão estática máxima de 500 kPa (50 mH₂O) e pressão dinâmica mínima de 100 kPa (10 mH₂O). Os reservatórios podem ser de montante; jusante e de posição intermediária.

O reservatório de montante é localizado anterior à rede de distribuição, sendo que esse tipo de reservatório sempre fornece água à rede de distribuição, ao consumo, e possuem uma tubulação de entrada e outra de saída, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10. Reservatório de posição a montante.



Fonte: Tsutiya (2006).

O reservatório de jusante situa-se posteriormente a rede de distribuição de água, conforme apresentado na Figura 11. Também são chamados de reservatórios de sobra, porque recebe água durante as horas de maior consumo e auxilia o abastecimento, assim como, possibilita menor oscilação de pressão nas zonas de jusante da rede. Uma característica desse tipo de reservatório é a entrada e saída de água por meio de uma única tubulação.

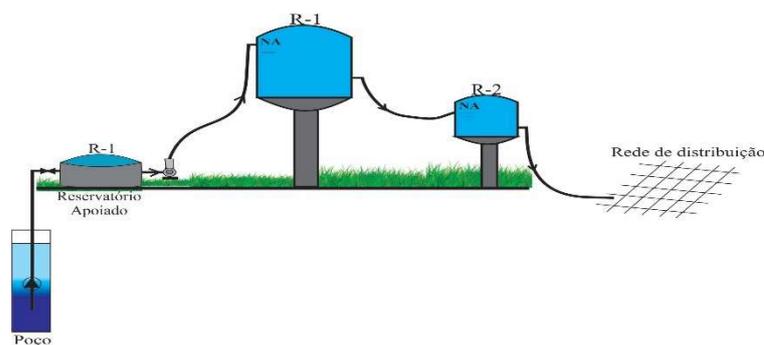
Figura 11. Reservatório de posição a jusante



Fonte: Tsutiya (2006).

E os reservatórios de posição intermediária, são intercalados no sistema de adução e tem como função servir de volante de regularização das transições entre bombeamento e/ou adução por gravidade (HELLER; PÁDUA, 2016), conforme mostrado na Figura 12.

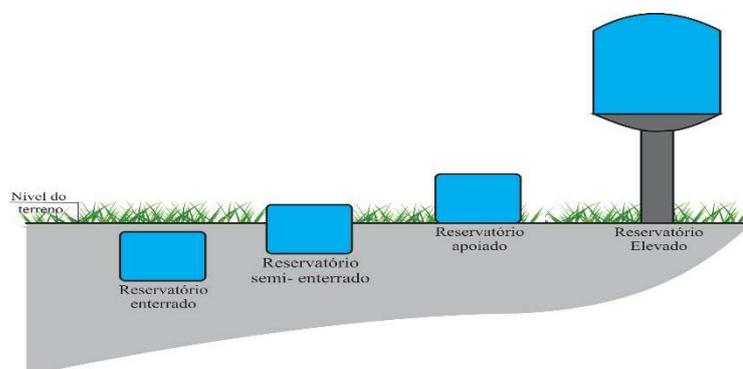
Figura 12. Reservatório de posição intermediária.



Fonte: Adaptado de Heller e Pádua (2016).

No que se refere a localização do reservatório no terreno, podem ser classificados em: enterrado, semienterrado, apoiado e elevado, de acordo com a sua posição ou instalação em relação ao terreno (HELLER; PÁDUA, 2010, 2016), conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13. Posição dos reservatórios em relação ao terreno



Fonte: Heller e Pádua (2016).

- a. O reservatório enterrado: é aquele que se situa inteiramente em cota inferior à do terreno em que está localizado. Entretanto, o custo de execução é maior e a entrada e

saída dos reservatórios e sua descarga são mais difíceis e onerosas. Em contrapartida, tem como vantagem causar menos impacto ambiental (HELLER; PÁDUA, 2016).

- b. O reservatório semienterrado: é aquele que apresenta pelo menos um terço de sua altura total situada abaixo do nível do terreno. O reservatório apoiado é o reservatório em que o fundo se encontra a uma profundidade corresponde a menos que um terço de sua altura total abaixo do nível do terreno. Os reservatórios semienterrado e apoiado são mais fáceis de ser construídos, no entanto, geralmente necessitam de um isolamento térmico adequado.
- c. Reservatório elevado¹: é o reservatório cuja cota de fundo é superior à cota do terreno onde se localiza. São dimensionados quando a topografia do terreno não é adequada para abastecer a área por outros tipos de reservatório. Apresenta como desvantagem os custos elevados e áreas disponíveis para construção das unidades.

Para Barreto (2007), os reservatórios apoiados e elevados têm grande importância na operação dos SAA's, já que permitem a redução do bombeamento de água em alguns períodos de tempo, colaborando para a redução na despesa com energia elétrica.

No que corresponde a forma do reservatório, destacam-se os reservatórios de seção retangular e circular. De acordo com, Tsutyia (2006) e NBR (1994), ressaltam que não existem restrições para escolha do formato do reservatório, porém, a forma do reservatório adotada deve proporcionar máxima economia global em fundação, estrutura, utilização de área disponível, equipamentos de operação e interligação das unidades.

Na mesma linha de pensamento, Tsutyia (2006) destaca que em relação a custo e aspecto estrutural, a forma cilíndrica é a mais econômica por gastar menos material de construção. Segundo o mesmo autor, em construções multicelulares geminadas a retangular é a mais frequente. Sua forma mais econômica dependerá das relações largura/comprimento.

Ademais, Heller e Pádua (2016) comentam que, para os reservatórios enterrados, semienterrados e apoiados, existem diversas formas, das quais predominam as circulares e retangulares.

Em relação ao material de construção, os reservatórios podem ser construídos de diversos materiais, tais como: reservatório de concreto armado; reservatório de concreto protendido; reservatório de aço; reservatório de chapa metálica, bem como, de outros materiais especiais (madeira, borracha, alvenaria, fibra de vidro, etc).

¹ É o elemento do sistema de abastecimento de água destinado a regularizar as variações entre vazões de adução e de distribuição e condicionar as pressões na rede de distribuição (NBR 12217, 1994).

Conforme Heller e Pádua (2010, 2016), embora a diversidade dos materiais que podem ser utilizados para construção de reservatórios, os de maior porte são geralmente construídos de concreto armado, e com menor frequência, de aço, alvenaria estrutural e concreto protendido.

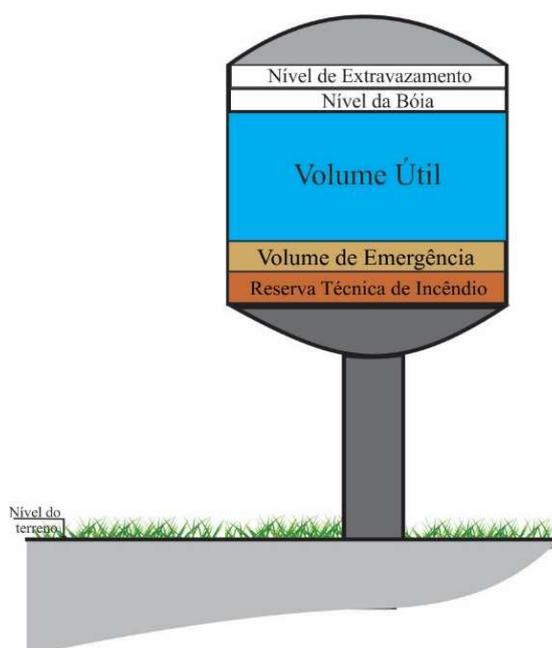
Segundo Guimarães (2007), principalmente os reservatórios de menor porte são também construídos em argamassa armada, fibra de vidro, aço e madeira. LIU (2017) comenta que os reservatórios elevados, na maioria das vezes, são em concreto armado, já os enterrados e os semi-apoiados são construídos em alvenaria de pedras, tijolos com cintamentos ou envoltimentos com malhas de ferro ou aço.

Por outro lado, a NBR (1994) também destaca que o material de estrutura do reservatório deve ser escolhido após estudo técnico e econômico que considere as condições de fundação, a disponibilidade do material na região e a agressividade da água a armazenar e a do ar atmosférico.

Volumes de reservação

Os volumes de reservação de água são dimensionados para atender determinada demanda. A respeito disso, os projetos de reservatórios de armazenamento de água possuem volume útil, volume emergência e volume de reserva técnica de incêndio, conforme mostrado na Figura 14. Esses volumes são determinados de acordo com cada projeto.

Figura 14. Volumes existentes em reservatórios de água.



De acordo com Heller e Pádua (2016), o volume útil de água corresponde ao volume compreendido entre os níveis d'água mínimo e máximo operacional. Este é o volume de armazenamento necessário num reservatório para garantir uma vazão regularizada constante.

De acordo com Guimarães (2007), não há fórmula para determinar o volume de emergência. A decisão de se considerar determinado volume para emergência, deverá ser do responsável pelo SAA, pois esse volume depende da vulnerabilidade do sistema.

Segundo Miguel et al. (1996), para o SAA de pequenas populações, o volume de emergência poderá ser igual ao volume de incêndio. Porém, para populações médias e grandes, recomenda-se que o volume de emergência seja maior que o volume de incêndio.

Nesse sentido, Orsini (1996) destaca que a concessionária do serviço de água deverá dar instruções ao projetista sobre o volume a ser adotado conforme a segurança que se deseja para o sistema. Essa segurança tem por finalidade reduzir a velocidade com que é possível resolver os problemas de emergências. Assim, Orsini (1996) cita ainda, que em alguns países utilizam uma reserva de 25% do consumo máximo diário previsto.

O volume para combate a incêndio é necessário quando a capacidade do SAA não é suficiente. Em sistemas de grande porte, no qual as demandas de incêndios são uma fração muito pequena da demanda máxima diária, normalmente não há necessidade de se prever um volume adicional de reservação para o combate a incêndios (TSUTIYA, 2006).

Uma vez que constata a necessidade de um volume adicional para combater incêndio, uma das alternativas recomendáveis de cálculo é multiplicar a vazão necessária pela duração do fogo. Para incêndio de tamanho médio, a AWWA (1998) recomenda as vazões e durações do fogo, apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros para a determinação do volume para combate a incêndio

Vazão para o combate a incêndio (l/s)	Duração do fogo (h)
Menos que 157	2
189 - 220	3
251 - 755	4

Fonte: AWWA (1998).

De acordo com Walski (2000), para os Estados Unidos, a vazão necessária para o combate a incêndio é de aproximadamente 31,4 l/s. Enquanto que na Espanha, Miguel et al. (1996) comentam que a norma de edificações recomenda volumes para combate a incêndios de 120 m³ para populações menores que 5.000 habitantes e 240 m³ para as demais populações.

Segundo Orsini (1996), o incêndio é um evento de frequência relativamente baixa no Brasil, principalmente em cidades de médios e pequenos portes normalmente não se destina um volume de reservação para o combate a incêndios.

Assim, as concessionárias preferem ter uma rede de distribuição malhada, que apresente grande flexibilidade de manobra para possibilitar o desvio da água para os hidrantes. Entretanto, em áreas de grande risco deve ser prevista a reserva para incêndio.

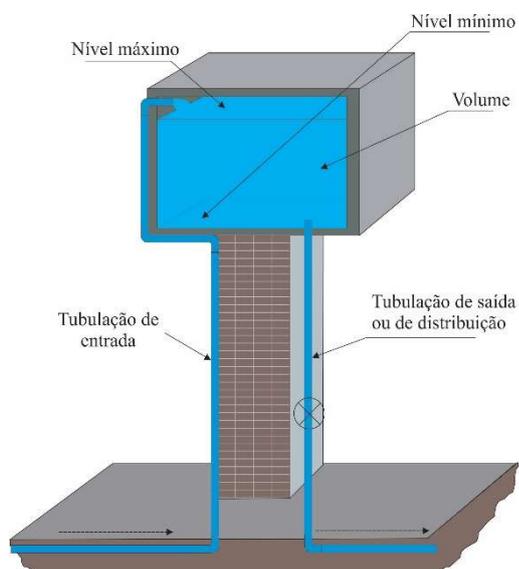
3.1.1.1.1 Operação de reservatórios de distribuição de água

A operação de reservatórios de distribuição de água é realizada com manobras de válvulas, registros, com controle do nível da água e/ou de acionamento ou desligamento de CMB's. De acordo com Tsutiya (2006) e Shokri (2013) é necessário estabelecer limites operacionais de segurança fundamentados em dados e informações do sistema.

Segundo Heber (2012) e Denaro (2017), para a análise da operação de um reservatório é indispensável o conhecimento da curva de demanda do dia de maior consumo, de preferencia obtida de banco de dados com a série histórica mais longa possível.

Além disso, é importante atualização do cadastro das partes componentes do reservatório, tal como, tubulação de entrada e saída, volume, nível d'água máximo e mínimo, extravasor, tubo de limpeza e instrumentos de controle (Figura 15), as quais devem ser devidamente dimensionadas e especificadas, de forma a garantir a funcionalidade da unidade de reservação.

Figura 15. Elementos de uma unidade de reservação.



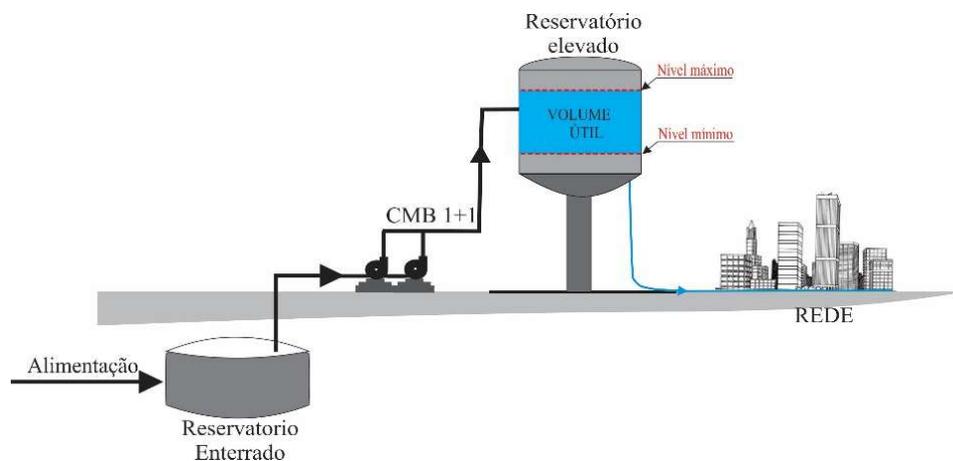
Fonte: Adaptado de Tsutiya (2006).

Os principais parâmetros de controle operacional dos reservatórios são o nível da lâmina líquida e as vazões de entrada e de saída do reservatório (GOMES, 2012). Esses parâmetros são utilizados como referência no monitoramento do reservatório. Para Tsutiya (2006), os níveis operacionais importantes para o controle de um reservatório de água são:

- a. Nível Mínimo: para evitar vórtices, entrada de ar, mau funcionamento da elevatória (se houver);
- b. Nível Máximo: para que haja tempo hábil de manobra, evitando que atinja o limite de extravasamento do reservatório, ou que a bóia de segurança seja acionada;
- c. Nível da Bóia: nível d'água a partir do qual é acionado o mecanismo de uma bóia que atua localmente no fechamento da válvula de controle do reservatório;
- d. Nível de Extravasamento: lâmina d'água a partir da qual começa haver perda de água pelo tubo ladrão.

Na Figura 16 são mostrados os níveis máximo e mínimo operacionais considerados importantes por Tsutiya (2006), para o controle de reservatório de água.

Figura 16. Níveis operacionais de um reservatório.



Além dos níveis de água no reservatório, Bolouri-Yazdeli (2014) ressalta a importância de observar:

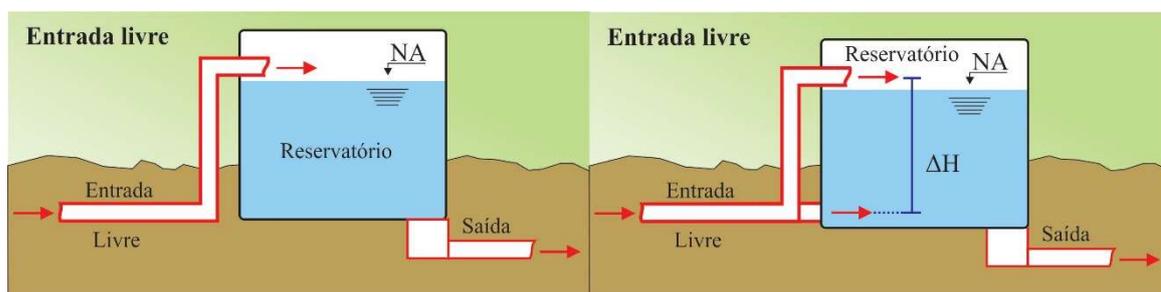
- a. O volume nominal: compreendido entre o fundo do reservatório e o nível de extravasamento;
- b. Volume útil: compreendido entre o nível alto e o nível baixo, destinado à operação do reservatório,
- c. E a folga: correspondente à diferença entre o limite da bóia e o limite alto, que corresponde ao acréscimo de volume entre a emissão do alarme de limite alto e o total fechamento da válvula de controle.

Por outro lado, Shokri (2014) ressalta que a posição do nível d'água do reservatório pode reduzir em até 36% o consumo de energia elétrica. Em consequência disso, a unidade de reservação acaba influenciando na rotina operacional da estação elevatórias de bombeamento de água e, em decorrência disso, no consumo e custo de energia elétrica.

Nesse sentido, Tsutiya (2006) ressalta a necessidade de definição dos limites operacionais de segurança, a fim de evitar falhas e/ou acidentes. Ainda segundo o mesmo autor, a determinação desses limites dependerá da definição da folga de segurança. Guimarães et al. (2007) e Shokri (2013) também observam que o reservatório de distribuição de água deve permitir o abastecimento da população de forma confiável.

Na Figura 17 são mostradas informações importantes do funcionamento do reservatório de distribuição de água, tais como, tubulação de entrada de água, a qual pode ser dimensionada em qualquer posição da altura do reservatório. Todavia, duas posições de entrada prevalecem: a entrada acima do nível de água (entrada livre) e a entrada afogada.

Figura 17. Tubulação de entrada de água no reservatório.



Fonte: Guimarães et al. (2007).

No Brasil, é comum utilizar a entrada livre devido a menor complexidade no projeto para a escolha do CMB (GUIMARÃES et al., 2007; LIMA, 2011). A velocidade da água na tubulação de entrada não deve exceder o dobro da velocidade na adutora que alimenta o reservatório. Além disso, a entrada de água deve ser dotada de sistema de fechamento por válvula, comporta manobrada por dispositivo situado na parte externa do reservatório.

Por outro lado, deve ser verificado o impacto decorrente da queda da água no fundo do reservatório vazio. No caso de entrada afogada em reservatório de montante, a tubulação de entrada deve ser dotada de dispositivos para impedir o retorno de água.

De acordo com Guimarães et al. (2007) a velocidade da água na tubulação de saída não deve exceder uma vez e meia a velocidade na tubulação da rede principal imediatamente a jusante. Para isso, a saída de água deve ser dotada de sistema de fechamento por válvula, comporta ou adufa, manobrada por dispositivo situado na parte externa do reservatório.

A jusante do sistema de fechamento deve ser previsto dispositivo destinado a permitir a entrada de ar na tubulação. A saída de água de reservatório é um dos componentes de maior importância, pois é nela que acontecem os fenômenos hidráulicos referentes à formação de vórtices. A entrada de ar por meio de vórtices poderá acarretar problemas no SAA, como:

- a. Diminuição da vazão nas adutoras;
- b. Redução da capacidade de armazenamento do reservatório;
- c. Diminuição da eficiência e vazão da bomba;
- d. Vibração e cavitação da bomba;

Diante de tal situação, Tsutiya (2006) ressalta procedimento tradicional para evitar a formação de vórtices, o qual consiste em considerar a submergência mínima na saída de água do reservatório. Ainda de acordo com o autor, a tubulação de saída de água, embora seja apenas uma parte do reservatório, é um dos componentes de maior importância, pois é nela que acontece os fenômenos hidráulicos referentes a formação de vórtices.

Entretanto, há grande divergência entre os diversos autores com relação aos valores a serem adotados, pois apesar de várias pesquisas a respeito de vórtices, ainda não é completamente esclarecido, devido complexidade do fenômeno. Por outro lado, Tsutiya (2006), Gomes (2012), Heller e Pádua (2016), apresentam recomendações para melhorar a operação diária do sistema de reservação:

- a. No que se tange ao extravasor, é recomendado que os reservatórios devem ser providos de extravasor com capacidade para a vazão máxima afluyente em condições normais de operação;
- b. Com relação a ventilação, sugere-se abertura de ventilação para saída de ar quando a lâmina sobe e a entrada de ar quando a lâmina desce. Isso é feito para evitar os esforços devido ao aumento e diminuição da pressão interna.
- c. E no que diz respeito a vazão de ar, para dimensionamento deve ser igual à máxima vazão de saída de água do reservatório.
- d. Em relação ao acesso no interior do reservatório, devem ter na sua laje de cobertura aberturas que permitem o fácil acesso ao seu interior, bem como escadas fixadas nas paredes, com abertura mínima de 0,60m x 0,60 livres.

As recomendações e regras operacionais em reservatórios de água podem ser definidas para otimizar o sistema, buscando atender diversos objetivos, como a redução dos gastos com energia elétrica, minimização das falhas no atendimento a demanda, redução de perdas físicas

em função das pressões na rede e flexibilidade na operação de sistemas com múltiplos reservatórios interligados.

Logo, um das vantagens na operação dos reservatórios, é reservar volume de água horas antes do início do posto horário de ponta. Isso é interessante, pois, os custos em SAA dependem também das tarifas elétricas (BAGIROV et al., 2013). Dessa forma, torna-se interessante o deslocamento do bombeamento de água para o posto horário fora de ponta, para evitar as tarifas de energia elétrica mais onerosas.

Lima (2010) recomenda verificar a viabilidade da construção de um novo reservatório para atender o consumo de água no horário de ponta de energia elétrica e para suprir a demanda crescente das cidades. Porém, Gomes (2009) destaca que a construção de novos reservatórios não é solução automática para se deslocar a demanda de energia elétrica.

Em muitos sistemas é possível otimizar ou ampliar a reservação existente, permitindo que os bombeamentos sejam deslocados para fora do posto horário de ponta, porém, a questão não é tão simples como pode parecer a primeira vista, pois o funcionamento adequado depende de uma boa operação e de um bom nível de controle operacional (GOMES, 2009).

Ainda sobre o assunto, Soler et al. (2016), comenta que o problema de planejamento de estoque de água em reservatórios consiste em decidir, em cada período do horizonte de planejamento; a operações dos CMB's de captação que abastecem os reservatórios e a transferência de água entre eles.

Isto permite que a demanda estimada de cada reservatório seja atendida em cada período e que sejam respeitados seus níveis mínimos e máximos, e o custo de energia elétrica seja mínimo. Para facilitar a operação do sistema, é considerado um custo de acionamento das bombas hidráulicas, a fim de minimizar o número de vezes que as bombas são acionadas.

A questão da reservação em sistemas de públicos de abastecimento de água não é tão simples como poderia parecer à primeira vista, pois o funcionamento adequado da reservação em um sistema depende de uma boa operação e de um bom nível de controle operacional, condições estas que costumam faltar na maioria dos SAA's.

Nesse cenário, é indispensável conhecer as curvas de demanda da área abastecida pelo reservatório, o que implica medir continuamente a saída. Este já é primeiro problema, pois, frequentemente não se mede o volume de água na saída dos reservatórios. Geralmente, os gestores só se preocupam em medir os volumes de água entrada do reservatório (PEREIRA; CONDURÚ, 2014).

Neste contexto, a utilização do sistema de telemetria na operação dos reservatórios é de suma importância, pois, monitora continuamente informações de nível dos reservatórios apoiado e elevado, sendo essas informações utilizadas para acionamento e desligamento dos CMB's. A respeito disso, Silva (2014) observa que:

A maioria dos projetos de distribuição de água não prevê instrumentos de controle operacional, como a macromedição, a telemetria, a automação, o controle de pressão, o cadastro, uma adequada integração com o sistema antigo e equipamentos operacionais básicos (SILVA, 2014).

O sistema telemetria permite o contínuo acompanhamento da variação do nível de água no reservatório o que é fundamental para a análise hidroenergética e planejamento operacional, monitoramento e controle dos SAA's.

Além disso, é possível monitorar em tempo real o funcionamento de estações elevatórias, medidores de vazão, dispositivos elétricos e hidráulicos; armazenar e apresentar dados sobre a qualidade do abastecimento, alarmar transbordamento nos reservatórios, falhas de operação, pressões e vazões; prevenir e minimizar perdas economia de energia elétrica.

De acordo com Gomes (2012), para projetos que pretendem retirar demanda do posto horário de ponta, aumentando a capacidade de reservação, os organismos patrocinadores dos projetos certamente exigirão que os estudos sejam embasados em:

- a. A curva de demanda média horária do reservatório, para o dia de maior consumo;
- b. As configurações possíveis para o bombeamento, com ou sem o uso de conversor de frequência e as respectivas vazões bombeadas, hora a hora;
- c. O consumo e demanda de energia, na ponta e fora de ponta, com a situação atual;
- d. As especificações e curvas características do bombeamento atual e a curva do sistema;
- e. As especificações e curvas características para o bombeamento e sistema proposto.

Vale observar que as dimensões do volume útil de reservação tem impactado na rotina operacional de muitos SAA's e, conseqüentemente, o consumo de energia elétrica tem sido cada vez maior nesses sistemas (PEREIRA; CONDURÚ, 2014). Portanto, é imprescindível orientações e planejamento na operação para melhoria e eficiência do SAA.

3.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

A energia elétrica é indispensável na operação dos SAA's. E com o aumento constante do preço da eletricidade, existe a necessidade de investir em soluções mais eficientes para reduzir os custos elevados de energia elétrica (RAMOS et al., 2010; FREITAS, 2016; OZCELIK, 2017).

De acordo com Brasil (2017), em muitas companhias de saneamento no Brasil, o consumo com energia elétrica é a segunda maior despesa dos SAA's, no qual estão incluídas atividades de captação, tratamento, transporte e distribuição de água.

O uso intensivo das elevatórias é o mais importante consumidor de energia elétrica nos SAA's, e isso tem elevado o custo de energia elétrica, sendo um dos principais custos operacionais das prestadoras de serviços de saneamento básico (TSUTIYA, 2006; GOMES, 2012; VILANOVA, 2015).

Convém observar, que a maioria dos sistemas de bombeamento atualmente existentes no Brasil, responsáveis pelas elevatórias de água bruta, potável e residuárias, foram projetadas e construídas sem a preocupação com o custo da energia elétrica, já que este era fortemente subsidiado e não onerava muito o custo operacional das estações de bombeamento (CASTANHO, 2014; DUTRA, 2014).

Atualmente, se discute meios para utilização de energia elétrica de forma eficiente nos SAA's (WWAP, 2015; GHOSH et al., 2016; KRAUSE, 2017). Neste contexto, Moura (2010) destaca a importância de incentivar novas práticas e procedimentos os quais possam oferecer o mesmo produto de ou serviço com redução de custo com energia elétrica.

Nos estudos disponíveis na literatura, é verificado que grande parte das pesquisas desenvolvidas para a otimização de operação dos SAA's visa à redução dos custos de energia elétrica com bombeamento de água (BAGIROV, 2013; MALA-JETMAROVA et al., 2015; HOFFMAN, 2017).

Neste sentido, Xu (2015), Vilanova (2015) e Chen (2015) comentam que os estudos relacionados à otimização das operações dos SAA's, contribuem para futuras ampliações dos sistemas de bombeamento e a adquirir melhores informações das interações entre os seus componentes.

A respeito disso, autores como, Carvalho e Oliveira (2008), Oliveira Filho et al. (2011) e Gomes e Bezerra (2012) ressaltam que o consumo de energia elétrica é dependente da altura de recalque, da tubulação e dos equipamentos de bombeamento de água, sendo possível melhorar a eficiência de operação por meio da adequação técnica dos CMB's.

Dada a relevância à redução ao consumo de energia elétrica, Oliveira et al. (2010) e Ghaddar (2014) comentam que o uso de motores elétricos superdimensionados e/ou reconicionados induz a redução na eficiência do uso da energia elétrica, pois carregamento abaixo de 75% da potência nominal requer maior quantidade de energia elétrica para produzir a mesma energia mecânica.

Luz et al. (2016), resalta que o consumo elevado de energia elétrica no bombeamento do SAA, pode estar relacionado aos equipamentos, que são obsoletos e não são dimensionados adequadamente. Além disso, o aumento da demanda de água resulta em funcionamento dos CMB's no posto horário de ponta do sistema elétrico, horário no qual a tarifa de energia elétrica é mais onerosa do que no posto horário fora de ponta.

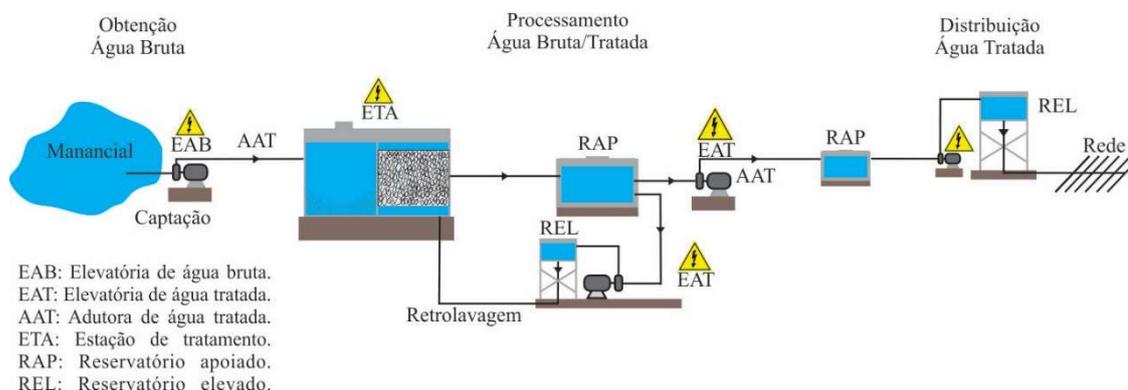
Segundo Cardoso et al. (2009), Azevedo Netto e Farias (2013) e Rocamora et al. (2013), a decisão de quantas bombas são adequadas a uma estação de bombeamento de água e qual capacidade de cada CMB é de responsabilidade do engenheiro projetista e será dimensionada em função do hidrograma de vazão de consumo, considerando ou não a existência de reservatórios.

O consumo de energia elétrica depende da vazão, altura manométrica e da eficiência dos equipamentos eletromecânicos (DUARTE et al., 2009), haja vista, que é necessário ser analisadas de forma individual para cada unidade consumidora de energia elétrica, e global para o SAA (PEREIRA; CONDURÚ, 2014; REGO, 2016; PIMENTEL, 2015).

Pereira e Condurú (2014) ressaltam que o consumo de energia elétrica no SAA tem relação direta com a configuração do sistema, unidades, equipamentos utilizados, bem como, com a rotina operacional e manutenção do sistema. Sendo que, o desempenho das unidades pode ser afetado pelas características e condições operacionais das outras unidades.

As unidades consumidoras de energia elétrica utilizam equipamentos na rotina operacional normal de operação do SAA, tais como: CMB's das estações elevatórias de água bruta (EAB), de água tratada (EAT), dos agitadores, floculadores, e raspadores de lodo da ETA. Na Figura 18 é mostrado exemplo das unidades que consomem energia elétrica no SAA.

Figura 18. Unidades consumidoras de energia elétrica no SAA.



Fonte: Pereira e Condurú (2014).

Os sistemas de bombeamento de água consomem aproximadamente 3% da energia distribuída no mundo (GONÇALVES et al., 2013), sendo os principais consumidores de energia elétrica no SAA. Segundo Pereira e Condurú (2014), os CMB's nas estações elevatórias de água dos SAA's tem relação direta com as despesas de energia elétrica, isso gera impacto na eficiência e sustentabilidade do sistema. Diante disso, o controle ótimo do sistema é uma ferramenta importante para minimizar seus custos operacionais.

De acordo com Soler et al. (2016), além dos CMB's no SAA, existem também outros equipamentos que consomem energia elétrica, tais como, sopradores de ar, equipamentos de injeção, controles, iluminação e, em alguns casos, dependendo do processo de desinfecção (por luz ultravioleta e ozonização), no qual também há consumo de energia elétrica.

Por outro lado, Ramos et al. (2012) afirmaram que o consumo de energia elétrica, na maioria dos SAA's em todo o mundo, poderia ser reduzido em pelo menos 25%, por meio de melhorias de eficiência energética, o que evidencia a importância do desenvolvimento de modelos que definam novas estratégias operacionais, sobretudo, nas estações de bombeamento.

O consumo de energia elétrica nas etapas do ciclo de uso da água é determinado considerando vários fatores, estando entre os principais: a origem da água, o volume de água a ser aduzida, a distância de adução e a topografia da região (SELEK, 2012; PULEO et al., 2014). Segundo Tsutyia (2006) na operação de ETA's são utilizados bombas para lavagem dos filtros, remoção de lodo, recuperação de água de lavagem dos filtros, recalque de água para distribuição, sendo estes grandes consumidores de energia elétrica.

No que diz respeito à distribuição de água, Justino e Nogueira (2013) e Bagirov et al. (2013), comentam a necessidade de se considerar fatores como: existência de reservatórios de

distribuição (apoiado ou elevado), topografia do terreno, este último influenciará diretamente na determinação da altura manométrica e na pressão disponível nos trechos da rede de distribuição.

Por isso, a busca de alternativas para economia de energia elétrica assume, portanto, um papel de importância fundamental na redução dos custos e isso deve despertar o interesse de gestores das companhias de saneamento. Assim, o consumo de energia elétrica precisa ser avaliado em função das demais unidades do SAA, no caso, dos reservatórios de distribuição de água.

3.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

A crise energética do início do século XXI levou o Governo Brasileiro a decretar racionamento de energia elétrica, sendo estabelecidas cotas com medidas punitivas em busca da redução de 20% no consumo de energia elétrica. No setor de saneamento foi evidenciado o desperdício de energia elétrica provocado pelo grande volume perdido de água nos municípios brasileiros (CONDURÚ; PEREIRA, 2012).

Melhorias com foco em eficiência energética podem oferecer maior confiabilidade e qualidade no fornecimento de água a custo menor. Uma das preocupações do PROCEL SANEAR (2017), programa, vinculado a Eletrobrás, Ministério de Minas Energia é quanto a eficiência hidroenergética, neste sentido, esse programa tem como objetivo:

Desenvolver de projetos que promovam o combate ao desperdício de água e energia elétrica no setor de saneamento, bem como a integração institucional com a academia, agentes governamentais, associações de classe, entidades públicas e privadas, de modo a minimizar fatores críticos à transformação do mercado da eficiência energética no Brasil (PROCEL SANEAR, 2017).

De acordo com Sobrinho e Borja (2016) e Abday (2014), os SAA's têm demandado crescente consumo de energia elétrica, o que tem aumentado também os custos de operação. Este consumo ocorre nas atividades de captação, tratamento e distribuição de água, bem como, na operação do sistema, na iluminação das áreas administrativas e nos serviços auxiliares.

Segundo Cherchi et al. (2015) e Pillot (2016), as perdas de energia elétrica das companhias de saneamento ocorrem nas estações elevatórias e originam-se, principalmente, por causa da baixa eficiência dos equipamentos eletromecânicos, por procedimentos operacionais inadequados e por falha na concepção dos projetos.

Neste sentido, Krocová (2016) e Mala-Jetmarova et al. (2017) comentam que as principais medidas operacionais que visam à diminuição do custo energético dos SAA's englobam a alteração do sistema de bombeamento reservação, dos procedimentos operacionais das estações de tratamento de água e a utilização de conversores de frequência.

Apesar dos estudos para a eficiência energética, a maioria dos trabalhos não se apresenta de forma viável ao uso racional de energia elétrica nos SAA's em tempo real. Assim, com base na realidade descrita, tem-se a necessidade premente de estudar de forma conjunta, a gestão do uso eficiente de energia elétrica nos SAA's para reduzir a despesa com energia elétrica (VILANOVA; BALESTIERI, 2014; COELHO, 2014).

A eficiência energética nos SAA's requer melhor controle dos processos, que podem ser entendido como conjunto de condições, ou causas que, agindo juntas, geram um dado resultado (THORTON, 2012). De acordo com Fracasso (2014) e Schaltegger (2015), devido à quantidade de energia elétrica consumida pelas estações de bombeamento de água, os trabalhos de otimização visam estratégias do acionamento dos CMB's ao longo do dia.

Segundo Jayaram e Srinivasan (2008), Jung (2014) e Babaei (2015), a operação ótima dos SAA's é definida por um conjunto de regras, ou uma programação, que indica quando cada bomba do sistema deve ser acionada ou desligada em operação determinado, de modo a atender às restrições operacionais, de quantidade e de qualidade, com o menor custo possível.

Por outro lado, os indicadores de eficiência energética usuais nos serviços de abastecimento público são os de custo unitário da energia adquirida da concessionária e os que relacionam a energia consumida com o volume de água bombeado.

Acerca disso, Gordic (2010), comenta que o melhor indicador de eficiência energética é o consumo específico de energia. Em SAA, a utilização do consumo específico de energia normalizado permite comparar instalações de diferentes alturas manométricas.

Para Condurú e Pereira (2012), a avaliação das ações de eficiência energética é prejudicada pelas informações hidroenergéticas no setor de saneamento brasileiro ainda serem desarticuladas, incompletas e restritas aos seus próprios geradores, sendo relacionadas em pequeno número nas bases governamentais, como na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), na Pesquisa Nacional de Amostra por Domicílios (PNAD) e no Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento Básico (SNIS).

A PNSB reúne parte dos resultados da pesquisa sobre a oferta e a qualidade dos serviços de saneamento básico nos municípios Brasileiros, com base em levantamento realizado junto às prefeituras municipais e empresas contratadas para a prestação de serviços de saneamento. Porém, é observada nessa base de dados e na base do PNAD, a ausência de informações que correlacionem água e energia elétrica nos SAA's.

Dentre as bases de dados apresentadas do setor de saneamento, é oportuno observar que, somente o SNIS, mais importante sistema de informações do setor de saneamento brasileiro, apresenta indicadores de consumo e despesas de energia elétrica nos SAA's. A respeito disso, em Condurú e Pereira (2012) é encontrada a seguinte argumentação:

Apesar do SNIS ser um instrumento de informação para o setor de saneamento, apresenta desencontros e divergências na coleta, processamento e interpretação, formal ou não, de dados primários e de indicadores de desempenho, os quais, normalmente, não tem resultado em informação estratégica para a gestão dos sistemas de abastecimento de água e, muito menos, em conhecimento consolidado no setor (CONDURÚ; PEREIRA, 2012).

Ainda de acordo com Condurú e Pereira (2012), a deficiência de dados hidroenergéticos por horário de funcionamento e por unidade, dificulta a gestão do desempenho do SAA. Além disso, é preciso relacionar os dados hidroenergéticos com outras informações, como população atendida, período de paralisação, volume perdido de água etc.

Um dos principais indicadores de eficiência da operação dos SAA's é o índice de perdas de água. Brasil (2017) destaca que o cenário brasileiro é bastante problemático. A média de perdas de água é de aproximadamente 40%, porém, em algumas companhias esse valor supera 60%. Esse índice de perdas de água reduz o faturamento das empresas e a capacidade de investimento.

Segundo ABES (2015), o elevado nível de perdas preocupa as lideranças de saneamento pelo menos a partir do início dos anos 2000, especialmente por causa da escassez hídrica que estas organizações enfrentam e pelos altos valores das perdas, gerando demanda adicional num SAA já bastante exigido pelo desenvolvimento urbano das cidades brasileiras.

A situação atual dos prestadores não favorece os investimentos em redução de perdas de água. Parte importante dos operadores não possui quadro de profissionais em quantidade suficiente e, mesmo quando os tem, não está suficientemente treinado e capacitado para gerenciar os sistemas de modo a manter baixos e sob controle os índices de perdas (ABES, 2015; CAMBRAINHA, 2015).

Além disso, outro fator que agrava o problema é a precária condição física dos SAA's, com redes antigas, escassez de equipamentos e instrumentos, e até mesmo de cadastros técnicos e comerciais, haja vista, a existência de prestadores que desconhecem as principais características do sistema que operam.

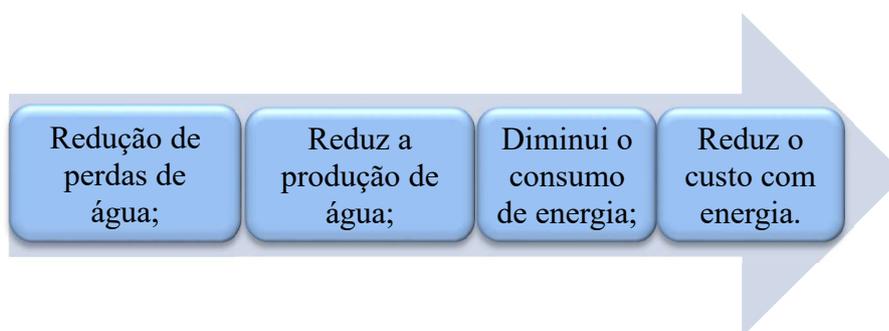
Vale comentar estudos realizados com a finalidade de atingir metas de redução de perdas de água, utilizando a aplicação do método MASPP². Neste contexto, a concessionária “Águas de Niterói” iniciou em 2005 a implantação do PROGRAMA PRODUZA para redução de perdas de água. Após dois anos dessa ação houve importantes melhorias, pois proporcionou ganhos expressivos em rentabilidade.

Estudos aplicando o método de MASPP também foram utilizados em concessionária de outras localidades, como, no SAER, Rio Branco, desde 2008 apresentou entre outros resultados, a redução das Perdas Físicas de água de 1600 l/lig/dia para 1.100 l/lig/dia de junho 2008 até julho de 2010, o aumento do volume micromedido, a redução do volume produtor, o aumento do faturamento e o aumento da arrecadação. E na Sabesp, a qual obteve redução do volume perdido de água de 897.766 m³/mês, o equivalente a redução de 11,2%.

Sob a visão econômica, a perda de água nos SAA's, gera desperdício dos recursos públicos, aumentando a despesa para a prestadora desse serviço, que normalmente é repassado para o usuário (SAIANI, 2007; PERTEL, 2016).

Neste contexto, destacam-se sinergias nas ações de redução de perdas de água e eficiência energética. Portanto, quando reduz o índice de perdas diminui a produção de água que, por sua vez, diminui o consumo de energia elétrica e também as despesas de energia elétrica, conforme mostrado na Figura 19.

Figura 19. Relação entre redução das perdas de água e eficiência energética.



² Método de Análise e Solução de Problemas de Perdas D' Água e de Faturamento. O MASPP pode ser entendido como uma adaptação do Ciclo de Deming, também conhecido como Ciclo do PDCA (Plan-Do-Check-Act) para programas de redução de perdas.

Os benefícios diretos das medidas de eficiência energética são refletidos na redução dos gastos com energia elétrica. Além disso, é possível apontar benefícios indiretos. Por exemplo, os gastos investidos em conservação diminuem a necessidade de ampliação da geração de energia (SOARES, 2015; FILHO, 2016).

De acordo com ABES (2005), para cada R\$ 1,00 gasto em conservação de energia elétrica, é economizado R\$ 8,00 em investimento para geração de mais energia. Além disso, aumento de eficiência permite que as empresas tenham mais recursos para investimento.

A respeito disso, Pereira e Condurú (2014) enfatizam que, para a busca da eficiência energética no SAA, é preciso identificar os pontos de consumo de energia elétrica, os horários em que a tarifa apresenta os maiores valores. O primeiro serve para classificar as unidades por prioridades de ações, o segundo para avaliar alternativas para a rotina operacional do SAA.

Os mesmos autores destacam ainda que a gestão eficiente desses recursos são fundamentais para o desenvolvimento sustentável, discutido amplamente entre políticos, empresários, acadêmicos e sociedade civil. Existem significativas oportunidades para melhoria de eficiência dos SAA's urbanos no Brasil.

Portanto, a implantação de medidas de gestão que possam reduzir os custos com problemas nos SAA é importante para a viabilidade econômica das empresas que operam esses sistemas. Assim, o sucesso das medidas de gestão está diretamente ligada ao conhecimento e participação de todos os agentes responsáveis na companhia de saneamento.

Neste sentido, as primeiras pesquisas de registro de melhoria de eficiência dos SAA's foram realizadas na década de 1970, com programação dinâmica, (LANSEY, 1994) seguido por uma série de trabalhos utilizando esse método (JOLLAND; COHEN, 1980), apesar de muito destes algoritmos serem desenvolvidos para sistemas relativamente simples, também se utiliza em tempo real para sistemas mais complexos (ALBUQUERQUE, 2007).

Na literatura técnica é possível encontrar vários estudos e experiências realizados em diversas localidades do mundo com aplicação de técnicas de pesquisa operacional e otimização com a perspectiva de reduzir os gastos com energia elétrica e custos operacionais em sistemas de abastecimento de água.

Em Melbourne, na Austrália, foi desenvolvido um modelo computacional e tecnologia de monitoramento para o planejamento e operação do SAA (COSGRIFF et al., 1985). O resultado desse modelo computacional foi a melhoria no acerto hidráulico quanto à operação e manutenção do sistema, tendo consideráveis economias nos custos operacionais.

Nos Estados Unidos, Brasiley e Jacobs (1989) já relatavam que aproximadamente 7% da energia elétrica consumida naquele país é utilizada pelas empresas de saneamento, podendo estimar que 90% deles são referentes ao tratamento e bombeamento de água bruta.

Em Washington D.C, Ormsbee et al. (1989) propuseram metodologia envolvendo duas fases básicas: o desenvolvimento de uma trajetória ótima de nível de água no reservatório e outra para operação ótima da bomba. Este modelo foi aplicado em um setor de distribuição de água desse distrito federal. Essa metodologia possibilitou redução no custo anual de energia elétrica de 6,7%, quando comparado ao custo previsto em projeto.

Vários autores como Lannuzel e Ortolano (1989), Dandy (1997), Ormsbee e Reddy (1995) e Pezeshk e Helweg (1996), baseados em experiências de operadores de elevatórias, investigaram possíveis economias potenciais que podem resultar de uma modificação na operação de CMB's utilizando recursos de pesquisa operacional acoplados aos modernos recursos de informática, incluindo métodos heurísticos.

Dentre estes se podem citar: programação dinâmica (ORMSBEE et al., 1989; YEH et al., 1992; LANSEY; AWUMAH, 1994; NITVATTANANON et al., 1996): programação linear (LITTLE; MCCRODDEN, 1989; JOWIT; XU, 1990) e programação não linear (BRION; MAYS, 1991; SANTANA, 1999).

Na pesquisa de Jowitt e Germanopoulos (1992) foi desenvolvido modelo de otimização linear para minimizar o custo de bombeamento de água em SAA no Reino Unido. Nesse modelo eles consideraram a eficiência dos CMB's, a modalidade da tarifa de energia elétrica, o perfil do consumidor e limitações operacionais da rede. A abordagem foi aplicada e mostrou que a economia nos custos é possível. O método foi considerado com baixa utilização de tempo computacional, o que pode ser vantajoso na utilização em tempo real.

Nitivattananon et al. (1996) propuseram um modelo de otimização progressiva. O modelo dividia o sistema em vários subsistemas no tempo e espaço, planejando intervalos dentro dos períodos operacionais. O modelo foi aplicado no SAA da cidade de Pittsburgh, na Pensilvânia. O resultado deste modelo apresentou redução de 20% nos custos de operação das estações de bombeamento, quando comparados com aos custos reais.

Experiências realizadas por Brion e Mays (1991), na cidade de Austin, no Texas, com modelo de otimização e simulação aplicado no sistema de bombeamento de água, conseguiram redução de 17,3% nos custos operacionais do sistema.

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

Os métodos para a determinação de um registro ótimo para operação de bombas em SAA foram apresentados por Lansey e Awumah (1994). Esta metodologia minimiza custo de energia elétrica, inclui restrições quanto ao número de CMB, para o nível dos reservatórios, quando há variação dos níveis de água, no qual, as características hidráulicas são analisadas, gerando simplificação hidráulica e funções de custo para a operação on-line.

Leon et al (2000) desenvolveram um sistema híbrido para gerenciar o sistema de abastecimento de água da cidade de Sevilha, na Espanha, e os resultados forneceram economia de 25% no consumo de energia elétrica.

Kazantzis et al. (2002) propuseram metodologia para a otimização da operação de CMB's considerando dois objetivos maximização do bombeamento no período de tarifa mínima e minimização com racionalização dos níveis dos reservatórios. Esta metodologia foi testada em parte do SAA de Murray Bridge na Austrália. Segundo os autores, os resultados apresentaram redução entre 15 e 20% nos custos relativos a energia elétrica daquele sistema.

Almeida e Barbosa (2002) desenvolveram modelo hidráulico estruturada na forma de problema de programação não-linear inteira mista de grande escala. Tal, modelo foi aplicado para avaliar as condições iniciais de reservação de água em uma estação de bombeamento tipo booster. Os resultados indicaram economia na ordem de 36% no consumo de energia elétrica.

No trabalho de Carrijo (2004), foi desenvolvido modelo para otimização na operação de sistemas de distribuição de água para abastecimento público. Esse modelo foi aplicado no sistema de macro distribuição de Goiânia, Goiás. Como resultado desse modelo proposto, apresentou economia de aproximadamente 25% de energia elétrica.

O modelo de otimização energética desenvolvido por Cunha (2009) foi aplicado por Pedrosa (2006) no sistema estudado na cidade de São Carlos, São Paulo. As estratégias operacionais produzidas pelo modelo indicaram redução de custos da ordem de 8,5% em relação aos custos diários de energia elétrica obtida por Pedrosa (2006) naquele sistema.

A proposta de Toledo et al. (2008) foi um modelo de otimização linear e um modelo linear-inteiro para o problema de planejamento com vários reservatórios, considerando a interdependência entre eles. Testes computacionais mostraram que a solução do modelo linear-inteiro por softwares comerciais é muito lenta, não tendo sido obtida a solução ótima em tempo razoável para vários exemplares testados.

Bøaszczyk et al. (2012) estudaram o sistema de distribuição de água de Toronto, Canadá. Essa pesquisa teve a finalidade de desenvolver uma ferramenta capaz de gerar uma política de bombeamento para 153 bombas que atendam às necessidades quantitativas do sistema e que minimizem seus custos. Esse modelo teve função que expressou o custo de energia elétrica consumida nas estações de bombeamento e restrições de balanço de massa com volumes agregados dos reservatórios apoiados e elevados foi proposto.

Gebrim (2013) desenvolveu modelo de otimização operacional, com foco na redução de custo de energia elétrica, aplicado ao estudo de caso do SAA do Descoberto, no Distrito Federal. Verificou-se que a operação otimizada com esse modelo atendeu às demandas de água nos nós de consumo e manteve os níveis dos reservatórios dentro dos limites definidos. O custo de energia elétrica foi inferior ao observado na operação do centro de controle.

Diniz (2014) realizou estudo de otimização baseada na minimização do consumo de energia elétrica. O estudo de caso foi realizado no sistema de abastecimento e distribuição de água da cidade de Salvador, Bahia. Os resultados de otimização mostraram ganhos de economia de energia elétrica, por meio do uso de conversores de frequência, considerando-se as restrições impostas e a variabilidade da demanda de consumo.

A pesquisa de Silva et al. (2015), objetivou projetar um sistema de controle adaptativo para o controle, em tempo real, da pressão de sistemas de distribuição de água por meio da atuação na rotação do sistema de bombeamento e na abertura de válvulas. Os ensaios realizados na bancada experimental apresentaram resultados satisfatórios, com erro máximo no controle de pressão de 2,12% (0,42 mca) e redução de 19,2% no consumo de energia elétrica para o sistema atuando na condição mais desfavorável.

O trabalho de Luz et al. (2016), apresentou um algoritmo genético visando melhorar a operação de uma ETA, no município de Guarapuava, Paraná. Neste contexto, o objetivo foi determinar o tempo de funcionamento dos CMB's, diminuindo o custo de energia elétrica no bombeamento de água. Os resultados mostraram que a redução do uso dos motores no posto horário de ponta houvesse economia de aproximadamente 18% de energia elétrica no sistema.

O estudo de Andr s (2016), consistiu em desenvolver estudo para otimizar um SAA e desenvolver metodologia, considerando os diferentes padrões de consumo e tarifas energia elétrica. Com essa metodologia, o funcionamento dos CMB's teriam maior regularidade, reduzindo o custo com energia elétrica em aproximadamente 4,7%.

Na Tabela 2 é mostrado em resumo os trabalhos comentados anteriormente para melhor entendimento.

Tabela 2. Resumo das pesquisas de registro de melhoria de eficiência dos SAA's no Mundo.

Estudo	Unidade	Autor (es)
Programa�o dinâmica	CMB'S	Ormsbee et al., (1989); [...]
Programa�o linear	CMB'S	Little; Mccrodden, (1989); [...]
Modelo de otimiza�o linear	CMB'S	Jowitt e Germanopoulos (1992)
Modelo de otimiza�o progressiva	CMB'S	Nitivattananon et al. (1996)
Modelo de otimiza�o	CMB'S	Brion e Mays (1991)
Algoritmo genético	CMB'S	Luz et al. (2016)
Metodologia de otimiza�o	CMB'S	Andr�s (2016)
Política de bombeamento	CMB's	B�aszczyk et al. (2012)
Modelo hidráulico	CMB's/ booster	Almeida e Barbosa (2002)
Programa�o linear	CMB's e Rede	Jowitt e Germanopoulos (1992).
Opera�o de CMB'S	CMB'S e Reservatório	Lansey e Awumah (1994).
Otimiza�o na opera�o	CMB'S e Reservatório	Kazantzis et al. (2002)
Modelo de otimiza�o linear e modelo linear-inteiro	Reservatórios	Toledo et al. (2008)
Sistema híbrido	SAA	Leon et al (2000)
Modelo para otimiza�o	SAA	Carrijo (2004)
Modelo energético	SAA	Cunha (2009)
Modelo de otimiza�o	SAA	Gebrim (2013)
Uso de conversores de frequência	SAA	Diniz (2014)
Controle adaptativo pressão	SAA	Silva et al. (2015)

É oportuno observar, que os programas e a es de eficiência energética voltada para o uso eficiente de energia elétrica nos sistemas de bombeamento de água, precisam ser mais bem divulgados, não só pelo governo, mas também pelos profissionais dessa área, uma vez que, nos últimos anos as pesquisas têm demonstrado que a otimiza o é o caminho que dará as ferramentas e as condi es para melhoria do controle operacional nos SAA's.

Como já comentado, as despesas com energia elétrica têm sido as maiores fra es dos custos das companhias de saneamento básico. Cabe, portanto, aos pesquisadores aprimorar metodologias e técnicas que proporcionem o aumento da eficiência energética dos sistemas de bombeamento de água e a redu o na despesa de energia elétrica.

3.3.1 Ações para eficiência energética no sistema de abastecimento de água

A implantação de medidas para reduzir os custos com energia elétrica é de suma importância para a viabilidade econômica dos SAA's, visto que, gastos com energia elétrica tem sido cada vez mais elevados. Neste contexto, para alcançar a eficiência energética é fundamental executar procedimentos eficientes na rotina do SAA, no caso, ações administrativas, ações operacionais e ações tecnológicas.

As ações administrativas compreendem a primeira fase de medidas a serem tomadas, e praticamente não envolvem custos para serem implantadas. São ações relativas aos contratos existentes com as concessionárias de energia elétrica e podem ser resumidas em, regularização da demanda contratada; alteração da modalidade tarifária; desativação de instalações sem utilização; conferência de leitura da conta de energia elétrica; entendimentos com as companhias energéticas para redução de tarifas (ABES (2015)).

Para regularização da demanda contratada, deve-se verificar a possibilidade de redução das cargas instaladas e de introdução de controles automáticos para modulação de carga (SCHUTZE, 2015). Além disso, avaliar as contas de energia elétrica para verificação da demanda faturada, procurando constatar o pagamento de multas por ultrapassagem da demanda contratada ou de contratação superior ao realmente necessário (SCHUTZE, 2010).

O processo da análise tarifária consiste em primeiramente na separação do histórico das faturas dos últimos 12 meses, sendo 24 meses o recomendado. A análise deste período é necessária para entender o histórico de consumo da unidade, relacionando-o com eventuais fatos ocorridos neste período (BRASIL, 2015).

Logo, para a eficiência energética no sistema operacional, é importante a realização de mudanças nos procedimentos operacionais dos SAA's, como ajuste dos equipamentos; controle operacional (alteração de bombeamento e reservação, utilização de inversor de frequência, alterações operacionais da ETA); automação do SAA; capacidade de reservação de água no posto horário de ponta do sistema elétrico.

Segundo o Procel (2017), as principais ações para o setor de saneamento básico são a modulação da carga em relação à ponta dos sistemas elétricos, o controle das vazões de recalque em relação às demandas da rede de distribuição de água, o dimensionamento adequado dos equipamentos eletromecânicos e a automação operacional.

No tocante as ações tecnológicas, destaca-se a instalação de automação em sistemas de bombeamento, que reduz sensivelmente os custos operacionais com mão de obra, ao mesmo tempo em que minimiza as possibilidades de ocorrência de problemas operacionais causados por falhas humanas (ABES, 2015).

Para reduzir o custo adicional com o equipamento e energia elétrica, a energia reativa pode ser fornecida ao equipamento por meio de fontes externas. Os CMB's apresentam potencial de economia, pois o motor de indução converte entre 80 e 90% da potência aparente entregue para realizar trabalho útil e o restante são utilizados para estabelecer o campo magnético que origina a rotação no motor (SAIDUR, 2010).

Normalmente as perdas de energia elétrica ocorrem nas diversas etapas do SAA, são encontradas nos procedimentos operacionais, no dimensionamento dos sistemas, na idade dos equipamentos, nas tecnologias não eficientes utilizadas, na manutenção, nas formas contratuais e no desperdício de água (THORTON, 2012).

De acordo com Menkes (2004), o investimento em eficiência energética permite retorno de aproximadamente 20 a 25% dos recursos em curto prazo e pode possibilitar a longo mais de 100% de retorno. Ainda de acordo com a autora, a política de eficiência energética exige a consolidação de parcerias do setor público, privado e a participação social.

Assim, a eficiência energética tem importância nos SAA's, pois, é uma alternativa para reduzir o custo efetivo com energia elétrica e melhorar os serviços de abastecimento de água, assim como, atender as necessidades das crescentes populações, aumentando a capacidade de serviço do sistema.

3.3.2 Tarifas de energia elétrica

Até o ano de 1981, o único sistema de tarifa utilizado no Brasil era o convencional, que não buscava disciplinar o consumo, uma vez que não possuía diferenciação de preços segundo sua utilização durante as horas do dia e/ou períodos do ano (IRFFI et al., 2009; FASOLIN, 2014).

Diante da perspectiva de crise no suprimento de energia elétrica no Brasil prevista na década de 80, foram criadas políticas visando o uso racional de energia elétrica, em nível estadual em 1983, e a nível federal, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica em 1985 (JORDÃO; PESSÔA, 2014).

De acordo com Siqueira et al. (2006) e Gomes (2010), o programa de racionamento mostrou a vulnerabilidade do sistema energético nacional, indicando que a geração de energia não era suficiente para atender a uma demanda que aumentava gradativamente, resultante do crescimento da economia e da renda nacional.

Atualmente, a demanda de energia elétrica no Brasil apresenta-se de forma irregular, originando períodos críticos de consumo, exigindo geração máxima, e em outros de baixa demanda (CASTELLANELLI, 2015). Logo, no posto horário de ponta afeta o sistema elétrico brasileiro, em função da elevada demanda de energia elétrica, bem como as companhias de saneamento, devido as tarifas de energia elétrica serem mais onerosas nesse horário.

No Brasil, as tarifas de energia elétrica são determinadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, que estabelece também os critérios de classificação dos consumidores e as formas de cobrança de energia elétrica. Uma unidade consumidora é classificada em função da atividade exercida e, para efeito de faturamento, os consumidores são classificados em dois grupos: Grupo A (alta tensão) e Grupo B (baixa tensão).

As empresas de saneamento básico são classificadas como consumidores do Grupo A. Os consumidores deste grupo são faturados com componentes de demanda e de consumo. A cobrança de tarifas para esse grupo pode ser feita segundo duas modalidades tarifárias: o convencional e o horo-sazonal (azul ou verde). Estes sistemas tarifários são comentados pela Resolução Normativa nº 783 (2017) da ANEEL e são brevemente descritos a seguir.

A modalidade tarifária convencional é caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano. Enquanto que, a modalidade tarifária azul é

diferenciadas para o consumo (kWh) de acordo com a hora de utilização no dia e com os períodos do ano, bem como tarifas diferenciadas para a demanda de potência (kW) conforme cada hora de utilização no dia.

Na modalidade tarifária azul, a utilização de energia elétrica, ou seja, as tarifas da demanda de potência e de consumo de energia elétrica no posto horário de ponta são mais elevadas que nos demais horários. As tarifas aplicadas no período seco são ligeiramente mais elevadas que as no período úmido.

A modalidade tarifária verde é caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas para o consumo de energia elétrica (kWh) de acordo com as horas de utilização no dia e com os períodos do ano, bem como uma única tarifa para demanda de potência (kW). Na modalidade tarifária verde, as tarifas de consumo de energia no posto horário de ponta são mais elevadas do que as do posto horário fora de ponta.

Ainda, segundo a ANEEL (2017), de acordo com o valor para a demanda contratada e tensão, os consumidores podem optar pela modalidade tarifária. Consumidores com demanda contratada inferior a 300 kW e em tensão de fornecimento inferior a 69 kV podem escolher qualquer uma das modalidades: convencional, verde ou azul.

Consumidores com demanda contratada igual ou superior a 300 kW e em tensão de fornecimento inferior a 69kV devem obrigatoriamente escolher entre as modalidades tarifárias azul ou verde. E as unidades consumidoras atendidas em tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV adotam obrigatoriamente a modalidade tarifária azul.

Como as tarifas de energia elétrica variam ao longo do dia para os consumidores que utilizam a tarifa horo-sazonal, torna-se necessário em um SAA, planejamento do horário de funcionamento das bombas hidráulicas e, conseqüentemente, dos níveis dos reservatórios em um horizonte de planejamento.

A demanda de posto horário de ponta é questão relevante tanto para o planejamento da expansão, quanto para operação dos sistemas elétricos. Diante de tal importância, foram estabelecidas tarifas por hora do dia, com o objetivo de reduzir o pico de consumo, diminuindo, dessa forma, investimentos na expansão do parque gerador.

Por conseguinte, no posto horário de ponta, devido ao maior carregamento das redes de distribuição, cada novo consumidor a ser atendido custará mais a concessionária uma vez que para atendê-lo haverá necessidade de ampliação do sistema. Nesse contexto, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2012) define os postos tarifários como:

- a. **Posto horário de ponta:** período composto por 3 (três) horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora considerando a curva de carga de seu sistema elétrico, aprovado pela ANEEL, com exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, Corpus Christi, e os seguintes feriados.
- b. **Posto horário fora de ponta:** período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas nos postos ponta e, para o Grupo B, intermediário (ANEEL, 2012).

Em resumo, na Tabela 3 são mostradas as modalidades tarifárias, consumo e demanda de energia elétrica nos postos horários de ponta e fora de ponta comentadas anteriormente.

Tabela 3. Modalidades Tarifária, Convencional, Azul e Verde.

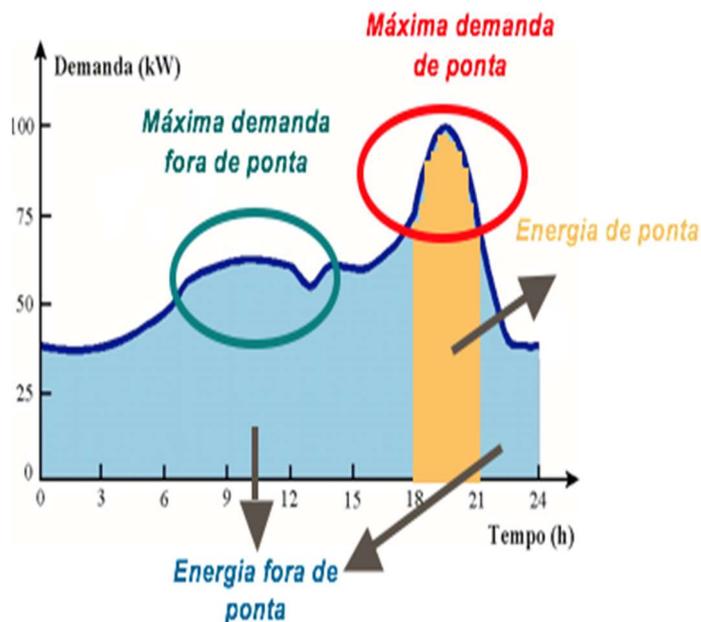
Modalidade Tarifaria convencional (GB)	
Resolução Homologatória nº 2.117/2016	Valor sem Tributos
B1 - Residência Baixa Renda até 30 kW/h (desconto de 65%)	0,20549
Consumo de 31 a 100 kWh (desconto de 40%)	0,35226
Consumo de 101 a 220 kW/h	0,52839
Consumo acima de 220 kW/h	0,58710
B1 - Residencial Convencional	0,59902
B2 - Rural	0,41931
B2 - Cooperativa de Eletrificação Rural	0,41931
B2 - Serviço Público de Irrigação	0,35941
B2 - Demais Classes	0,59902
B4a - Iluminação Pública	0,32946
B4b - Iluminação Pública	0,35941
Modalidade Tarifaria Azul	
Resolução Homologatória nº 2.284/2017	Valor sem Tributos
Grupo A4 (2,3 a 25 kV)	Unidade
Demanda Ponta D (kW)	80,14000
Demanda Fora Ponta D (kW)	23,88000
Consumo Ponta C (kW)	0,43948
Consumo Fora Ponta C (kW)	0,30555
Modalidade Tarifária Verde	
Resolução Homologatória nº 2.284/2017	Valor sem Tributos
Grupo A3a(30 a 44 kV)	Unidade
Demanda D (kW)	23,88000
Consumo Ponta C (kW)	2,38387
Consumo Fora Ponta C (kW)	0,30555

Fonte: ANEEL (2017).

A concessionária responsável pelo fornecimento de energia elétrica deve ter capacidade para suprir as demandas de consumo nos postos horários ponta e fora de ponta, no caso, 24 horas. A carga média do posto horário de ponta é chamada de carga de base e a carga média das três horas do horário de ponta é chamada de carga de ponta.

Para obter melhor equilíbrio do sistema de geração, é utilizada durante o dia nos horários fora de ponta, a energia das hidrelétricas, mantendo o suprimento da carga de base (SANTOS, 2014). Todavia, quando o consumo aumenta, são utilizadas as termelétricas, o que tem maior custo. Na Figura 20 são mostradas características genéricas de uma curva do desempenho de bombeamento de água em um SAA nos postos horários ponta e fora de ponta.

Figura 20. Curva nos postos horários ponta e fora de ponta.



Fonte: Castellanelli (2015).

Assim, Tsutiya (2001) apresenta aspectos relevantes para a redução do custo de energia elétrica em EEA, no caso, o desligamento total ou parcial dos CMB's em posto horário de ponta. Além disso, destacam-se as ações de operação de reservatórios; análise da evolução do consumo setorial; observação das características das bombas; controle de estações elevatórias; estudo e ampliação de reservação de água.

Por outro lado, Tsutiya (2001) propõem ainda, condições necessárias para viabilizar o desligamento dos CMB's no posto horário de ponta, para isto, é essencial que o volume necessário para atender a demanda no horário de ponta seja menor ou igual ao volume útil do reservatório.

Para isso, a operação dos CMB's precisa ser concebida e operada em função da capacidade de armazenamento da água no sistema, sempre observando o consumo de energia elétrica necessária para o atendimento da demanda de água da área atendida.

3.4 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA EM SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Na tentativa de acompanhar e controlar o consumo e despesa de energia elétrica são utilizadas ferramentas computacionais nas diversas áreas de engenharia. Isso tem se tornando cada vez mais frequente e necessária (SUSE, 2014; CREACO e PEZZINGA, 2015). Nos últimos anos essas ferramentas vêm sendo aplicadas, cada vez mais, com o propósito de melhorar a eficiência da operação (FILHO, 2014).

De acordo com Barroso e Gastaldini (2010), Ghaddar (2015), a utilização de softwares como ferramenta na gestão operacional de SAA tem se tornado cada vez mais frequente, certamente por possibilitar a visão sistêmica do SAA e o acompanhamento contínuo dos parâmetros hidráulicos, complementando o conhecimento e experiência dos técnicos envolvidos no planejamento, projeto e o diagnóstico do funcionamento de tais sistemas.

Neste contexto, Gomes (2012), Ibarra e Arnal (2014) e D'Ambrósio (2015) comentam que a utilização de ferramentas computacionais de otimização podem contribuir para economias de até 30%, o que representaria dezenas ou centenas de milhões de dólares. Além disso, estudos afirmam que redução de pressão de 30 mca para 17 mca pode resultar em economia de aproximadamente 30% do consumo de água.

De acordo com Neves e Leite (2008), os modelos de análise hidráulica são ferramentas essenciais nos estudos modernos de projeto e operação dos SAA's, uma vez que, eles permitem avaliar diferentes cenários de funcionamento e auxiliar o processo de tomada de decisão. Segundo Kang e Lansey (2011) e Miquelin (2016), nas últimas três décadas, foram realizados estudos com a finalidade de projetar e operar SAA's ótimos utilizando diversos algoritmos de otimização.

Em termos de otimização de um SAA, a literatura apresenta trabalhos nos quais é considerado o sistema como um todo, não adotando metodologia específica para unidades isoladas. Nessa linha de verificação, termos como confiabilidade do sistema, custos operacionais, são bjetivos para processo de otimização (ALBUQUERQUE, 2007).

Neste contexto, trabalhos propondo metodologia de otimização para confiabilidade de SAA's foram apresentados por Su et al. (1997), Ormsbee e Kessler (1990), Xu e Goulter (1999), Shinstine et al. (2002), Prasad e Park (2004), considerando a maximização de benefícios hidráulicos para o sistema foram sugeridos por Walters et al. (1999), Walski (2001) e Wu (2002) e considerando a reabilitação de sistemas de distribuição de água, podem ser encontrados em trabalhos propostos por Cheung et al. (2003) e Cheung (2004).

Para que o uso desses modelos sejam ampliados é necessário que os mesmos sejam adaptados para descrever situações, mas realista dos sistemas, principalmente os brasileiros, que enfrentam, pressões insuficientes em pontos da rede (DINIZ et al., 2013).

Dentre os modelos hidráulicos de simulação e análises já desenvolvidos, o software *Epanet 2.0* se destaca por sua qualidade e quantidade de usuários existentes em muitos países (GOMES, 2012; GEORGESCU, 2015). Esse software é de domínio público, que pode ser utilizado livremente por qualquer usuário, foi desenvolvido para o ambiente Windows pela U. S. Environmental Protection Agency (USEPA) (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América), e foi concebido:

Para ser uma ferramenta de apoio a análise de sistemas de distribuição, melhorando o conhecimento sobre o transporte e o destino dos constituintes da água para consumo humano. Pode ser utilizado em diversas situações no qual seja necessário efetuar simulações de sistemas pressurizados de distribuição. O estabelecimento de cenários de projeto a calibração de modelos hidráulicos, a análise do decaimento do cloro residual e a avaliação dos consumos são alguns exemplos de aplicação do programa (GOMES, 2012).

Como caracteriza Gomes (2012), o software *Epanet* permite avaliar possíveis ações que possam diminuir o consumo de energia elétrica das estações de bombeamento e possibilitar condições de operação em controles simples, dependentes de uma só condição (altura de água num reservatório de nível variável, tempo), ou em controles com condições múltiplas. De acordo com Rossman (2002) o software *Epanet 2.0* permite obter:

Valores de vazão, da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável e da concentração de espécies químicas através da rede durante o período de simulação, subdividido em múltiplos intervalos de cálculo. Adicionalmente, além de espécies químicas, o modelo simula o cálculo da idade da água e o rastreamento da origem de água em qualquer ponto da rede (ROSSMAN, 2002).

Dada a importância desse software, Rossman (2009) ressalta que o *Epanet 2.0* é, indiscutivelmente, o programa de modelagem hidráulica e de qualidade de água mais empregado no mundo; é encontrado em versões nos principais idiomas e seu número de usuários aumenta, exponencialmente, devido à sua facilidade de uso e por ser um programa disponibilizado gratuitamente.

Neste sentido, vale destacar estudos realizados nos SAA's utilizando o software *Epanet 2.0*, dentre esses, são encontrados na literatura; Soares (2003), Netto (2003), Carrijo (2004), Cheung (2004), Rey et al. (2004), Lucena (2005), Castro (2005), Ibáñez et al. (2005), Pedrosa Filho et al. (2005), Gomes (2006), Costa (2010), Alves (2012), Suse (2014) e Abe (2014), Sunela (2015), Nascimento (2016), Melo (2016).

Predominantemente, o software *Epanet 2.0* é utilizado pelos gestores dos SAA's para analisar estratégias e alternativas de gestão, de modo a melhorar a qualidade do sistema e realizar o controle entre oferta e demanda e controle de perdas de água (COSTA, 2010; NASCIMENTO, 2016). A modelagem de um sistema de distribuição de água por meio do software *Epanet* utiliza tipicamente os seguintes intervalos:

- a) Desenhar uma representação esquemática do sistema de distribuição ou importar uma descrição-base do sistema a partir de um arquivo de texto; b) Editar as propriedades dos objetos que constituem o sistema; c) Descrever as condições de operacionalidade do sistema; d) Selecionar conjunto de opções de simulação; e) Executar simulação hidráulica ou de qualidade da água [...] (ROSSMAN, 2009).

É importante destacar, que apesar do software *Epanet 2.0* ser importante ferramenta na operação dos SAA's, a eficiência da sua aplicabilidade depende da precisão dos dados e informações de entrada (ALVES, 2012; GERGORGESCU, 2015). Nesse contexto, Abday (2015) e Sunela (2015) ressaltam que a estimativa dos valores das demandas nos nós é, historicamente, um dos passos mais difíceis da simulação hidráulica dos SAA's.

Diante disso, OLAIA (2012), Sunela (2015) e Bohórquez (2015) citam dentre os procedimentos necessários à simulação, a distribuição de vazão nos nós merece atenção especial. Pois, segundo Gomes e Bezerra (2012), Beygi (2016) e Jolly et al. (2014) geralmente a distribuição da vazão dos nós é estimada, determinada a partir da razão entre a “vazão total distribuída” e a “extensão total”, o que pode ocasionar falhas nos resultados.

Por outro lado, Gomes e Bezerra (2012), comentam a importância de observar a relação distribuição e população abastecida por nó, e na maioria dos casos, é diferente em um mesmo setor, pois, na maioria das simulações é utilizado o mesmo valor de população para calcular o consumo nos nós, o que nem sempre representa a realidade do SAA (ABE, 2014).

Assim, é de suma importância a aplicação de modelos de análise hidráulica para otimização dos SAA's, a fim de, minimizar custos com energia elétrica e, ao mesmo tempo, atender exigências dos sistemas, como, atendimento da demanda de água e manutenção de pressões adequadas na rede. Por isso, é importante que no dimensionamento do reservatório seja considerado a unidade de consumo.

3.5 TÉCNICAS DE DIMENSIONAMENTO DE VOLUME ÚTIL DE RESERVAÇÃO

A importância do volume útil de água para atendimento no posto horário de ponta se torna necessário devido as tarifas mais onerosas de energia elétrica. Para tanto, é verificado se os métodos disponíveis na literatura consideram energia elétrica no dimensionamento do volume útil de água na unidade de reservação. Assim, são mostrados os seguintes métodos:

- a. NBR 12217 (1994) - Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público;
- b. Método proposto pela CETESB (1987), no caso, quando se dispõe da curva de consumo: diagrama de massas, quando não se dispõe da curva de consumo e volumes diferenciais;
- c. Método de Gomes (2012) o qual também trabalha com volumes diferenciais, porém, considerando a paralisação de bombeamento no posto horário de ponta.

Esses procedimentos têm por finalidade determinar o volume útil de reservação de água para consumo diário de uma determinada demanda. Esses métodos estão comentados a seguir para melhor compreensão.

Apesar da grande importância operacional dos reservatórios para o funcionamento dos SAA's, a determinação do volume útil dessas unidades é normalmente realizado apenas em função do consumo diário de água no sistema, não considerando, portanto, outros aspectos importantes, como por exemplo, o consumo de energia elétrica no sistema.

3.5.1 Método de determinação do volume útil baseado na NBR 12217 ABNT (1994)

A NBR 12.217 recomenda a adoção de fator de segurança de 1,2 aos volumes determinados ou pelo “método da curva de consumo” ou pelo “método do consumo assimilado a uma curva senoidal”. Na impossibilidade de utilização desses métodos, sugere a reservação de 1/3 do volume correspondente a demanda máxima do dia de maior consumo. A demanda máxima do dia de maior consumo é determinados por meio da equação 2.

$$Q_{Td} = \frac{P \times q}{86.400} \times K_1 \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

Q_{Td} = consumo teórico médio de água, em L.s; P = população da área abastecida; q = consumo médio diário per capita, em L.hab.dia; K_1 = Coeficiente do dia de maior consumo.

3.5.2 Método proposto pela CETESB (1987)

a. Método de determinação do volume útil quando se dispõem da curva de consumo

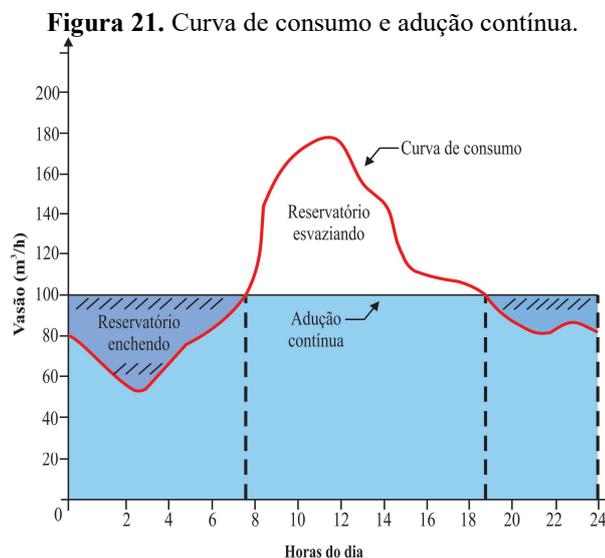
Conhecendo a curva de consumo de um SAA, o volume útil de reservação é determinado considerando a adução contínua ao reservatório, com vazão durante 24 horas do dia, utilizando a adução para o dia maior consumo, conforme a equação 2.

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q dt - \bar{Q} \times (t_2 - t_1) \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

V = volume de reservação; Q = vazão média do dia; t₂ = instante em que consome é menor que a vazão fornecida; t₁ = instante em que consome é maior que a vazão fornecida.

Na Figura 21 é apresentado um exemplo de uma curva de consumo de um setor de abastecimento de água. É mostrado o consumo no dia de grande solicitação de água, em particular daquele mais desfavorável, a reta de adução com vazão constante, representa a vazão média de consumo no dia mais desfavorável.

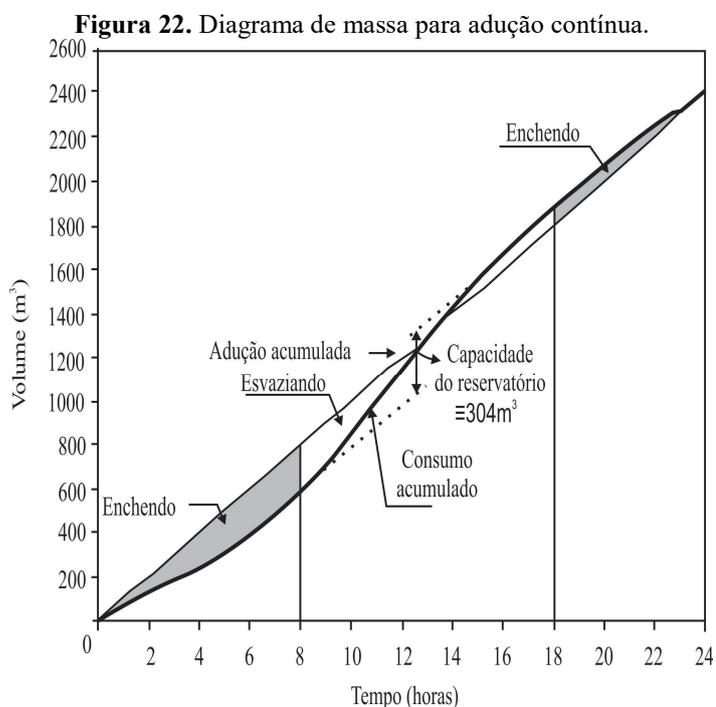


No tempo t₁, a vazão de consumo começa a ultrapassar a vazão de adução, de modo que o reservatório começa a esvaziar, terminando no tempo t₂. Entre os intervalos t₂ e 24 horas e t₁, a adução supera o consumo e o reservatório vai acumulando água em excesso, para cedê-la ao setor no intervalo de tempo t₁ e t₂.

As áreas hachuradas em tracejado são iguais às áreas não hachuradas, representando cada uma delas a capacidade mínima do reservatório para atender o consumo normal no dia de consumo máximo.

b. Método de determinação do volume útil baseado no diagrama de massa

CETESB (1987), Tsutyia (2006) e Heller e Pádua (2010, 2016) afirmam que também é possível determinar o volume útil de reservação por meio do diagrama de massa que é o gráfico de volumes acumulados, esse método também é utilizado quando se dispõe da curva de consumo do sistema, conforme mostrado na Figura 22.



Fonte: CETESB (1987).

Na Figura 22 a reta de adução acumulada corresponde a uma vazão constante e a curva representa o consumo acumulado de um setor durante 24 horas do dia de maior consumo. Reta e curva tem as mesmas extremidades, o que significa que o volume de água aduzido é o mesmo que o consumido durante o dia de maior consumo.

Traçando tangente à curva paralela à reta de adução, nos pontos máximo e mínimo, e determinando a distância entre as duas tangentes traçando uma reta paralela ao eixo das ordenadas, determina-se a capacidade mínima do reservatório (MARTINS, 1978).

c. Método de determinação do volume útil quando não se dispõe da curva de consumo

Esse método é utilizado caso não se dispõe de dados suficientes para o traçado da curva de variação diária de consumo da área a ser atendida pelo reservatório. Para essas situações, esse método é realizado por meio de uma hipótese de variação da curva de consumo. Uma delas é admitir a forma senoidal. Admitindo que o comportamento do consumo seja senoidal, a equação da curva está apresentada na equação 4. Sendo V o volume de água consumido em um dia de maior consumo, V/24 representa a vazão média nesse dia.

$$Q = (K_2 - 1) \frac{V}{24} \operatorname{sen} \frac{\Pi}{12} + \frac{V}{24} 12 \quad \text{Equação (4)}$$

O volume de reservação necessário será determinado por meio da equação 5.

$$C = \int_8^{20} Q dt - \frac{V}{24} 12 \quad \text{Equação (5)}$$

A equação 5 foi aplicada no período de tempo em que a vazão de consumo é superior à vazão de adução. Caso fosse aplicada entre o período de 20 às 8 horas, quando o consumo é menor que a adução, o volume seria o mesmo, a resolução está mostrada na equação 6.

$$C = \frac{k2-1}{\Pi} \quad \text{Equação (6)}$$

Em que:

C = capacidade mínima do reservatório, m³;

k2 = Coeficiente da hora de maior consumo;

V = volume consumido no dia de maior consumo, m³.

Macintyre (1996) sugere reservatórios de distribuição com volume igual ao consumo diário, tendo o reservatório inferior volume 50% maior que o do reservatório superior. E Creder (1995) propõe volumes de reservação ainda maiores, com capacidade para até dois dias de consumo e que o reservatório inferior armazene 60%, e o superior 40% do consumo.

Tendo em vista os aspectos observados, verifica-se que no dimensionamento de reservatórios conforme a norma NBR 12217 da ABNT (1994) não são considerados aspectos de custo e consumo com energia elétrica. Sendo que, a disponibilidade de energia elétrica é apenas um elemento necessário para elaboração do sistema de bombeamento no projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público.

Portanto, dada a relevância da eficiência energética, o sistema de reservação e elevação de água devem ser muito bem projetados e operados com a finalidade de obtenção dessa eficiência, sendo esta de suma importância para o bom desempenho do SAA.

d. Método de determinação do volume útil baseado nos volumes diferenciais

O método dos volumes diferenciais, fundamenta-se constatação de que o volume útil de um reservatório depende, fundamentalmente, de duas taxas: a qual é alimentado e a qual é esvaziado, sendo que o somatório da diferença entre os volumes de adução e os volumes de consumo determinados, representam o volume útil de reservação necessários para atender uma determinada demanda, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Método dos volumes diferenciais.

Hora	Vazão de alimentação	Vazão de distr	Q _{alim} – Q _{distr} (m ³ /h)	
	Q _{alim} (m ³ /h)	Q _{distr} (m ³ /h)	+	-
00:00	Q _{alim 00:00}	Q _{distr 00:00}	Se positivo	Se negativo
:	:	:	:	:
23:00	Q _{alim 23:00}	Q _{distr23:00}	:	:
Total				
	Q _{média} (m ³ /h)			
Volume útil – Reservatório elevado (m ³)			Volume Útil Necessário (m³)	

Fonte: CETESB (1987).

No método da CETESB (1987) é sabido que o volume útil deve ser igual ao somatório das diferenças positivas, caso, esse valor for menor, pode haver vazamentos no reservatório, e se for maior, significa que a demanda está maior do que a produção.

A soma das diferenças positivas será igual à soma das diferenças negativa, caso, os volumes diários de entrada e saída no reservatório sejam iguais. A taxa que o reservatório é esvaziado é dada pela demanda. E a taxa com a qual é abastecido depende da configuração do bombeamento, se a vazão é constante ou variável se a adução é contínua ou não.

Assim, para se obter a taxa com a qual o reservatório é esvaziado, deve-se observar a curva de demanda de água, que pode ser obtida por aquisição de dados de vazão de entrada e de saída pela maior quantidade de tempo possível. Seleciona-se então o dia de maior demanda (pior situação) para a realização dos cálculos.

3.5.3 Método do volume útil baseado nos volumes diferenciais (GOMES, 2012)

A determinação do volume útil pela metodologia de Gomes (2012) segue o princípio dos volumes diferenciais do Método da CETESB (1987), porém com adaptações. No Método de Gomes (2012), o volume de bombeamento de água (volume de entrada) é paralisado no posto horário de ponta. Todavia, o volume de distribuição de água (volume de saída) é constante, ou seja, atendimento nas 24 horas do dia.

Para sua determinação também é necessário a curva de demanda de água. Após a seleção da curva de demanda de água, o volume diário total é dividido por 21 horas, haja visto que não correrá bombeamento no posto horário de ponta. O resultado dessa divisão será a média utilizada para o volume de entrada, enquanto que o volume de saída serão os valores de consumo de cada hora.

Em seguida, é realizada a diferença entre os volumes de entrada e os volumes de saída (curva de demanda). A soma das diferenças positivas será igual à soma das diferenças negativa, caso, os volumes diários de entrada e saída no reservatório sejam iguais. Esse resultado representa o volume útil de reserva necessários para atender determinada demanda. Na Tabela 5 é mostrado exemplo do referido método.

Tabela 5. Método dos volumes diferenciais.

Hora	Vazão de entrada	Vazão de saída (curva de demanda)	SALDO entrada - saída	
	$V_{Entr} (m^3/h)$	$V_{Saída} (m^3/h)$	+	-
00:30:00	$V_{Entr} 00:30$	$V_{Saída} 00:30$	Se positivo	Se negativo
:	:	:	:	:
19:30:00	0,00	$V_{Saída} 19:30$		
20:30:00	0,00	$V_{Saída} 20:30$		
21:29:00	0,00	$V_{Saída} 21:29$		
:	:	:	:	:
23:30:00	$V_{Entr} 23:00$	$V_{Saída} 23:00$:	:
Total				
$V_{Entr} (Q.dia/21h)$				
Volume útil – Reservatório elevado (m^3)			Volume Útil Necessário (m^3)	

Fonte: Gomes (2012).

Como pode ser observado, a maioria dos métodos tradicionais não considera o consumo de energia elétrica do dimensionamento do volume útil de reservação, o que certamente torna o sistema ineficiente hidroenergeticamente.

4 MATERIAL E MÉTODOS

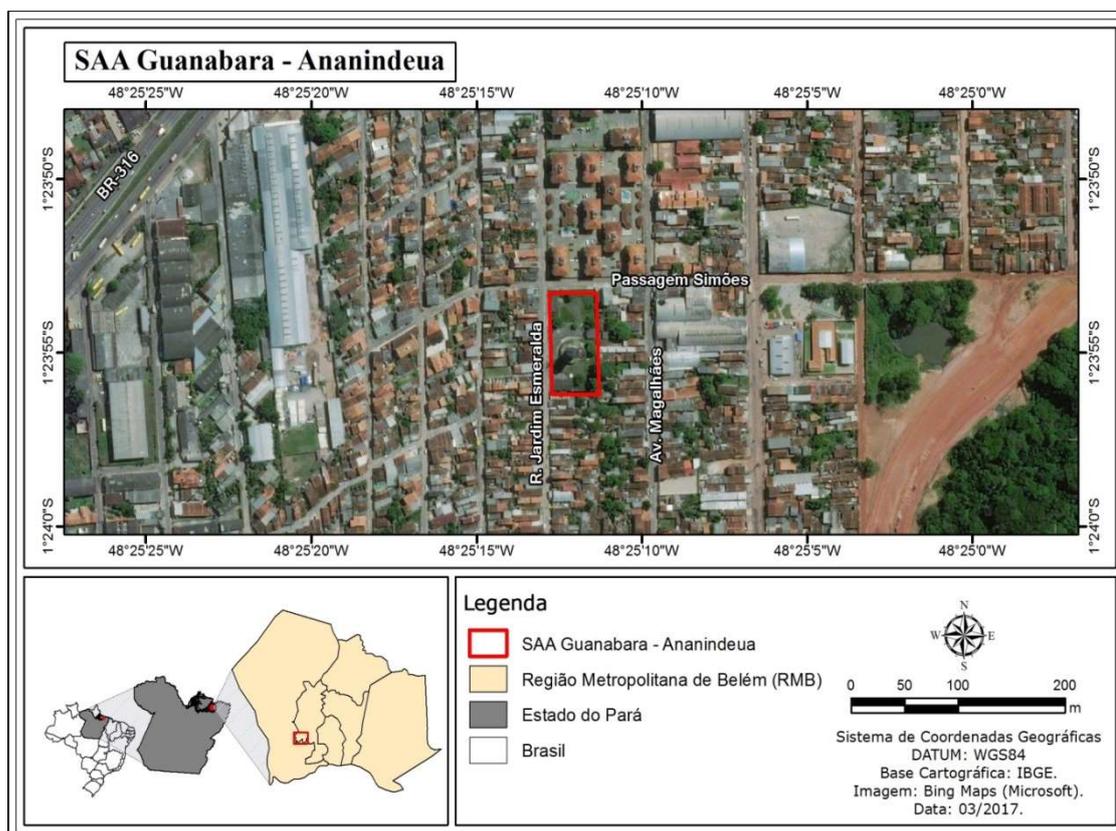
No presente capítulo são comentados a área de estudo, os procedimentos metodológicos e as etapas desenvolvidas na pesquisa, para alcançar os objetivos apresentados neste trabalho.

De acordo com Oliveira (2011) e Prodanov (2013), o estudo se classifica como pesquisa experimental. Neste contexto, o objeto de estudo dessa pesquisa é a unidade de reservação e bombeamento de água do Setor Guanabara, enquanto que as variáveis de influência são energia elétrica e o volume útil de reservação.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

Como área de estudo da pesquisa foi definido o sistema de bombeamento e reservação de água do Setor Guanabara, o qual está localizado em um bairro residencial, nas coordenadas $1^{\circ} 23' 55.880''$ S e $48^{\circ} 25' 12.596''$ W, na Rua Jardim Esmeralda, no Bairro da Guanabara, município de Ananindeua, Região Metropolitana de Belém (RMB), no Estado do Pará, conforme mostrado na Figura 23. Vale comentar que a conclusão de implantação desse setor ocorreu em julho de 1998.

Figura 23. Localização do Setor Guanabara no município de Ananindeua, Pará.

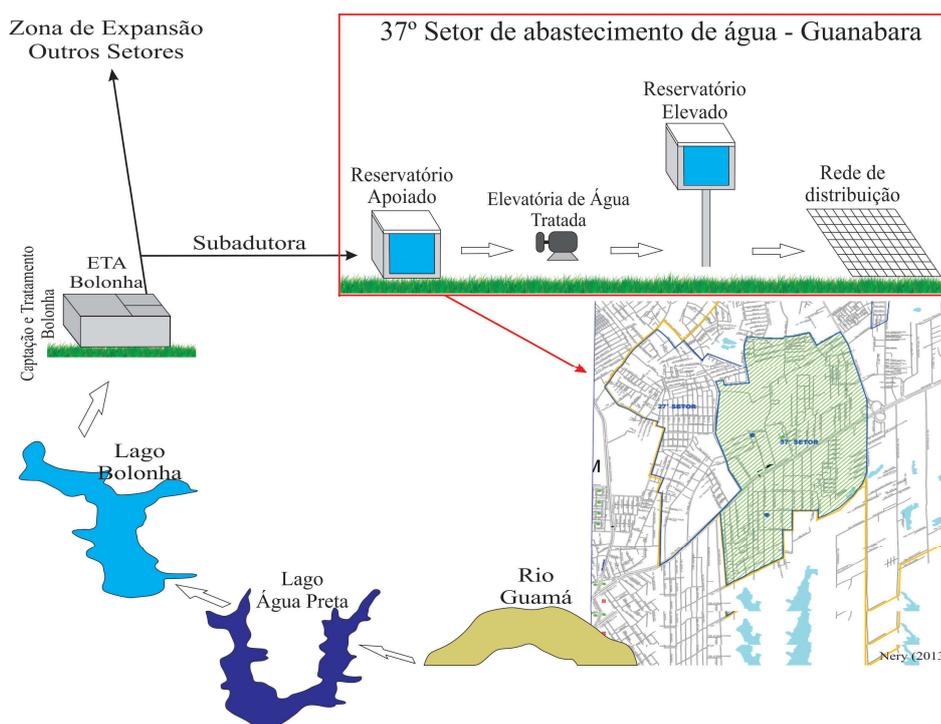


O Setor Guanabara é o 37º Setor no Plano Diretor do Sistema de Abastecimento de Água Potável (PDSAAP) da RMB e possui gerenciamento operacional e comercial da Unidade de Negócios BR 316 da Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA).

Esse Setor integra o Sistema Bolonha e é composto por subadutora, reservatório apoiado, estação elevatória de água tratada, reservatório elevado e rede de distribuição de água. Esse sistema foi projetado com final de plano em 2016 para abastecer 27.250 habitantes com consumo per capita de água de 150 l/hab.dia e demanda de aproximadamente 7.357,68 m³ diários. Na Figura 24 é mostrada a configuração que melhor representa esse SAA.

Vale comentar que, de acordo com o método de Projeção Geométrica, considerando taxa de crescimento de 2% ao ano, a estimativa de população calculada para o ano de 2017 e 2018 foi de 28.034 e 28.601 habitantes respectivamente.

Figura 24. Configuração a do Setor de Abastecimento de Água do Guanabara.



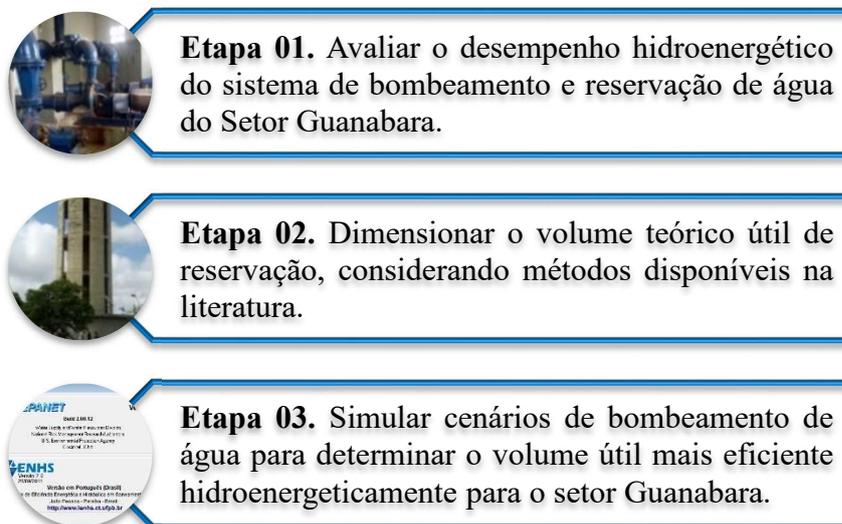
O Sistema Bolonha utiliza água superficial que é captada do rio Guamá para o lago³ Água Preta o qual mantém o nível do lago Bolonha por gravidade, nas proximidades localiza-se a ETA Bolonha onde ocorre o tratamento de água. Posteriormente, a água tratada é distribuída para diversos setores integrados ao SAA Bolonha Zona Central (ZC) e Bolonha Zona de Expansão (ZE), dentre eles o Setor Guanabara, no município de Ananindeua.

³ O lago Bolonha juntamente com o lago Água Preta e o rio Guamá fazem parte do Complexo Hídrico Estadual do Utinga, e embora existam, nascentes naturais nos lagos, 90% das suas águas são captadas no rio Guamá por meio de sistema de bombeamento (VASCONCELOS; SOUZA, 2011).

4.2 ETAPAS DA PESQUISA

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas (Esquema 1). Inicialmente foram verificadas as condições operacionais, os volumes de projeto e de operação no Setor Guanabara, possibilitando estudo do desempenho operacional. Na segunda Etapa foram dimensionados três (3) volumes teóricos útil de reservação, considerando métodos descritos nesta metodologia. Na terceira Etapa, foram realizadas simulações hidroenergética para verificar o consumo de energia elétrica, considerando os volumes úteis dimensionados mais o volume útil de projeto considerando a mesma demanda.

Esquema 1 – Etapas de desenvolvimento da pesquisa.



4.2.1 Etapa 1 – Avaliar o desempenho hidroenergético considerando volume útil de projeto e operação do Setor Guanabara

Nessa etapa foram realizadas visitas as instalações do Setor Guanabara, consultados projeto de engenharia, documentos da COSANPA, e o Relatório Técnico: diagnóstico hidroenergético da Estação Elevatória de Água Tratada do Setor Guanabara, realizado pela equipe técnica do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS-UFPA) no ano de 2014.

No Projeto executivo do Setor Guanabara, elaborado pela empresa CESAN Consultoria, Engenharia Sanitária e Ambiental, foram levantadas informações de População, consumo per capita, principalmente com destaque para o volume útil de reservação (V_p).

Em seguida, em documentos da COSANPA e no Relatório Técnico do LENHS (2014) foram obtidas informações para caracterizar o comportamento operacional. Esse relatório trata

de dados de monitoramento do Setor Guanabara, realizado de forma contínua no período de 17 a 24 de outubro de 2014, com medições a cada minuto totalizando 192 horas ou 8 dias, além de 4 dias complementares. Posteriormente, a análise dos dados disponíveis no LENHS – UFPA, foram selecionados os dados do dia 23 de outubro de 2014, para o desenvolvimento deste trabalho. Esse dia foi indicado por ser o dia de maior distribuição de água monitorado, conforme recomendações da CETESB (1987), NBR 12218 (1994), Tsutiya (2001) e Gomes (2012).

Na avaliação do desempenho operacional do reservatório apoiado foi verificado a vazão de entrada, volume de água armazenado, características físicas, comportamento e utilização do nível do reservatório considerando dados do dia 23 de outubro de 2014.

Para verificar o volume útil de reservação utilizado do reservatório apoiado, foram utilizados dados de variações das vazões hidráulicas do dia 23 de outubro de 2014. E cálculos para área do reservatório apoiado (m²), altura útil utilizada, volume útil utilizado, e quanto em porcentagem o volume estava sendo utilizado e o volume morto nesse monitorado no reservatório apoiado. Para tanto, foram considerados os seguintes parâmetros:

Altura útil do reservatório apoiado; Volume útil do reservatório apoiado de projeto, Altura útil do reservatório apoiado utilizado; Nível mínimo do reservatório apoiado monitorado; Nível máximo do reservatório apoiado monitorado, Nível máximo do reservatório apoiado de projeto; Volume do reservatório apoiado utilizado, Volume total do reservatório apoiado monitorado.

Para o cálculo da área do reservatório apoiado foi utilizado a equação 7.

$$A = \frac{v}{h} \quad \text{Equação (7)}$$

Em que:

A = área do reservatório apoiado, em m²;

v = volume útil de projeto do reservatório apoiado, em m³;

h = altura total de projeto do reservatório apoiado, em m.

Com a finalidade de conhecer a altura útil do reservatório apoiado utilizado, foi realizado cálculo por meio da equação 8.

$$H = N_{\text{máx}} - N_{\text{mín}} \quad \text{Equação (8)}$$

Em que:

H = altura útil do reservatório apoiado utilizado, em m;

N.máx = nível máximo do reservatório apoiado monitorado, em m;

N.mín = nível mínimo do reservatório apoiado monitorado, em m.

O cálculo do volume útil de reservação utilizado foi realizado conforme a equação 9.

$$V = A \times H \quad \text{Equação (9)}$$

Em que:

V = Volume útil de reservação utilizado, em m³;

A = Área do reservatório apoiado calculada, em m²;

H = Altura útil do reservatório apoiado calculada, em m.

Para o cálculo do volume total de reservação foi utilizado a equação 10.

$$VT = A \times N_{\text{máx}} \quad \text{Equação (10)}$$

Em que:

VT = volume total de reservação, m³;

A = área do reservatório apoiado calculada, em m²;

N.máx = nível máximo do reservatório apoiado monitorado, em m.

Com o intuito de conhecer a porcentagem utilizada do volume útil do reservatório apoiado, foi realizado cálculo conforme a equação 11.

$$\% \text{utiliz.} = \frac{V}{V_1} \quad \text{Equação (11)}$$

Em que:

%utiliz. = porcentagem do volume útil utilizado;

V = Volume útil de reservação utilizado, em m³;

V₁ = volume útil de projeto de operação do reservatório apoiado, em m³.

O volume morto foi determinado por meio da equação 12.

$$VM = VT - V \quad \text{Equação (12)}$$

Em que:

VM = volume morto, em m³;

VT = volume total de reservação, m³;

V = volume útil de reservação utilizado, em m³;

Na estação elevatória de água tratada foi avaliada a vazão bombeada, considerando o tempo de operação dos CMB's nos postos horários de ponta e fora de ponta, no caso, o tempo de monitoramento entre o acionamento ou desligamento dos motores e o consumo de energia elétrica.

No reservatório elevado também foi verificado volume de reservação, considerando a variação do nível de água durante as 24 horas. A partir disso, foi obtido o hidrograma de vazão de distribuição diária.

Para encontrar o volume de reservação utilizado na operação ($V_{op.}$) do reservatório elevado no Setor Guanabara, também foram utilizados dados de variações das vazões hidráulicas do dia 23 de outubro de 2014. Para os cálculos, foram utilizadas as mesmas equações empregadas para reservatório apoiado.

Diante disso, também foram realizados cálculos de área (m^2) para o reservatório elevado, altura útil utilizada, volume útil utilizado, quanto em porcentagem o volume estava sendo utilizado e o volume morto no reservatório elevado, os cálculos foram realizados empregando as mesmas equações utilizadas no reservatório apoiado descritas anteriormente. Para tanto, foram considerados os seguintes parâmetros:

- a. Altura útil do reservatório elevado, Volume útil do reservatório elevado, Altura útil do reservatório elevado utilizado, Nível mínimo do reservatório elevado monitorado, Nível máximo do reservatório elevado monitorado, Nível máximo do reservatório elevado de projeto, Volume do reservatório elevado monitorado utilizado, Volume total do reservatório elevado monitorado.

Nos resultados no final desta Etapa foram comentados volumes projetados, variações das vazões (volume de operação) e indicadores de eficiência hidroenergetica do Setor Guanabara, consultados no LENHS – UFPA.

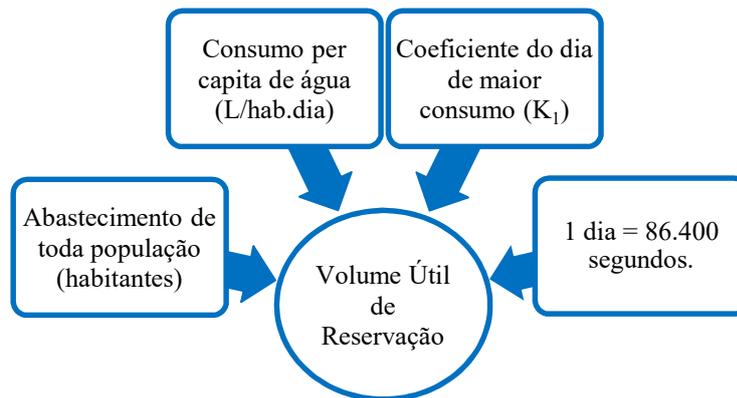
4.2.2 Etapa 2 – Determinação do volume teórico útil de reservação, considerando 3 diferentes métodos de dimensionamentos

Nesta etapa foram determinados volumes útil de reservação para a atual demanda do Setor Guanabara, sendo utilizado três (3) diferentes métodos de dimensionamento, no caso o volume útil dimensionado com as recomendações da NBR 12217 (1994), com os procedimentos do Método da CETESB (1987) e com o Método proposto por Gomes (2012).

4.2.2.1 Por meio de recomendações da NBR 12217 (1994)

A seguir são apresentados os procedimentos e recomendações utilizados da NBR 12217 (1994). Para o cálculo do consumo teórico de água foram considerados os parâmetros mostrados na Figura 25 e também recomendações de Tsutiya (2006).

Figura 25. Dados utilizados no dimensionamento pela NBR 12217 (1994).



O cálculo do consumo teórico médio de água para o Setor Guanabara foi realizado utilizando a equação 13.

$$Q_{Tm} = \frac{P \times q}{86.400} \quad \text{Equação (13)}$$

Em que:

Q_{Tm} = consumo teórico médio de água, em L.s;

P = população da área abastecida;

q = consumo médio diário per capita, em L.hab.dia.

Para o cálculo do consumo efetivo teórico de água para o dia de maior consumo para o Setor Guanabara foi utilizada a equação 14.

$$Q_{Td} = \frac{P \times q}{86.400} \times K_1 \quad \text{Equação 14}$$

Em que:

Q_{Td} = consumo teórico médio de água, em L.s;

P = população da área abastecida;

q = consumo médio diário per capita, em L.hab.dia;

K_1 = Coeficiente do dia de maior consumo.

O cálculo do consumo efetivo de água para o dia e a hora de maior consumo para o Setor Guanabara foi realizado por meio da equação 15.

$$Q_{Tdh} = \frac{P \times q}{86.400} \times K_1 \times K_2 \quad \text{Equação 15}$$

Em que:

Q_{Tdh} = consumo teórico médio de água, em L.s;

P = população da área abastecida;

q = consumo médio diário per capita, em L.hab.dia;

k1 = Coeficiente do dia de maior consumo;

k2 = Coeficiente da hora de maior consumo.

Volume de reservação

Seguindo as recomendações da NBR 12217 (1994), primeiramente foi realizado o cálculo utilizando o Método do consumo assimilado a uma senóide, esse cálculo teve por objetivo auxiliar na determinação dos volumes útil de água do reservatório elevado para o Setor Guanabara. Para tanto, o volume de reservação foi determinado por meio da equação 16.

$$V_{res} = \left(\frac{K_2 - 1}{\pi} \right) \times (24 \times K_1 \times Q_{Tm}) \quad \text{Equação 16}$$

Em que:

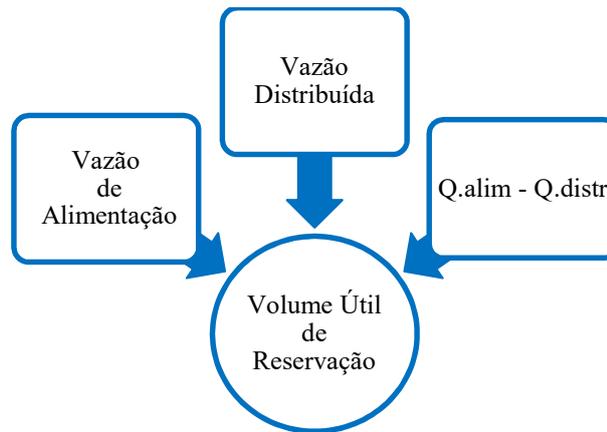
VR = Volume de reservação em m³;

Q_{Tm} = Consumo teórico médio de água, em m³/h.

4.2.2.2 Por meio do Método dos volumes diferenciais CETESB (1987)

No Método da CETESB foi considerado a distribuição do dia de maior consumo de água (curva de demanda) monitorada pela Equipe LENHS (2014) no Setor Guanabara, ou seja, o dia de grande solicitação de água, em particular daquele mais desfavorável, no caso, o dia 23 de outubro de 2014. Na Figura 26 é mostrado os dados utilizados para o cálculo do volume útil por meio desse método.

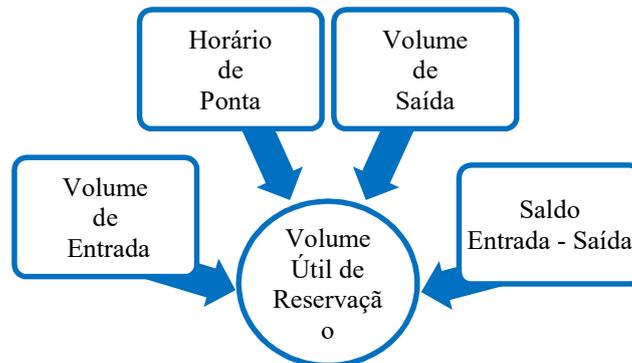
Figura 26. Dados utilizados no Método da CETESB (1987).



4.2.2.3 Por meio do Método dos volumes diferenciais Gomes (2012)

No Método dos Volumes Diferenciais de Gomes (2012) também foi considerado a distribuição do dia de maior consumo de água (curva de demanda) monitorada pela Equipe LENHS (2014) no Setor Guanabara. Esse método considera distribuição de água sem interrupção, com vazão (atendimento) durante 24 horas do dia. Porém, com paralisação de bombeamento de água no posto horário de ponta. Na Figura 27 é mostrado dados utilizados para o cálculo do volume útil por meio desse método.

Figura 27. Dados utilizados no Método dos volumes diferenciais de GOMES (2012).



No procedimento, o volume total diário monitorado foi dividido por 21 horas (paralisa no posto horário ponta), o que resultou em determinado valor médio, esse valor médio foi utilizado como volume de entrada, e como dados de saída foi considerado os dados horários de vazão na saída do reservatório elevado.

4.2.3 Etapa 3 – Simulação de cenários de operação do bombeamento de água tratada para determinar o volume ideal de reservação setor Guanabara

Essa etapa foi realizada em duas fases, inicialmente foram realizadas simulações hidroenergéticas para os volumes úteis de reservação de projeto e para os volumes úteis determinados na etapa 2. Em seguida foram comparados aos resultados hidroenergéticos do volume utilizado na operação do Setor Guanabara (Etapa 1) e aos valores cobrados no período vigente nas faturas do Setor Guanabara. E na segunda fase, foram determinados os indicadores de eficiência hidroenergética do sistema.

Fase 3.1 - Estabelecimento das condições de simulações

Nesta fase foram realizadas simulações hidroenergética para definição do volume útil de reservação de água mais eficiente para o Setor Guanabara. Para tanto, foram considerados postos horários de ponta e fora ponta, os níveis dos reservatórios e diâmetros o qual variou conforme cada volume útil. Também, foram adotadas tarifas de energia elétrica, conforme estabelecidas pelas Centrais Elétricas do Pará (CELPA).

A Central Elétrica do Pará (Celpa) é a concessionária responsável por atuar em toda a área de concessão do estado do Pará, ou seja, responde pelo atendimento de energia elétrica em todo o estado. Neste âmbito, a Celpa informa que o no posto horário de ponta praticado atualmente no estado do Pará corresponde ao horário entre 18:30 às 21:29 ⁴(CELPA, 2017).

Todavia, nestas horas o valor cobrado é diferenciado. Diante dessa realidade, verifica-se a necessidade de otimizar ou ampliar volume de reservação de água em SAA's, permitindo desta forma, que o bombeamento de água ocorra fora dos horários de ponta.

⁴ Vale observar que em outros Estados o posto horário de ponta é praticado em outros períodos, como por exemplo, na Eletropaulo esse período ocorre das 17h30 às 20h30. e na Celesc em Santa Catarina das 18h e 21h.

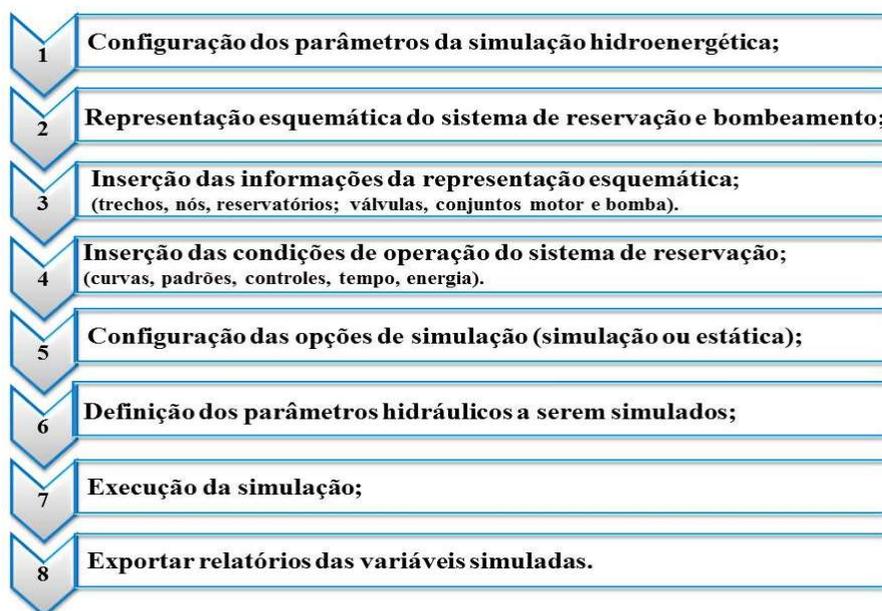
Foram estabelecidos 4 (quatro) Cenários de simulações computacionais, conforme mostradas na Tabela 6.

Tabela 6. Cenários de simulações hidroenergéticas.

Cenários	Condições
1	Simulação computacional do funcionamento do sistema de bombeamento e reservação, considerando o volume útil de projeto executivo denominado VP.
2	Simulação computacional do funcionamento do sistema de bombeamento e reservação, considerando o volume útil teórico denominado VT ₁ , obtido na Etapa 2 por meio da CETESB (1987).
3	Simulação computacional do funcionamento do sistema de bombeamento e reservação, considerando o volume útil teórico denominado VT ₂ , obtido na Etapa 2 por meio da NBR 12217 (1994).
4	Simulação computacional do funcionamento do sistema de bombeamento e reservação, considerando o volume útil teórico denominado VT ₃ , também obtido na Etapa 2 por meio do Método dos volumes diferenciais Gomes (2012).

As simulações foram realizadas no *software Epanet 2.0*. Esse simulador hidráulico foi empregado por apresentar resultados satisfatórios, permitindo obter valores de variações operacionais, como, vazões, pressões, nível da água nos reservatórios, simulação em redes de abastecimento em regime permanente e custos com despesa de energia elétrica. Na Figura 28 é mostrada a sistematização das informações utilizadas nas simulações.

Figura 28. Sistematização para a simulação hidroenergética no software *Epanet 2.0*.



Para melhor entendimento, foi utilizado o editor de controles programados do *software Epanet 2.0*, para simular a variação do nível de água do reservatório elevado junto ao acionamento dos CMB's nos horários de ponta e fora de ponta. Também foram utilizadas, três curvas dos CMB's, operando 2+1, e os reservatórios apoiado e elevado.

Para alimentar o reservatório apoiado, nas simulações de projeto e NBR 12217 (1994) foram utilizados seus volumes determinados. Porém, para as simulações da CETESB (1987) e Gomes (2012) os valores de alimentação foram adotados, com base no princípio da NBR 12217 (1994). E no ponto final do sistema foi inserida a curva de demanda, sendo essa, a mesma para as 4 (quatro) simulações. Essa curva foi monitorada pela Equipe LENHS (2014).

As simulações foram realizadas em unidade de vazões m³/h, em período de 1 mês, sendo que a aquisição de dados foi realizada a cada minuto. Logo, foram encontradas a média de distribuição, em seguida, multiplicada por 24 horas com a finalidade de obter a vazão diária.

Análise da despesa de energia elétrica no SAA

Foram levantadas informações nas faturas encaminhadas pela concessionária de energia elétrica, Centrais Elétricas do Pará (CELPA), ao Setor Guanabara, no caso, as faturas de energia elétrica dos meses de Agosto de 2016 a Janeiro de 2018. Também foi identificada a modalidade tarifária aplicada pela CELPA para cobrança do consumo e demanda de energia elétrica da unidade consumidora de energia elétrica.

Em seguida, foi aplicada a metodologia proposta por Gomes (2012, p 439) para calcular a despesa de energia elétrica, com os dados das simulações hidráulicas e monitorados pela equipe LENHS (2014), o que possibilitou quantificar o valor da fatura de energia elétrica (VF, em R\$), para cada volume útil simulado por meio da equação 17.

$$VF = [(FC + FD + FER + FDR) \times (1 - desc) + FU] \times \left(\frac{1}{1 - icms} \right) + \text{outros} \quad \text{Equação 17}$$

Em que

FC = Valor total da parcela do faturamento do consumo de energia ativa (kWh), em R\$;

FD = Valor total da parcela do faturamento da demanda de potência ativa (kW), em R\$;

FER = Valor total da parc. do fatur. consumo de energia reativa (kVArh) excedente, em R\$;

FDR = Valor total da parc. do fatur. demanda de potência reativa (kVAr) excedente, em R\$;

FU = Valor total da parc. do fatur. da dem. de ultrapassagem de potência ativa (kW), em R\$;

Desc = Expressão decimal do desconto percentual incidente sobre as tarifas e aplicáveis aos; fornecimentos de energia às unidades consumidoras das classes/grupos, de acordo com a legislação vigente:

O faturamento do consumo (FC, em R\$) de energia elétrica ativa para o Setor Guanabara foi obtido utilizando a equação 18.

$$FC = CF_P \times TC_P + CF_{fp} \times TC_{fp} \quad \text{Equação 18}$$

Em que

CF = consumo faturável por posto horário “h”, em kWh;

TC = Tarifa de consumo de energia ativa aplicável por posto horário “h”, em R\$/kWh.

A equação 19 foi utilizada para calcular o valor faturado de demanda ativa (FD, em R\$), de acordo com a legislação vigente. É obrigatório somente para unidades consumidoras do grupo A, no caso, para o Setor Guanabara.

$$FD = DC \times TD \quad \text{Equação 19}$$

Em que

DC = Demanda contratada pela unidade consumidora, em kW;

TD = Tarifa de demanda de energia elétrica ativa, em R\$/kW.

A equação 20 foi utilizada para calcular o valor faturado do consumo de energia elétrica reativa excedente (FER, em R\$) à quantidade permitida pelo fator de potência de referência no período de leitura.

$$FER = CE \times \left[\frac{f_r}{f_t} - 1 \right] \times TC \quad \text{Equação 20}$$

Em que

CE = Consumo de energia elétrica ativa, em kWh;

f_r = fator de potência de referência – igual a 0,92 por legislação’;

f_t = Fator de potência da instalação elétrica da unidade consumidora;

TC = Tarifa de consumo de energia ativa aplicável por posto horário “h”, em R\$/kWh.

O cálculo do valor faturado de demanda de energia elétrica reativa excedente (FDR, em R\$), foi realizado por meio da equação 21. Esse excedente refere-se à quantidade permitida pelo fator de potência de referência no período de leitura considerado, em R\$.

$$FDR = \left[\left(DM \times \frac{f_r}{f_t} \right) - DC \right] \times TD \quad \text{Equação 21}$$

Em que

DM = Demanda de energia elétrica ativa contratada, em kW;

f_r = fator de potência de referência – igual a 0,92 por legislação’;

f_i = Fator de potência da instalação elétrica da unidade consumidora;

DC = Demanda contratada pela unidade consumidora, em kW;

TD = Tarifa de demanda de energia elétrica ativa, em R\$/kW.

A demanda de ultrapassagem de energia elétrica foi por meio da equação 22.

$$FU = DUF \times TUD \quad \text{Equação 22}$$

Em que

DUF = Demanda de energia elétrica faturável por posto horário “h”, em kW.

TUD = Tarifa de ultrapassagem de demanda de energia elétrica por posto horário “h”, em kW.

Vale observar que as tarifas utilizadas para o cálculo de energia elétrica foram os mesmo vigentes para o Setor Guanabara, ou seja, já incluso valores de Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), Programas de Integração Social e de Formação do Patrimônio do Servidor Público (PIS) e Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (COFINS), quer dizer, o preço da tarifa = Tarifa + Tributos em que o SAA está inserido.

Com os resultados obtidos foi possível analisar a despesa de energia elétrica para cada volume útil simulado, e verificar qual se comportou mais eficiente do ponto de vista hidroenergético. Também foram comparados aos valores cobrados no período vigente nas faturas do Setor Guanabara.

Fase 3.2 – Determinação de indicadores de desempenho hidroenergético

Para os indicadores de desempenho operacional, foi determinado o consumo específico de energia elétrica (CEE) (kWh/m³ bombeado), por meio da equação 23.

$$CEE = \frac{EE_C}{V_B} \quad \text{Equação (23)}$$

Em que:

CEE = Consumo específico de energia elétrica, em kWh/m³;

EE_C = Energia elétrica consumida, em kWh;

V_B = Volume de água bombeado, em m³.

Quanto aos indicadores de desempenho financeiro foram determinados Custo médio de energia elétrica R\$/kWh e R\$/ m³ por meio da equação 24.

$$C_{\text{méd}} = \frac{V_t}{C_t} \quad \text{Equação (24)}$$

Em que:

$C_{\text{méd}}$ = Custo médio de energia elétrica, em R\$/kWh;

V_t = Valor total da conta, em R\$;

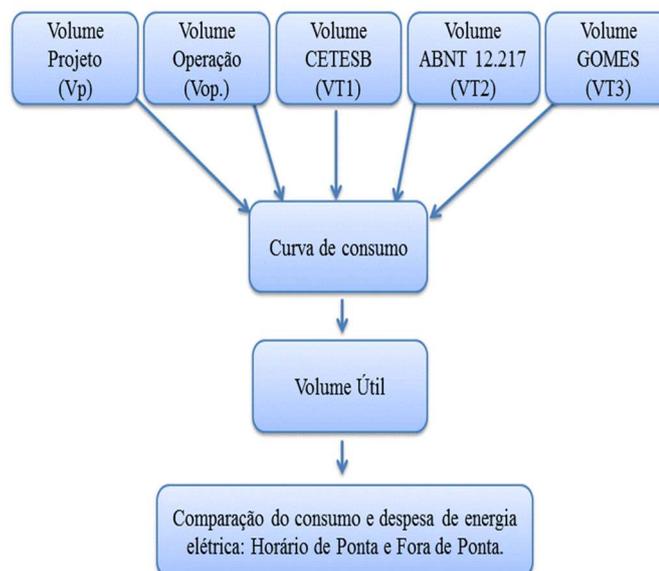
C_t = Consumo total de energia, em kWh.

4.2.4 Tratamento de dados

Os dados selecionados das variações das vazões hidráulicas foram tratados e sistematizados em programas computacionais, como, Software Microsoft Office Excel e Minitab 18, a fim de melhor interpretação das informações. As tabelas e gráficos dos dados de vazão de água foram elaboradas com a finalidade de facilitar a identificação de variações no comportamento do volume de água bombeado nos postos horário de ponta e fora de ponta, observando, ainda, o padrão dos volumes horários bombeados.

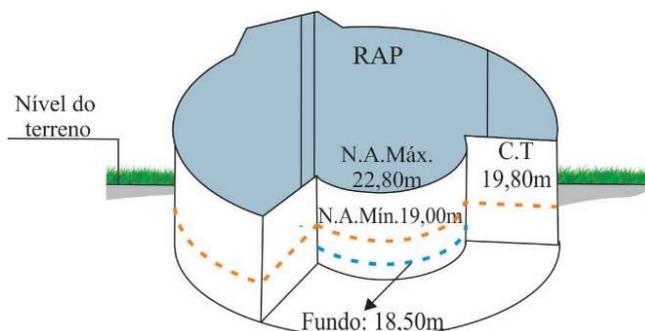
Na Figura 29 é mostrado um esquema obtido no resultado final desta metodologia. São apresentados consumo de energia elétrica tanto para o posto horário de ponta, quanto para o posto horário fora de ponta para volumes simulados e de operação.

Figura 29. Esquema obtido no resultado final desta metodologia.



De acordo com Relatório técnico (2014), o Setor Guanabara possui reservatório apoiado, em concreto armado, e volume útil de 850 m³, tem altura total de 4,3 metros, altura útil de projeto de 3,8 metros e extravasor. O volume de entrada é controlado por manobra. Na Figura 32 são identificadas as cotas do reservatório, máxima de 22,80 m, mínima 19,00, de fundo 18,50 e cota do terreno de 19,80 m.

Figura 32. Medidas do reservatório apoiado do Setor Guanabara.



Fonte: Relatório técnico (2014)

O nível do reservatório apoiado do Setor Guanabara é monitorado continuamente por sistema de telemetria, sendo que no registro pode ser visualizado e acompanhado em tempo real em display instalado na sala do operador dentro do próprio Setor Guanabara, além de ser transmitido automaticamente para os gestores da Unidade de Negócios BR 316.

Esse sistema foi incorporado com o intuito de melhorar o controle do abastecimento e consumo de água do Setor Guanabara. Nesse setor atuavam três operadores em turnos de revezamento proporcionando controle 24 horas para melhor atendimento a população.

O sistema de bombeamento succiona água do reservatório apoiado e recalca para o reservatório elevado. A operação dos CMB's é 2+1, com alimentação de energia elétrica do centro de comando de motores. Na Figura 33 é mostrada a visão geral dos três CMB'S, a visão geral do barrilete e do recalque.

Figura 33. Visão dos conjuntos motor e bomba e do CCM ao fundo.



Vale observar que no monitoramento realizado pela Equipe LENHS em 2014 o CMB 1 estava em manutenção, o que foi verificado da mesma forma na visita técnica realizada em Agosto 2017, razão para a operação ocorrer nas rotinas 2+0, portanto, sem CMB de reserva.

Os motores são de indução trifásicos da WEG, 60 cv, 1.775 rpm, categoria N, IP de proteção 54, REG S1 contínuo, tensões nominais de operação 220/440 v, correntes nominais de operação de 14,8/8,6 A. As bombas são da marca IMBIL, o modelo é ITAP e a família é 125-330 1.750 rpm (ANEXO A) (RELATÓRIO TÉCNICO, 2014).

As instalações elétricas da elevatória de água tratada do Guanabara são alimentadas por meio de ramal de entrada subterrânea com tensão média de 13,800 kV, atendidas por meio de contrato de fornecimento de energia elétrica com tarifação no Grupo A4 (água, esgoto e saneamento) na modalidade de tarifa azul (CELPA⁵, 2017).

O ramal de alimentação tem entrada subterrânea para a estação abrigada transformadora abaixadora de tensão, construída em alvenaria, onde a tensão 13.8 kV é rebaixada para baixa tensão nos níveis de 440/254v e 220/127v, sendo que a tensão 440/254v é o nível de tensão de alimentação dos CMB's (RELATÓRIO TÉCNICO, 2014).

O acionamento dos CMB'S é do tipo Partida Direta, mais conhecida como “partida On/Off”. De acordo com Sobrinho e Borja (2016), nesse tipo de partida o motor parte a plena tensão, potência muito superior à potência nominal. Isso implica em elevados picos de potência elétrica, aumentando, portanto, os custos operacionais (ROCAMORA et al., 2013).

Como não há inversores de frequência para variação da vazão recalçada pelas bombas, os operadores são obrigados a manobrar constantemente os registros de jusante dos CMB's para atendimento das demandas horárias. Esse procedimento diminui a vida útil dos equipamentos, aumenta a perda de carga e o consumo de energia elétrica.

Assim, o inversor de frequência é sugestão importante para os SAA's, pois, controla o nível e a frequência da tensão aplicada ao motor, além da rotação e sua potência (SCARCELLI et al., 2009; MACINTYRE, 2013). O controle de rotação, além de suavizar a partida, permite que o CMB bombeie vazão compatível com a demandada. Isso faz com que as velocidades utilizadas nas tubulações sejam reduzidas o que diminui significativamente as perdas de carga, evitando consumos desnecessários de energia elétrica.

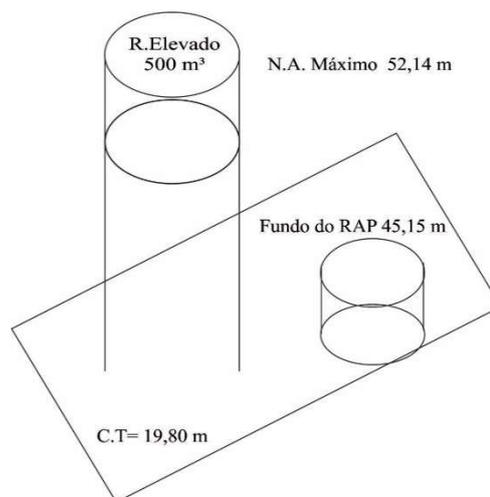
⁵ Centrais Elétricas do Pará.

O reservatório elevado foi construído em concreto armado, com formato circular (Figura 34), com capacidade para armazenamento de 500 m³, altura útil de 7,0 m e com tubulação de 300 mm para extravasar o volume excedente instalada no nível máximo de água. A tubulação de saída do reservatório elevado é de FoFo 400 mm de diâmetro, com registro instalado no mesmo compartimento dos CMB's. As cotas do reservatório elevado são observadas na Figura 35.

Figura 34. Vista do reservatório elevado.



Figura 35. Cotas Reservatórios Setor Guanabara



Fonte: Projeto do SAA Guanabara (1998).

Do mesmo modo que o reservatório apoiado, o nível de água no reservatório elevado do Setor Guanabara também é acompanhado por sistema de telemetria da COSANPA na sala do operador e sua transmissão ocorre em intervalos de 6 minutos.

Esse sistema telemétrico funciona a partir de informações de um transdutor de pressão instalado na tubulação de descarga de fundo do reservatório elevado, sendo os dados utilizados para monitoramento dos operadores da estação elevatória de água tratada Setor Guanabara e pelos gestores da Unidade de Negócios BR 316.

Com isso, os operadores utilizam dispositivo com display para avaliação dos níveis de água dos reservatórios. Essas informações são utilizadas para o acionamento e desligamentos dos CMB's e para manobra de registros das tubulações de recalque e de distribuição de água, visando adequação da vazão e pressão de água distribuída.

Nessa configuração, a rede de distribuição é abastecida por gravidade pelo reservatório elevado de 500 m³, que atende população superior a 27.250 habitantes para final de plano em 2016, no bairro da Guanabara.

5.1.1 Avaliação das variações das vazões hidráulicas

Na pesquisa avaliaram-se variações das vazões hidráulicas mais representativas, o dia 23 de outubro de 2014. Foram avaliadas vazões de entrada no reservatório apoiado, bombeada para o reservatório elevado e vazão de distribuição, conforme mostradas na Tabela 7. Para o objetivo deste trabalho foram utilizados dados de vazão de saída do reservatório elevado.

Tabela 7. Dados de vazões hidráulicas utilizados no trabalho.

Hora	Vazão de entrada no R.A (m³/h)	Vazão bombeada para R.E (m³/h)	Vazão de saída do R.E (m³/h)
	Dia 23	Dia 23	Dia 23
00:00:00	235,37	231,02	219,83
01:00:00	235,53	230,87	219,13
02:00:00	236,56	231,23	218,90
03:00:00	236,64	231,18	220,26
04:00:00	219,61	245,69	237,60
05:00:00	250,26	235,69	332,78
06:00:00	258,72	340,24	393,68
07:00:00	346,96	330,50	394,36
08:00:00	351,00	254,66	391,00
09:00:00	350,14	453,19	407,81
10:00:00	350,89	413,03	395,53
11:00:00	350,57	248,60	392,29
12:00:00	348,92	323,57	430,25
13:00:00	349,35	440,64	424,03
14:00:00	351,29	450,12	421,74
15:00:00	351,47	293,36	371,72
16:00:00	349,71	252,06	364,99
17:00:00	349,20	273,47	367,99
18:00:00	350,03	487,46	388,78
19:00:00	351,70	343,62	382,45
20:00:00	350,58	440,70	370,94
21:00:00	350,05	286,70	367,17
22:00:00	346,85	259,25	352,40
23:00:00	340,22	282,63	324,49
Total	7.611,60	7.579,43	8.390,15
Média	317,15	315,81	349,59
Máxima	351,70	487,46	430,25
Mínima	219,61	230,87	218,90

Fonte: Relatório Técnico: Setor Guanabara (2014).

Na Tabela 7 foi verificado diferença entre os valores de vazão de entrada no reservatório apoiado menor do que a vazão distribuída na rede, isso ocorre pelo motivo de um dia para o outro haver água armazenada no reservatório elevado. A seguir serão comentadas variações das vazões hidráulicas de acordo com cada unidade do setor.

5.1.1.1 Vazão de alimentação ao reservatório apoiado

A vazão média diária de água na entrada do reservatório apoiado do Setor Guanabara foi de 317,15 m³/h, a qual é aduzida por subadutora, tendo registro de derivação instalado para realizações de medição de vazão (Figura 36) e registro de manobra manual para controlar a vazão afluyente ao reservatório apoiado (Figura 37).

Figura 36. Entrada da Subadutora no R.A

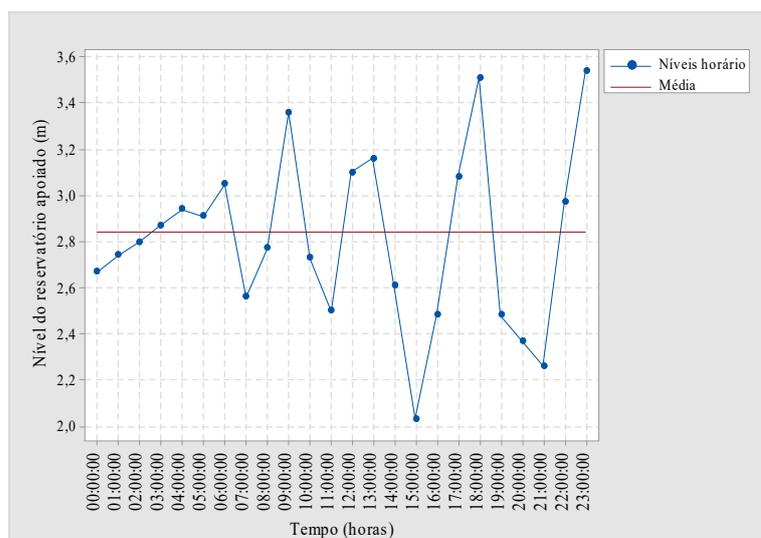


Figura 37. Registro na entrada do R.A.



No Gráfico 1 é apresentado o comportamento horário da altura da lâmina líquida do nível do reservatório apoiado, encontradas nos dados das variações das vazões hidráulicas nas 24 horas da rotina operacional do sistema de bombeamento e reservação do Setor Guanabara.

Gráfico 1. Comportamento horário do nível do reservatório apoiado.



Com as variações das vazões hidráulicas do nível da lâmina d'água do reservatório apoiado foi possível verificar que a altura da lâmina líquida aumentou continuamente no período de 00h00min às 06h00min, indicando que a vazão de entrada no reservatório apoiado é maior que a vazão recalçada pelos CMB's para o reservatório elevado. Neste sentido, o consumo de água foi menor quando comparado ao de outros horários do dia. Nos demais horários, a altura da lâmina líquida oscilou.

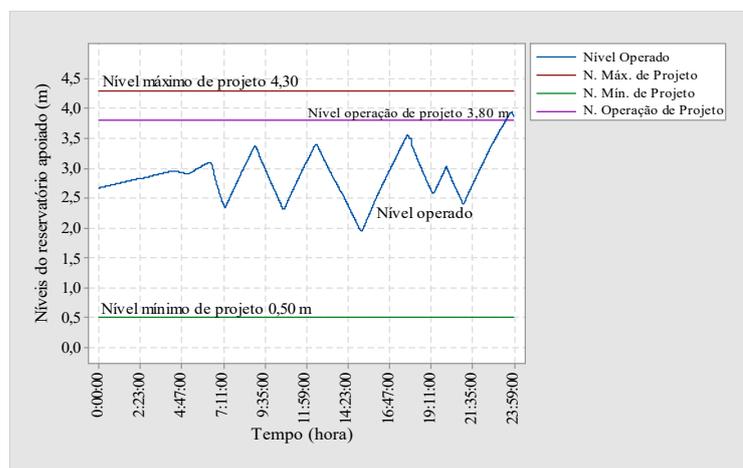
No intervalo das 18h00min às 21h00min também foram observados níveis baixos da lâmina líquida, resultando na necessidade de funcionamento dos CMB's nesse horário. Considerando que a tarifa de energia elétrica no 37º setor é do tipo horosazonal, neste sentido, cabe observar que para esse horário o custo de energia elétrica é mais oneroso. Ademais, o nível de água do reservatório apoiado aumentou a partir das 23h00min, em razão da redução do bombeamento de água para o reservatório elevado e do menor consumo.

No Gráfico 2 é mostrado o comportamento da curva da variação das vazões em relação aos níveis do reservatório apoiado no dia 23. Logo, observa-se que o reservatório ultrapassou o nível máximo de operação estabelecido ao projeto, o que pode ter ocorrido por problemas de operação.

No Gráfico 2 é mostrado o comportamento dos níveis de reservação operados no Setor Guanabara no dia 23. Logo, observa-se que a operação ultrapassou o nível máximo estabelecido no projeto (3,80 m), o que pode ter ocorrido por problemas de operação.

O nível máximo de projeto do reservatório apoiado é de 4,30 m e o nível mínimo de 0,50 m. Todavia, é verificado que esses níveis não foram operados de forma correta. Por outro lado, os níveis mínimo e máximo de operação variaram entre 1,95 e 3,94 m respectivamente, não atendendo o estabelecido no projeto de 0,50 m, nem o nível operação de 3,80 m.

Gráfico 2. Variação do nível do reservatório apoiado - Setor Guanabara.

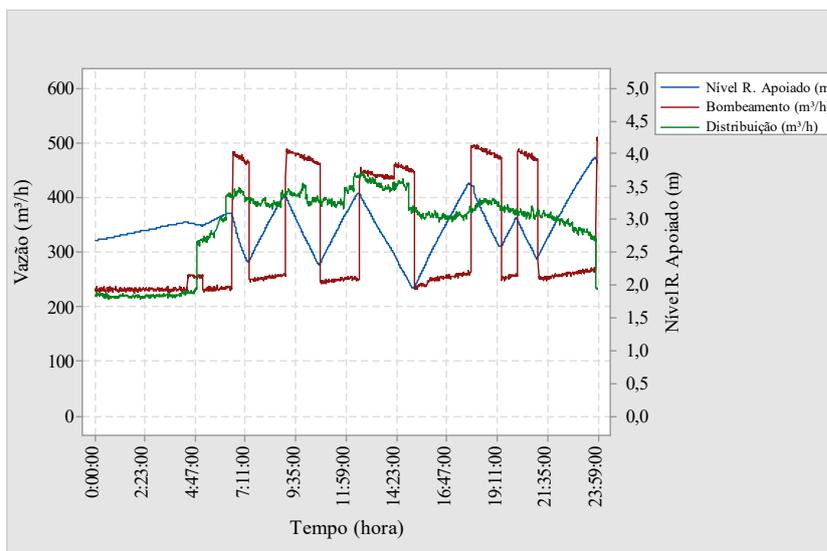


A utilização ineficiente do volume útil do reservatório apoiado geram impactos negativos. A respeito disso, Shokri (2014) ressalta que a posição do nível da água no reservatório pode reduzir em até 36% o consumo de energia elétrica.

O volume do reservatório apoiado é sempre em função do balanço hídrico, ou seja, A rotina operacional do reservatório apoiado não é fixa, pois é relacionada com a demanda de consumo de água distribuída, ou seja, aduzida e bombeada. Se o volume bombeado é maior do que o aduzido, o nível do reservatório apoiado diminui, uma vez que, esta sendo bombeado mais do que o reservatório está recebendo.

Em contrapartida, se somente uma das bombas estiver desligada, geralmente o que é distribuído é maior do que está sendo bombeado. Dessa forma, o nível tende a aumentar novamente, um exemplo desse comportamento é mostrado no Gráfico 3.

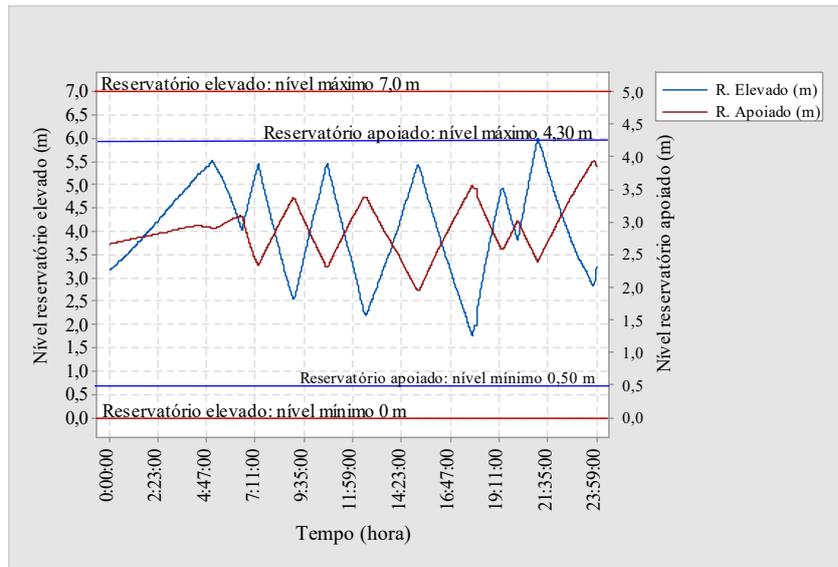
Gráfico 3. Operação do Reservatório apoiado.



A respeito disso, Gomes (2012) comenta que os principais parâmetros de controle operacional dos reservatórios são o nível da lâmina líquida e as vazões de entrada e de saída do reservatório. Esses parâmetros devem ser utilizados como referência no monitoramento de reservatório.

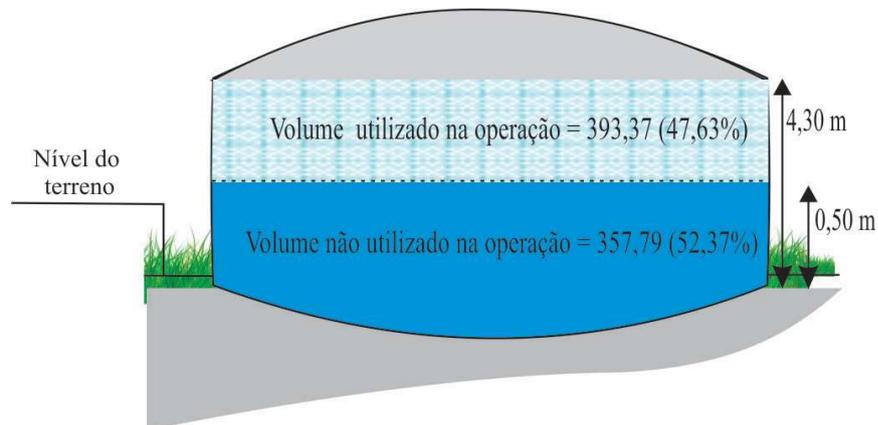
Vale ressaltar que o nível do reservatório elevado também varia conforme a distribuição e de acordo com a demanda, o reservatório apoiado sofrerá modificações equivalentes ao do reservatório elevado ao longo do dia, pois, quando o CMB é acionado para recalcar água ao reservatório elevado o nível do reservatório apoiado diminui, e neste sentido os níveis dos reservatórios apoiado e elevado do setor do Guanabara se comportaram de forma inversamente proporcional, conforme mostrados no Gráfico 4.

Gráfico 4. Comportamento dos níveis dos reservatórios apoiado e elevado.



Com base nos dados das variações das vazões hidráulicas foi constatada a utilização ineficiente do volume útil do reservatório apoiado. Por conseguinte, foram verificadas alturas máxima de 3,94 m e mínima de 1,95 m, isso representou 47,63% (393,37 m³) do volume útil de operação do reservatório apoiado de 751,16 m³, ou seja, mais da metade (52,37%) do volume não foi utilizado, conforme mostrado na Figura 38.

Figura 38. Volume de água utilizado na operação do reservatório apoiado do 37º setor.



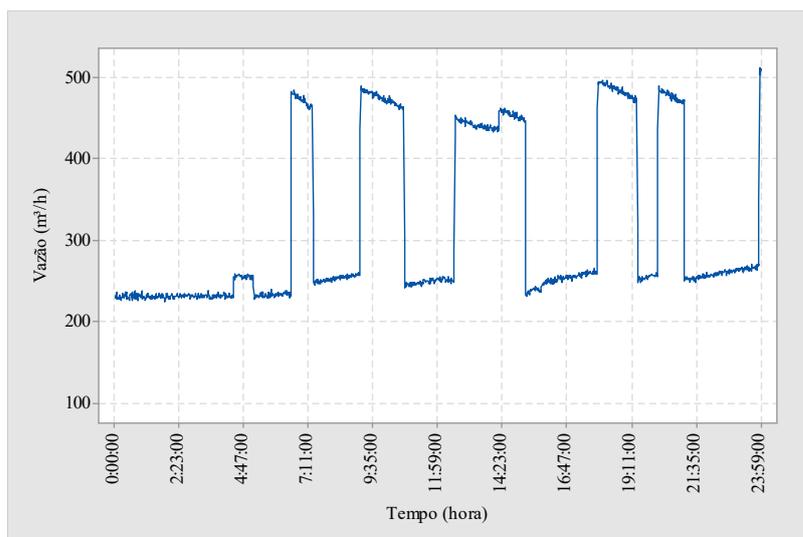
Assim, os principais problemas constatados em relação ao nível de reservação foram, a não utilização de toda altura útil do reservatório apoiado e do volume útil projetado para operação. Além dos baixos níveis de reservação instantes antes do posto horário de ponta, quando a tarifação de energia elétrica tende a ser mais onerosa.

5.1.1.2 Vazão bombeada para o reservatório elevado

A vazão média diária de água bombeada verificada para o reservatório elevado no Setor Guanabara foi de 315,81 m³/h, e vazões máxima 487,46 m³/h e mínima de 230,87 m³/h. Na vazão de bombeamento para o reservatório elevado foi identificado padrão de operação no qual há breve funcionamento de CMB's em paralelo, próximo das 07:00, possivelmente para recuperação de nível de reservação no reservatório elevado Guanabara para troca de turno de operador, conforme mostrado no Gráfico 5.

Também, foi observado controle de vazão do bombeamento bem abaixo da operação comum dos CMB's do Setor Guanabara ao longo da madrugada, conforme mostrado no Gráfico 5, isso ocorreu provavelmente para evitar atividades de acionamento e desligamento nesse período.

Gráfico 5. Vazão medida na EAT Guanabara.



Fonte: Relatório técnico (2014).

Não há operação padrão de acionamento e desligamento dos CMB's na EAT Guanabara. Além disso, em nenhum momento há o desligamento simultâneo dos CMB's. Por se tratar do uso de apenas dois CMB na EAT Guanabara operando hora de forma isolada hora em conjunto, é possível observar duas linhas de vazão instantâneas bem distintas.

No entanto, em alguns momentos é constatado comportamento fora desses padrões, com valores inferiores, significando que o sistema de bombeamento opera por vezes com os registros de recalque estrangulados para controle de vazão, o que não é indicada para o sistema.

No posto horário de ponta foi verificada operação de dois CMB's em conjunto na EAT Guanabara. Para os postos horários de energia elétrica, essa forma de operação impossibilita qualquer intenção de enquadramento com tarifas diferenciadas de energia elétrica.

A quantidade elevada de acionamentos do segundo CMB em paralelo e o relativo curto tempo de funcionamento do mesmo podem ser indicativos de capacidade de reservação do reservatório elevado aquém do necessário para a demanda atual do Setor Guanabara, não levando em consideração as perdas de água no sistema.

Operação dos CMB's

A operação da estação elevatória do 37º Setor é originalmente do tipo 2+1, todavia, no período de monitoramento da equipe LENHS - UFPA o sistema operava com 2+0, devido um CMB's apresentar problemas técnicos. Em consequência disso, são frequentes os momentos em que os CMB's funcionam com operações dos tipos 2+0 e 1+1, sem nenhum critério de revezamento dos CMB's, conforme foi verificado na operação diária.

Foi verificada utilização total ou parcial dos CMB's no posto horário de ponta de energia elétrica. Na Tabela 8 são mostradas as horas de bombeamento por operação dos CMB's. Neste sentido, foi verificado que, no posto horário de ponta o CMB 01 funcionou 2,53 horas, enquanto que o CMB's 03 funcionou em 100% do horário de ponta e juntos os CMB's trabalharam por 2,53 horas também nesse tempo.

No que se refere ao horário fora de ponta, o CMB 01 funcionou por 12,30 horas, o enquanto que CMB 03 esteve em operação por 14,43 horas, e juntos trabalharam totalizando 5,73 horas.

Vale comentar que em todo horário fora de ponta, pelo menos um CMB estava em operação sendo que as horas em funcionamento foram de 20,52 consecutivas. Além disso, vale observar que pelo menos uma elevatória de água tratada funcionou 98% do dia.

Tabela 8. Horas de bombeamento por operação dos conjuntos motor e bomba.

Horário	Tempo de funcionamento (h)			
	CMB 01	CMB 03	CMB 01 e 03	Pelo menos 1 CMB
Ponta (3h)	2,53	3,00	2,53	3,00
Fora de ponta (21h)	12,30	14,43	5,73	20,52
Total (24h)	14,22	17,43	7,65	23,52

Foi verificada também, a operação de dois CMB's em conjunto na EAT Guanabara no no posto horário de ponta. Além disso, praticamente nas 24 horas não houve desligamento concomitante dos CMB's. Esse tipo de operação impossibilita intenção de enquadramento com tarifas diferenciadas de energia elétrica nos postos horários.

A respeito disso, Tsutiya (2001) propõem condições necessárias para viabilizar o desligamento dos CMB's no posto horário de ponta, para isto, é essencial que o volume necessário para atender a demanda no posto horário de ponta seja menor ou igual ao volume útil do reservatório.

Na Tabela 9 é mostrado o volume de água bombeado e o consumo de energia elétrica em kWh. Por conseguinte, o volume de água bombeado no posto horário de ponta foi de 1.185,54 m³, o equivalente a 15,39% do volume total bombeado no dia. Esse bombeamento consumiu 15,49% da energia elétrica diária. Nesse horário a tarifa de energia elétrica tende a ser mais onerosa, uma alternativa com a finalidade de reduzir custos ao sistema, seria deslocar esse bombeamento de água para os demais horários do dia. Isto é, paralisar os CMB's no posto horário de ponta, o que certamente diminuiria o custo de energia elétrica.

Neste contexto, a redução ou paralisação do consumo de energia elétrica no posto horário de ponta, é alternativa mais importantes de uso racional e eficiente de energia elétrica, sem comprometer o desempenho dos sistemas de cada uso final, ou, nível de conforto proporcionado aos usuários.

Tabela 9. Volume de água bombeado e consumo de energia elétrica.

Horário	Volume bombeado (m ³)		
	CMB 01	CMB 03	Bombeamento
Ponta (3h)	455,22	730,31	1.185,54
Fora de ponta (21h)	2.986,25	3.531,60	6.517,85
Total (24h)	3.441,47	4.261,91	7.703,38
Horário	Energia Consumida (kWh)		
	CMB 01	CMB 03	Total
Ponta (3h)	74,81	97,67	172,48
Fora de ponta (21h)	474,86	466,08	940,94
Total (24h)	549,67	563,75	1.113,42

Fonte: Relatório técnico (2014).

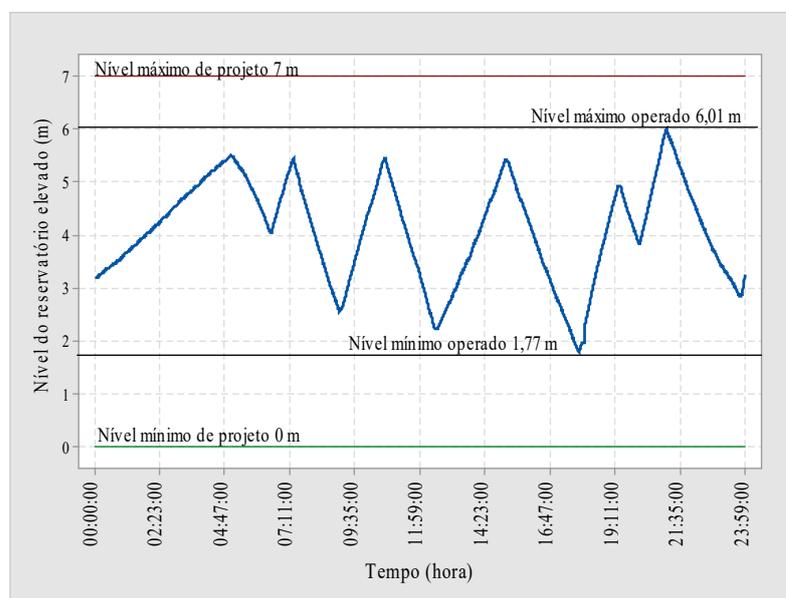
Como já comentado, o custo de energia elétrica associado ao bombeamento de água é responsável por parte significativa do custo total do sistema (SOLER et al., 2016). Desse modo, o controle ótimo do sistema é uma ferramenta importante para minimizar seus custos operacionais (PEREIRA; CONDURÚ, 2014).

5.1.1.3 Vazão de saída para a rede de distribuição

Foi observado volume distribuído no dia de 8.390,15 m³ de água, por sua vez, a maior vazão distribuída ocorreu as 12:00 (430,25 m³/h) e mínima as 02:00 (218,90 m³/h), horário similar a outras curvas de consumo de outros setores na Região Metropolitana de Belém, Pará. Essa vazão diária será utilizada para o dimensionamento do volume útil de reservação na etapa 2.

O nível máximo e mínimo de reservação do reservatório elevado monitorado na atual operação do Setor Guanabara não coincidiu com valores estabelecidos no projeto, sendo esses de 7,0 e 0 metros respectivamente, conforme mostrado no Gráfico 6.

Gráfico 6. Variação do nível do reservatório Elevado - Setor Guanabara.

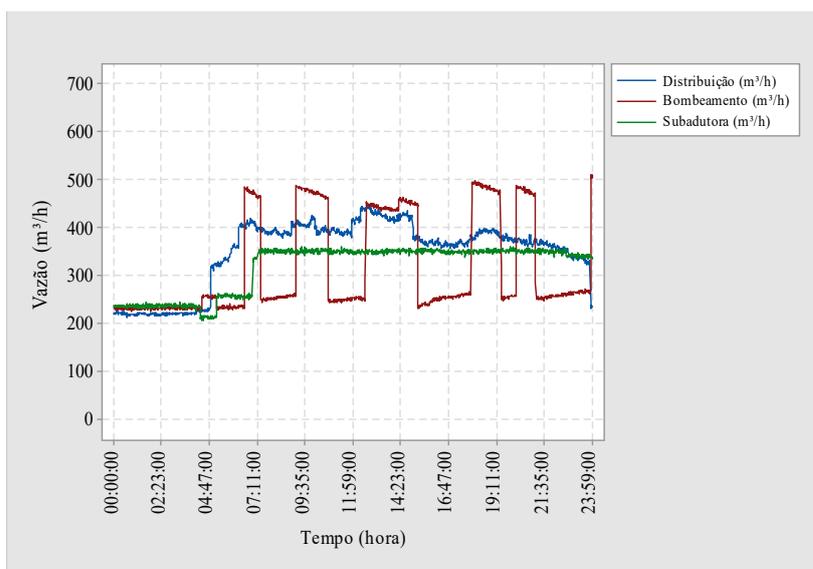


Foi verificada forma diferente de operação dos níveis de reservação do reservatório elevado, com isso é mostrado no Gráfico 6 que o nível baixou próximo a 1,80 m e em outros momentos operou entre o nível mínimo de 1,77 m e máximo de 6,01 m, funcionando, assim, como caixa de passagem, ou seja, não realizando sua função principal que é de regularizar vazões ao longo do dia (TSUTIYA 2006; GOMES 2012).

O número elevado de ciclos de acionamento e desligamento dos CMB da elevatória de água tratada é indício de volume útil de reservação no reservatório elevado abaixo da demanda existente, portanto, sendo necessário estudo criterioso da real demanda que o reservatório elevado pode atender e verificação da possibilidade de reduções de demanda, por redução de perdas reais.

No Gráfico 7 é mostrado o comportamento do hidrograma de vazão. Vale observar que o hidrograma de distribuição de água não é característico, em razão das manobras realizadas no registro da tubulação de descida do reservatório elevado e que essa curva obedece ao mesmo padrão da vazão bombeada (RELATÓRIO TÉCNICO, 2014). Com isso, o controle da vazão de distribuição é realizado com o acionamento ou desligamento dos CMB's.

Gráfico 7. Vazão instantânea na subadutora, no bombeamento e na distribuição do Setor Guanabara.



A prática de controle da vazão distribuída com o acionamento do CMB é prejudicial ao sistema, por alguns motivos, a saber, as manobras contínuas dos registros recalque podem diminuir a vida útil dos próprios registros, bem como a vida útil do CMB, pois o mesmo acaba funcionando com carga superior para qual foi dimensionado previamente.

Além disso, a regulação da vazão distribuída faz com que a pressão dinâmica na rede de distribuição de água possa estar abaixo do valor da NBR 12218 (1994), o que pode causar falta de água a população. Também faz com que o hidrograma de distribuição se torne descaracterizado, impedindo o cálculo exato do coeficiente da hora de maior consumo.

Assim, o volume de água bombeado no posto horário de ponta deve ser analisado para ser modulado para horários anteriores, para que seja possível a paralisação do bombeamento no posto horário de ponta para a tarifa de energia elétrica, desde que a demanda de água no setor seja controlada.

5.1.1.4 Comparação dos Volumes útil de projeto e monitorado no Setor Guanabara

a. Volume útil de projeto

O projeto executivo do Setor Guanabara foi elaborado pela empresa Consultoria, Engenharia Sanitária e Ambiental (CESAN), para modificação da concepção e de expansão de unidades para complementar o abastecimento de água potável no Bairro da Guanabara.

Esse projeto executivo foi entregue no dia 20 de junho de 1.996 e aprovado pela COSANPA em julho de 1.998, tendo como período de alcance de 20 anos e população de 27.250 habitantes no final de plano. Na Tabela 10 é apresentado os parâmetros utilizados no projeto executivo para o Setor Guanabara.

Tabela 10. Volume útil de reservação e parâmetros de projeto executivo.

Memória de cálculo					
Parâmetros	Valor	Unidade	Descrição	Valor	Unidade
População	27.250*	habitantes	Médio diário	4.087,50	m ³ /dia
per capita	150	l.hab.dia	Vazão máxima diária	56,77	l/s
K ₁	1,2	-	Vazão máxima diária	204,37	m ³ /h
K ₂	1,2	-	Máxima horária	85,16	l/s
			Máxima horária	306,57	m ³ /h

Fonte: CESAN (1996) * Final de plano

Na Tabela 11 é apresentado volume útil de reservação dimensionados no projeto executivo e existente no Setor Guanabara. Foi verificado que o volume útil de reservação para os reservatórios apoiado e elevado projetados foram de 850 m³ e 1.000 m³, respectivamente, conforme mostrado na Tabela 11.

Tabela 11. Volume útil de reservação projeto e existente no Setor Guanabara.

Volumes de reservação			
Reservatório	Projetado	Existente	Total
Apoiado (m ³)	-	850	850
Elevado (m ³)	500	500	1.000
Total	500	1.350	1.850

Fonte: CESAN (1996).

É oportuno observar que, um dos reservatórios elevados projetados para 500 m³ não foi construído, ficando, portanto, o Setor Guanabara com o volume de reservação existente, por sua vez, volume total de 1.350 m³, sendo 850 m³ para o reservatório apoiado e 500 m³ para o reservatório elevado. O volume de projeto foi importante também para simulação hidroenergetica na Etapa III deste trabalho sendo considerado como VP.

b. Volume útil de reservação das vazões monitoradas no Setor Guanabara

Reservatório apoiado

No intuito de verificar o comportamento do reservatório apoiado foram utilizadas variações das vazões hidráulicas do dia 23 de outubro de 2014. A seguir, são mostrados cálculos para o reservatório apoiado de área (m²), altura útil utilizada, volume útil utilizado, quanto em porcentagem do volume estava sendo utilizado e o volume morto no reservatório apoiado. Para tanto, foram considerados os seguintes parâmetros:

- a) Altura total de projeto do reservatório apoiado, em m
- b) Altura útil do reservatório apoiado utilizada, em m;
- c) Nível máximo de projeto do reservatório apoiado, em m;
- d) Nível máximo do reservatório apoiado monitorado, em m;
- e) Nível mínimo do reservatório apoiado monitorado, em m;
- f) Volume útil projetado para operação do reservatório apoiado, em m³;
- g) Volume do reservatório apoiado monitorado utilizado, em m³;
- h) Volume total do reservatório apoiado monitorado em m³;

Para o cálculo da área do reservatório apoiado foram utilizados volume útil de projeto (v) do reservatório apoiado de 850 m³ e altura total do reservatório apoiado (h) de 4,30 m. Neste sentido, verificou-se área (A) de 197,67 m², conforme mostrado na equação 25.

$$A = \frac{V}{h} = \frac{850}{4,30} = 197,67 \text{ m}^2 \quad \text{Equação (25)}$$

Em que:

A = área do reservatório apoiado, em m²;

v = volume útil de projeto do reservatório apoiado, em m³;

h = altura total de projeto do reservatório apoiado, em m.

Com a finalidade de conhecer qual a altura útil do reservatório apoiado estava sendo utilizada, foi realizado cálculo por meio da equação 26. Para isso, o nível máximo do reservatório apoiado obtido no monitoramento foi de 3,94 m e nível mínimo de 1,95 m. Assim, com base nesses dados, a altura útil do reservatório apoiado (H) utilizada foi de 1,99 m. Vale ressaltar, que a altura útil de projeto é de 3,80 m, por sua vez, verificou-se operação com altura útil menor de reservação, haja vista que, 47,63% dessa não foi utilizada.

$$H = N_{\text{máx}} - N_{\text{mín}} = 3,94 - 1,95 = 1,99 \text{ m} \quad \text{Equação (26)}$$

Em que:

H = altura útil do reservatório apoiado utilizado, em m;

N.máx = nível máximo do reservatório apoiado monitorado, em m;

N.mín = nível mínimo do reservatório apoiado monitorado, em m.

Com o objetivo de encontrar o volume útil de reservação que estava sendo utilizado foi empregada a equação 27. Para esse fim, foram utilizadas a área do reservatório apoiado (A) de 197,67 m² e altura útil (A) de 1,99 m. Diante disso, obteve volume útil de reservação do reservatório apoiado utilizado (V) no Setor Guanabara de 393,37 m³ (Como já comentado, o volume de reservação projetado para operação foi de 751,16 m³ e altura total de 3,80 m), com isso, verificou-se que, 47,63% do volume projetado não estava sendo utilizado.

$$V = A \times H = 197,67 \times 1,99 = 393,37 \text{ m}^3 \quad \text{Equação (27)}$$

Em que:

V = Volume útil de reservação utilizado, em m³;

A = Área do reservatório apoiado calculada, em m²;

H = Altura útil do reservatório apoiado calculada, em m.

Para obtenção do volume total de reservação (V_T) em operação foi aplicada a equação 28. Para tal fim, foram utilizados a área do reservatório apoiado (A) de 197,67 m² e nível máximo do reservatório apoiado monitorado de 3,94 m. Com isso, o volume total de reservação encontrado esteve em 778,84 m³. Vale lembrar, que o volume de projeto para o reservatório apoiado foi de 850 m³, todavia, foi observado déficit de 71,16 m³.

$$V_T = A \times N_{\text{máx}} = 197,67 \times 3,94 = 778,84 \text{ m}^3 \quad \text{Equação (28)}$$

Em que:

V_T = volume total de reservação, m³;

A = área do reservatório apoiado calculada, em m²;

N.máx = nível máximo do reservatório apoiado monitorado, em m.

Com o intuito de conhecer a porcentagem utilizada (%utiliz.) do volume útil do reservatório apoiado, foi realizado cálculo por meio da equação 29. Para tanto, foram empregados o volume útil de água do reservatório apoiado utilizado (V) de 393,37 m³ e volume útil de operação (v) de 751,16 m³. Nesse sentido, calculou-se que a porcentagem do

volume útil utilizado no Setor Guanabara esteve em 52,37%.

$$\%_{\text{útil}} = \frac{V}{V_1} = \frac{393,37}{751,16} = 52,37\% \quad \text{Equação (29)}$$

Em que:

%utiliz. = porcentagem do volume útil utilizado;

V = Volume útil de reservação utilizado, em m³;

v₁ = volume útil de projeto do reservatório apoiado de operação, em m³.

O volume morto corresponde a parcela do volume total do reservatório que não é utilizada, é a diferença entre o volume total e volume utilizado, esse valor foi encontrado por meio da equação 30. Para isso, foram aplicados o volume total de reservação (VT) de 778,84 m³ e o volume útil de água utilizado (V) do reservatório apoiado calculado de 393,37 m³. Por conseguinte, o volume morto (VM) do reservatório apoiado encontrado foi de 385,47 m³, ou seja, volume que não estava sendo utilizado na operação do apoiado.

$$VM = VT - V = 778,84 - 393,37 = 385,47 \text{ m}^3 \quad \text{Equação (30)}$$

Em que:

VM = volume morto, em m³;

V_T = volume total de reservação, m³;

V = Volume útil de reservação utilizado, em m³;

Assim, na Tabela 12 é mostrado em resumo o resultado dos cálculos para o volume útil do reservatório apoiado em operação no Setor Guanabara, sendo encontrados com base nos dados monitorados da Equipe LENHS (2014).

Tabela 12. Cálculo de volume útil utilizado do reservatório apoiado no Setor Guanabara.

Memória de cálculo	Valor	Unidade
Área do reservatório apoiado	197,67	m ²
Altura útil do reservatório apoiado utilizado	1,99	m
Volume útil de reservação utilizado	393,37	m ³
Volume total de reservação	778,84	m ³
Porcentagem do volume útil utilizado	52,37%.	-
Volume morto	385,47	m ³

Fonte: Relatório técnico (2014).

Reservatório elevado

Para verificar a operação do reservatório elevado, também foram utilizados dados de monitoramento do dia 23. Assim como, as equações para os cálculos foram os mesmos utilizados para o reservatório apoiado. Cálculos de área do reservatório (m²), altura útil utilizada, volume útil utilizado, quanto em porcentagem do volume estava sendo utilizado e o volume morto verificado no reservatório elevado.

Para o cálculo da área do reservatório elevado foram utilizados volume útil de projeto (v) de 500 m³ e altura total de 7,0 m. Neste sentido, foi obtida área (A) de 71,43 m² para o reservatório elevado, conforme mostrado na equação 31.

$$A = \frac{V}{h} = \frac{500}{4,30} = 71,43 \text{ m}^2 \quad \text{Equação (31)}$$

Em que:

A = área do reservatório elevado, em m²;

v = volume útil de projeto do reservatório elevado, em m³;

h = altura total de projeto do reservatório elevado, em m.

O nível máximo do reservatório elevado obtido nas variações das vazões hidráulicas foi de 6,01 m e nível mínimo de 1,77 m. Portanto, com base nesses dados, a altura útil do reservatório elevado utilizada (H) foi de 4,24 m, encontrado por meio da equação 32. Vale comentar, que a altura útil de projeto é 7,0 m, por sua vez, verifica-se que 60,57% dessa altura não foi utilizada, o que caracteriza a operação do sistema de forma ineficiente.

$$H = N_{\text{máx}} - N_{\text{mín}} = 6,01 - 1,77 = 4,24 \text{ m} \quad \text{Equação (32)}$$

Em que:

H = altura útil do reservatório elevado utilizado, em m;

N.máx = nível máximo do reservatório elevado monitorado, em m;

N.mín = nível mínimo do reservatório elevado monitorado, em m.

Como já encontrado anteriormente, a área do reservatório elevado (A) é de 71,43 m² e altura útil (H) de 4,24 m. Diante desse resultado, por meio da equação 33 tem-se que o volume útil de reservação do reservatório elevado utilizado (V) no Setor Guanabara foi de 302,86 m³. Com isso, foi verificado que 39,42% do volume projetado não estava sendo utilizado, haja vista, que o volume de operação projetado foi de 500 m³.

$$V = A \times H = 71,43 \times 4,24 = 302,86 \text{ m}^3 \quad \text{Equação (33)}$$

Em que:

V = Volume útil de reservação utilizado, em m³;

A = Área do reservatório elevado calculada, em m²;

H = Altura útil do reservatório elevado calculada, em m.

Para obtenção do volume total de reservação (VT) foram utilizados dados de área do reservatório elevado encontrada (A) de 71,43 m², assim como, o nível máximo do reservatório elevado monitorado de 6,01 m. Empregando a equação 34, o volume total de reservação (VT) encontrado esteve em 429,29 m³. No entanto, foi observado déficit de 70,71 m³.

$$VT = A \times N_{\text{máx}} = 71,43 \times 6,01 = 429,29 \text{ m}^3 \quad \text{Equação (34)}$$

Em que:

V_T = volume total de reservação, m³;

A = área do reservatório elevado calculada, em m²;

N.máx = nível máximo do reservatório elevado monitorado, em m.

O volume útil de água do reservatório elevado utilizado (V) foi de 302,86 m³, porém, o volume útil projetado foi de 500 m³. Nesse sentido, a porcentagem de volume útil utilizado (%utiliz.) no Setor Guanabara foi de 60,60%, conforme mostrado na equação 35.

$$\%_{\text{útil}} = \frac{V}{V_1} = \frac{302,86}{500} = 60,60\% \quad \text{Equação (35)}$$

Em que:

%utiliz. = porcentagem do volume útil utilizado;

V = Volume útil de reservação utilizado, em m³;

v₁ = volume útil de projeto do reservatório elevado de operação, em m³.

Para encontrar o volume morto do reservatório elevado, foi empregado o volume total de reservação (VT) de 429,29 m³ e o volume útil de água utilizado (V) do reservatório elevado encontrado de 302,86 m³. Por conseguinte, o volume morto (VM) do reservatório elevado encontrado foi de 126,43 m³, conforme mostrado na equação 36, ou seja, volume que não estava sendo utilizado na operação do Setor Guanabara.

$$VM = VT - V = 429,29 - 302,86 = 126,43 \text{ m}^3$$

Equação (36)

Em que:

VM = volume morto, em m³;

V_T = volume total de reservação, m³;

V = Volume útil de reservação utilizado, em m³;

Na Tabela 13 é mostrado em resumo os resultados dos cálculos para o volume útil do reservatório elevado no Setor Guanabara encontrados com base nos dados monitorados pela equipe LENHS – UFPA (2014).

Tabela 13. Cálculo de volume útil utilizado do reservatório elevado no Setor Guanabara.

Memória de cálculo	Valor	Unidade
Área do reservatório elevado	71,43	m ²
Altura útil utilizada	4,24	m
Volume útil de reservação utilizado	302,86	m ³
Volume total de reservação	429,29	m ³
Porcentagem utilizada do volume útil	60,60	%
Volume morto	126,43	m ³

Fonte: Relatório técnico (2014).

Consumo e despesa hidroenergética de operação do Setor Guanabara

Na Tabela 14 são mostrados os valores na operação do Setor Guanabara monitorados pela Equipe LENHS – UFPA. Logo, o bombeamento de água no posto horário de ponta foi de 1.185,54 m³ e no posto horário fora de ponta foi de 6.517,85 m³. A soma desses volumes gerou despesa mensal de energia elétrica de 33.402,51 kW e R\$ 27.801,53.

Tabela 14. Valores hidroenergéticos dos volumes de operação do Setor Guanabara.

Vazão de Bombeamento		Despesas							
		Energia Elétrica		R\$					
(m ³)		kW (mês)		Mês		Total/mês	Ano		Total/ano
H.P	H.F.P	H.P	H.F.P	R\$/H.P	R\$/H.F.P	R\$	R\$/H.P	R\$/H.F.P	R\$
1.185,54	6.517,85	5.174,36	28.228,15	13.799,67	14.001,87	27.801,53	165.595,99	168.022,42	333.618,42

Legenda: H.P: Horário na Ponta; H.F.P: Horário Fora de Ponta.

Na simulação para os dados de projeto, foi verificado que o bombeamento de água no posto horário de ponta correspondeu a 8,51% (691,91m³), sendo que, mensalmente, isso representaria 47,82% na despesa total (R\$ 25.789,54). Portanto, apesar de existir o volume projetado e o volume de monitoramento é preciso ainda investigar qual o volume teórico útil é mais eficiente hidroenergeticamente para o Setor Guanabara.

Análise geral do sistema

Com base no volume distribuído monitorado pela Equipe LENHS (2014) no Setor Guanabara foi verificado que a demanda per capita estava superior daquele projetado, ou seja, o volume de água o qual estava sendo distribuído era maior em 51,30% daquele consultado no projeto executivo, conforme mostrado na Tabela 15.

Tabela 15. Comparação dos dados de projeto e de operação - Setor Guanabara.

Dados	volume (m ³)	volume (m ³)	distribuição	distribuição	Pop.	q	Nível
	Rapoiado	Relevado	(m ³ /dia)	Reservatório	hab.	l.hab.dia	(m)
Projeto	850	500	4.087,50	8,18	27.250	150	7
							0
Monitorado	402,74	302,86	8.390,15	27,70	27.250	308	6,01
							1,77

Fonte: Relatório técnico (2014).

Vale comentar também que a operação do SAA projetado para o Setor Guanabara não cumpriu as recomendações da NBR 12217 (1994), haja vista, que o volume para atendimento de final de plano estava superdimensionado, conforme verificado nas variações das vazões dos parâmetros hidráulicos, mostrados na Tabela 15.

É importante ressaltar que durante um dia, o volume de água distribuído no 37° SAA se manteve superior a 4.087,50 m³ (projetado), tendo em vista, que o volume distribuído monitorado foi de 8.390,15 m³, sendo esse, cerca de duas vezes maior do valor projetado, ou seja, valor 105,26% acima do consumo teórico de água projetado pela CESAN (1996).

Em relação aos níveis de reservação, foi verificada a utilização ineficiente na operação do reservatório apoiado, o mesmo ocorrendo com o reservatório elevado, pois, na rotina operacional são utilizados níveis de água diferentes dos valores mínimos e máximos estabelecidos no projeto.

A diminuição da altura entre os níveis de água máximo e mínimo acarreta redução no volume útil desses reservatórios, fazendo com que os mesmos funcionem como caixas de passagem, já que a demanda de água potável é maior que a capacidade de reservação.

Além disso, vale pontuar problemas em relação ao nível de reservação, tais como, a não utilização adequada da altura útil dos reservatórios; baixos níveis de reservação antes do posto horário de ponta e a inexistência de padrão de manobra de registro para controle da vazão de entrada no reservatório apoiado. Neste contexto, verifica-se a necessidade de urgente estudo de volume útil de reservação para a regularização da demanda no Setor Guanabara.

Análise dos indicadores de desempenho do sistema - Reservação e Bombeamento

Na Tabela 16 são mostrados valores de indicadores de eficiência hidroenergética do Setor Guanabara. Para melhor avaliação do consumo específico de energia elétrica seria necessário dados de monitoramento dos CMB's realizado num período consideravelmente anterior, para possível comparação do funcionamento atual. Porém, foi verificado que o CEE médio do CMB 1 foi 0,22 kWh/m³ e do CMB 3 foi 0,21 kWh/m³.

No Consumo Específico Normalizado (CEEN) o CMB1 consumiu em média 0,59 por kWh/m³/100 mca. E o CMB 3 teve consumo médio de 0,56 kWh/m³/100mca. Vale citar que o CEEN é um indicador recomendado pela IWA, que pode ser entendido como medida indireta do rendimento médio dos CMB's.

Portanto, o resultado do CEEN dos CMB's indicaram que o desempenho dos CMB's da EAT estavam acima do valor recomendado pela IWA (0,5), o que verifica-se a necessidade de melhorar a eficiência hidroenergética do Setor Guanabara.

As demandas contratadas de Outubro 2013 a Setembro de 2014 e registrada nas variações fora de demanda contratada 115 kW e demanda registrada 88,32 kW. Além disso, o gasto específico de energia elétrica esteve em 24 R\$/m³ e 0,34 R\$/kWh.

O Fator de Potência médio verificado foi de 0,88, vale comentar, que os baixos fatores de potência provocam consumo e demanda de energia reativa excedente, naturalmente, impactando na despesa de energia elétrica.

A respeito disso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabelece o valor de 0,92 como limite mínimo para fatores de potência de instalações elétricas, portanto, o Setor Guanabara pode ser penalizado por meio de pagamento de multa pelo consumo e demanda de energia elétrica reativa excedente em 4,35%.⁶

Tabela 16. Resumo dos indicadores de linha base do Setor Guanabara.

Indicador do Setor Guanabara	Valor	Unidade
CEN Médio (CMB1)	0,59	kWh/m ³ /100mca
CEN Médio (CMB3)	0,56	KWh/m ³ /100mca
Gasto específico de energia elétrica (bombeado)	0,24	R\$/m ³
Gasto específico de energia elétrica	0,34	R\$/kWh
Demandas: contratadas de out 2013 a set de 2014 e registrada nas variações		
Demanda contratada	115	kW
Demanda registrada	88,32	kW

Fonte: Relatório técnico (2014).

⁶ 0,92 - 0,88 = 0,04 (faltou alcançar) isso equivale a 4,35%.

5.2 DETERMINAÇÃO DO VOLUME ÚTIL DE RESERVAÇÃO, CONSIDERANDO DIFERENTES MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTOS

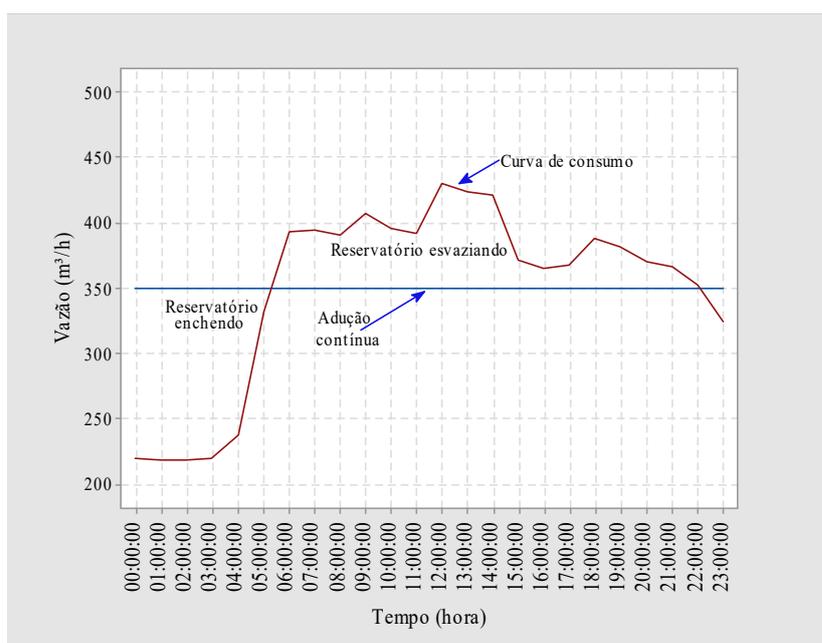
Nessa etapa são apresentados os resultados do dimensionamento dos volumes útil de reservação para o reservatório elevado do 37º Setor da Região Metropolitana de Belém, com base nos Métodos CETESB (1987), NBR 12217 (1994) e Gomes (2012).

5.2.1 Volume teórico útil de reservação empregando o Método da CETESB (1987)

No Gráfico 8 é mostrada a curva de consumo⁷ do Setor Guanabara utilizada para determinar o volume útil de reservação por meio do Método da CETESB (1987). Para tanto, esse método baseia-se na diferença entre os volumes horários e a média diária. Além disso, esse método considera adução contínua e distribuição de água durante 24 horas do dia. Logo, a reta representa adução constante com vazão média de consumo no dia mais desfavorável.

A taxa de alimentação é positivo quando o volume de alimentação é maior do que o volume de distribuição, e negativa no caso contrário. Também é mostrado no Gráfico 8 que as 06:00 horas a vazão de consumo ultrapasa a vazão de adução, de modo que o reservatório começa a esvaziar, terminado as 22:00 horas. Entre os intervalos de 23:00: e 05:00 horas, a adução supera o consumo e o reservatório acumula água para cede-la ao setor no intervalo de tempo 06:00 e 22:00, complementando a adução.

Gráfico 8. Curva de adução contínua – Setor Guanabara.



⁷ Curva de consumo do dia 23 de Outubro de 2014 selecionada a partir dos dados monitorados pela equipe LENHS - UFPA.

Com base na curva de consumo foi estabelecida a vazão média de consumo diário, a qual resultou em 349,59 m³/h, obtida por meio da equação 31. Essa vazão média foi utilizada como vazão de alimentação na determinação do volume útil, conforme recomendações desse método.

$$Q = \frac{\sum Q}{T} = \frac{8.390,15}{24} = 349,59 \text{ m}^3/\text{h} \quad \text{Equação 37}$$

Em que:

Q = Vazão média horária, em m³/h;

$\sum Q$ = Somatória das vazões diárias, em m³/h;

T = 24 horas (1 dia).

Também foram obtidos dados de vazão a cada hora utilizados como vazão distribuída conforme mostrados na Tabela 17. Esses dados foram organizados em colunas de planilha do Software Excel. Em seguida, foi realizada a diferença entre a vazão de alimentação e a vazão distribuída por meio da equação 32.

$$VR = Q_{\text{alim}} - Q_{\text{distr}} = 674,13 \text{ m}^3 \quad \text{Equação 38}$$

Em que:

VR = Volume útil de reservação, em m³;

Q_{alim.} = Vazão de alimentação, em m³/h;

Q_{distr.} = Vazão distribuída, em m³/h.

Dessa forma, a somatória positiva da diferença entre a vazão de alimentação e a vazão distribuída determinou o volume útil de reservação para o reservatório elevado em 674,13 m³, conforme mostrado na Tabela 17.

Porém, a NBR 12217 (1994) recomenda aplicar fator de 1,2 ao volume útil de reservação determinado para considerar as incertezas dos dados utilizados. Diante disso, o volume útil determinado de 674,13 m³ foi multiplicado pelo fator de segurança 1,2 por meio da equação 33. A partir disso, o volume útil total para atender a demanda do Setor do Guanabara foi de 808,96 m³, conforme mostrado na Tabela 17.

$$VT = VR \times 1,2 = 674,13 \times 1,2 = 808,96 \text{ m}^3 \quad \text{Equação 39}$$

Em que:

VT = Volume útil total, em m³;

VR = Volume útil de reservação, em m³;

1,2 = fator de segurança.

Na Tabela 17 são mostrados os valores de vazão de alimentação e de distribuição utilizados no Método da CETESB (1987), bem como, o volume útil de reservação determinado e volume útil total para o reservatório elevado do Setor do Guanabara.

Tabela 17. Determinação do volume útil de reservação - Método da CETESB (1987).

Hora	Vazão de alimentação	Vazão distribuída	Q.alim - Q.distr	
	(m ³ /h)	(m ³ /h)	+	-
00:00:00	349,59	219,83	129,76	
01:00:00	349,59	219,13	130,45	
02:00:00	349,59	218,90	130,69	
03:00:00	349,59	220,26	129,33	
04:00:00	349,59	237,60	111,99	
05:00:00	349,59	332,78	16,81	
06:00:00	349,59	393,68		-44,09
07:00:00	349,59	394,36		-44,77
08:00:00	349,59	391,00		-41,41
09:00:00	349,59	407,81		-58,22
10:00:00	349,59	395,53		-45,94
11:00:00	349,59	392,29		-42,70
12:00:00	349,59	430,25		-80,66
13:00:00	349,59	424,03		-74,44
14:00:00	349,59	421,74		-72,15
15:00:00	349,59	371,72		-22,13
16:00:00	349,59	364,99		-15,40
17:00:00	349,59	367,99		-18,40
18:00:00	349,59	388,78		-39,19
19:00:00	349,59	382,45		-32,86
20:00:00	349,59	370,94		-21,35
21:00:00	349,59	367,17		-17,58
22:00:00	349,59	352,40		-2,81
23:00:00	349,59	324,49	25,10	
Total	8.390,14	8.390,15	674,13	-674,13
Vazão Média (m ³ /h)		349,59		
Volume útil – Reservatório elevado (m ³)			674,13	
Volume útil Total (m ³)			808,96	

É importante comentar, que, se a taxa com a qual o reservatório é alimentado é maior do que a taxa com a qual é esvaziado, o que geralmente ocorre. Neste contexto, pode-se concluir que o bombeamento de água poderá ser desligado por certo período, de modo a equilibrar as vazões diárias. Assim, essa recomendação é observada na Tabela 17 das 00:00 as 05:00 e as 23:00, porém, não contemplando o posto horário de ponta.

5.2.2 Determinação do volume teórico útil de reservação empregando a NBR 12217 (1994)

Neste item, é mostrada a determinação do volume teórico útil de reservação empregando a NBR 12217 (1994). Para tanto, inicialmente foi determinado o consumo médio teórico de água. E o consumo teórico de água para o dia de maior consumo. Para tanto, foram utilizados os seguintes dados:

População da área abastecida: 27.250 habitantes;

Consumo médio diário per capita: 150 L.hab.dia;

Coefficiente do dia de maior consumo, k_1 1,2;

Coefficiente da hora de maior consumo, k_2 1,5; e Fator de segurança: 1,2.

a) Determinação do consumo médio teórico de água:

Para a determinação do consumo médio teórico de água foi utilizado a equação 34.

$$Q_{Tm} = \frac{P \times q}{86.400} = \frac{27.250 \times 150}{86.400} = 47,31 \text{ l/s} \quad \text{Equação 40}$$

Em que:

Q_{Tm} = Consumo médio teórico de água, em l/s;

P = população da área abastecida, em habitantes;

q = consumo médio diário per capita, em L.hab.dia.

A determinação do consumo teórico de água horário foi de 170,31 m³/h, o consumo diário de 4.087,50 m³, e consumo mensal de 122.625,00 m³.

b) Determinação do consumo teórico de água para o dia de maior consumo:

Na determinação do consumo teórico de água para o dia de maior consumo foi utilizada a equação 35.

$$Q_{Td} = \frac{P \times q}{86.400} \times K_1 = \frac{27.250 \times 150}{86.400} \times 1,2 = 56,77 \text{ l/s} \quad \text{Equação 41}$$

Em que:

Q = Consumo teórico de água para o dia de maior consumo, em l/s;

P = população da área abastecida; em habitantes;

q = consumo médio diário per capita, em l.hab.dia;

k1 = Coeficiente do dia de maior consumo.

Com base nos dados de população abastecida, consumo per capita e coeficiente do dia de maior consumo, foi obtido consumo teórico de água horário de 204,38 m³, consumo teórico diário de 4.905,00 m³ e consumo teórico mensal de 147.150,00 m³.

Determinação do volume útil de reservação para o Reservatório Elevado

Seguindo as recomendações da NBR 12217 (1994), primeiramente foi utilizado o Método do consumo assimilado a uma senóide, esse cálculo teve por objetivo auxiliar na determinação do volume útil de água para o reservatório elevado do Setor Guanabara. Para tanto, o volume útil de reservação foi determinado por meio da equação 36.

$$VR = \left(\frac{K_2 - 1}{\pi} \right) \times (24 \times K_1 \times Q_{Tm}) = \left(\frac{1,5 - 1}{\pi} \right) \times (24 \times 1,2 \times 170,31) = 780,64 \text{ m}^3 \quad \text{Equação 42}$$

Em que:

k1 = Coeficiente do dia de maior consumo;

k2 = Coeficiente da hora de maior consumo;

Q_{Tm} = Consumo teórico médio de água, em m³/h.

Logo, o volume útil de reservação determinado foi de 780,64 m³. Em seguida foi aplicado a esse valor o fator de segurança de 1,2 conforme recomendações da NBR 12.217 (1994). Diante disso, o volume total de reservação para o reservatório elevado foi de 936,77 m³, encontrado por meio da equação 37.

$$VT = VR \times 1,2 = 780,64 \times 1,2 = 936,77 \text{ m}^3 \quad \text{Equação 43}$$

Em que:

VT = Volume útil total;

VR = Volume útil de reservação;

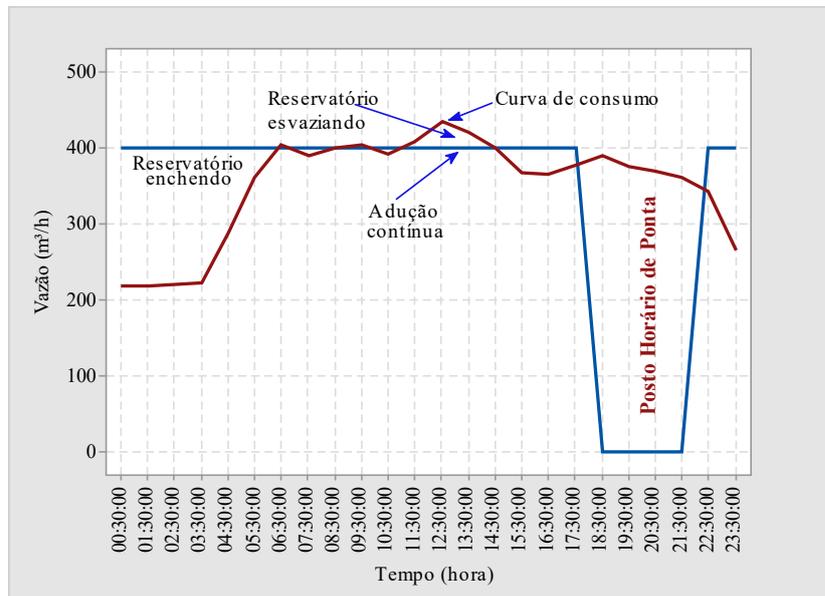
1,2 = fator de segurança.

A título de informação, a NBR 12.217 (1994) recomenda que o volume útil para o reservatório apoiado corresponde a 2/3 do volume teórico total distribuído no dia de maior consumo. Neste sentido, com base na determinação do consumo teórico de água para o dia de maior consumo, o volume útil para o reservatório apoiado foi de 3.270 m³.

5.2.3 Determinação do volume teórico útil de reservação empregando o Método dos Volumes Diferenciais Gomes (2012)

Para esse método também foi utilizada a mesma curva de consumo. A metodologia desenvolvida por Gomes (2012) além de levar em consideração a diferença entre os volumes horários e a média diária, considera paralisação total de bombeamento de água no posto horário de ponta. A distribuição de água é realizada sem interrupção, durante as 24 horas do dia. No Gráfico 9 e na Tabela 18 é mostrado o comportamento desse método.

Gráfico 9. Paralisação de bombeamento de água no posto horário de ponta.



De posse da curva de consumo selecionada, para a determinação do volume útil de reservação foi obtida a vazão média de consumo diário por meio da equação 38. Por conseguinte, o volume diário total foi dividido por 21 horas, haja vista que não correrá bombeamento no posto horário de ponta.

$$Q = \frac{\sum Q}{T} = \frac{8.390,15}{21} = 399,53 \text{ m}^3/\text{h} \quad \text{Equação 44}$$

Q = Vazão média horária, em m³/h;

$\sum Q$ = Somatória das vazões diárias, em m³/h;

T = 21 horas (horário fora de ponta em 1 dia).

A vazão média de 399,53 m³ foi utilizada como vazão de entrada, e a vazão de saída foram os valores de consumo de cada hora, conforme mostrados na Tabela 18. Esses dados também foram organizados em colunas de planilha do Software Excel. Em seguida, foi realizada a diferença entre a vazão de entrada e a vazão de saída por meio a equação 39.

$$VR = Q_{\text{alim}} - Q_{\text{distr}}$$

Equação 45

Em que:

VR = Volume útil de reservação, em m³;

Q_{alim.} = Vazão de alimentação, em m³/h;

Q_{distr} = Vazão distribuída, em m³/h.

Dessa forma, a somatória positiva da diferença entre a vazão de entrada e a vazão de saída determinou o volume útil de reservação para o reservatório elevado em 1.175,92 m³, conforme mostrado na Tabela 18.

De acordo com recomendações da NBR 12217 (1994) deve ser aplicar fator de 1,2 ao volume útil de reservação determinado para considerar as incertezas dos dados utilizados. Diante disso, o volume útil determinado de 1.175,92 m³ foi multiplicado pelo fator de segurança 1,2, por meio da equação 40. A partir disso, o volume útil total para atender a demanda do Setor do Guanabara foi de 1.411,10 m³, conforme mostrado na Tabela 18.

$$VT = VR \times 1,2 = 1.175,92 \times 1,2 = 1.411,10 \text{ m}^3$$

Equação 46

Em que:

VT = Volume útil total, em m³;

VR = Volume útil de reservação, em m³;

1,2 = fator de segurança.

Na Tabela 18 são mostrados os valores de vazão de entrada e de saída utilizados no Método da CETESB (1987), bem como, o volume útil de reservação determinado e o volume útil total para o reservatório elevado do Setor do Guanabara.

Tabela 18. Cálculo de volume útil de reservação – Métodos dos volumes diferenciais (GOMES, 2012).

Hora	Vazão de entrada	Vazão de saída (curva de demanda)	SALDO entrada - saída	
	(m³/h)	(m³/h)	+	-
00:30:00	399,53	218,72		-180,81
01:30:00	399,53	218,69		-180,84
02:30:00	399,53	219,86		-179,67
03:30:00	399,53	222,35		-177,18
04:30:00	399,53	287,15		-112,38
05:30:00	399,53	361,03		-38,50
06:30:00	399,53	403,13	3,60	
07:30:00	399,53	389,31		-10,22
08:30:00	399,53	400,12	0,59	
09:30:00	399,53	402,91	3,38	
10:30:00	399,53	392,28		-7,25
11:30:00	399,53	407,82	8,29	
12:30:00	399,53	433,72	34,19	
13:30:00	399,53	419,64	20,10	
14:30:00	399,53	399,83	0,30	
15:30:00	399,53	366,52		-33,01
16:30:00	399,53	364,96		-34,57
17:30:00	399,53	377,60		-21,93
18:30:00	399,53	389,814		-9,72
19:30:00	0,00	374,96	374,96	
20:30:00	0,00	369,77	369,77	
21:30:00	0,00	360,74	360,74	
22:30:00	399,53	343,24		-56,29
23:30:00	399,53	265,97		-133,56
Total	8.390,15	8.390,15	1.175,92	-1.175,92
Vazão Média (8.390,15/21)		399,53		
Volume útil – Reservatório elevado (m³)				1.411,10

Dos volumes determinados, a metodologia de Gomes (2012) apresentou maior volume útil de reservação por levar em consideração a paralisação no posto horário de ponta. Na Tabela 19 são mostrados os métodos e volumes encontrados nesta etapa.

Vale observar que nos Método da CETESB (1987) e de Gomes (2012) não são considerados dados de bombeamento de água para determinação do volume útil e sim a média da distribuição diária.

5.3 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE OPERAÇÃO DO BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA DETERMINAR O VOLUME ÚTIL MAIS EFICIENTE HIDROENERGETICAMENTE AO SETOR GUANABARA

Na Tabela 19 são apresentados os 4 (quatro) volumes utilizados na Simulação hidroenergética dos cenários de operação de bombeamento de água tratada, para comparação e indicação do volume útil mais eficiente hidroenergeticamente para o Setor Guanabara.

Tabela 19. Volumes úteis de reservação utilizados nas simulações hidroenergética.

Método	Cenários	Volume Útil Reservatório Elevado (m ³)
Projeto (1.996)	VP	500
CETESB (1987)	VT ₁	808,96
NBR 12.217 (1994)	VT ₂	936,77
Gomes (2012)	VT ₃	1.411,10

5.3.1 Estabelecimento das condições de simulações

Na Tabela 20 são mostrados dados obtidos para as simulações hidroenergética de acordo com cada volume útil. São apresentados valores de volume útil, área e diâmetro, esses dados foram inseridos no Software *Epanet 2.0* para execução das simulações. Vale observar que para verificar a eficiência do volume útil de reservação, a curva ⁸de consumo utilizada foi a mesma para todas as simulações.

Vale observar que as Metodologias da CETESB (1987) e de Gomes (2012) não determinam volume útil para o reservatório apoiado. Diante disso, os volumes foram adotados com base no princípio da NBR 12217 (1994) para as simulações hidráulicas nesses dois casos.

Tabela 20. Dados obtidos para as simulações hidroenergética do Volume Útil de reservação.

Item	Reservatórios		Item	Reservatórios	
	Apoiado	Elevado		Apoiado	Elevado
CETESB (1987)	Valor	Valor	ABNT NBR (1994)	Valor	Valor
Volume útil (m ³)	1.617,92	808,96	Volume útil (m ³)	3.270,00	936,77
Área (m ²)	385,22	115,57	Área (m ²)	778,57	133,82
Diâmetro (m)	22,15	12,13	Diâmetro (m)	31,49	13,05
Item	Reservatórios		Item	Reservatórios	
	Apoiado	Elevado		Apoiado	Elevado
Projeto (1996)	Valor	Valor	GOMES (2012)	Valor	Valor
Volume útil (m ³)	850	500	Volume útil (m ³)	2.822,20	1.411,10
Área (m ²)	202,38	71,43	Área (m ²)	671,95	201,59
Diâmetro (m)	16,05	9,54	Diâmetro (m)	29,25	16,02

⁸ Curva de demanda monitorada pela Equipe LENHS (2014) - UFPA no Setor Guanabara.

No que tange a utilização das tarifas de energia elétrica, foi verificado que o Setor Guanabara estava enquadrado no subgrupo tarifário A4, que estabelece tarifas para Água, Esgoto e Saneamento, na modalidade horosazonal, na modalidade azul. Esse setor não pode ser enquadrado na modalidade tarifária convencional, assim, caso houvesse interesse em mudança, a alternativa seria a modalidade tarifária verde.

Vale ressaltar que as unidades consumidoras atendidas em tensão abaixo de 2.300 volts são classificadas no Grupo B, baixa tensão. Enquanto que os consumidores atendidos em alta tensão, acima de 2.300 volts, como por exemplo, o Setor Guanabara 13.800 volts (13.8 kV), indústrias e shopping são classificados no Grupo A⁹.

Na Tabela 21 é mostrado o levantamento dos valores de tarifação praticados pela concessionária de energia elétrica para enquadramento desse SAA, essas tarifas são utilizadas atualmente e foram de suma importância para simulações hidroenergéticas deste trabalho.

Na pesquisa foi verificado que o valor da tarifa no posto horário de ponta (R\$ 0,328831 R\$/kWh) utilizada no Setor Guanabara foi aproximadamente 30,75% maior do que no posto horário fora de ponta (R\$ 0, 227707 R\$/kWh), o que justifica a proposta de otimizar o volume útil de reservação para redução do funcionamento dos CMB's (18:30 às 21:29).

Tabela 21. Tarifas Celpa a partir de 07/08/2015 Resolução Homologatória 1.930/2015 da ANEEL (Anexo B).

Modalidade Tarifária Azul			
Demanda Fora de Ponta	Demanda na Ponta	Consumo Fora Ponta	Consumo na Ponta
R\$/kW	R\$/kW	R\$/kWh	R\$/kWh
15,44	58,81	0, 227707	R\$ 0,328831

Fonte: Fonte: ANEEL (2015).

Shokri (2014) comenta que a posição do nível d'água do reservatório pode reduzir em até 36% o consumo de energia elétrica. Diante disso, a programação (Anexo C) utilizada nas simulações, funcionaram em função do nível de água do reservatório elevado (recomendado) com operação CMB's (2+1) em paralelo. No intervalo entre as 21:29 e 14:00 horas, os CMB's foram programados para acionarem quando o reservatório atingisse o nível 0 m, e desligarem ao atingirem o nível 7 m. Das 14:00 as 18:30 horas os CMB's foram programados para acionarem no nível 6 m e desligarem no nível 7 m. Logo, as 18:30 horas foi programado o desligamento dos CMB's para redução do consumo de energia elétrica. Neste sentido, das 18:30 as 21:29 horas os CMB's funcionaram entre os níveis de 0 m e 1 m, quando necessário.

⁹ Subgrupo A1 para o nível de tensão de 230 kV ou mais. Subgrupo A2 para o nível de tensão de 88 a 138 kV. Subgrupo A3 para o nível de tensão de 69 kV. Subgrupo A3a para o nível de tensão de 30 a 44 kV. Subgrupo A4 para o nível de tensão de 2,3 a 25 kV.

5.3.2 Resultados das Simulações hidroenergéticas

Os resultados das simulações hidroenergéticas foram comparados aos valores das faturas de energia elétrica do Setor Guanabara de Agosto de 2016 a Janeiro de 2018 para melhor confiabilidade dos resultados dos valores dos volumes úteis simulados. Como o foco desta dissertação é o volume útil de reservação para paralisação no posto horário de ponta, esse horário apresentou maior destaque nas discussões.

Vale ressaltar que para as simulações foram considerados 4 diferentes volumes de reservação, com isso, foram estabelecidos como premissas a curva de consumo e a vazão de bombeamento igual. O que mudou nas simulações foram os volumes úteis.

Simulação do Volume Útil de Projeto (VP)

Na Tabela 22 é mostrado o resultado da simulação hidroenergética para o volume útil de reservação do projeto executivo do Setor Guanabara. A despesa mensal para esse volume foi de R\$ 12.332,10 no posto horário de ponta e de R\$ 13.457,44 no posto horário fora ponta totalizando despesa de R\$ 25.789,54. Esse custo é equivalente ao consumo médio de aproximadamente 169 residências brasileiras mensalmente.

Tabela 22. Resultado de Simulação hidroenergética para o Volume Útil de Projeto (1996).

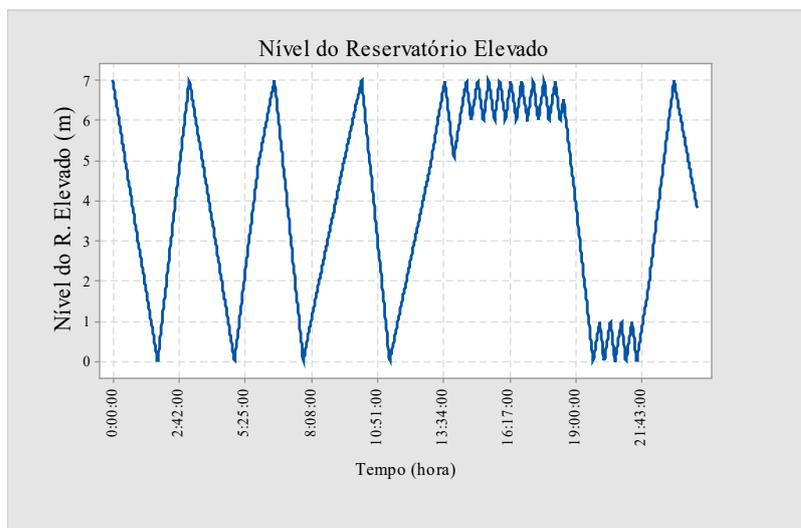
Vazão de Bombeamento		Despesas							
		kW		R\$					
m³/dia		Mês		Mês		Total /mês	Ano		Total/ano
H.P	H.F.P	H.P	H.F.P	R\$/H.P	R\$/H.F.P	R\$	R\$/H.P	R\$/H.F.P	R\$
691,91	7.443,41	2.490,89	26.796,29	12.332,10	13.457,44	25.789,54	147.985,19	161.489,25	309.474,45

Legenda: H.P: Horário na Ponta; H.F.P: Horário Fora de Ponta.

Foi verificado bombeamento de 8,51% do volume total diário no posto horário de ponta, isso, equivale a 47,82% da despesa mensal. Em contrapartida, deslocando esse bombeado água para os demais horários do dia a despesa seria reduzida em até 44,15%. Diante disso, ao longo de um (1) ano o sistema teria economia de R\$ 136.619,97.

No Gráfico 10 é mostrado resultado do comportamento dos níveis do reservatório elevado. Neste, foi verificado reservação de água suficiente para atender as solicitações das 18:30 as 19:43 horas, logo, os CMB's foram acionados em diferentes intervalos, a saber; das 19:44 as 19:59, 20:11 as 20:25, 20:37 as 20:52 e das 21:04 as 21:19 horas, em seguida, as 21:20 os CMB's desligaram se prologando para os demais horários.

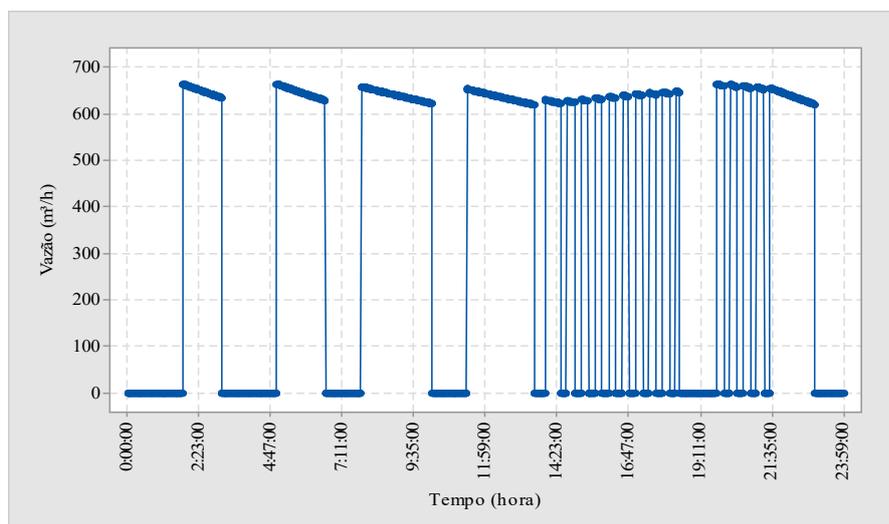
Gráfico 10. Comportamento dos níveis do Reservatório Elevado - Projeto (1996).



No que se refere aos CMB's, foi verificado funcionamento em 12,68 (761 min) horas do dia, o tempo médio diário foi de 40,05 minutos. Ademais, o maior tempo de acionamento foram de 2,38 horas (143 min) e menor tempo de 8 minutos.

O volume útil projetado pela empresa CESAN, foi capaz de atender a demanda em 65% (2,53 horas) do posto de horário de ponta. Além disso, do total de 19 acionamentos diários, 4 ocorreram no posto horário de ponta, conforme mostrado no Gráfico 11.

Gráfico 11. Número de acionamentos para o volume útil – Projeto (1996).



Para essa simulação foi verificado que o número de 19 acionamentos não atenderam as recomendações de 6 acionamentos diários propostos por Barbosa et al. (2001), sendo considerado valor ótimo para o funcionamento diário dos CMB's. Nem a paralisação total do bombeamento de água no posto horário de ponta segundo recomendações de Gomes (2012), Pereira e Condurú (2014).

Simulação do Volume Útil Método CETESB (1987) (VT₁)

Na Tabela 23 é mostrado o resultado da simulação hidroenergética para o Volume Útil de reservação dimensionado pelo Método da CETESB (1987). A despesa mensal por esse método foi de R\$ 11.772,85 no posto horário de ponta e de R\$ 14.591,01 no posto horário fora ponta totalizando despesa de R\$ 26.363,87. Esse custo seria suficiente para atender o consumo médio de aproximadamente 173¹⁰ residências brasileiras mensalmente.

Tabela 23. Resultado de Simulação hidroenergética para o Volume Útil - CETESB (1987).

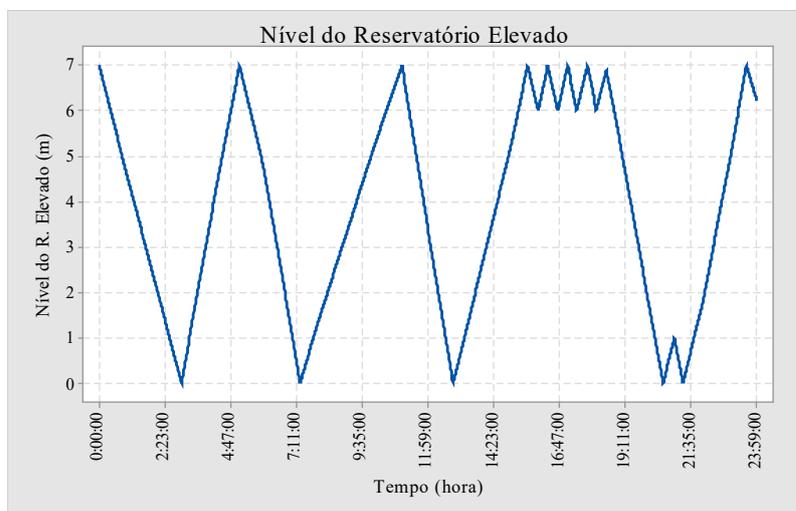
Vazão de Bombeamento m ³ /dia		Despesas							
		kW		R\$					
H.P	H.F.P	Mês		Mês		Total /mês	Ano		Total/ano
		H.P	H.F.P	R\$/H.P	R\$/H.F.P	R\$	R\$/H.P	R\$/H.F.P	R\$
407,86	7.863,69	1.468,30	28.309,30	11.772,85	14.591,01	26.363,87	141.274,25	175.092,14	316.366,39

Legenda: H.P: Horário na Ponta; H.F.P: Horário Fora de Ponta.

O volume bombeado no posto horário de ponta correspondeu a 4,93% do volume total, o que equivale a 44,66% da despesa mensal. Por outro lado, se esse volume de água bombeado fosse deslocado para os demais horários do dia a despesa seria reduzida em 43,46%, realizando projeção anual teria economia de R\$ 134.574,81.

Sobre o comportamento dos níveis do reservatório elevado no posto horário de ponta, no Gráfico 12 é mostrado variação de volume útil entre os níveis de 0 m e 7,0 m (todas simulações). Nota-se que o reservatório permaneceu com água suficiente para atender a distribuição das 18:30 as 20:34 horas, logo, das 20:35 as 20:59 horas ocorreu bombeamento, desligando os CMB's as 21:00 horas.

Gráfico 12. Comportamento dos níveis do Reservatório Elevado (CETESB, 1987).



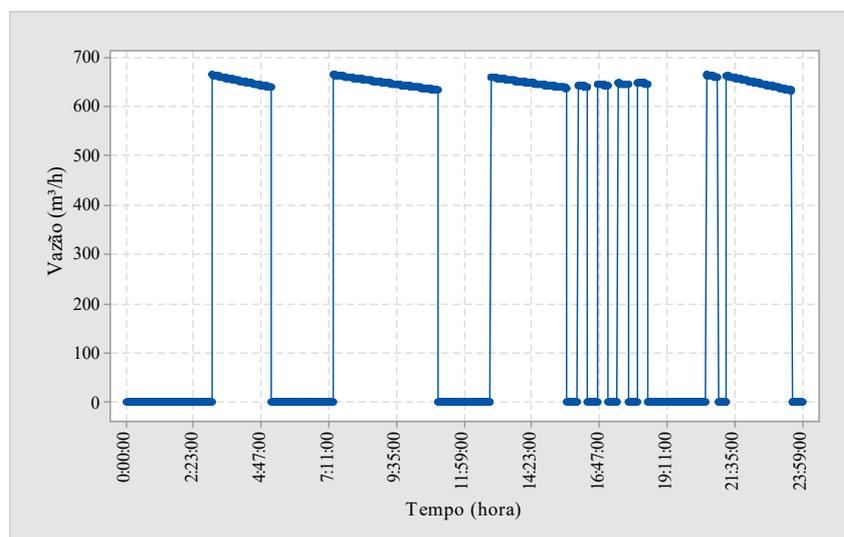
¹⁰ Consumo médio de 157 kWh/mês por residência brasileira (EPE, 2016).

Nessa Simulação foi verificado funcionamento total dos CMB's em 12,75 (765 min) horas do dia, sendo que o tempo médio trabalhados pelos CMB's foi de 1,42 horas (85 min), logo, o maior tempo foi de 3,72 horas (223 min) e menor tempo de acionamento 21 minutos.

O volume útil determinado pela CETESB (1987) foi capaz de atender a demanda em 79,44% (2,38 horas) do posto horário de ponta. Sendo que, do total de 9 acionamentos diários, 2 ocorreram no posto horário de ponta, conforme mostrado no Gráfico 13.

De acordo com estudos realizados por Barbosa et al. (2001) recomenda-se valor ótimo de 6 acionamentos diários para o funcionamento dos CMB's. Neste sentido, foi verificado que o volume útil obtido pelo Método da CETESB (1987) não antedeu a esse parâmetro.

Gráfico 13. Número de acionamentos para o volume útil - CETESB (1987).



Vale comentar também, que, conforme recomendações de Gomes (2012), Pereira e Condurú (2014) a paralisação do bombeamento no posto horário de ponta pode reduzir significativamente na despesa de energia elétrica.

Assim, foi constatado que os CMB's funcionaram 20,56% desse horário, o que certamente contribuirá para aumento na despesa de energia elétrica, haja vista tarifas maiores nesse intervalo de tempo.

Simulação Volume Útil ABNT NBR (1994) (VT₂)

Para esse Volume Útil foi obtida despesa mensal de R\$ 11.600,70 no posto horário de ponta e de R\$ 14.591,01 no posto horário fora de ponta totalizando despesa mensal de R\$ 26.191,71, conforme mostrado na Tabela 24. Em comparação, esse custo é semelhante ao consumo médio mensal de aproximadamente 172 residências brasileiras.

Tabela 24. Resultado de Simulação hidroenergética para o Volume Útil da ABNT NBR (1994).

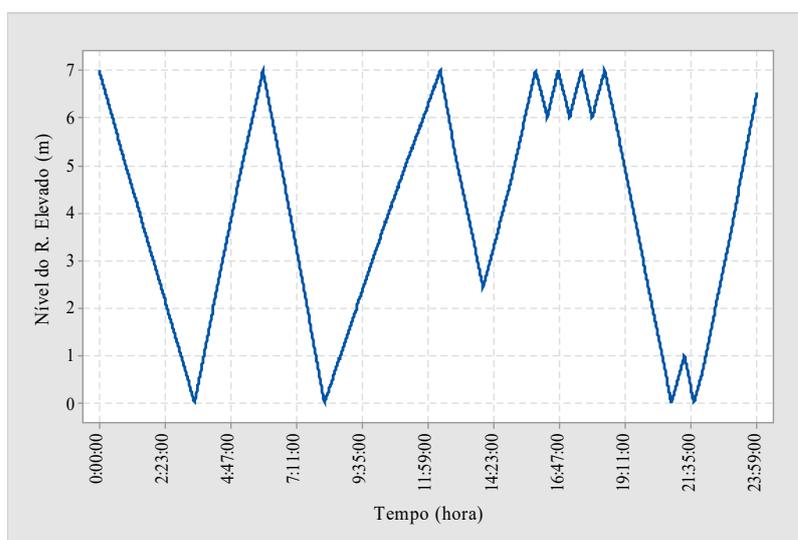
Vazão de Bombeamento		Despesas							
		kW		R\$					
m³/dia		Mês		Mês		Total /mês	Ano		Total/ano
H.P	H.F.P	H.P	H.F.P	R\$/H.P	R\$/H.F.P	R\$	R\$/H.P	R\$/H.F.P	R\$
320,42	8.001,50	1.153,52	28.805,42	11.600,70	14.591,01	26.191,71	139.208,44	175.092,14	314.300,58

Legenda: H.P: Horário na Ponta; H.F.P: Horário Fora de Ponta.

O volume bombeado no posto horário de ponta para o Método da ABNT NBR (1994) representou 3,85% do volume total, o equivalente a 44,29% da despesa mensal. Por outro lado, se esse volume de água bombeado fosse deslocado para os demais horários do dia a despesa seria reduzida em 43,49%. Em projeção anual teria economia de R\$ 133.945,26.

No Gráfico 14 é mostrado o comportamento do nível do reservatório elevado. Para essa simulação, foi verificado que o reservatório elevado permaneceu com água suficiente para atender a demanda das 18:30 as 20:51 horas, logo, as 20:52 horas os CMB's foram acionados se prologando até as 21:20, conforme mostrado no Gráfico 14.

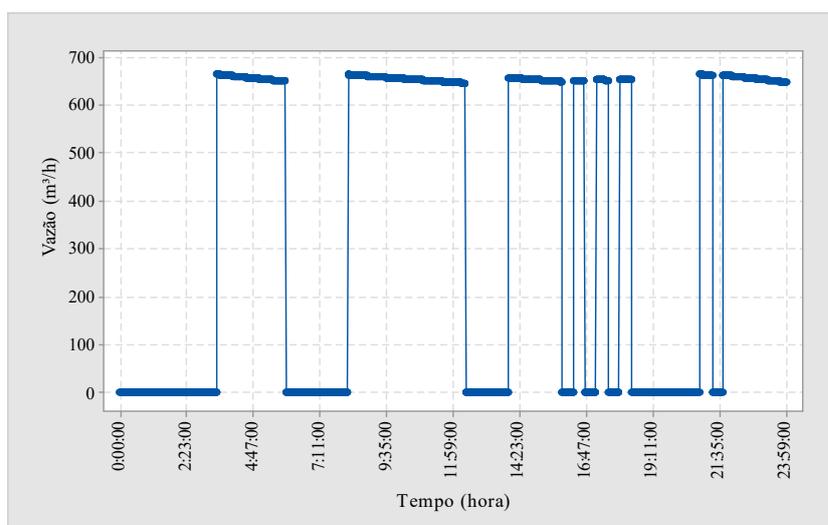
Gráfico 14. Comportamento dos níveis do Reservatório Elevado (ABNT NBR, 1994).



Para essa simulação foi verificado funcionamento total dos CMB's em 12,70 (762 min) horas do dia, sendo o tempo médio de 1,59 hora (95,25 min), por sua vez, o maior tempo que os CMB's acionaram nessa simulação foram de 4,23 horas (254 min) e menor tempo de 23 minutos.

O volume útil dimensionado pela ABNT NBR (1994) foi capaz de atender a demanda em 83,89% (2,52 horas) do posto horário de ponta. Além disso, do total de 8 acionamentos diários, 1 ocorreu no posto horário de ponta, conforme mostrado no Gráfico 15.

Gráfico 15. Número de acionamentos para o volume útil - ABNT NBR (1994).



Foi observado nessa simulação, que o número de acionamentos diário também não atenderam as recomendações propostas por Barbosa et al. (2001), o qual considera em seu estudo valor ótimo de 6 acionamentos diários para o funcionamento dos CMB's, bem como, a paralisação total do bombeamento no posto horário de ponta segundo recomendações de Tsutiya (2006), Gomes (2012) e Pereira e Condurú (2014).

Simulação Volume Útil – Método Gomes (2012) (VT₃).

Dos resultados apresentados, o Método de Gomes (2012) se apresentou mais eficiente hidroenergeticamente. Pois, na simulação para esse método, não houve bombeamento de água no posto horário de ponta (18:30 as 21:29). Do ponto de vista hidroenergético isso reduz a despesa com energia elétrica, o que não é levado em consideração nos métodos tradicionais. Logo, como o bombeamento de água ocorreu nos demais horários do dia, a despesa mensal obtida foi de R\$ 14.698,95, conforme mostrado na Tabela 25.

Tabela 25. Resultado de Simulação hidroenergética para o Volume Útil - Gomes (2012) (VT₃).

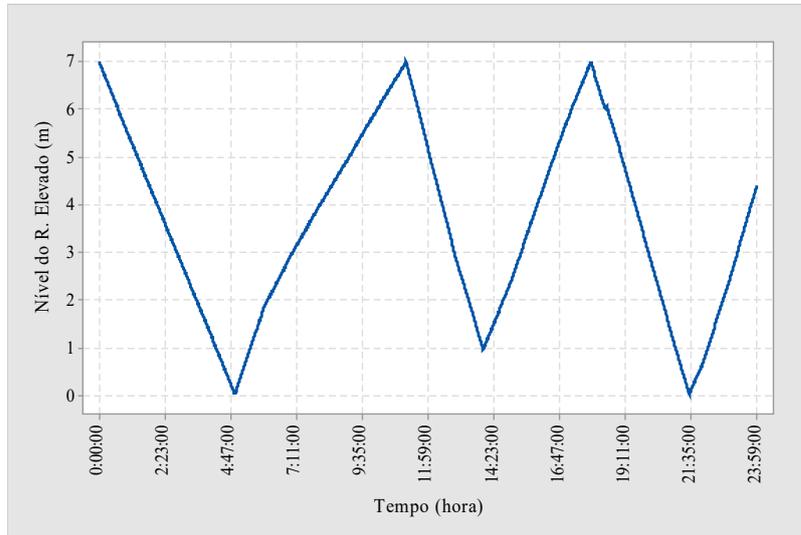
Vazão de Bombeamento		Despesas							
		kW		R\$					
m³/dia		Mês		Mês		Total /mês	Ano		Total/ano
H.P	H.F.P	H.P	H.F.P	R\$/H.P	R\$/H.F.P	R\$	R\$/H.P	R\$/H.F.P	R\$
0,00	8.350,41	0,00	30.061,49	0,00	14.698,95	14.698,95	0,00	176.387,45	176.387,45

Legenda: H.P: Horário na Ponta; H.F.P: Horário Fora de Ponta.

Além disso, comparando essa despesa ao consumo mais desfavorável (Agosto de 2016 a Janeiro de 2018) de R\$ 32.751,81 no Setor Guanabara, para a metodologia de Gomes (2012) esse setor teria economia mensal de 44,88%.

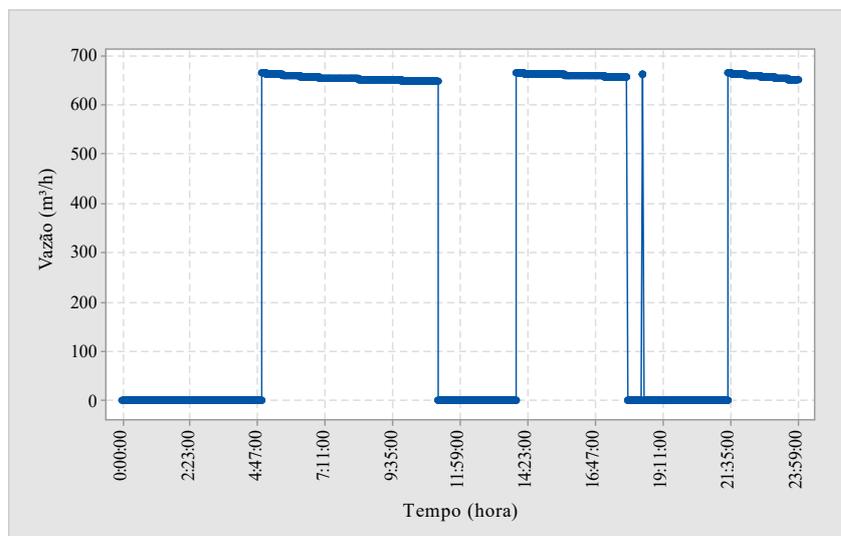
No que tange ao comportamento do nível do reservatório elevado, foi verificado que o reservatório permaneceu com água durante todo posto horário de ponta, ou seja, o volume útil de reservação determinado pelo Método de Gomes (2012) foi capaz de atender a demanda ao longo de todo esse horário sem bombeamento de água, conforme mostrado no Gráfico 16.

Gráfico 16. Comportamento dos níveis do Reservatório Elevado (Gomes, 2012).



Nos CMB's foi verificado funcionamento em 12,72 (763 min) horas do dia, sendo a média de 3,18 (190,75 min) horas. Além disso, o maior tempo de trabalho dos CMB's foram de 6,25 (375 min) horas, enquanto que o menor intervalo ocorreu em 3 minutos. Ademais, para essa simulação os CMB's tiveram 4 acionamentos diários, conforme mostrado no Gráfico 17.

Gráfico 17. Número de acionamentos para o volume útil – Gomes (2012).



Tsutiya (2001) propõem condições necessárias para viabilizar o desligamento dos CMB's no posto horário de ponta, para isto, é essencial que o volume necessário para atender a demanda no posto horário de ponta seja menor ou igual ao volume útil do reservatório.

Nesse contexto, dos volumes úteis simulados, o Método de Gomes (2012) se mostrou o mais eficiente hidroenergeticamente. Os resultados desse método atenderam os parâmetros estabelecidos por Barbosa et al. (2001) com 4 acionamentos diários, sendo considerado 6 acionamentos valor ótimo para o funcionamento dos CMB's. Assim como, cumpriram as recomendações de Tsutiya (2001;2006), Gomes (2012), Pereira e Condurú (2014), os quais propõem paralisação do bombeamento de água no posto horário de ponta.

Assim, é confirmada a ideia de Xu (2015), Vilanova (2015) e Chen (2015) quando comentam a necessidade de estudos que relacionem o volume útil de reservação com o consumo de energia elétrica nos SAA's, especialmente, no posto horário de ponta em que o bombeamento de água resulta em altos custos de energia elétrica.

5.3.3 Determinação de indicadores de desempenho hidroenergético

Na Tabela 26 é mostrada a comparação dos Indicadores de desempenho operacional, determinados conforme as simulações hidroenergéticas. O valor médio para cada metro cubico de água bombeado foi de R\$ 0,09 assim como, a média para cada kWh foi de R\$ 0,78. Os indicadores são importantes para monitoramento da eficiência do sistema ao longo do tempo, assim como, para o controle operacional.

Tabela 26. Comparação de Indicadores de desempenho operacional.

Indicadores de desempenho operacional		Custo médio de energia elétrica	
Métodos	CEE Médio (CMB) (kWh/m ³)	R\$/m ³	R\$/kWh
Projeto (1996)	0,12	0,11	0,88
CETESB (1987)	0,12	0,11	0,89
NBR (1994)	0,12	0,10	0,87
GOMES (2012)	0,12	0,06	0,49

Comparação das simulações hidroenergética

Para melhor confiabilidade das simulações hidroenergéticas, os resultados foram comparados aos valores das fatura de energia elétrica do Setor Guanabara de 18 meses consecutivos, de Agosto de 2016 a Janeiro de 2018 (Anexo D). Neste contexto, é mostrado na

Tabela 27 que os resultados estiveram entre o máximo e mínimo no período investigado, exceto a simulação de Gomes (2012) por não haver bombeamento no posto horário de ponta.

Tabela 27. Comparação dos resultados de volume útil e despesa.

Comparação	Cenários	Volume de Reservação		Acionamentos	Energia Elétrica		Despesa mensal
		m ³			R\$/mês		R\$/mês
Volumes	-	Apoiado	Elevado	nº	H.P	H.F.P	Total
Projeto (1996)	VP	850	500	19	12.332,10	13.457,44	25.789,54
Operação	V _{op}	402,74	302,86	24 h	13.799,67	14.001,87	27.801,53
CETESB (1987)	VT ₁	1.617,92	808,96	9	11.772,85	14.591,01	26.363,87
NBR (1994)	VT ₂	3.270,00	936,77	8	11.600,70	14.591,01	26.191,71
GOMES (2012)	VT ₃	2.822,20	1.411,10	4	0,00	14.698,95	14.698,95
Valores máximos e mínimos das Contas de Energia Elétrica Setor Guanabara (Ag. 2016 a Jan. 2018)							
Máximo	Mês	Ano		Mínimo	Mês	Ano	
R\$ 32.751,81	Novembro	2017		R\$ 23.562,82	Maior	2017	

Legenda: H.P: Horário na Ponta; H.F.P: Horário Fora de Ponta.

A desvantagem da metodologia de Gomes (2012) é o custo de construção dos reservatórios o qual certamente será maior. Esse custo não foi calculado neste trabalho. Porém, apesar de maior investimento, o mesmo pode ser recuperado ao longo da vida útil do sistema, haja vista, a economia de energia elétrica no bombeamento de água no posto horário de ponta.

Na Tabela 28 é apresentada a economia do volume útil de Gomes (2012) em função dos demais volumes útil (considerando a despesa máxima do Setor Guanabara). Realizando projeção para 10 anos, existe em termos operacionais redução significativa na despesa de energia elétrica de até R\$ 2.166.343,20 para paralisação de bombeamento de água no posto horário de ponta, conforme mostrado na Tabela 28. Sendo que essa economia poderá ser investida para melhoria do sistema.

Tabela 28. Comparação de economia em função do Volume Útil de Gomes (2012).

Volume Útil	Cenários	Custo R\$/ano	Economia	
			R\$/ano	R\$/10 anos
Projeto (1996)	VP	309.474,45	136.619,97	1.366.199,70
Operação	V _{op}	333.618,42	141.986,86	1.419.868,58
CETESB (1987)	VT ₁	316.366,39	134.574,81	1.345.748,10
NBR (1994)	VT ₂	314.300,58	133.945,26	1.339.452,60
GOMES (2012)	VT ₃	176.387,45	216.634,32	2.166.343,20

Dentre as alternativas para redução na despesa de energia elétrica, vale ressaltar, que além da paralisação de operação dos CMB's nos horários de ponta, faz-se necessário o dimensionamento corretamente das etapas do sistema. Também é essencial a intervenção de

combate a perda de água constata no Relatório Técnico (2014) do Setor Guanabara, para reduzir o desperdício de água e despesa de energia.

O controle da operação da unidade de reservação visa reduzir os custos envolvidos na operação do sistema de distribuição de água. Esses custos aumentam com o acionamento dos CMB's, no posto horário de ponta. Dessa forma, é preciso distribuir o volume de água demandado, porém respeitando as restrições do sistema, tal como, o volume de água nos reservatórios, no caso, principalmente no reservatório de distribuição.

É importante ressaltar que os métodos utilizados nesse trabalho, discorrem somente sobre volume útil. Não utilizam vazão de bombeamento de água e sim apenas a distribuição e sua média diária, não possibilitando identificar elementos para o consumo e a despesa de energia elétrica já que não apresentam a rotina dos CMB's.

Neste contexto, o ideal é que os métodos de dimensionamentos de volume útil de reservação, considerem o volume de entrada, as variações do volume no reservatório e o volume de saída.

Assim, para redução de despesa de energia elétrica na operação dos SAA's deve ser levado em consideração o consumo no posto horário de ponta. Além disso, os métodos de dimensionamento também devem considerar essa variável, visando sempre evitar o bombeamento de água nesse horário. Desse modo, o controle ótimo do sistema é uma ferramenta importante para minimizar seus custos operacionais.

6 CONCLUSÃO

Na pesquisa foi verificado que o volume do reservatório elevado do Setor Guanabara não permite a redução do bombeamento de água no posto horário de ponta, o que, naturalmente, influencia no valor da despesa de energia elétrica.

No monitoramento foi verificado que o volume de água distribuído em um dia (8.390,15 m³) foi cerca de duas vezes maior do que o volume projetado (4.087,50 m³). Isso indica que o reservatório elevado não cumpre sua função de armazenamento de água, sendo principalmente utilizado como “caixa de passagem”.

Como o nível de água na operação do reservatório elevado variou de 6,01 m a 1,77 m, não atendeu aos valores estabelecidos no projeto (mínimo de 0 m e máximo de 7 m). Com isso, a capacidade útil do reservatório não foi utilizada, o que, naturalmente, aumentou a necessidade de bombeamento de água durante as 24 horas do dia, ou seja, esse procedimento operacional aumentou o consumo e a despesa de energia elétrica, inclusive no posto horário de ponta.

Dessa forma, em nenhum momento ocorreu desligamento simultâneo dos CMB's na EAT Guanabara, que no período monitorado funcionaram, CMB 01 14,22 horas e CMB 03 17,43 horas de forma isolada e 7,65 horas em paralelo (CMB 01 + CMB 03), vale comentar, que pelo menos 1 CMB funcionou em 23,52 horas do dia.

Esse procedimento operacional com falta de padrão de acionamento/desligamento também contribuiu para a constatação da necessidade de estudo da capacidade e das condições de operação do reservatório elevado do Setor Guanabara.

Assim, foram estudadas três alternativas para modificar a atual situação operacional da unidade de reservação do Setor Guanabara, visando a redução do consumo e despesa de energia elétrica. No dimensionamento dos volumes úteis pelos 3 métodos estudados, foram obtidos 808,96 m³ com o Método da CETESB (1987), 936,77 m³ com os procedimentos recomendados na NBR 12.217 (1994) e 1.411,10 m³ quando foi utilizada o método proposto por Gomes (2012).

Vale ressaltar que nos métodos da CETESB (1987) e da NBR 12.217 (1994) não existiam indicações para a economia do consumo de energia elétrica, o que somente foi verificado no método proposto por Gomes (2012), que considera a paralisação do bombeamento no posto horário de ponta (18:30 as 21:29).

Nas simulações realizadas no *Epanet 2.0* foi utilizado o mesmo hidrograma de vazão (curva de consumo), o que resultou despesa de energia elétrica em 29.287,18 kWh/mês e R\$ 25.789,54/mês para o volume útil do reservatório elevado projetado. De 29.777,60 kWh/mês e R\$ 26.363,87/mês para o volume útil do reservatório elevado CETESB (1987). De 29.958,94 kWh/mês e R\$ 26.191,71/mês para o volume útil do reservatório elevado NBR 12.217 (1994). E para o Método proposto por Gomes (2012) resultou despesa mensal de 30.061,49 kWh/mês e R\$ 14.698,95/mês.

Contudo, a utilização do volume útil do reservatório dimensionado pelo Método de Gomes foi cerca de 66,39% superior ao determinado com a NBR 12.217 (1994) e cerca de 64,56% superior ao de projeto e 57,33% superior ao CETESB (1987). Desse modo, o maior valor do volume impactará no valor a ser investido para a implantação do reservatório elevado.

Por essa razão, na pesquisa foi estudada a economia com despesa de energia elétrica ao longo de 10 anos. Assim, considerando o Método de Gomes (2012) estimou-se economia de R\$ 1.379.131,30 (78,19%) em relação ao Método da NBR 12.217 (1994) e de R\$ 1.399.789,40 (79,36%) em relação ao Método da CETESB (1987).

Vale salientar que este trabalho não esgota as discussões e considerações sobre eficiência hidroenergética em sistemas de bombeamento e reservação de água, o que deve ser realizado de forma específica para cada situação, em razão da importância para o bom desempenho tanto hidroenergético quanto financeiro para as entidades prestadoras deste tipo de serviço.

Assim, é preciso que seja repensado a forma de dimensionamento de reservatórios, uma vez que, a questão hidroenergética é muito importante nos dias atuais para os SAA's.

Recomendações para trabalhos futuros

Verificar a estimativa de retorno de investimento com custo construtivo por meio da metodologia de Gomes (2012) em relação aos demais métodos utilizados nesta dissertação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDAY, M. A. H.; GUPTA, R.; TANYIMBOHB, T. T. Modelling Pressure Deficient Water Distribution Networks in Epanet. **Procedia Engineering**, v. 89, p. 626-631, 2014.
- ABE, N. Proposição de Calibração de Redes de Sistemas de Abastecimento de Água Através do Método Híbrido. Tese de Doutorado - Programa de Pós Graduação e Área de Concentração em hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- ABES - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Controle e redução de perdas nos sistemas públicos de abastecimento de água. Porto Alegre. 2015.
- ABONYI, J., KULCSAR, T., BALATON, M., NAGY, L. Energy monitoring of process systems: time-series segmentation-based targeting models. *Clean Technol. Environ. Policy* 16, p. 1245-1253, 2014.
- ALBUQUERQUE, A. A. Análises e Métodos de Otimização para Eficiência Energética de Estações Elevatórias em Sistemas de Abastecimento de Água. 113 p. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2007.
- ALLIANCE TO SAVE ENERGY – ASE. Watergy: taking advantage of untapped energy and water efficiency opportunities in municipal water systems. Washington: Alliance to Save Energy, 2017.
- ALMEIDA, P. L. C.; Otimização da operação de uma estação elevatória, minimização do custo da energia respeitando critérios de qualidade da água. 2010. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.
- ALMEIDA, R., BARBOSA, P.S.F. Operação ótima de Sistemas de Distribuição de Água via Modelo de Programação Não Linear Inteira Mista. In: Seminário-Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água. O Estado da Arte e Questões Avançadas. João Pessoa, 2002.
- ALPEROVITS, E.; SHAMIR, U. Design of Optimal Water Distribution Systems. *Water Resources Research*, Vol. 13, Nº 6, p. 885-900, New York, NY, USA, 1997.
- ALVES, Z.; C. Gonçalves, A. Modelação Hidráulica de um Sistema de Distribuição de Água - Aplicação a uma Zona de Castelo Branco. Tese de Doutorado - Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco, Portugal, 2012.
- AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. ANSI/AWWA C 502-94 – Standard for Dry-Barrel Fire Hydrants, 1998.
- AMILKAR E. ILAYA-AYZA, A. E.; BENÍTEZ, J.; IZQUIERDOA, J.; PÉREZ-GARCÍA, R. Multi-criteria optimization of supply schedules in intermittent water supply systems. *Journal of Computational and Applied Mathematics* n. 309, p. 695-703, 2017.
- ANDRÊS, D. F. V. Otimização Energética de um Sistema de Abastecimento de Água. Análise de um caso prático das Águas do Norte. 2016. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12211. Estudo de Concepção de Sistemas Públicos de Abastecimento de Água. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12214. Projeto de Sistemas de Bombeamento de Água para Abastecimento Público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12217. Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12218 - projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público, 1994.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F. Manual de Hidráulica. 9a ed. São Paulo: Edgard Blücher. 632p. 2015.
- BABAEI, N.; TABESH, M.; NAZIF, S. Optimum reliable operation of water distribution networks by minimising energy cost and chlorine dosage. *Water SA*, v. 41, n. 1, p. 149-156, 2015.
- BAGIROV, A. M., BARTON, A. F., MALA-JETMAROVA, H., AL NUAIMAT, A., AHMED, S. T., SULTANOVA, N., YEARWOOD, J. An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution

systems using a novel approach to pump scheduling. *Mathematical and Computer Modelling*, n. 57, p. 873-886, 2013.

BAGIROV, A. M., BARTON, A. F., MALA-JETMAROVA, H., AL NUAIMAT, A., AHMED, S. T., SULTANOVA, N., & YEARWOOD, J. An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling. *Mathematical and Computer Modelling*, n. 57, p. 873-886, 2013.

BAPTISTA, M; LARA, M. *Fundamentos de Engenharia Hidráulica*, Belo Horizonte, Editora da UFMG, 2002.

BARBOSA, J. *Simulação da operação de bombas em sistemas de abastecimento de água*. 2001. 110 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2001.

BARRETO, G. C. *Avaliação da operação e estimativa das perdas de água e de energia elétrica no 3º setor de abastecimento de água da Região Metropolitana de Belém*. 2006, 151 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPA, Belém, PA, 2006.

BARROSO, L. B.; GASTALDINI, M. C. C. *Redução de vazamentos em um setor de distribuição de água de Santa Maria - RS*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 15, n. 2, p. 27-36, 2010.

BARRY, Judith. *Watery: Energy and Water Efficiency in Water Supply and Wastewater Treatment*. Washington, D.C.: Alliant Save Energy. 2007.

BEYGI, S.; BOZORG-HADDAD, O.; FALLAH-MEHDIPOUR, O. E. Bargaining models for optimal design of water distribution networks *J. Water Resour. Plann. Manag.* n. 140, p. 92-99, 2014.

BEZERRA, S. T. M.; CHEUNG, P. B. *Perdas de água: tecnologias de controle*. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013.

BEZERRA, Saulo de Tarso Marques. *Perdas de água: tecnologias de controle*. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013.

BØASZCZYK, J., KARBOWSKI, A., KRAWCZYK, K., MALINOWSKI, K., & ALLIDINA, A. Optimal pump scheduling for large scale water transmission system by linear programming. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, nº 3, p. 91-96, 2012.

BOASZCZYK, J., KARBOWSKI, A., KRAWCZYK, K., MALINOWSKI, K., ALLIDINA, A. Optimal pump scheduling for large scale water transmission system by linear programming. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, n. 3, p. 91-96. 2012.

BOHÓRQUEZ, J.; SALDARRIAGA, J.; VALLEJO D.. Pumping Pattern Optimization in Order to Reduce WDS Operation Costs. *Procedia Engineering*, v.119, p. 1069-1077, 2015.

BOLOGNESIA, A.; BRAGALLIA, C.; LENZIB, C.; ARTINAA, C. Energy Efficiency Optimization in Water Distribution Systems. 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, *Procedia Engineering*, p. 181-190, 2014.

BOLOURI-YAZDELI, Y.; BOZORG-HADDAD, O.; FALLAH-MEHDIPOUR, E. MARIÑO, M.A. Evaluation of real-time operation rules in reservoir systems operation *Water Resour. Manag.* n. 28 p. 715-729, 2014.

Brasil. Agência Internacional para as Energias Renováveis - Irena. Disponível em: <http://www.barloventorecursos.com/pt-br/content/agencia-internacional-de-energias-renovaveis>. >. Acesso em: 16 maio, 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa n. 414, de 9 de setembro de 2010. Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf>>. Acesso em: 16 maio. 2017.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. *Manual de Saneamento*. 4ª ed. ver. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2016.

BRASIL. Lei de Diretrizes Nacionais de Saneamento Básico, altera as Leis nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, nº 8.036, de 11 de maio de 1990, nº 8.666, de 21 de junho de 1993, nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências nº 11.445 – 1 de maio de 2007. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF: 8 de maio de 2007.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. *Programa de Modernização do Setor Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos*. 2014. Brasília, 2015. 1 CD-ROM.

- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. *Abastecimento de água: gerenciamento de perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento*. Guia do profissional em treinamento: nível 2. Salvador: ReCESA. 139 p. 2008.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2015. Brasília: SNSA/MCIDADES, 212 p. : il. 2017. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2015>>. Acesso em: 24 mar. 2017.
- Brasil. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2015. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2017. 212 p. : il., 2017.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS . Disponível em: <<http://app.cidades.gov.br/serieHistorica/#>> Acesso em: 11 mar. 2017.
- BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Assessoria Especial para Modernização da Gestão. Central de Compras. Brasília, 24 p.: il., color, 2015.
- BRASIL. Resolução CONAMA n.º 274, de 29 de novembro de 2000. Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. Revoga os artigos 26 e 34 da Resolução nº 20/86 (revogada pela Resolução nº 357/05). **Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília**, Seção 1, p. 70-71, 25 jan. 2001.
- BRASIL. Resolução CONAMA n.º 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília**, Seção 1, p. 58-63, 2005.
- BRASILEY, D., JACOBS, A. Energy Management in the Waterworks Industry. Journal National of England Water Works Association, Vol. 94, n. 3, p. 216-226, 1989.
- BRION, L.; MAYS, L.; W. Methodology for Optimal Operation of Pumping Stations in Water Distribution Systems. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 117, Nº 11, p. 1551-1569, New York, NY, USA, 1991.
- BRUSTOLINI, E. J. L. Estudo da eficiência energética da estação elevatória de água bruta do ribeirão são Bartolomeu - SAAE de Viçosa, 2012.
- CAMBRAINHA, G. M. G.; FONTANA, M. E. Análise da aplicação de investimentos em perdas de água no nordeste brasileiro. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM, v. 19, n. 2, p.983-994, 2015.
- CARDOSO, R. B.; NOGUEIRA, L. A. H.; BORTONI, E. C.; HADDAD, J.; SOUZA, E. P. Avaliação da economia de energia, atribuída a ações de etiquetagem energética, em motores de indução no Brasil. Revista Brasileira de Energia, v.15, p. 29-47, 2009.
- CARVALHO, F. S. D. Estudos sobre perdas no sistema de abastecimento de Água na cidade de Maceió. VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. 2014.
- CARVALHO, J.A.; OLIVEIRA, L.F.C. Instalações de bombeamento para irrigação - Hidráulica e consumo de energia. Lavras: Editora UFLA, 2008.
- CASTANHO, M. J. P; OUTEIRO, V. H; HERNANDES, F. Uso de Programação Matemática Fuzzy para Reduzir Custos de Energia. Anais do XXXV Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional – CNMAC, Natal – RN, 2014.
- CASTELLANELLI, C. A. Autosuficiência energética no horário de ponta: Análise técnico-econômica de geradores operados com diesel e biodiesel obtido através do óleo de fritura usado. Revista ESPACIOS, v. 36, n. 19, 2015.
- CENTRAIS ELÉTRICAS DO PARÁ - CELPA. Tarifas. 2016. Disponível em: <<http://www.celpe.com.br/display/499f676e-b44a-4039-97ab-9e91e38f296e>>. Acesso em: 24 mar. 2017.
- CETESB - ASCETESB. Técnicas de abastecimento e tratamento de águas In: “Reservatório de distribuição de água”, 332 p. v. 2. 3. ed. 332 p., São Paulo, 1987.
- CHEN, Q.; SILIANG.; C. D. Improving water and energy metabolism efficiency in urban water supply system through pressure stabilization by optimal operation on water tanks. Ecological Informatics, n. 26, p. 111-116, 2015.

- CHERCHI, C., BADRUZZAMAN, M., GORDON, M., BUNN, S., JACANGELO, J.G. Investigation of cost and energy optimization of drinking water distribution systems. *Environ. Sci. Technol.* 49, p. 13724-13732, 2015.
- CHERCHI, C., BADRUZZAMAN, M., OPPENHEIMER, J., BROS, C., JACANGELO, J. Energy and water quality management systems for water utility's operations: a review. *J. Environ. Manage* 153, p. 108-120, 2015.
- COELHO, B.; ANDRADE-CAMPOS, A. Efficiency achievement in water supply systems - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 30, p. 59-84, 2014.
- CONDURÚ, M. T.; PEREIRA, J. A. R. Análise das informações de volume perdido de água no planejamento de sistemas de abastecimento de água em áreas urbanas no Brasil. In: XII Seminário Ibero-Americano sobre sistemas de abastecimento de água e drenagem, 2012, Coimbra, SEREA, v. 1. p. 1-8, 2012.
- COSGRIFF, G. O.; FORTE, P. E.; KENNEDY, M. A.; RUSSEL, J. V.; SMITH, R. D.; WEST, A.K. Interactive Computer Modeling, Monitoring, and Control of Melbourne's Water Supply System. *Water Resources Research*, Vol. 21, n 2, p. 123-129, New York, NY, USA, 1985.
- COSTA, L. H. M.; CASTRO, M. A. H. Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água. *Revista de Eng. Sanit. Ambient*, vol. 15, n. 2, p. 187-196, 2010.
- COSTA, L. H. M.; CASTRO, M. A. H.; RAMOS, H.. Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água. *Revista de Eng Sanit Ambient*, v.15, n. 2, 2010.
- CREACO, E., PEZZINGA, G. Embedding linear programming in multi objective genetic algorithms for reducing the size of the search space with application to leakage minimization in water distribution networks. *Environ. Model. Softw.* 69, p. 308-318, 2015.
- CREDER, H. Instalações hidráulicas e sanitárias. Livros Técnicos e Científicos Editora, 5ª Edição, 1995.
- CUNHA, A. A. R. Otimização energética em tempo real da operação de sistemas de abastecimento de água. 2009. Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- D'AMBROSIO, C.; LODI, A.; WIESE, S.; BRAGALLI, C. Mathematical programming techniques in water network optimization. *European Journal of Operational Research*, v. 243, n. 3, p. 774-788, 2015.
- DA SILVA, MARCOS A., Manual de Treinamento KSB - Seleção e Aplicação de Bombas Centrífugas, 5ª Ed., 2003.
- DACACH, N.G. - "Sistemas Urbanos de Água", LTC Editora S.A., 2ª Edição, Rio de Janeiro, 1979.
- DANDY, G; C.; SIMPSON, A. R.; MURPHY, L. J. Comparison of Methods for Yield Assessment of Multiple Reservoir Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123 n. 6, p. 350-358, 1997.
- DENARO, S.; ANGHILERI, D.; GIULIANI, M.; CASTELLETTI. Informing the operations of water reservoirs over multiple temporal scales by direct use of hydro-meteorological data. *Advances in Water Resources*, n. 103, p. 51-63, 2017.
- DINIZ, A. M. F. Modelagem em regime transitório, simulação e otimização energética de um sistema de abastecimento de água baseado no reconhecimento de padrões de consumo. 150 p. Tese de Doutorado - Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica Salvador, 2014.
- DINIZ, A.M.F.; FONTES, C.H.O.; COSTA, C.A.; AND COSTA, G.M.N. Dynamic modeling and simulation of a water supply system with applications for improving energy efficiency. *Journal of Energy Efficiency*, submitted (under review), 2013.
- DUARTE, H. P.; ALEGRE, H.; COVAS, D. PI for assessing effectiveness of energy management processes in water supply systems, PI09: Benchmarking water services-the way forward (IWA), 2009.
- DUTRA, R. F. E; ALTAFINI, C. R. Melhorias em um sistema de bombeamento municipal visando à Eficiência Energética – Estudo de Caso, *Scientia Cum Indústria (Sci. Cum Ind.)*, vol. 2, p. 1-9, 2014.
- EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SANEAMENTO AMBIENTAL - PROCEL SANEAR INFORMAÇÃO (2017). Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMID6D82CF76DD284E7B8A607F31CB419A79PTBRIE.htm>>. Acesso em: 24 mar. 2017.
- EUROPUMP; HYDRAULIC INSTITUTE. Variable speed pumping. A guide to successful applications. First edition. Bodmin, Cornwall: Elsevier. 2004.

- FASOLIN, L. B. Relação entre o Índice de Sustentabilidade e os Indicadores Econômico financeiros das empresas de energia brasileiras. *Revista em Gestão, Educação e Tecnologia, (REGET)*, v. 18, n. 2, p. 955-981, 2014.
- FILHO, J. F. S. Caracterização e avaliação do macro sistema urbano de distribuição de água em Natal. Natal, 2014. 95 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, 2014.
- FILHO, J. T. Aspectos relevantes do controle de perdas em sistemas públicos de abastecimento de água, *Revista DAE*, nº 201, janeiro abril de 2016.
- FRACASSO, P. T. Redução de Gastos com Energia Elétrica em Sistemas de Distribuição de Água Utilizando Processos Decisórios de MARKOV. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Edição Revisada. São Paulo, p. 132. 2014.
- FRAGA C.C.S., MEDELLÍN-AZUARA J., MARQUES G.F. Planning for infrastructure capacity expansion of urban water supply portfolios with an integrated simulation-optimization approach. *Sustainable Cities and Society*, Volume 29, 1, 2017.
- FREITAS, M. F. Avaliação de riscos geológicos no planejamento energético eólico no Rio Grande do Norte, Fortaleza. *Revista de Eng Sanit Ambient*, v. 1. 15 n.1, p. 117-129, 2016.
- GEBRIM, D. V. B. Otimização Operacional de Sistemas de Abastecimento de Água com Objetivo de Redução de Custo de Energia Elétrica. 2013. 120 p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120p, 2013.
- GEORGESCU, S. C. Pumping station scheduling for water distribution networks in EPANET. *UPB Sci. Bull, Series D*; n. 77, p. 235-246, 2015.
- GERGORGESCU, A.; M. EPANET Simulation of Control Methods for Centrifugal Pumps Operating under Variable System Demand. *Procedia Engineering*, v.119, p.1012-1019, 2015.
- GHADDAR B, NAOUM-SAWAYA J, KISHIMOTO A, TAHERI N, ECK B. A. Lagrangian decomposition approach for the pump scheduling problem in water networks. *Eur. J. Oper. Res. N. 241*, p. 490-501, 2014.
- GHADDAR, B.; NAOUM-SAWAYA, J.; KISHIMOTO, A.; TAHERI, N.; ECK, B. A. Lagrangian decomposition approach for the pump scheduling problem in water networks. *European Journal of Operational Research*, v. 241, n. 2, p. 490-501, 2015.
- GHOSH, R. KANSAL, A. AGHI, S. Implications of end-user behaviour in response to deficiencies in water supply for electricity consumption - A case study of Delhi Original Research Article. *Journal of Hydrology*, v. 536, May 2016, p. 400-408, 2016.
- GOMES, D. M.; GUTIERREZ., L. A. C. L.; PEREIRA, J. A. R. Utilização do EPANET 2.0 para avaliação do impacto da verticalização no funcionamento de sistemas de abastecimento de água. In: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007, Belo Horizonte. 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, v. 1. p. 18, 2007.
- GOMES, H. P. (organizador). **Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética**. 1ª ed. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2009.
- GOMES, H. P. **Sistema de Bombeamento: Eficiência Energética**. Editora Universitária/UFPB, João Pessoa, 2ª edição. 460 p, 2012.
- GOMES, H. P. **Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes de elevatórias**. 3. ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2009.
- GOMES, H.P.; BEZERRA, S.T.M. Ações de eficiência energética. In: GOMES, H.P.; CARVALHO, P. S. O. (Org.). *Manual de sistemas de bombeamento - eficiência energética*. João Pessoa: Editora Universitária, UFPB,. P. 129-140. 2012.
- GOMES, L. S. F. A demanda por energia elétrica residencial no Brasil: Uma estimativa das elasticidades-preço e renda por meio de painel. 2010, 72 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da USP, Ribeirão Preto, SP, 2010.
- GONÇALVES, R. D. O. Análise das Perdas Físicas no Sistema de Abastecimento de Água de Santa Cruz do Sul, SC. Universidade de Santa Cruz do Sul - SC. Santa Cruz do Sul. 2013.

- GORDIC, D. et al. Development of energy management system - Case study of Serbian car manufacturer. **Energy Conservation and Management**, n. 51, p. 2783-2790, 2010. Elsevier.
- GUIMARÃES, A. J. A.; CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. Saneamento básico. S. l., (2007), 9 p. Apostila do Instituto de Tecnologia/Departamento de Engenharia – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://bd.centro.iff.edu.br/bitstream/123456789/74/1/tcc-aline_deiz.pdf>. Acesso em: 16 maio 2017.
- HELLER, L.; PÁDUA. V. L. (Org.) - Abastecimento de água para consumo humano. Reservação. 2ª ed. Belo Horizonte: editora UFMG, 2010. 859 p.
- HELLER, L.; PÁDUA. V. L. (Org.) - Abastecimento de água para consumo humano. Reservação. 3ª ed. Belo Horizonte: editora UFMG, 2016. 870 p.
- HOFFMAN, I. M.; GOLDMAN, C. A.; RYBKA, G.; LEVENTIS, G. L.; ALAN, L. S.; SCHILLER, H. S. S. Estimating the cost of saving electricity through U.S. utility customerfunded energy efficiency programs. *Energy Policy*, n. 104, p. 1-12, 2017.
- IBARRA, D., ARNAL, J. Parallel programming techniques applied to water pump scheduling problems. *J. Water Resour. Plan. Manag. ASCE* 140 (7), 2014.
- IMBIL. Indústria e Manutenção de Bombas ITA Ltda. Disponível em: <<http://www.imbil.com.br/Imbil/Portugues/detServicos.php>>. Acesso em: 27 set. 2017.
- INSTITUTO TRATA BRASIL: Saneamento no Mundo. Progress on Sanitation and Drinking-Water-Organização Mundial da Saúde/UNICEF, 2014.
- IRFFI, G. Previsão da demanda por energia elétrica para classes de consumo na região Nordeste, usando OLS dinâmico e mudança de regime. *Economia Aplicada*, Ribeirão Preto, SP, v. 13, n. 1, p. 69-98, 2009.
- JAYARAM, N.; SRINIVASAN, K. Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks sing life cycle costing, *Water Resour. Res.*, 44, W01417, 2008.
- JOLLAND, G.; COHEN, G. Optimal Control of Water Distribution Network by two Multilevel Methods. *Water Resources Research*, Vol. 16, p. 83-88, New York, NY USA, 1980.
- JOLLY, M., LOTHES, A., SEBASTIAN BRYSON, L., ORMSBEE, L. Research database of water distribution system models. *J. Water Resour. Plan. Manag. ASCE* 140 (4), p. 410 - 416, 2014.
- JORDÃO, E.P.; Pessoa, C.A. Tratamento de Esgotos Domésticos, ABES, 7ª edição, 2014.
- JOWITT, P. W., GERMANOPOULOS. G. Optimal pump scheduling in water-supply networks. *Journal of water Resources Planning and Manegement*, 118, p. 416-422, (1992).
- JOWITT, P. W.; XU, C. Optimal Valves Control in Water-Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 116, n. 4, p. 455-472, New York, NY, USA, 1990.
- JOWITT, P.W., GERMANOPOULOS, G. Optimal Pump Scheduling in Water Supply Network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 118, n. 4, p. 416-422, 1992.
- JUNG, D.; KANG, D.; KANG, M.; KIM, B. Real-time pump scheduling for water transmission systems: Case study. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014.
- JUSTINO, J. D.; NOGUEIRA, É. Estudo e análise de um sistema de distribuição de água: aplicação do método de Hardy Cross utilizando a equação universal de Darcy-Weisbach e o método de Hazen-Williams. *Cadernos UniFOA*. Rio de Janeiro, ano VII, n. 22, p. 25-35, 2013.
- KANG, D.; LANSEY, K. Revisiting optimal water distribution system design: issues and a heuristic hierarchical approach. **Journal of Water Resources Planning and Management**. Accepted manuscript. 2011.
- KANG, J.; GRABLE, K.; HUSTVEDT, G.; AHN. M. Sustainable water consumption: The perspective of Hispanic consumers Original Research Article *Journal of Environmental Psychology*, v. 50, p. 94-103, 2017.
- KARAKAYA, E.; SRIWANNAWIT, P. Barriers to the adoption of photovoltaic systems: The state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 49, p. 60-66, set. 2015.
- KRAUSE, A. ROTTER, V. S. Linking energy-sanitation-agriculture: Intersectional resource management in smallholder households in Tanzania. Original Research Article *Science of The Total Environment*, v. 590-591, p. 514-530, 2017.

- KROCOVÁ, S. Water supply systems and their influence on increasing operational safety in industry. *Perspectives in Science*, n. 7, p. 236-239, 2016.
- KUREK, W.; OSTFELD, A. Multiobjective water distribution systems control of pumping cost, water quality, and storage-reliability constraints. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 140, n. 2, p. 184-193, 2014.
- LANNUZEL, P.; ORTOLANDO, L. Evaluation of Heuristic Program for Scheduling Treatment Plant Pumps. *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE*, v.115, n. 4, p. 457-471, New York, NY, USA, 1989.
- LANSEY, K. E., AWUMAH, K. Optimal Pump Operations Considering Pump Switches. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 120, n. 1, p.17-35, New York, NY, USA, 1994.
- LANSEY, K. E.; MAYS, L. W., (1989). Optimization Model for Water Distribution System Design. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 115, N°5, p.630-645, New York, NY, USA, 1989.
- LEON, C, MARTIN, S., ELENA, J. M., LUQUE, J. EXPLORE. Hybrid Expert Systems for Water Networks Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 126, N° 2, p.65-74, New York, NY, USA, 2000.
- LIMA, G. M.; VIANA, A. N. C; SILVA, A. Q.; DIAS, R. S. C. Otimização do Uso De Reservatórios para Redução do Bombeamento no Horário de Ponta. **XIX Simpósio de Recursos Hídricos**. Maceió. 2011.
- LINSINGEN, I. V. **Fundamentos de sistemas hidráulicos**. Florianópolis: Edufsc, 2001.
- LITTLE, K. W., McCRODDEN, B. J. Minimization of Raw Water Pumping Cost Using MILP. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v.115, n 4 p. 511-522, New York, NY, USA, 1989.
- LIU, G.; ZHANG, Y.; KNIBBE, W. J.; FENG, C. J.; LIU, W.; MEDEMA, G.; MEER, W. V. D. Potential impacts of changing supply-water quality on drinking water distribution: A review. *Water Research*, n. 116, p. 135-148, 2017.
- LOPES, R. M. Simulação computacional do consumo e do custo de energia elétrica a operação da estação elevatória de esgoto bruto do UMA. Belém, Pará. 2013.
- LUZ, E. M; RÉ, A. M; HERNANDES, F. Economia de Energia no Sistema de Abastecimento de Água: Uma Abordagem Usando Algoritmos Genéticos. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics*, Natal, DINCON, Vol. 4, N. 1, 2016.
- MACINTYRE, A. J. Bombas e instalações de bombeamento. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- MACINTYRE, A. J. Instalações Hidráulicas Prediais e Industriais. 3 ed. Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro – RJ, 1996.
- MACINTYRE, A.J. - "Bombas e Instalações de Bombeamento", Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.
- MACINTYRE, JOSEPH, A. Bombas e Instalações de Bombeamento. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. 2012.
- MALA-JETMAROVA, H.; SULTANOVA, N.; SAVIC, D. Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation. *Environmental Modelling and Software* 93, p. 209-254, 2017.
- MAMADE, A.; CATARINA, S.; ANA MARQUES, A. LOUREIROA, D. HELENA ALEGREA, H. COVASC, D. Energy auditing as a tool for outlining major inefficiencies: results from a real water supply system. 13th Computer Control for Water Industry Conference, *Procedia Engineering*, p. 1098-1108, 2015.
- MAMADE, A.; LOUREIRO, D.; COVAS, D. "Energy auditing as a tool for improving service efficiency of water supply systems," in 16th Conference on Water Distribution System Analysis, Bari, Italy, 2014.
- MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E.M. Metodologia científica. São Paulo: Atlas, 2010.
- MARTINS, J. A. Reservatório de distribuição de água. Capítulo 12. In: Técnica de abastecimento e tratamento de água. V. 1. CETESB. São Paulo, 1978.
- MATROSOV, E., HUSKOVA, I., KASPRZYK, J., HAROU, J., LAMBERT, C., REED, P. Manyobjective optimization and visual analytics reveal key trade-offs for London's water supply. *J. Hydrol.* 531(3), p. 1040-1053, 2015.
- MATTOS, E. E.; FALCO, R. Bombas Industriais 2 ed. Rio de Janeiro: Interciencia, 1998.

- MENKE R, ABRAHAM E, PARPAS P, STOIANOV I. Approximation of system components for pump scheduling optimisation. Proc. Eng. n. 119, p. 1059-68, 2015.
- MENKES, M. Eficiência energética, políticas públicas e sustentabilidade. 295 p. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília - Centro de Desenvolvimento Sustentável, UnBCDS, Brasília, 2004.
- MIGUEL, V. S. F. Los depósitos em los em los sistemas de distribución. Capítulo 19. In: Ingeniería Hidráulica Aplicada a Los Sistemas de distribución de Agua. Vol II. Universidad Politécnica de Valencia, 1996.
- Ministério de Minas e Energia, “Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016” EPE - Empresa de Pesquisa Energética, p. 07 - 08, 2016.
- MIQUELIN, L. M.; SOLER, E. M. Modelo matemático para otimização da operação de sistemas de abastecimento de água. C.Q.D. Revista Eletrônica Paulista de Matemática, Bauru, v. 7, p. 88-96, dez. 2016.
- MORAIS, L. C. Estudo sobre o panorama da energia elétrica no Brasil e Tendências futuras. Bauru, 2015. 128 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, 2015.
- MOTTA, R. G. Importância da setorização adequada para combate às perdas reais de água de abastecimento público. 2010. 176 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2010.
- NASCIMENTO, R. S. **Simulação de alterações numa ETA convencional de porte médio para a produção de água segura.** *RBRH*, vol.21, n. 2, p.439-450, 2016.
- NEVES, M. V.; LEITE, S. Utilização do simulador Epanet no estudo de sistemas prediais de abastecimento de água. 3ª Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, 2008.
- NITIVATTANANON V.; SADOWSKI, C. E.; QUIMPO, R. G. Optimization of Water Supply System Operation. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 122, N° 5, p. 374-384, New York, NY, USA, 1996.
- OLAIA, Ana I. Santos. Gestão de Sistemas de Abastecimento de Água Através de Modelação Hidráulica. Tese de Doutorado - Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2012.
- OLIVEIRA FILHO, D.; SAMPAIO. R.P.; MORAES, M.J.; PIZZIOLLO, T.A.; DAMIÃO, J.H.A. Metodologia de diagnóstico energético em estação de captação de água. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.15, n.10, out. 2011.
- OLIVEIRA, D.; RIBEIRO, M. C.; MANTOVANI, E. C.; SOARES, A. A.; FERNANDES, H. C. Dimensionamento de motores para dimensionamento de água. Engenharia Agrícola, v.30, p.1012- 1022, 2010.
- OLIVEIRA, M. F. Metodologia científica: um manual para a realização de pesquisas em administração. Catalão: UFG, 2011. 72 p.: il. Manual (pós-graduação) - Universidade Federal de Goiás, 2011.
- ORMSBEE, L. E.; REDDY, S.L. Nonlinear Heuristic for Pump Operations. Journal of Water Resource Planning and Management, ASCE, v. 121, N° 4. p. 302-309, New York, NY, USA, 1995.
- ORMSBEE, L. E.; WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SHARP, W. W. Methodology for Improving Pump Operation Efficiency. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 115, n. 2, p. 148-164, New York, NY, USA, 1989.
- ORMSBEE, L. E.; WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SHARP, W. W. Methodology for Improving Pump Operation Efficiency. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 115, n. 2, p. 148-164, New York, NY, USA, 1989.
- ORSINI, E. Q. *Sistema de abastecimento de água.* apostila da disciplina PHD 412 - Saneamento II. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 1996.
- OZCELIK, M. Alternative model for electricity and water supply after disaster. Süleyman Demirel University, Engineering Faculty, Geological Engineering, Isparta, Turkey, p. 1658-3655, 2017.
- PEDROSA, L. A. F. Um Modelo de Operação de Sistemas Adutores de Abastecimento de Água com vistas a Minimização dos Custos Energéticos. Campina Grande, Paraíba. 174 p. Tese Doutorado - Universidade Federal de Campina Grande, 2006.
- PEREIRA, B.E.B. **Técnica de abastecimento de água:** abastecimento de água. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1987.
- PEREIRA, J. A. CONDURÚ, M. Abastecimento de água: informação para eficiência hidroenergética. João

Pessoa: UFPB, 2014.

PERTEL, M.; AZEVEDO, J.P.S.; VOLSCHAN JUNIOR, I. Uso de indicadores de perdas para seleção de um benchmarking entre as companhias estaduais de serviço de distribuição de água no Brasil. *Revista Eng Sanit Ambient*, v. 21, n. 1, p. 159-168, 2016.

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

PILLOT, J. CATEL, L. RENAUD, E. AUGÉARD, B. ROUX, P. Up to what point is loss reduction environmentally friendly?: The LCA of loss reduction scenarios in drinking water networks. *Water Research*, v. 104, 1. p. 231-241, 2016.

PORTO, R.M. “Hidráulica Básica”. EESC-USP, São Carlos, SP, 3ª edição, 2004.

PRODANOV, C. C. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed., Novo Hamburgo, 2013.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. Rio de Janeiro: PROCEL. 2017.

PULEO, V., MORLEY, M., FRENI, G., & SAVIĆ, D. Multi-stage linear programming optimization for pump scheduling. *Procedia Engineering*, 70, p.1378-1385, 2014.

RAMOS, H. M., COSTA L. H. M., GONÇALVES F. V. “Energy Efficiency in Water Supply Systems: GA for Pump Schedule Optimization and ANN for Hybrid Energy Prediction, Water Supply System Analysis” - Selected Topics, Dr. Avi Ostfeld (Ed.), 2012.

RAMOS. H. R.; VIEIRA, F.; DÍDIA I.; COVAS, C. Energy efficiency in a water supply system: Energy consumption and CO2 emission. *Water Science and Engineering*, 3, p. 331-340, 2010.

REIS JUNIOR, J. C. F. R. Análise hidroenergética da rotina operacional de sistema de bombeamento utilizado em abastecimento público de água, 2012, 135 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPA, Belém, PA, 2012.

RELATÓRIO TÉCNICO: Diagnóstico Hidroenergético da Estação Elevatória de Água Tratada do setor Guanabara/José Almir Rodrigues Pereira, Petrônio Vieira Júnior, Augusto da Gama Rego, Coordenadores. Belém: Universidade Federal do Pará. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, Eletrobras, 236 p. 2014.

ROCAMORA, C.; VERA, J.; ABADÍA, R. Strategy for efficient energy management to solve energy problems in modernized irrigation: analysis of the Spanish case. *Irrigation Science*, Heidelberg, v.31, n.5, p.1139-1158, 2013.

RODRIGO, C.; LOPES, J.; SAÚDE, M.; MENDES, R., CASIMIRO, R. Controlo Operacional em Sistemas Públicos de Abastecimento de Água. Lisboa: Europress, Lda. 2007.

RONGA, Q.; YANPENG, C.; CHEND, B. Field management of a drinking water reservoir basin based on the investigation of multiple agricultural nonpoint source pollution indicators in north China. *Ecological Indicators*, 2017.

ROSSMAN, L. A. Epanet 2.0 Manual do Usuário. PROCEL SANEAR, Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da UFPB, 2009.

ROSSMAN, L. A. Manual do utilizador EPANET 2.0. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2002.

SAIANI, C.C.S. Restrições à expansão dos investimentos em saneamento básico no Brasil: déficit de acesso e desempenho dos prestadores. 2007. 315 p. Dissertação (Mestrado em economia aplicada) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2007.

SAIDUR, R.; A review on electrical motors energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. n. 14, p. 877-898, 2010.

SALVINO, M. M.; CARVALHO, P. S. O.; GOMES, H. P. Calibração multivariada de redes de abastecimento de água via algoritmo genético multiobjectivo. *Revista de Eng. Sanit. Ambient*, Rio de Janeiro, vol. 20 n. 3, p. 503-512, 2015.

- SANTANA, G. C. Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água Abastecidos por Bombeamento e Reservatórios de Regularização. 184 p. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP, Campinas, 1999.
- SANTANA, G. C. Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água Abastecidos por Bombeamento e Reservatórios de Regularização. 184 p. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP, Campinas, 1999.
- SANTOS, L. L. C. Metodologia para análise da tarifa branca e da geração distribuída de pequeno porte nos consumidores residenciais de baixa tensão. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Santa Maria, 2014.
- SCARCELLI, R. O. C.; FILHO, D. O.; RIBEIRO, M. C.; LOPES, D. C. Economia de energia com uso de inversor de frequência em sistemas de bombeamento de água para perímetro irrigado. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v.17 n.6, p. 462-472, 2009.
- SCHALTEGGER, R.; BURRITT, S.; ZVEZDOV, D.; HÖRISCH, J. Management roles and sustainability information. Exploring corporate practices Aust. Account. Rev. n. 25, p. 328-345, 2015.
- SCHUTZE, A. A Demanda de Energia Elétrica no Brasil. 2015. 120 p. Tese de Doutorado – Faculdade de Economia. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2015.
- SCHUTZE, A. Efeitos da Regulação no Custo de Aquisição de Energia Elétrica no Brasil. 2010. 97 p. Dissertação de (Mestrado). Fundação Getúlio Vargas –FGV, Escola de Pós Graduação em Economia , Rio de Janeiro, 2010.
- SELEK, I.; BENE, J. G.; HOS, C. Optimal (short-term) pump schedule detection for water distribution systems by neutral evolutionary search. Applied Soft Computing, v. 12, n. 8, p. 2336-2351, 2012.
- SHOKRI, A.; BOZORG, O.; MARIÑO, M. A. Multi-objective quantity-quality reservoir operation in sudden pollution. Water Resour. Manag. n. 28, p. 567-586, 2014.
- SHOKRI, A.; BOZORG, O.; MARIÑO, M. A. Reservoir operation for simultaneously meeting water demand and sediment flushing: a stochastic dynamic programming approach with two uncertainties J. Water Resour. Plann. Manag., n. 139, p. 277-289, 2013.
- SILVA, C. O. DA. Modelagem de rede de distribuição de água com ênfase no controle de perdas 2014. 112 p. (Dissertação (Engenharia Urbana e Ambiental) - da Universidade Federal da Paraíba (UFPB, PB), João Pessoa, 2014.
- SILVA, M. J. S.; ARAÚJO, C. S.; BEZERRA, S. T. M.; ARNAUD, S.; SOUTO, C. R.; GOMES, H. P. Sistema de controle adaptativo aplicado a um sistema de distribuição de água com ênfase na eficiência energética. Revista de Eng Sanit Ambient, v. 20 n. 3, p. 405-413, 2015.
- SILVEIRA, D. T.; CÓDOVA, F. P. A pesquisa científica. In: GERHARDDT, T. E. e SILVEIRA, D. T. (org.). Métodos de Pesquisa. Porto Alegre: Editora de UFRGS, p. 31-42, 2009.
- SIQUEIRA, M. L., CORDEIRO JR., H. H.; CASTELAR, I. A demanda por energia elétrica no Nordeste brasileiro após o racionamento de 2001-2002: previsões de longo prazo. Pesquisa e Planejamento Econômico, v. 36, n. 1, p. 137-178, jun. 2006.
- SOARES, D. Desafios na Redução de Perdas de Água Frente à Crise Hídrica na Região Central de São Paulo, Revista Saneas, AESABESP, nº 55, Abril a Julho de 2015.
- SOBRINHO, R. A.; BORJA, P. C. Gestão das perdas de água e energia em sistema de abastecimento de água da Embasa: um estudo dos fatores intervenientes na RMS. Revista de Eng Sanit Ambient, v. 21, n. 4, p. 783-795, 2016.
- SOLER, E. M.; TOLEDO, F. B. T.; SANTOS, M. O. S.; ARENALES, M. N. Otimização dos custos de energia elétrica na programação da captação, armazenamento e distribuição de água. Production, 26 (2), p. 385-401, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.146113>.
- SOLER, E. M.; TOLEDO, F. M. B.; SANTOS, M. O.; ARENALES, M. N. Otimização dos custos de energia elétrica na programação da captação, armazenamento e distribuição de água. Production, n. 26, p. 385-401, 2016.
- SUNELA, M. I.; PUUST, R.. Real Time Water Supply System Hydraulic and Quality Modeling – A Case Study. **Procedia Engineering**, v.119, p. 744-752, 2015.

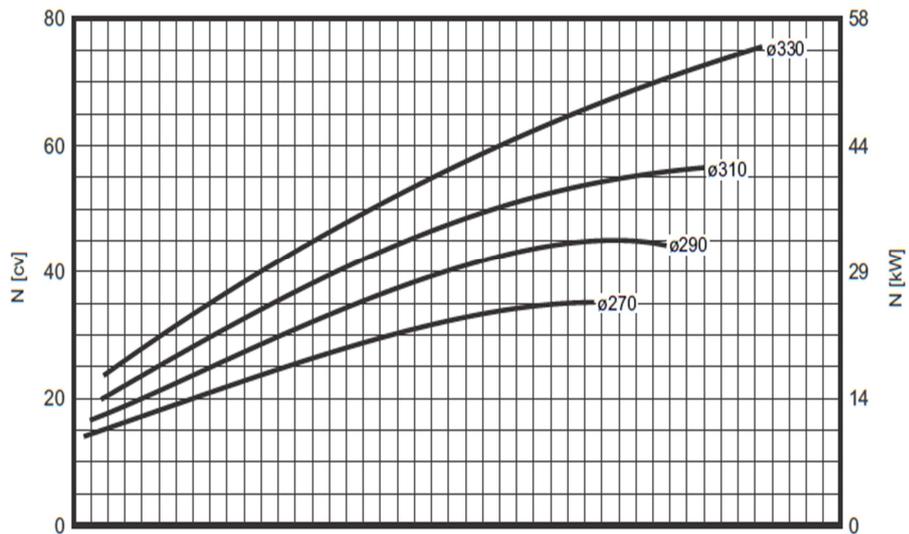
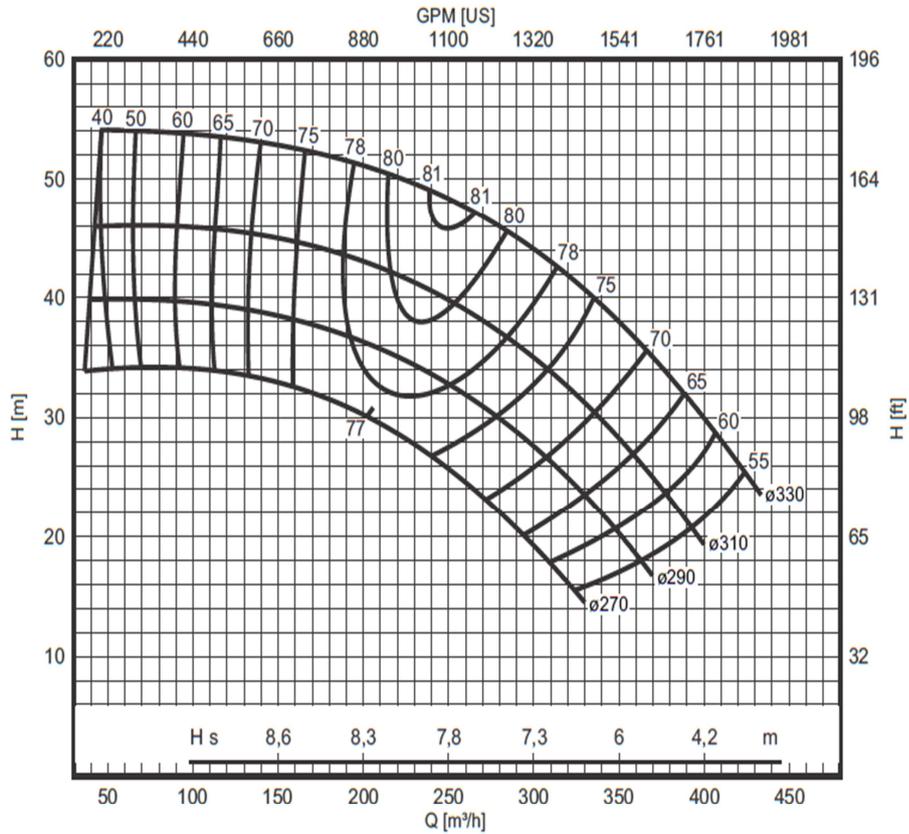
- SUSE, R.; YOSHIKAWA, A. M.; JUNIOR, E. L. Simulação da qualidade de água em redes de distribuição empregando o EPANET-MSX. *Revista DAE*, n. 197, p. 32-41, 2014.
- THOMAZINI, D.; Albuquerque, P. U. Braga, D. *Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações*. 3ªed. Local: São Paulo Érica, 2007.
- THORTON, J. Contratos de performance: contratos pioneiros para redução de perdas de água e eficiência energética: apresentação. In: Grupo de Economia do Saneamento, Energia & Soluções Ambientais, São Paulo, 2012.
- TIOMNO, T. M. *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.). EPE: Rio de Janeiro, 2016.
- TOLEDO, F. M. B., SANTOS, M. O., ARENALES, M. N., SELEGHIM JUNIOR, P. S. Logística de distribuição de água em redes urbanas: racionalização energética. *Pesquisa Operacional*, 28 (1), p. 75-91, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-74382008000100005>.
- TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de água: gerenciamento de perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento: guia do profissional em treinamento: nível 2 / Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.)*. – Salvador: ReCESA, 2008.
- TSUTIYA, M. T. *Gerenciamento de perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento: nível 2 / Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.)*. – Salvador: ReCESA, 2008. 139 p.
- TSUTIYA, M. T. *Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água*. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, p. 185, 2001.
- TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de água: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, 4 ed., 643p, São Paulo, 2006.
- TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 4ª ed. Depto de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP. São Paulo, p. 659, 2006.
- USEPA - Agência de Proteção Ambiental dos EUA. *Guia de Planos para Conservação de Água Tratada*. Washington D.C. 1998.
- VASCONCELOS, V. M. M.; SOUZA, C. F. Caracterização dos parâmetros de qualidade da água do manancial Utinga, Belém, PA, Brasil. *Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 6, n. 2, 2011.
- VILANOVA, M. R. N.; BALESTIERI, J. A. P. Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 30, p. 701-714, 2014.
- VILANOVA, M. R. N.; BALESTIERI, J. A. P. Exploring the water-energy nexus in Brazil: The electricity use for water supply. *Energy*, n. 85, p. 415-432, 2015.
- WALLACE, K.J., WAGNER, C., SMITH, M.J. Eliciting human values for conservation planning and decisions: a global issue. *J. Environ. Manag.* 170, p. 160-168, 2016.
- WALSKI, T. M. Hydraulic design of water distribution storage tanks. Chapter 10. In: *Water distribution systems Handbook*. McGraw-Hill, 2000.
- WWAP. *The United Nations World Water Development Programme Report 2015: Water for a Sustainable World*. Paris, UNESCO, 2015.
- XAVIER, M. L. M. LIMA, P. H. S. JANZEN, J. G. Impacto da configuração de entrada e saída sobre a mistura em reservatórios de armazenamento de água, Rio de Janeiro. *Revista de Eng Sanit Ambient*, v. 19, n. 3, p. 315-324, 2014.
- XU, Q. Improving water and energy metabolism efficiency in urban water supply system through pressure stabilization by optimal operation on water tanks. *Ecological Informatics*, 2015.
- ZENG, X.T.; ZHANG, S.J.; HUANG, G.H.; ZHANG, P. A multi-reservoir based water-hydroenergy management model for identifying the risk horizon of regional resources-energy policy under uncertainties. *Energy Conversion and Management*, n. 143, p. 66-84, 2017.
- ZESSLER, U.; SHAMIR, U. Optimal Operation of Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 115, N° 6, November, p. 735-752, 1989.

ANEXOS

ANEXO A - Curva da bomba da estação elevatória de água tratada.

ITAP 125-330

1750 RPM



Rotor Máximo	330	mm	Flange de Sucção	150	mm
Rotor Mínimo	270	mm	Flange de Pressão	125	mm
Largura	22	mm	Peso Específico	$\gamma = 1$	kgf/dm³
			Viscosidade	$\mu = 1$	cP

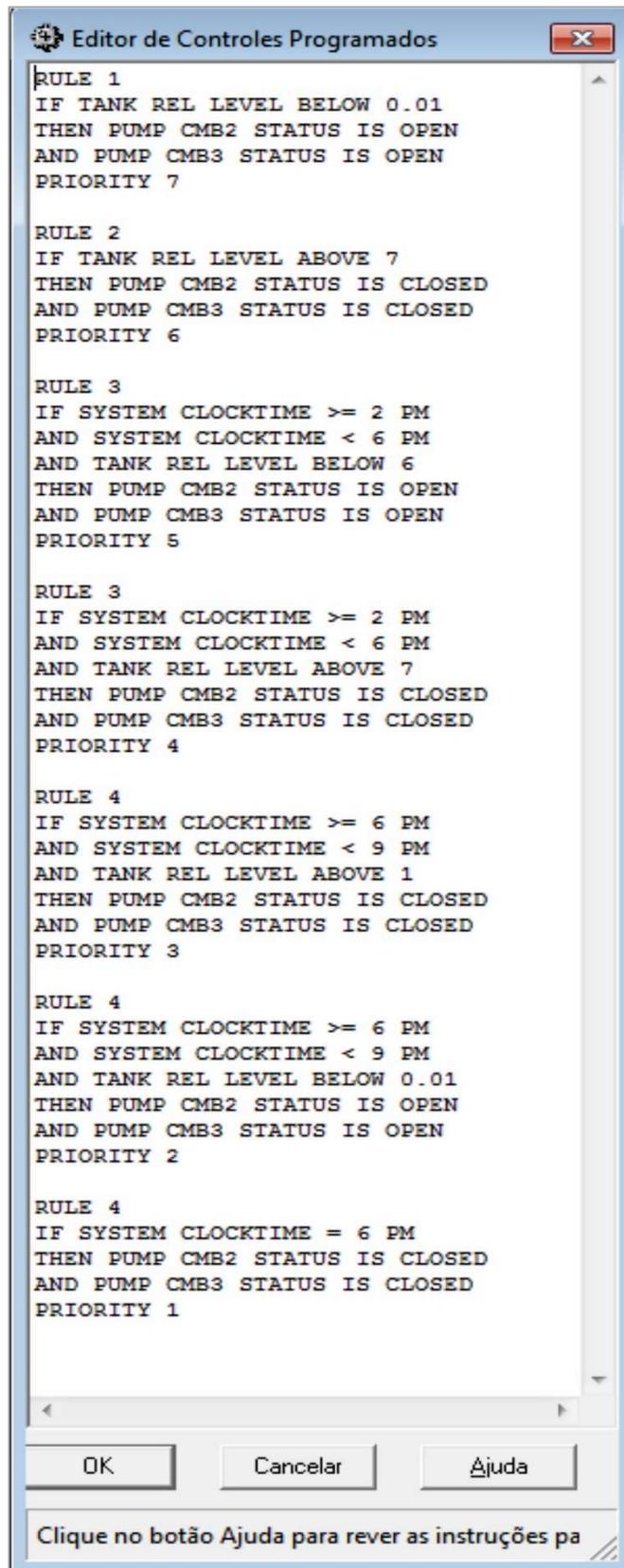
Fonte: IMBIL (2017).

ANEXO B - Tarifas Celpa a partir de 07/08/2015 Resolução Homologatória 1.930/2015 da ANEEL -

GRUPO A - Celpa 2015.

<h1 style="margin: 0;">TARIFAS</h1> <p style="margin: 0;">(em vigor a partir de 07/08/2015)</p>				
MODALIDADE TARIFÁRIA AZUL (GB)				
Resolução Homologatória 1.930/2015		BANDEIRA VERDE	BANDEIRA AMARELA	BANDEIRA VERMELHA
A2 (88 a 138 kV)				
Demanda Ponta	D (kWh)	15,56	15,56	15,56
Demanda Fora Ponta	D (kWh)	4,37	4,37	4,37
Consumo Ponta	C (kWh)	0,355620	0,380620	0,400620
Consumo Fora Ponta	C (kWh)	0,236650	0,261650	0,281650
A3 (69 kV)				
Demanda Ponta	D (kWh)	15,45	15,45	15,45
Demanda Fora Ponta	D (kWh)	3,80	3,80	3,80
Consumo Ponta	C (kWh)	0,357390	0,382390	0,402390
Consumo Fora Ponta	C (kWh)	0,238420	0,263420	0,283420
A3a (30 a 44 kV)				
Demanda Ponta	D (kWh)	69,19	69,19	69,19
Demanda Fora Ponta	D (kWh)	18,16	18,16	18,16
Consumo Ponta	C (kWh)	0,386860	0,411860	0,431860
Consumo Fora Ponta	C (kWh)	0,267890	0,292890	0,312890
A3a Rural (desconto 10%)				
Demanda Ponta	D (kWh)	62,27	62,27	62,27
Demanda Fora Ponta	D (kWh)	16,34	16,34	16,34
Consumo Ponta	C (kWh)	0,348174	0,373174	0,393174
Consumo Fora Ponta	C (kWh)	0,241101	0,266101	0,286101
A3a Rural, Irrigação e Aquicultura				
Demanda Ponta	D (kWh)	62,27	62,27	62,27
Demanda Fora Ponta	D (kWh)	16,34	16,34	16,34
Consumo Ponta	C (kWh)	0,348174	0,373174	0,393174
Consumo Irrigante (21h30 às 06h)	C (kWh)	0,053578	0,078578	0,095578
Consumo Fora Ponta (06h às 18h29)	C (kWh)	0,241101	0,266101	0,286101
A3a Água, Esgoto e Saneamento (desconto 15%)				
Demanda Ponta	D (kWh)	58,81	58,81	58,81
Demanda Fora Ponta	D (kWh)	15,44	15,44	15,44
Consumo Ponta	C (kWh)	0,328831	0,353831	0,373831
Consumo Fora Ponta	C (kWh)	0,227707	0,252707	0,272707
A4 (2,3 a 25 kV)				
Demanda Ponta	D (kWh)	69,19	69,19	69,19
Demanda Fora Ponta	D (kWh)	18,16	18,16	18,16
Consumo Ponta	C (kWh)	0,386860	0,411860	0,431860
Consumo Fora Ponta	C (kWh)	0,267890	0,292890	0,312890
A4 Rural (desconto 10%)				
Demanda Ponta	D (kWh)	62,27	62,27	62,27
Demanda Fora Ponta	D (kWh)	16,34	16,34	16,34
Consumo Ponta	C (kWh)	0,348174	0,373174	0,379174
Consumo Fora Ponta	C (kWh)	0,241101	0,266101	0,286101
A4 Rural, Irrigação e Aquicultura				
Demanda Ponta	D (kWh)	62,27	62,27	62,27
Demanda Fora Ponta	D (kWh)	16,34	16,34	16,34
Consumo Ponta	C (kWh)	0,348174	0,373174	0,393174
Consumo Irrigante (21h30 às 06h)	C (kWh)	0,053578	0,078578	0,098578
Consumo Fora Ponta (06h às 18h29)	C (kWh)	0,241101	0,266101	0,286101
A4 Água, Esgoto e Saneamento (desconto 15%)				
Demanda Ponta	D (kWh)	58,81	58,81	58,81
Demanda Fora Ponta	D (kWh)	15,44	15,44	15,44
Consumo Ponta	C (kWh)	0,328831	0,353831	0,373831
Consumo Fora Ponta	C (kWh)	0,227707	0,252707	0,272707

ANEXO C - Editor de controles Programados.



ANEXO D – Fatura Energia Elétrica do Setor Guanabara, Agosto de 2016 a Janeiro de 2018.

Conta de Energia Elétrica – Contrato 10051690	
Agosto 2016	R\$ 24.745,29
Setembro 2016	R\$ 25.672,60
Outubro 2016	R\$ 25.780,66
Novembro 2016	R\$ 27.707,07
Dezembro 2016	R\$ 26.990,49
Janeiro 2017	R\$ 24.810,04
Fevereiro 2017	R\$ 25.187,96
Março 2017	R\$ 24.573,49
Abril 2017	R\$ 25.400,65
Maio 2017	R\$ 23.562,82
Junho 2017	R\$ 27.860,05
Julho 2017	R\$ 26.064,92
Agosto 2017	R\$ 27.806,36
Setembro 2017	R\$ 28.824,39
Outubro 2017	R\$ 29.725,96
Novembro 2017	R\$ 32.751,81
Dezembro 2017	R\$ 29.411,86
Janeiro 2018	R\$ 27.725,93
Máximo	R\$ 32.751,81
Mínimo	R\$ 23.562,82
Média	R\$ 26.922,35