

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
RAISSA RIBEIRO MUNHOZ

**ESTUDO DO DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DO CONJUNTO
ELEVATÓRIA – RESERVATÓRIO DE DISTRIBUIÇÃO EM SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

CURITIBA

2016

RAISSA RIBEIRO MUNHOZ

**ESTUDO DO DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DO CONJUNTO
ELEVATÓRIA – RESERVATÓRIO DE DISTRIBUIÇÃO EM SISTEMAS DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Ambiental da Universidade Federal do
Paraná como requisito à obtenção do
grau Bacharel em Engenharia
ambiental

Orientador: Prof. Daniel Costa dos
Santos

CURITIBA

2016

AGRADECIMENTOS

A meu orientador, Professor Daniel Costa dos Santos, pelo acompanhamento, orientação e amizade durante esse ano.

Ao Curso de Engenharia Ambiental, do Setor de Tecnologias da Universidade Federal do Paraná, na pessoa de seu coordenador Professor Emilio Mercuri, pelo apoio recebido.

As minhas colegas de curso Yana Maestri e Juliana Claro, pela compreensão nos momentos difíceis, ajuda nos momentos necessários e amizade durante todo o percurso.

Aos meus familiares pelo apoio incondicional e incentivo.

RESUMO

Água e energia elétrica são recursos fundamentais para o desenvolvimento humano, considerando que ambos são recursos limitados no planeta, assim seu uso tem que ser de maneira racional. Nesse contexto, o objetivo principal desse trabalho é avaliar em nível de concepção e de projeto a possibilidade de otimização do sistema elevatório e volume de reservação sob os critérios da eficiência hidroenergética e econômicos. Foram considerados para atingir esse objetivo parâmetros como volume do reservatório, energia gasta pelo conjunto motor-bomba, consumo específico de energia elétrica e E/V, além da análise econômica dos projetos. A partir do tempo de bombeamento ótimo definido, foi feito um estudo sobre como seria seu comportamento em outros tempos. Os resultados alcançados mostraram que a promoção da eficiência hidroenergética em sistemas de abastecimento de água tem papel fundamental, tanto para o desenvolvimento sustentável de cidades como para redução dos custos de projeto e implantação.

Palavras-chave: Sistema de Abastecimento de Água. Reservatório. Estação Elevatória. Eficiência Hidráulica e Energética.

ABSTRACT

Water and energy are primordial for human development, considering that water is a limited resource in our planet, its use need to be clever. Inside that context, the main object of this paper is to evaluate at conception and design level the possibility of optimization of the elevation system and reservoir volume under the criteria of energy efficiency and economic efficiency. Parameters such as reservoir volume, energy spent by the motor-pump set, specific consumption of energy and E/V , besides the economic analysis of the projects were considered to reach this objective. From the defined optimum pumping time, a study was made of how its behavior would be in other times. The results showed that the promotion of hydropower efficiency in water supply systems plays a fundamental role both for the sustainable development of cities and for reducing the costs of design and implementation.

Key words : Water Supply System. Tank. Pumping station . Hydraulic and Energy Efficiency .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. % de perdas de água no decorrer dos anos. Fonte: SNIS, de 2004 a 2011.....	16
Figura 2. Sistema simples de abastecimento de água. Fonte: TSUTIYA, 2006.	17
Figura 3. Tipo de rotores e rendimento da bomba pela rotação específica. Fonte: XAVIER, E. A.	21
Figura 4. Tipos de Reservatórios em relação à cota do terreno. Fonte: CAGEPA, Campina Grande.	26
Figura 5. Diagrama da metodologia proposta	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Volume do reservatório em função dos diferentes tb_s	53
Gráfico 2. Energia consumida em função dos diferentes tbs	54
Gráfico 3. Energia consumida em função dos diferentes volumes do reservatório	55
Gráfico 4. Parâmetro E/Q em função dos diferentes tb_s	56
Gráfico 5. Parâmetro E/Volume diário em função dos diferentes tb_s	57
Gráfico 6. VAUE com juros de 10% ao ano	59
Gráfico 7. VAUE com juros de 15% ao ano	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Redução dos custos com energia elétrica. Fonte: TSUTYA, 2006. .	24
Tabela 2. Curva de Consumo: Adução Contínua.	40
Tabela 3. Adução intermitente de 12h.....	42
Tabela 4. Adução intermitente de 14h.....	43
Tabela 5. Adução intermitente de 16h.....	43
Tabela 6. Adução intermitente de 18h.....	44
Tabela 7. Adução intermitente de 20h.....	44
Tabela 8. Altura manométrica para adução contínua.	50
Tabela 9. Vazões de projeto para os diferentes tb_s	51
Tabela 10. Volume do reservatório para os diferentes tb_s	51
Tabela 11. Altura manométrica para tb de 12,14,16 horas.....	51
Tabela 12. Altura manométrica para tb de 18 e 20 horas.....	52
Tabela 13. Melhor eficiência para os diferentes tb_s	52
Tabela 14. Potência para os diferentes tb_s	52
Tabela 15. Energia consumida pelo conjunto elevatório para os diferentes tb_s	52
Tabela 16. Valores estipulados para os parâmetros utilizados na análise econômica	58
Tabela 17. Cálculo dos parâmetros para os diferentes Tb_s	58
Tabela 18. P e A com taxas de 10% e 15% ao ano para os diferentes Tb_s	59
Tabela 19. Desempenho do projeto implantado.....	61

LISTA DE SIGLAS

ETA- Estação de Tratamento de Água

MS – Ministério da saúde

NPSH - Net Positive Suction Head

PMSS - Programa de Modernização do Setor de Saneamento

SAA – Sistema de Abastecimento de água

SNIS – Sistema Nacional de Informação sobre o Saneamento

Tb- Tempo de bombeamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVO	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
3 REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1 A questão das perdas de água e da energia em SAA	16
3.2 Sistemas de abastecimento de água (SAA)	17
3.3 Descrição	18
3.3.1 Captação	18
3.3.2 Adução por gravidade e recalque	18
3.3.3 Elevatórias	19
3.3.4 Estação de Tratamento de Água (ETA _s)	25
3.3.5 Reservatórios.....	25
3.3.6 Redes de Distribuição de Água.....	28
3.4 Dimensionamento geral.....	29
3.4.1 Estimativa da vazão do projeto	29
3.4.2 Dimensionamento da captação	31
3.4.3 Adutoras por gravidade.....	32
3.4.4 Adutoras por recalque.....	33
3.4.5 Estação de Tratamento de Água.....	35
3.4.6 Reservatórios.....	35
3.4.7 Rede de distribuição de água.....	36
3.5 Eficiência hidroenergética em sistemas de abastecimento de água	36
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.1 Descrição do SAA sob estudo	39
4.2 Apresentação do SAA.....	39

	11
4.2.1 Configuração do SAA.....	39
4.2.2 Estimativa de vazão do projeto	39
4.2.3 Adoção da curva de consumo.....	40
4.2.4 Dimensionamento do reservatório.....	40
4.2.5 Dimensionamento do sistema elevatório.....	41
4.2.6 Estimativa do parâmetro de consumo de energia	41
4.3 Simulações.....	42
4.3.1 Tempo de bombeamento de 12 horas	42
4.3.2 Tempo de bombeamento de 14 horas	43
4.3.3 Tempo de bombeamento de 16 horas	43
4.3.4 Tempo de bombeamento de 18 horas	44
4.3.5 Tempo de bombeamento de 20 horas	44
4.4 Prospecção de relações entre variáveis	44
4.5 Estudo Financeiro	45
4.5.1 Escolha do projeto para implantação	46
4.5.2 Avaliação do desempenho energético para o projeto escolhido.....	47
4.6 Etapas desenvolvidas durante o trabalho.....	47
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1 Estimativa da população	48
5.2 Dimensionamento do sistema elevatório.....	48
5.2.1 Adução contínua	48
5.2.2 Adução intermitente	51
5.3 Definição do tb ótimo.....	52
5.3.1 Análise dos parâmetros	53
5.3.2 Análise econômica.....	57
5.4 Avaliação do desempenho energético para o Tb ótimo.....	61

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	62
7 BIBLIOGRAFIA	64
ANEXO I – CATÁLOGO DE FERRO FUNDIDO, TUBO CLASSE K7 – JGS, PAM.....	67
ANEXO II – CATÁLOGO UTILIZADO DA BOMBA KSB ETA.....	68
ANEXO III – PLANILHA DE ORÇAMENTO ESTIMATIVO DE UM RESERVATÓRIO	69
ANEXO IV – ORÇAMENTO DISPONIBILIZADO PELA EMPRESA CONSULT ENGENHARIA LTDA	70

1 INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, água e energia elétrica estão entre os recursos mais importantes utilizados nos diversos setores produtivos, assim como no cotidiano das populações. A ênfase que as mudanças climáticas tem ganhado no mundo, trouxe destaque a dois dos principais fatores desse fenômeno, fazendo uma relação que antes era pouco abordada. O uso excessivo ou mau uso de recursos energéticos é considerado um dos principais fatores que gera as mudanças climáticas. Uma das principais consequências geradas por causa dessas mudanças e sentidas pelos seres humanos é a falta de água potável. Tal consequência, causada pelo aumento da frequência de inundações e secas que são exemplos das manifestações do aquecimento global no cotidiano (UNESCO, 2009).

Segundo GOMES (2005) esses recursos, juntamente com os financeiros estão cada vez mais escassos para projetos, inclusive os de saneamento, tornando assim necessária a análise de melhores alternativas, que minimizem os custos de implantação e operação, sem comprometimento dos aspectos técnicos, sociais e ambientais.

Nesse contexto, o alcance da máxima eficiência hidráulica e energética em sistemas de abastecimentos de água (SAA) torna-se uma meta a ser alcançada, já que os mesmos desperdiçam parcelas significativas da água captada durante o processo e demandam grandes quantidades de energia elétrica para seu funcionamento, principalmente para o bombeamento. As perdas de água, físicas e de consumo, nos SAA no Brasil, segundo informações fornecidas pelo Serviço Nacional de Informações em Saneamento (SNIS, 2013) tem se mantido na ordem de 40% nos últimos doze anos nas cidades brasileiras. As perdas físicas e de consumo geram inúmeras despesas desnecessárias que aumentam ainda mais o custo da produção da água, gerando prejuízos econômicos as empresas de saneamento.

De acordo TSUTYA (2001) mais de 90% dos gastos com energia elétrica das empresas de água devem-se às elevatórias dos sistemas de abastecimento público, sendo considerada grande parte desses gastos como perdas de energia elétrica. Essas perdas de energia são, em sua maioria,

geradas pela baixa eficiência dos conjuntos motor-bomba utilizados (GOMES, 2005).

Assim, medidas que combatam as perdas de água e energia e que aumentem a eficiência hidroenergética dos SAA são essenciais e de máxima urgência para que a sustentabilidade, tanto de empresas de saneamento como de cidades e nações, seja alcançada (GOMES, 2005). A implantação e sucesso de tais medidas nas companhias de saneamento podem gerar um melhor desempenho econômico, tanto para a própria companhia quanto para os consumidores, revertendo tal benefício em tarifas mais baixas e possível investimento na ampliação dos SAA (TSUTIYA, 2001).

Outro componente essencial em um SAA é o reservatório de água, e segundo TSUTIYA (2006), ele pode ser dimensionado em um projeto de saneamento de modo a gerar máxima economia em sua concepção. Com isso surgiu a preocupação das empresas com a implantação desse componente, para que os projetos atinjam preços mais viáveis.

Considerando esse cenário, fatores que diminuam as perdas tanto energéticas quanto de água e também que gerem maior economia para implantação de projetos, em sistema de abastecimento, produzem benefícios diretos relativos a empresas de saneamento, consumidores e meio ambiente, merecendo um espaço cada vez maior na implantação de novos projetos, assim como no estudo de casos já existentes e que possam usufruir de tais medidas.

Devido aos fatores apresentados, o estudo do dimensionamento otimizado da estação elevatória - reservatório de distribuição em SAA deve buscar soluções que visem melhorar a eficiência hidroenergética dos sistemas urbanos e alternativas que tragam menores custos econômicos e impactos para a sociedade.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar, em nível de concepção e de projeto, a possibilidade de otimização do sistema elevatório e volume de reservação sob os critérios da eficiência hidroenergética e econômicos.

2.2 Objetivos específicos

Para os objetivos específicos são previstos os seguintes:

- Avaliar o desempenho energético para outros tempos de bombeamento;
- Avaliar o comportamento do consumo específico para diferentes tempos de bombeamento;
- Analisar as eficiências das bombas obtidas em catálogo em função da variação do tempo de bombeamento;
- Prospectar sobre futuras simulações que considerem variáveis referentes a idade do sistema e a escala do projeto.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 A questão das perdas de água e da energia em SAA

As perdas tanto de água como de energia elétrica estão ganhando cada vez mais destaque nas discussões sobre o SAA brasileiro, devido à carência hídrica que o mundo enfrenta e também as altas tarifas de energia elétrica. Outro ponto importante é a relação dos gastos gerados com essas perdas e a saúde financeira das empresas prestadoras de serviços de saneamento.

Segundo SNIS (2016a), os SAA sempre apresentam perdas, porém, quando elevadas, tornam-se desperdícios de recursos naturais, operacionais e de receita para as empresas da área. A **Figura 1** apresenta o comportamento das perdas de água nos anos de 2004 a 2011.

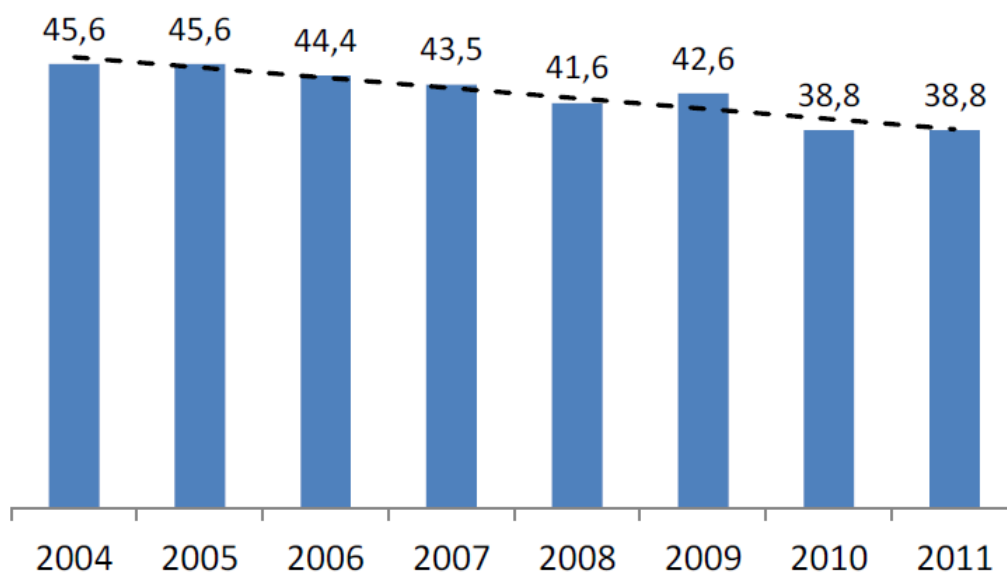


Figura 1. Percentual de perdas de água no decorrer dos anos. Fonte: SNIS, vários anos.

É possível notar, com base na Figura 1, que as perdas de água nos SAA brasileiros passaram de 45,6% em 2004 para 38,8% em 2011, tendo uma diminuição de 6,8% nesse período. Porém essa redução ainda é insuficiente, ou seja, os gastos com desperdício de água ainda são grandes no país.

Quanto à energia elétrica consumida no mundo, aproximadamente 3% é destinada ao bombeamento e tratamento de água para residências urbanas e indústrias. Esse consumo poderia ser reduzido em pelo menos 25%, por meio

de ações que visem atingir maior eficiência energética nos SAA (ALLIANCE, 2002)

Segundo GOMES (2013), em 2010 cerca de 2,32% dos gastos de energia do Brasil foram gerados pelo setor de saneamento básico, que considera os serviços de água e esgoto. Sendo os maiores reesposáveis por esse elevado gasto os motores e bombas utilizados no sistema.

De acordo com CLINGENPEEL (1983), 50% dos gastos das empresas de saneamento são com energia elétrica. A diminuição desses gastos pode ser alcançada quando medidas operacionais, tais como, alteração do sistema bombeamento-reservação, procedimentos operacionais das ETAs e utilização de inversores de frequência são tomadas (GOMES, 2005).

3.2 Sistemas de abastecimento de água (SAA)

A portaria MS nº 2914/2011 SAA para consumo humano como "instalação composta por conjunto de obras civis, materiais e equipamentos, destinados à produção e à distribuição canalizada de água potável para populações, sob a responsabilidade do poder público, mesmo que administrada em regime de concessão ou permissão." O objetivo principal de um SAA é fornecer ao consumidor água em boa qualidade para consumo, em quantidades e pressões adequadas. A **Figura 2** mostra os diversos componentes de um SAA, e, entre eles, estão: curso de água ou mananciais, captação, estação elevatórias de água, adutoras de água bruta (sem tratamento) ou tratada, estação de tratamento de água, reservatório e rede de distribuição de água.

De acordo com TSUTIYA (2006), o tipo de manancial, a topografia da área assim como as características da população que será atendida são os principais fatores a se considerar quando se planeja fazer um SAA.



Figura 2. Sistema simples de abastecimento de água. Fonte: TSUTIYA, 2006.

3.3 Descrição

Neste item será feita uma breve introdução dos principais componentes de um sistema de abastecimento de água convencional.

3.3.1 Captação

TSUTIYA (2006) define captação em mananciais como “conjunto de estruturas e dispositivos, construídos ou montados junto a um manancial, para a retirada de água destinada a um sistema de abastecimento de água.” Ela pode ser feita captando águas superficiais ou subterrâneas, sendo a segunda captação mais complexa e necessita de um sistema para bombear a água até a superfície. O mesmo deve fornecer água em condições adequadas para consumo, ou seja, água potável em padrões de potabilidade e vazões suficientes para atender a demanda do projeto. Geralmente, a captação é constituída por córregos, rios, lagoas e represas.

3.3.2 Adução por gravidade e recalque

Adutora é um conjunto de tubulações destinadas a transportar água entre unidades de um SAA. As adutoras têm suma importância em um SAA, requerendo cuidados especiais na hora da elaboração e implantação do projeto. TSUTIYA (2006) define adutoras em um SAA como sendo “um conjunto de tubos e conexões com a finalidade de transportar água de um ponto ao outro.” Os materiais usados para fazer essa tubulação podem ser metálicos (aço, ferro fundido dúctil, etc) ou não metálicos (matérias, plásticos, concreto protendido, etc.)

As adutoras são classificadas quanto à natureza da água que elas transportam ou quanto à energia necessária para movimentar a água. Quanto à natureza, denominando-se adutoras de água bruta as tubulações que conduzem a água da captação até as estações de tratamento, ou seja, água sem tratamento e adutoras de água tratada são as que conduzem água após seu tratamento. Quanto a energia, são classificadas como: adutoras por gravidade, por recalque ou mistas. Adutoras por gravidade são aquelas que transportam água de uma cota mais elevada para uma menos elevada, podendo ser feita em conduto forçado, quando a água está sob pressão maior que a pressão atmosférica ou conduto livre, quando a água esta sob a pressão atmosférica. Adutoras por recalque são as que transportam água por meio de

estações elevatórias, fazendo a água fluir de um ponto de cota menor a um ponto de cota maior e adutoras mistas, as que contem trechos por recalque e trechos por gravidade.

Para traçar uma adutora é preciso ter definido o esquema geral do SAA, ou seja, a posição da captação, da ETA e do reservatório. O seu traçado é feito em função das características topográficas do terreno e levando em conta a influência do plano de cargas e linhas piezométricas, localização e perfil da adutora, faixas de servidão ou desapropriação para implantação e operação das adutoras.

Equipamentos de medição são usados para controlar parâmetros como vazão, pressão, volume, entre outros e têm grande importância na operação dos SAAs, pois avaliam a eficiência dos mesmos. Em adutoras normalmente são instalados equipamentos conhecidos como macromedidores, que são utilizados para medir a água que entra em setores de distribuição, a água bruta, ou águas tratadas entregues por sistemas públicos ou privados.

3.3.3 Elevatórias

Estações elevatórias de água são estruturas eletromecânicas usadas para solucionar os mais variados problemas referentes ao transporte de água em SAA, podendo ser instaladas na captação, adução, tratamento e distribuição de água. O uso intensivo das mesmas pode elevar o custo de energia elétrica de um sistema de maneira considerável (AZEVEDO NETTO, et. al, 1998).

O motor e a bomba utilizados formam o conjunto de componentes principais em uma estação elevatória de água. As bombas podem ser classificadas em bombas cinéticas ou bombas de deslocamento. A bomba cinética faz com que a água atinja posições mais elevadas dentro de uma tubulação, pois dentro da bomba a energia em forma de energia de velocidade é transformada em energia de pressão. Dentre as bombas cinéticas, a mais usada é a bomba cinética centrífuga, devido à maiores eficiências e menores custos de instalação, operação e manutenção. A bomba centrífuga é uma máquina que pode funcionar com uma rotação constante, mesmo que as condições de vazão e altura manométrica variem. O rotor é a peça mais

importante da bomba, pois objetiva o movimento rotacional da massa líquida (TSUTIYA, 2006).

Para a classificação das bombas centrífugas usam-se os parâmetros: trajetória do líquido no rotor, rotação específica e disposição do conjunto motor-bomba. Quanto à trajetória do líquido no rotor, as bombas podem ser de fluxo radial, em que o escoamento no líquido é determinado pelo formato do rotor no sentido centrífugo radial e geralmente usada para elevar o líquido a uma altura elevada com uma vazão relativamente pequena. Fluxo axial, em que o escoamento no líquido também é determinado pelo formato do rotor, mas no sentido axial e é usado para elevar o líquido a uma altura pequena com uma grande vazão. Além de fluxo misto, que promove o escoamento gerado no sentido radial e axial, simultaneamente, e que são usadas em casos em que se objetiva uma altura de elevação relativamente baixa com uma vazão alta.

Para classificar uma bomba quanto a rotação específica (Nq), é necessário, por meio da Equação 1, saber a rotação específica da bomba e utilizar a **Figura 3**, que demonstra uma curva característica de uma bomba centrífuga. De acordo com TSUTIYA (2006) a rotação específica Nq é:

$$Nq = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (1)$$

Em que:

N - rotação da bomba (RPM);

Q - Vazão (m^3/s);

H - altura manométrica (m).

A curva característica da bomba centrífuga faz parte do conjunto de informações necessárias para a escolha da bomba. A curva característica da bomba relaciona a vazão recalçada com altura manométrica total, com a potência consumida e com a eficiência da bomba ou NPSH. É fundamental o seu conhecimento, para que a bomba escolhida funcione com condições e rendimento ótimos. O seu ponto ótimo de operação é determinado pelo cruzamento das curvas vazão versus altura manométrica total e do sistema.

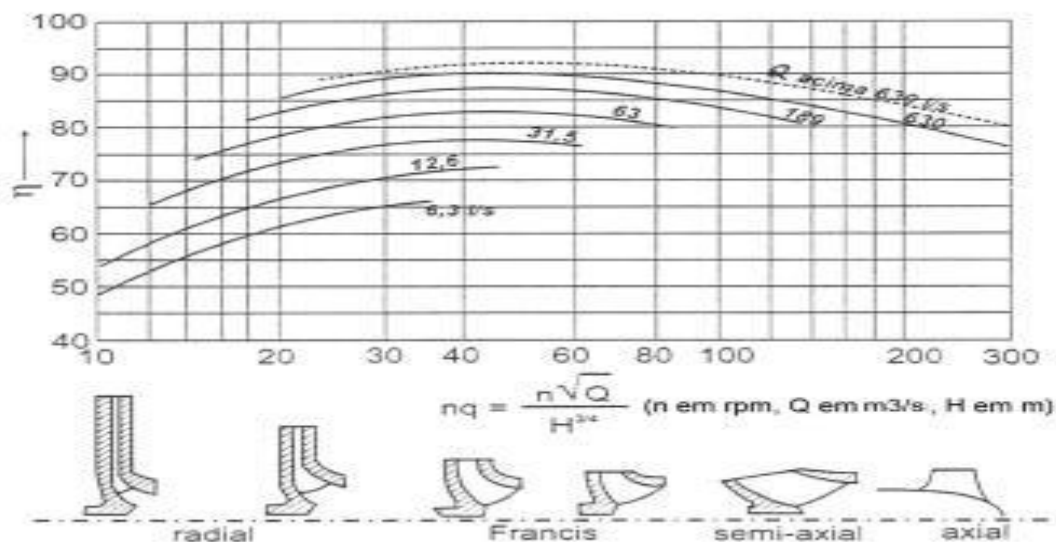


Figura 3. Tipo de rotores e rendimento da bomba pela rotação específica. Fonte: XAVIER, E. A.

Para a escolha da bomba centrífuga é preciso conhecer um conjunto de informações determinadas por grandezas utilizadas em sistemas elevatórios tais como: a localização da bomba em relação ao nível da água, a vazão de bombeamento (Q), a altura manométrica total (H), a potência fornecida pela bomba (P_E) e a eficiência ou o rendimento da bomba (η).

Para a determinação da altura manométrica, devem-se considerar as alturas geométricas de sucção e recalque (H_g), as perdas de carga (H_s e H_r) e as cargas cinéticas. A Equação 2 é utilizada para determinar a altura manométrica total de uma bomba (TSUTIYA, 2006).

$$H = H_g + \sum \Delta H_s + \sum \Delta H_r + \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

A potência consumida pela bomba é dada em kW pela Equação 3, em que γ é o peso específico da água em N/m³.

$$P_B = \gamma QH \quad (3)$$

A eficiência ou o rendimento da bomba, é dada pela relação entre a potência fornecida (P_E) e a potência consumida (P_b) e apresentada na Equação 4.

$$\eta = \frac{P_E}{P_b} \quad (4)$$

Alguns problemas gerados durante a operação da bomba, como a cavitação, podem reduzir sua eficiência, capacidade e vida útil. A cavitação é um fenômeno universal em hidráulica e consiste na formação de bolhas de vapor no meio líquido, ocorrendo quando a pressão do líquido atinge valores menores que a pressão de vapor do líquido. A geração desse fenômeno depende da natureza, da temperatura e da pressão do líquido. Para verificar a formação ou não de cavitação é necessário a determinação do NPSH disponível e requerido no sistema, sabendo que para um bom funcionamento da bomba é necessário que o NPSH disponível seja maior que o NPSH requerido. O NPSH disponível (NPSH_d) é a pressão absoluta que o sistema disponibiliza, sendo calculado a partir dos dados de instalação da bomba e usando a Equação 5 (TSUTIYA, 2006).

$$HPSH_d = H_{g,s} - \sum \Delta H_s + \frac{P_{atm}}{\gamma} + \frac{P_{vapor}}{\gamma} \quad (5)$$

Considerando que $\sum \Delta H_s$ é altura estática de sucção sendo positiva quando a bomba está afogada e negativa quando a bomba não está afogada.

O NPSH_r é a pressão mínima requerida na entrada da bomba para que não haja cavitação. Para o cálculo do NPSH_r é necessário calcular o coeficiente de cavitação ou coeficiente de Thoma (σ), relacionado pela Equação 6.

$$\sigma = \frac{NPSH_r}{H} \quad (6)$$

O coeficiente de cavitação também pode ser relacionado com a rotação específica da bomba por meio da Equação 7. O coeficiente K varia para cada tipo de bomba e seu rendimento.

$$\sigma = K(Nq)^{4/3} \quad (7)$$

Segundo TSUTIYA (2006), para o acionamento das bombas, geralmente, utiliza-se um motor elétrico. Os tipos mais comuns de motores, são os de corrente contínua ou os de corrente alternada. Os motores de corrente alternada são os mais empregados devido ao uso alternado de correntes elétricas para a distribuição de energia, sendo seus principais modelos os motores síncronos e assíncronos (ou de indução). Assim para a escolha do conjunto motor-bomba é preciso fazer uma análise das curvas do sistema elevatório e das bombas disponíveis no mercado, assim como nos tipos de operação do sistema de bombeamento, que podem ser feitos com apenas uma bomba, com bombas em paralelo ou em série.

Para determinar o ponto de operação do sistema de bombeamento na operação com apenas uma bomba é necessário fazer um cruzamento da curva do sistema elevatório com a curva da bomba e achar nas curvas características das bombas aquela que aumenta a vazão do projeto a sua devida altura manométrica, para assim garantir a máxima eficiência da bomba no sistema.

As bombas podem operar tanto individualmente quanto em paralelo, sendo cada uma responsável por bombear uma parcela da vazão recalçada. Para determinar as bombas desse sistema, é necessário verificar o catálogo das bombas para analisar sua curva característica, optando pela bomba que operará próximo de seu ponto de melhor eficiência. Já na operação com bombas em série, uma mesma vazão pode passar sequencialmente por uma ou mais bombas, sendo cada uma delas encarregada por uma parte da vazão de recalque.

Quanto aos tipos de estações elevatórias, elas podem ser estações elevatórias de água bruta, que recalcam a água sem tratamento, estações elevatórias de água tratada, que recalcam a água após o tratamento ou estações pressurizadas, denominadas “booster”, tipo de elevatória usada na rede de distribuição ou para reforçar a adução, aumentando a pressão. Quando a bomba está instalada fora da água, a elevatória se classifica como estação elevatória de poço seco, caso contrário, se a bomba estiver dentro da água à elevatória se classifica como estação elevatória de poço úmido.

A energia requerida em uma estação elevatória de água é responsável pela maior parcela de energia gasta em um SAA, fazendo com que o custo de energia elétrica aumente consideravelmente. Para que haja redução nos custos

de energia nas estações elevatórias de água, têm sido implantadas algumas medidas, que podem ser agrupadas nas seguintes categorias: conhecimento do sistema tarifário, redução da potência do equipamento, alteração do sistema operacional e automação de estações elevatórias. Os principais métodos para redução dos custos com energia elétrica em SAA estão apresentados na Tabela 1, dividida em duas fases, sendo a primeira fase referente a ações administrativas e a segunda fase referente a ações operacionais, subdivididas em cinco subfases.

Outro caminho para redução nos gastos com energia elétrica no SAA é a avaliação do custo de um sistema de bombeamento, que pode ser feito usando uma ferramenta de gestão, o custo de ciclo de vida (CCV), que é o custo total do equipamento durante toda sua vida útil e tem a finalidade de minimizar desperdícios e aumentar a eficiência de energia.

Tabela 1. Redução dos custos com energia elétrica. Fonte: TSUTYA, 2006.

Ações administrativas - 1ª fase	
Correção da classe de faturamento	
Regularização da demanda contratada	
Alteração da estrutura tarifária	
Desativação das instalações sem utilização	
Conferência de leitura da conta de energia elétrica	
Entendimento com as companhias energéticas para redução de tarifas	
Ações Operacionais - 2ª fase	
Ajuste dos equipamentos	Correção do fator de potência
	Alteração da tensão de alimentação
Diminuição da potência dos equipamentos	Melhoria no rendimento do conjunto motor-bomba
	Redução das perdas de carga nas tubulações
	Melhoria do fator de carga nas instalações
	Redução do índice de perdas de água
	Uso racional da água
Controle operacional	Alteração no sistema de bombeamento-reservação
	Utilização do inversor de frequência
	Alteração nos procedimentos operacionais de ETA's
Automação do SAA	
Alternativa para a geração de energia elétrica	Aproveitamento de potenciais energéticos
	Uso de geradores nos horários de ponta

3.3.4 Estação de Tratamento de Água (ETAs)

Estação de tratamento de água, segundo a ABNT, 1992 é o “conjunto de unidades destinado a adequar as características da água aos padrões de potabilidade.” Os padrões de potabilidade da água fornecem os limites gerais que são aceitáveis para as impurezas das águas destinadas a abastecimento público, sendo no Brasil definidos pela portaria nº 1469, de 29 de dezembro de 2000, do Ministério do Estado da Saúde. O tratamento da água é uma operação cara e deverá ser feita sempre que necessário, executando apenas fases indispensáveis para que o tratamento seja eficaz. Os processos são escolhidos para purificar a água, de acordo com as suas condições iniciais, variando desde uma simples cloração até as mais complexas operações de desmineralização por troca iônica (AZEVEDO NETTO, et. al, 1973).

Segundo o CONAMA, há três tipos básicos de tratamento de água:

- Tratamento simplificado: clarificação de água por meio de filtração e quando necessário desinfecção e correção do pH;
- Tratamento convencional: processo de clarificação utilizando coagulação e floculação, acompanhado de desinfecção e correção de pH;
- Tratamento avançado: técnicas que removam ou desativem de constituintes resistentes aos métodos convencionais de tratamento, que possam deixar a água com cor, odor, sabor, atividades tóxicas e patogênicas inadequadas.

3.3.5 Reservatórios

De acordo com TSUTIYA (2006) os reservatórios de distribuição de água são um dos mais importantes elementos contidos em um SAA. Além do seu destaque visual, ele tem finalidades importantes dentro do sistema. A regularização da vazão, o fornecimento de segurança ao sistema de abastecimento, a reserva de água para casos de incêndio e o bombeamento de água fora do horário de pico elétrico são algumas de suas funções.

Os custos elevados na implantação de um reservatório tanto quando a escolha do local adequado para sua implantação, com cotas adequadas e os impactos ambientais que podem ocorrer dependendo da localidade escolhida na hora da implantação são consequências negativas geradas pelo mesmo.

Os reservatórios podem ser classificados levando em conta a localização no sistema, localização no terreno, sua forma e os materiais de construção. Quanto à sua posição no sistema, ele pode estar localizado a montante da rede, jusante da rede ou com posições intermediárias com reservatórios intercalados no SAA. Quando a sua localização em relação ao terreno, podem ser classificados como reservatórios enterrados, semienterrados, apoiados ou elevados.

A **Figura 4** ilustra a posição dos reservatórios em relação ao terreno. Os reservatórios enterrados tem a vantagem de causar menos impactos ambientais e serem isolados termicamente, porém seus custos para execução são maiores. Os apoiados e semienterrados são os mais simples para implantação, porém não tem isolamento térmico adequado, requerendo um. Os elevados, assim como os enterrados tem como desvantagem o custo e os impactos ambientais gerados, porém é necessário em casos que a topografia do terreno não é adequada para abastecer a área por outros tipos de reservatório.

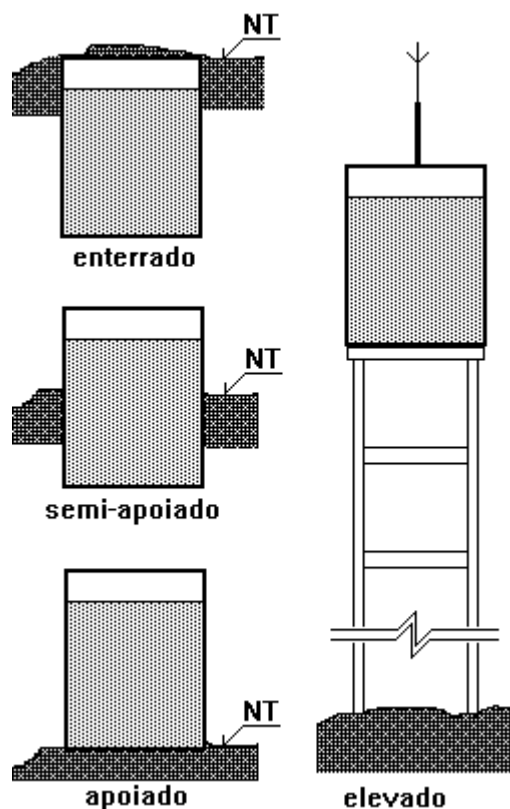


Figura 4. Tipos de Reservatórios em relação à cota do terreno. Fonte: CAGEPA, Campina Grande.

Quanto à forma dos reservatórios, é escolhida de modo a gerar máxima economia com sua fundação, estrutura, equipamentos de operação, utilização da área escolhida e interligação das unidades. Geralmente os reservatórios enterrados, semienterrados e apoiados são de forma circular ou retangular, já os elevados não tem um padrão próprio, dependendo da imaginação do seu projetista.

Conforme TSUTIYA (2006), o conhecimento da capacidade de um reservatório é de suma importância saber o volume útil, o volume para combater incêndios e o volume para emergência.

O volume útil é considerado o volume necessário para atender as variações diárias de consumo, compreendido entre o nível máximo e o nível mínimo do reservatório. Se conhecida a curva de consumo da região, seu cálculo pode ser feito considerando uma adução contínua ou intermitente ao reservatório. No caso da adução contínua, considera-se a adução para o dia de maior consumo, sendo sua vazão constante durante as 24 horas. Já na intermitente a vazão é constante, porém apenas algumas horas do dia e escolhidas de acordo com os horários de pico.

O volume para combater incêndios é necessário quando a capacidade do SAA não é suficiente, geralmente em sistemas de pequeno porte, já que nos de grande porte o uso de água para incêndios são uma fração muito pequena considerando o consumo máximo diário. Sendo os incêndios um evento que ocorre com uma baixa frequência no Brasil, normalmente não se destina um volume para reservação para combater incêndios nos seus SAA.

São consideradas situações de emergência os acidentes que causam interrupções nos SAA. Assim, é necessário um volume de emergência nos reservatórios. Não há nenhuma fórmula para se determinar esse volume e sua decisão deve ser considerada pelo projetista, dependendo da vulnerabilidade do sistema. Logo, após estimar esses três volumes, o volume total de reservação pode ser determinado.

A operação do reservatório geralmente é simples e depende da abertura ou fechamento de válvulas de controle e partida ou desligamento de bombas, variando as vazões de adução, mantendo o abastecimento normal.

3.3.6 Redes de Distribuição de Água

A rede de distribuição de água é, em geral, o componente mais caro de um projeto de SAA e tem como objetivo principal distribuir água potável e de forma contínua aos consumidores. Essa água precisa chegar ao comprador com ótima qualidade, pressão e quantidades adequadas podendo vir de diferentes fontes, como reservatórios elevados, apoiados, semienterrados e enterrados, estações elevatórias ou tanques hidropneumáticos.

A classificação das redes de distribuição é feita de acordo com a distribuição das tubulações principais e o sentido do escoamento nas tubulações secundárias, podendo ser ramificadas, malhadas ou mistas. As tubulações principais são de maior diâmetro e responsáveis por abastecer as tubulações secundárias, de menor diâmetro e que abastecem diretamente o consumidor.

De acordo com TSUTIYA (2006), a rede é classificada como ramificada quando “o abastecimento se faz a partir de uma tubulação tronco, alimentada por um reservatório ou por meio de uma estação elevatória. A distribuição da água é feita diretamente para os condutos secundários, sendo conhecido o sentido da vazão em qualquer trecho”. Redes malhadas podem abastecer um ponto do sistema por mais de um caminho, pois são formadas por canalizações principais que formam anéis ou blocos, assim se um caminho for interrompido, a água continua chegando ao mesmo ponto por meio de outros caminhos. Isso faz com que redes malhadas tenham mais flexibilidade para satisfazer a demanda que redes ramificadas, pois nelas quase não ocorrem interrupções no fornecimento de água.

TSUTIYA (2006) também cita alguns órgãos e equipamentos acessórios necessários em uma rede de distribuição de água, para maximizar a eficiência de seu funcionamento. Entre eles estão:

- Válvula de manobra, usada para garantir boa qualidade e continuidade de serviços sem interrupção. Ela minimiza a área de desabastecimento em casos de acidentes.
- Válvula de descarga, usadas para escoar a água da rede por meio de tubos. Geralmente elas são instaladas em pontos com baixas cotas.

- Ventosas, permitem a entrada e saída de ar nas tubulações, funcionando automaticamente. Geralmente, elas são instaladas em pontos com altas cotas.
- Válvulas redutoras de pressão (VRP), instaladas para reduzir, de forma automática e independente da variação de pressão e vazão do sistema, a pressão de montante a uma pressão constante a jusante.
- Válvula sustentadora de pressão (VSP), usada para equilibrar pressões mínimas a montante, independente da variação de pressão e vazão do sistema.
- Hidrante, equipamentos ligados a tubulação e com objetivo principal retirar água quando a ocorrências de incêndio.

3.4 Dimensionamento geral

Nesta seção serão apresentados os métodos utilizados para fazer o dimensionamento dos principais componentes do SAA.

3.4.1 Estimativa da vazão do projeto

Primeiramente, para determinar a vazão de um SAA é necessário estimar a população ao final do alcance do projeto e adotar um consumo “per capita” efetivo.

A determinação da população é feita por meio de dados censitários e pelo estudo do crescimento da população, durante período de projeto previsto. Há diferentes modelos de previsão para determinar a população ao final do alcance do projeto, sendo um desses modelos determinado pelo método de previsão geométrico, cuja formulação é, de acordo com AZEVEDO NETTO (1998):

$$P = P_0 \cdot (1 + \lambda g)^{\Delta t} \quad (8)$$

Em que:

P - População ao final do alcance;

P_0 - População inicial;

λg - Taxa geométrica de crescimento;

Δt - Alcance do projeto (em anos).

AZEVEDO NETTO (1998) refere que o consumo “per capita” é uma função do clima, dos hábitos, do padrão econômico, da natureza da cidade da medição e tarifação, do tipo de edificação, da disponibilidade, entre outros parâmetros. Um dos métodos para determinação do consumo “per capita” pode ser feita por meio do método de leitura dos hidrômetros prediais, neste caso o consumo per capita efetivo (q_e) é dado, tornando possível o cálculo do consumo per capita total (q_t), conforme a Equação 9.

$$q_t = \frac{q_e}{(1-I)} \quad (9)$$

Em que I é o índice de perdas, e é dado por:

$$I = \frac{(V_p - V_c)}{V_p} \quad (10)$$

Em que:

V_p - Volume produzido, medido na saída do reservatório (m^3);

V_c - Volume consumido (m^3).

Assim, a vazão média diária ao longo de um ano (Q), em litros por dia, é calculada por:

$$Q = P \cdot q_t \quad (11)$$

A variação no consumo padrão é dada em termos de coeficientes de variação de consumo, são eles: coeficiente do dia de maior consumo (K_1), coeficiente da hora de maior consumo (k_2) e coeficiente da hora de menor consumo (K_3). Os coeficientes de variação de consumo adotados foram: $K_1=1,2$; $K_2=1,6$ e $K_3=0,5$. Considerando essas variáveis é possível encaminhar a quantificação do consumo de água por meio da estimativa das vazões de dimensionamento do sistema. Os tipos de vazões de dimensionamento estão representadas pelas equações a baixo.

$$Q1 = K1. Q \quad (12)$$

Em que Q1 é a vazão média do dia de maior consumo do ano, usada para estimar a vazão nos trechos entre a captação e o reservatório. Geralmente o K1 varia de 1,1 até 1,5.

$$Q2 = K1. K2. Q \quad (13)$$

Em que Q2 é a vazão média da hora de maior consumo do dia de maior consumo, usada para estimar a vazão entre o reservatório e o início da rede. Geralmente o K2 varia de 1,5 até 2,2.

$$Q3 = K1. K3. Q \quad (14)$$

Em que Q3 é a vazão média da hora de menor consumo do dia de maior consumo, usada para estimar vazões em trechos onde o reservatório está localizado a jusante.

As vazões são estimadas em função dos trechos do sistema, por motivos econômicos, de modo que o dimensionamento da rede de distribuição seja feito todo em função da vazão da hora de maior consumo, sendo a mesma atendida pelo reservatório (SANTOS, 2013).

3.4.2 Dimensionamento da captação

Para definição da potencialidade de uso de um manancial, critérios quantitativos e qualitativos devem ser atendidos.

AZEVEDO NETTO (1998) menciona que a captação é dimensionada em função da vazão de captação no corpo hídrico e também da vazão de outorga de consumo de água, vazão essa definida por esses critérios, como sendo a vazão limite que será concedida para o uso por órgãos competentes. Para águas superficiais, a vazão de outorga é determinada em função da vazão de estiagem dos rios, ou seja, sua vazão mínima. Para águas subterrâneas, a vazão de outorga deve atender condições específicas de exploração, em função da capacidade de atendimento desse manancial.

Tanto para captação superficial como subterrânea, a sustentabilidade hídrica é o objetivo principal a ser alcançado, gerando assim, a necessidade de configurar vazões como vazão ecológica, conservação da água, salubridade ambiental, entre outros.

3.4.3 Adutoras por gravidade

Para o dimensionamento das adutoras por gravidade com escoamento em condutos forçados a equação de Darcy-Weisbach, também denominada de Equação Universal, torna-se válida para o cálculo de perdas de cargas, expressada pela Equação 15 (WHITE, 2010).

$$h = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (15)$$

Em que:

- H - Perda de carga (mca);
- F - Fator de perda de carga (ou fator de atrito);
- L - Comprimento da tubulação (m);
- D - Diâmetro do conduto (m);
- V - Velocidade do escoamento (m/s);
- g - Aceleração local da gravidade (m/s²).

O coeficiente de atrito “f” varia em função da rugosidade do tubo, da viscosidade e da densidade do líquido. Portanto, para obtenção de seus valores é necessário o auxílio de tabelas e gráficos.

Para esse caso, pode ser utilizada também a equação de Hazen-Williams, Equação 16.

$$Q = 0,279 \cdot C \cdot D^{2,63} \cdot J^{0,54} \quad (16)$$

Sendo:

- J - Taxa de perda de carga entre dois pontos da tubulação (m/m);
- C - Coeficiente de atrito (adimensional);

Isolando o D, encontra-se:

$$D = \left[\frac{10,643}{J} \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,85} \right]^{1/4,87} \quad (17)$$

De acordo com AZEVEDO NETTO (1998), a equação de Hazen-Williams é válida para praticamente todos os casos do dia-a-dia, sendo sua faixa de aplicação a mais ampla: de 50 a 3500 mm de diâmetro, enquanto o limite superior da velocidade é 3,0 m/s. Quanto ao coeficiente C, nota-se que seus valores são dados em função do material dos tubos e do tempo de uso e com ele é possível estimar o envelhecimento dos tubos. Assim, quanto menor o valor de C, menor a capacidade de transporte de água da tubulação. Da redução do coeficiente de atrito, resultam fenômenos como tuberculização ou incrustação sobre a parede da tubulação.

Para o dimensionamento das adutoras por gravidade com escoamento em condutos livres é usual o uso da Equação de Manning, com a seguinte formulação:

$$V = \frac{Rh^{2/3} \cdot \sqrt{I}}{n} \quad (18)$$

Em que:

Rh - Raio hidráulico (m);

I - Declividade da linha de energia (m/m);

n - Declividade (adimensional).

3.4.4 Adutoras por recalque

De acordo com AZEVEDO NETTO (1998), para o dimensionamento de adutoras por recalque, o método do diâmetro econômico pode ser empregado. A estimativa desse diâmetro, em metros, é dada pela Fórmula de Bresse:

$$D = k \cdot \sqrt{Q} \quad (19)$$

Em que Q é a vazão (m³/s) e k é o coeficiente variável, em função dos custos de investimento e operação. No Brasil, os valores utilizados para k estão entre 0,75 e 1,40.

Já para determinar a altura manométrica total, como citado acima, devem-se considerar as alturas geométricas de sucção e recalque (h_g), as perdas de carga (h_{pc}) e as perdas de carga localizadas (h_{pl}), todas dadas em metros de coluna d'água. Assim, a Equação 2 pode ser reescrita como:

$$H = h_g + h_{pc} + h_{pl} \quad (20)$$

Em que:

$$h_{pc} = J \cdot L \quad (21)$$

$$h_{pl} = \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (22)$$

$$V = \frac{Q}{A} \quad (23)$$

Sendo que A é a área interna do tubo (m²).

A altura manométrica total do sistema elevatório é estimada pela soma das alturas manométricas de sucção e de recalque, por meio da Equação 24.

$$H_{total} = H_{man,sucção} + H_{man,recalque} \quad (24)$$

Considerando que o conjunto elevatório deverá vencer a diferença de nível entre dois pontos mais as perdas de carga em todo o percurso, a potência elétrica consumida (também chamada de potência do conjunto motor-bomba) (P_E), em CV, será dada por:

$$P_E = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{total}}{75 \eta} \quad (25)$$

Em que:

Q - Vazão (m³/s);

γ - Peso específico da água (água bruta ou esgoto $\gamma = 1000 \text{ kgf/m}^3$);

H_{total} - Altura manométrica total (mca);

η - Rendimento global do conjunto elevatório, sendo $\eta = \eta_{motor} \cdot \eta_{bomba}$.

E para estimar a potência útil ou potência hidráulica, também em CV, utiliza-se da Equação 26.

$$P_b = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{total}}{75 \eta_{bomba}} \quad (26)$$

Para determinação da energia consumida por um conjunto elevatório, em kWh, é necessário saber o tempo de funcionamento da bomba (t_b) e a potência do conjunto moto-bomba, P_E , em kW. Assim, é possível calculá-la pela Equação 27.

$$E = P_E \cdot t_b \quad (27)$$

3.4.5 Estação de Tratamento de Água

Nesse contexto, são dimensionados: tratamento preliminar, tanque de coagulação, tanque de floculação, decantador, filtro, cama de desinfecção e tratamentos complementares. Para tanto, são trabalhados parâmetros como tempo de coagulação, tempo de floculação, tempo de detenção, taxas de filtração, dose de desinfetantes, entre outros pertinentes (SANTOS, 2013).

3.4.6 Reservatórios

Para o dimensionamento do volume de um reservatório, como citado a cima, é necessário saber o volume útil, o volume para combater incêndios e o volume para emergência. O cálculo do volume útil pode ser feito por meio do método que dispõe da curva de consumo, a curva de consumo varia de acordo com o tipo de adução, podendo ela ser contínua ou intermitente (TSUTIYA, 2006).

De acordo com AZEVEDO NETTO (1998), a vazão pode ser estimada para adução contínua, a qual é o caso de adução durante 24 horas ao dia, ou para adução intermitente cujo tempos de bombeamento podem variar, por exemplo, de 12 horas até 23 horas por dia.

Para o cálculo do volume para atendimento da variação normal de consumo ou volume útil (V_n) do reservatório, em m³, utiliza-se da equação:

$$V_n = \%CD \times Q \quad (28)$$

Em que Q é a vazão em m^3/dia e %CD é a diferença do volume de água quando o reservatório esta enchendo e esvaziando. Os percentuais de volume a mais e a menos devem ser iguais.

O volume para combater incêndios (V_n), segundo TSUTIYA, é de $0,0 \text{ m}^3$ para comunidades com reservatórios domiciliares e $61,38 \text{ m}^3$ para comunidades sem reservatórios domiciliares.

O volume de emergência pode ser calculado de diferentes formas segundo diferentes autores. Para o presente projeto o método utilizado será o proposto pela NBR 12217/94 e dado pela Equação 29.

$$V_e = 0,2.V_n \quad (29)$$

Assim, a capacidade máxima diária de um reservatório, em m^3 , é:

$$V_t = V_n + V_i + V_e \quad (30)$$

3.4.7 Rede de distribuição de água

O dimensionamento da rede de distribuição de água ocorre para redes ramificadas e redes em malhas, a partir da vazão que atende o dia e a hora de maior consumo (Q_2) (SANTOS, 2013).

3.5 Eficiência hidroenergética em sistemas de abastecimento de água

Atualmente, a eficiência hidroenergética ganhou atenção significativa de acadêmicos e da indústria devido aos impactos ambientais e econômicos associados com o consumo de água e energia.

Segundo PATTERSON (1996), eficiência energética remete à diminuição da utilização energia para produzir a mesma quantidade de serviços ou produtos úteis. Ele considera a mesma como um termo genérico, não havendo apenas um indicador quantitativo que se possa expressar a “eficiência energética” em todas as situações, mudando de acordo com os objetivos a serem alcançados e as ferramentas a serem aplicadas. Há inúmeros indicadores que permitem quantificar alterações na mesma. Por exemplo, no setor industrial, a eficiência energética pode ser mensurada pela quantidade de energia necessária para produzir uma tonelada de algum produto.

Enquanto a eficiência energética é, sem dúvidas, a maneira mais efetiva de ao mesmo tempo reduzir os custos e os impactos ambientais locais e globais. A conservação de energia reduz o consumo e posterga a necessidade de investimentos em expansão da capacidade instalada, sem comprometer a qualidade dos serviços prestados aos usuários finais (GOLDEMBERG, 2006). Segundo HERRING (2006) esses dois conceitos, geralmente, são utilizados como sinônimos, mesmo que tenham definições divergentes.

Algumas medidas como o uso de equipamentos e hábitos que provoquem o menor uso de energia, usufruindo do mesmo serviço prestado, podem ser tomadas, para que essa eficiência seja alcançada. O Plano Nacional de Energia 2030 (BRASIL, 2007) define essas medidas como “medidas de eficiência energética – MEE”.

A perspectiva brasileira de eficiência energética e conservação de energia pode ser resumida pela citação retirada do Plano Nacional de Energia 2030 (BRASIL, 2007).

O Brasil possui longo histórico de implantação de mecanismos de eficiência energética. Dentro de um processo de evolução natural, os atuais estudos energéticos do Governo Brasileiro tomam em conta uma estratégia de eficiência energética, objetivando definir metas, prazos e a perpetuação da energia conservada, embora existam dificuldades com levantamento de dados e com as atividades de monitoramento e verificação, com as quais se vem trabalhando no sentido de minimizá-las.

A situação típica dos SAA brasileiro e os obstáculos enfrentados pelos mesmos, como levantamento, monitoramento e verificação de dados afirmam a ideia adquirida pelo Plano Nacional de Energia 2030, de que os dados de monitoramento são fundamentais para conseguir criar sistemas mais eficazes para medir o parâmetro eficiência energética e o desempenho.

Quanto à eficiência hidráulica, o mesmo cenário de falta de informação, informações restritas aos seus próprios geradores, desarticuladas ou

incompletas, se repete, dificultando assim, a gestão dos sistemas de saneamento.

Para melhorar a sistematização das informações de ambos os setores, em 1996 foi criado o SNIS, ligado ao Programa de Modernização do Setor de Saneamento (PMSS), que coleta dados sobre a prestação de serviços de Água e Esgotos para disponibilizar informações com qualidade ao setor de saneamento (SNIS, 2016b).

Os indicadores de eficiência energética mais usuais nos serviços de abastecimento público, normalmente, são os de custo unitário da energia adquirida da concessionária (custo específico) e os que relacionam a energia consumida com o volume de água bombeado (consumo específico).

Especificamente quanto aos indicadores de eficiência hidroenergética, os mais usuais considerados são os de custo específico, ou seja, custo unitário de energia adquirida da concessionária e consumo específico (E/Q), que relaciona energia consumida com o volume de água bombeada (PROCEL SANEAR, 2005). Quanto ao custo específico, sua finalidade é indicar com que eficiência a empresa está adquirindo energia.

Já o consumo específico normalmente expressado em kWh/m³ (quilowatt hora por metro cúbico bombeado, ou metro cúbico produzido) costuma medir a performance do conjunto motor-bomba do sistema em termos de rendimento. Segundo TSUTIYA (2006), o consumo específico de energia em um SAA é da ordem de 0,6 kWh por m³ de água produzida, uma vez que valores elevados desse parâmetro pode significar perdas de carga excessivas.

De acordo com (PROCEL SANEAR, 2005), o consumo específico é um dos parâmetros mais importantes dos estudos que envolvem o uso racional de energia nas empresas em geral, pois ele facilita a apuração das economias e resultados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição do SAA sob estudo

O sistema escolhido para desenvolver as simulações, conforme atividade de contextualização apresentada em SANTOS (2013) atende a um município hipotético localizado em uma dada bacia hidrográfica. As características gerais desse cenário são apresentadas a seguir.

- Município do Vale Verde, situado no Paralelo 30, distante de 250 km da costa do oceano Atlântico estando, em média, 125 m acima do mar.
- A população atual do município é de 16.152 habitantes, sendo 9.268 residentes na área urbana, 5.334 residentes na área rural e aproximadamente 1.550 residentes ocupando uma área irregular, conforme censo recente. As perspectivas taxas geométricas de crescimento populacional são 3,0, 4,0 e 5,0%. A densidade populacional é maior na região central da área urbana, onde estão localizadas as principais partes dos serviços.
- O consumo per capita efetivo da região é de 100 L/hab.dia com um índice de perdas de 20% (considerado apenas as perdas físicas ou reais).

4.2 Apresentação do SAA

4.2.1 Configuração do SAA

O SAA, que atende a área urbana, é composto por uma captação superficial, três adutoras, uma estação de tratamento de água, um reservatório e uma rede de distribuição. A **Figura 1**, apresentada no item 3.2 desse trabalho representa graficamente a estrutura do sistema.

4.2.2 Estimativa de vazão do projeto

Para determinar a vazão do projeto, foi necessário primeiramente estimar a população. Considerando que o sistema a ser implantado tem cobertura prevista de 100% e o alcance do projeto será proposto para 15 anos a partir da implantação, o método utilizado para estimar a previsão populacional foi o método geométrico, **Equação 08**. Verificando o histórico populacional, encontraram-se várias taxas geométricas de crescimento, optando por escolher sempre a menor, já que essa taxa tende a diminuir.

Assim, com esses dados, calculou-se a população prevista para o alcance determinado.

Como é de conhecimento prévio o consumo per capita efetivo e o índice de perdas de água do município hipotético, determinou-se o consumo per capita total, por meio da **Equação 09**.

Relacionando os dados de crescimento populacional e consumo per capita por meio da **Equação 11**, determinou-se a vazão média diária durante um ano e assim, pela **Equação 12**, estimou-se a vazão média do dia de maior consumo do ano, usada para estimar a vazão nos trechos entre a captação e o reservatório.

4.2.3 Adoção da curva de consumo

A curva de consumo adotada para esse município hipotético, levando em conta que suas áreas são predominantemente residências e urbanas, foi proposta por LEME (1982) e esta representada pela Tabela 2.

Tabela 2. Curva de Consumo: Adução Contínua.

HORAS	CD%
0-2	3,35
2-4	3,35
4-6	5,00
6-8	9,20
8-10	12,05
10-12	11,70
12-14	12,05
14-16	10,80
16-18	11,70
18-20	9,60
20-22	6,20
22-24	5,00

CD%: Consumo Diário.

4.2.4 Dimensionamento do reservatório

Por meio do método da curva de consumo proposta, dimensionou-se a capacidade necessária para o reservatório do sistema. Primeiramente estimaram-se os volumes para atendimento da variação normal de consumo e volume de emergência por meio das **Equações 28 e 29**. Para o volume de

incêndio, usou-se o valor adotado por TSUTIYA (2006) como $V_i=61,38\text{m}^3$. Assim, pela **Equação 30** determinou-se o volume total do reservatório.

4.2.5 Dimensionamento do sistema elevatório

O método empregado para dimensionar a adutora por recalque desse sistema foi o método do diâmetro econômico. Por meio da Fórmula de Bresse, (**Equação 19**), esse diâmetro pôde ser estimado, adotando-se para este caso, o valor de $k=1,2$. Considera-se o diâmetro de recalque igual ao diâmetro econômico, e o diâmetro de sucção maior que o diâmetro de recalque. Calculou-se a velocidade do escoamento, a perda de carga unitária, a perda de carga contínua, a perda de carga localizada, perda de carga total e altura manométrica tanto para o diâmetro de sucção quanto para o diâmetro de recalque.

Utilizando a **Equação 23** determinou-se a velocidade de escoamento e com a **Equação 16** as perdas de cargas unitárias. Assim, utilizando desses dados foi estimado-se as perdas de cargas contínuas e localizadas por meio das **Equações 21 e 22**. Com o conhecimento prévio dos desníveis geométricos de recalque e sucção calculou-se a altura manométrica (**Equação 23**). A altura manométrica total do sistema elevatório foi estimada pela soma das alturas de recalque e sucção (**Equação 24**).

Para calcular a potência consumida pela bomba utilizou-se a **Equação 26**.

Para determinar a potência do conjunto todo, considerou-se que o motor utilizado funcionará com uma eficiência de 90% e aplicou-se a **Equação 25**.

Multiplicaram-se os resultados encontrados tanto para potência da bomba, como para potência do conjunto moto-bomba, por 0,735, para transformar a unidade de CV para kW.

4.2.6 Estimativa do parâmetro de consumo de energia

Utilizando da **Equação 27**, determinou-se a energia consumida por dia, pelo conjunto moto-bomba, dada em kWh.

4.3 Simulações

As simulações foram desenvolvidas a partir de variações do t_b , acompanhando o regime usual de operação de um SAA. Assim, os valores admitidos para os t_{b_s} foram 12, 14, 16, 18 e 20 horas.

Com relação ao regime usual de operação considerou-se a necessidade de evitar o bombeamento nos horários de maior tarifa de consumo de energia elétrica. Logo, para cada t_b simulado, foram apresentadas as horas de bombeamento ao longo do dia.

4.3.1 Tempo de bombeamento de 12 horas

O T_b de 12 horas foi distribuído conforme **Tabela 3**.

Tabela 3. Adução intermitente de 12h

HORAS	CD%	AD%
0-2	3,35	16,67
2-4	3,35	16,67
4-6	5,00	16,67
6-8	9,20	16,67
8-10	12,05	16,67
10-12	11,70	-
12-14	12,05	-
14-16	10,80	-
16-18	11,70	-
18-20	9,60	-
20-22	6,20	-
22-24	5,00	16,67

CD%: Consumo Diário.

AD%: Adução Diária.

4.3.2 Tempo de bombeamento de 14 horas

O Tb de 14 horas foi distribuído conforme **Tabela 4**.

Tabela 4. Adução intermitente de 14h.

HORAS	CD%	AD%
0-2	3,35	14,28
2-4	3,35	14,28
4-6	5,00	14,28
6-8	9,20	14,28
8-10	12,05	-
10-12	11,70	-
12-14	12,05	-
14-16	10,80	14,28
16-18	11,70	14,28
18-20	9,60	-
20-22	6,20	-
22-24	5,00	14,28

4.3.3 Tempo de bombeamento de 16 horas

O Tb de 16 horas foi distribuído conforme **Tabela 5**.

Tabela 5. Adução intermitente de 16h.

HORAS	CD%	AD%
0-2	3,35	12,50
2-4	3,35	12,50
4-6	5,00	12,50
6-8	9,20	12,50
8-10	12,05	12,50
10-12	11,70	-
12-14	12,05	-
14-16	10,80	12,50
16-18	11,70	12,50
18-20	9,60	-
20-22	6,20	-
22-24	5,00	12,50

4.3.4 Tempo de bombeamento de 18 horas

O Tb de 18 horas foi distribuído conforme **Tabela 6**.

Tabela 6. Adução intermitente de 18h.

HORAS	CD%	AD%
0-2	3,35	11,11
2-4	3,35	11,11
4-6	5,00	11,11
6-8	9,20	11,11
8-10	12,05	11,11
10-12	11,70	11,11
12-14	12,05	-
14-16	10,80	11,11
16-18	11,70	11,11
18-20	9,60	-
20-22	6,20	-
22-24	5,00	11,11

4.3.5 Tempo de bombeamento de 20 horas

O Tb de 20 horas foi distribuído conforme **Tabela 7**.

Tabela 7. Adução intermitente de 20h.

HORAS	CD%	AD%
0-2	3,35	10,00
2-4	3,35	10,00
4-6	5,00	10,00
6-8	9,20	10,00
8-10	12,05	10,00
10-12	11,70	10,00
12-14	12,05	10,00
14-16	10,80	10,00
16-18	11,70	10,00
18-20	9,60	-
20-22	6,20	-
22-24	5,00	10,00

4.4 Prospecção de relações entre variáveis

Após simulações concluídas, criaram-se gráficos no programa Microsoft Excel[®], versão 2010, os quais relacionam os dados adquiridos. Os gráficos gerados foram:

- Volume do reservatório x tempo de funcionamento da bomba
- Energia consumida x tempo de funcionamento da bomba
- Energia consumida x volume do reservatório
- E/Q x tempo de funcionamento da bomba
- E/Volume diário x tempo de funcionamento da bomba

4.5 Estudo Financeiro

Com os dados retirados das simulações para os diferentes t_b s, realizou-se uma análise de viabilidade financeira de implantação dos projetos para todos estes tempos, para assim identificar qual seria o t_b mais viável, ou seja, o que atingisse menores valores equivalentes anuais em reais. Consideraram-se para essa análise os parâmetros como custos de investimento o m^3 do reservatório e metro linear da tubulação. Para o custo operacional foi considerado e o kWh. O período considerado foi de 15 anos após implantação do projeto e o método de análise de investimento utilizado foi o Método do Valor Anual Uniforme Equivalente (VAUE).

De acordo com CASAROTTO & KOPITKE (2006), este método baseia-se em encontrar uma série uniforme equivalente a todos os custos e receitas para cada projeto utilizando a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), ou seja, achar uma série uniforme anual (A) equivalente ao fluxo de caixa dos investimentos observando a TMA. O projeto mais atrativo é aquele que tiver o maior VAUE positivo.

Para fazer essa análise foram escolhidas duas TMAs, a primeira de 10% ao ano e a segunda de 15% ao ano, para verificar se, para as duas taxas, o mesmo projeto ainda seria o mais interessante em termos econômicos.

Para converter as TMAs anuais em mensais, utilizou-se da Equação 31.

$$(1 + i) = (1 + im)^m$$

Sendo que:

i é a TMA do período maior;

im é a TMA do período menor;

m é o número de vezes que o período menor ocorre no período maior.

Para o estudo em questão, o m utilizado foi de 180 meses, já que o período considerado é de 15 anos e em cada ano têm-se 12 meses.

Para calcular as séries uniformes de pagamentos que iniciam no período 1 e terminam no período n usou-se a Equação 32.

$$P = A \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

Sendo que:

P é o principal ou capital na data de referência para início do projeto;

A é uma série uniforme de pagamentos (ou recebimentos) que inicia no período 1 e termina no período n ;

n é o número de períodos da série uniforme.

E então para calcular o valor total (A) a ser gasto após 15 anos utilizou-se da relação entre A e P .

$$A = P \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Assim encontrou-se o VAUE, em reais, referente à implantação de cada projeto e levando em conta, também, o quanto cada um gastaria de energia durante os 15 anos. Com os dados adquiridos criaram-se gráficos para melhor apresentação dos resultados.

4.5.1 Escolha do projeto para implantação

A partir dos resultados gerados pelo estudo econômico escolheu-se o projeto mais viável quanto ao VAUE, que considera o custo de implantação e os gastos de energia, para o período de 15 anos.

4.5.2 Avaliação do desempenho energético para o projeto escolhido

Para o projeto escolhido e a ser implantado, foram feitas simulações de como seria o funcionamento desse projeto implantado, caso seu tb ótimo fosse variado. O objetivo desta avaliação é averiguar qual seria o desempenho energético do sistema elevatório para outros tb_s no intuito de compará-los com o tb ótimo.

4.6 Etapas desenvolvidas durante o trabalho

Criou-se um diagrama para facilitar o entendimento dos procedimentos da metodologia proposta, exposto a seguir como Figura 5:

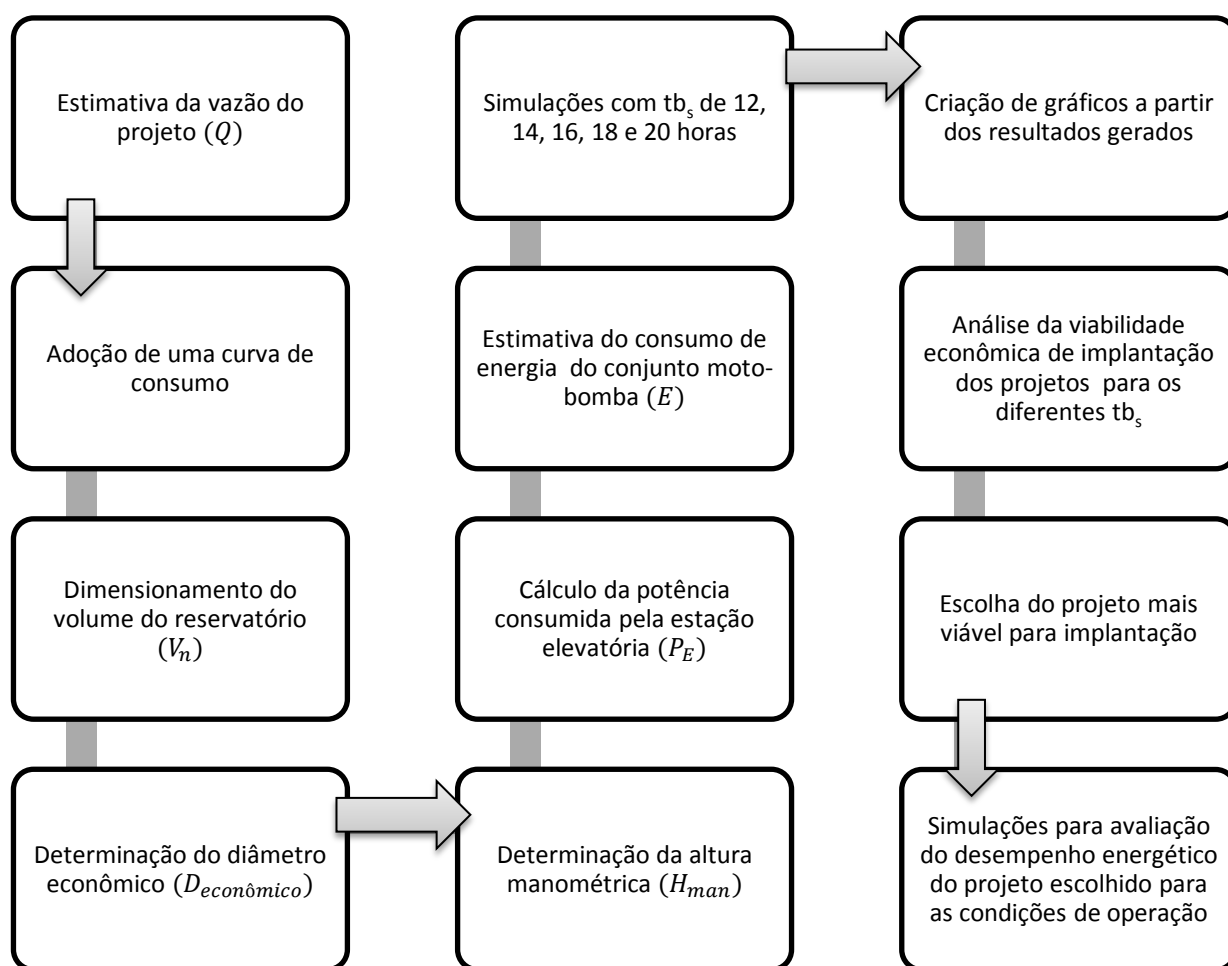


Figura 5. Diagrama da metodologia proposta

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os métodos descritos na seção 4, referentes aos materiais e métodos utilizados no trabalho, foram aplicados de modo a se determinar a vazão de projeto, o dimensionamento do volume do reservatório e do sistema elevatório e a estimativa de parâmetros de consumo de energia, para os tempos de bombeamento de 12, 14, 16, 18, 20 e 24 horas. Para cada tempo apresentaram-se os resultados preliminares e os resultados adquiridos com as simulações. Apresentaram-se também os resultados obtidos com o estudo econômico e os gráficos gerados.

5.1 Estimativa da população

Para determinar a população prevista para o alcance determinado e o consumo per capita os cálculos e resultados foram:

- População prevista para 15 anos:

$$P = 9.268(1 + 0,03)^{15} = 14.440 \text{ habitantes}$$

- Consumo per capita:

$$q_t = \frac{100 \text{ L/hab}}{(1 - 0,2)} = 125 \frac{\text{L}}{\text{hab. dia}}$$

5.2 Dimensionamento do sistema elevatório

5.2.1 Adução contínua

Foi considerada uma adução contínua durante 24 horas de um dia.

5.2.1.1 Estimativa da vazão do projeto

Para determinar a vazão do projeto, os cálculos e resultados foram:

- Vazão média durante um ano:

$$Q = 14.440 \text{ hab} \times 125 \frac{\text{L}}{\text{hab. dia}} = 18.050.000 \frac{\text{L}}{\text{dia}}$$

- Vazão média do dia de maior consumo do ano:

$$Q_1 = 18.050.000 \frac{L}{dia} \times 1,2 \times \frac{dia}{86.400s} = 25 \frac{L}{s}$$

5.2.1.2 Dimensionamento do reservatório

Para determinar a capacidade do Reservatório, os cálculos e resultados foram:

- Volume Útil:

$$V_n = 18,77\% \times 2.160 \frac{m^3}{d} = 405,36 \frac{m^3}{d}$$

- Volume de Emergência:

$$V_e = 0,2 \times 405 \frac{m^3}{d} = 81,07 m^3$$

- Volume Total Diário:

$$V_t = 405,36 + 61,38 + 81,07 = 547,81 m^3$$

Assim, para esse SAA com adução contínua de 24 horas, seria necessário implantar um reservatório com capacidade de 548 m³ para atender a toda a demanda do município.

5.2.1.3 Dimensionamento do sistema elevatório

Para o dimensionamento do Sistema Elevatório, os cálculos e resultados foram:

- Diâmetro econômico:

$$D_{econômico} = 1,2 \times \sqrt{0,025} = 0,19 m$$

O diâmetro comercial mais próximo é 0,200m ou 200 mm. Adotou-se, então, para o recalque o diâmetro de 200 mm e para a sucção o diâmetro de 250 mm. Porém, para os cálculos seguintes, utilizaram-se dos diâmetros internos, correspondentes aos diâmetros encontrados para a sucção e para o

recalque. Os valores foram retirados do catálogo de ferro fundido, tubo classe K7 – JGS, Pam. O catálogo utilizado está no Anexo I.

De acordo com o item 4.2.5, calcularam-se para esses dois diâmetros, todos os dados necessários para o cálculo da altura manométrica total do conjunto moto-bomba. Esses dados encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8. Altura manométrica para adução contínua.

Recalque/ Sucção (mm)	200	250
Velocidade (m/s)	0,63	0,42
J (mca/m)	0,002	0,0007
H _{pc} (mca)	0,09	0,005
H _{pl} (mca)	0,20	0,09
H _{pt} (mca)	0,29	0,09
H _{man} (mca)	39,29	5,09
H _{man Total} (mca)	44,38	

A eficiência da bomba foi consultada no catálogo da bomba KSB ETA cruzando os dados de vazão de projeto e de altura manométrica total. Assim, para esse conjunto encontrou-se uma eficiência de 71%. Os catálogos das bombas utilizadas estão no Anexo II.

Utilizando desses dados estimou-se a potência da bomba e a potência do conjunto moto-bomba.

- Potência da útil ou potência da bomba:

$$P_b = \frac{1.000 \times 0,025 \times 44,3830}{75 \times 0,71} = 20,84 \text{ CV ou } 15,33 \text{ kW}$$

- Potência do conjunto motor-bomba:

$$P_E = \frac{1.000 \times 0,025 \times 44,38}{75 \times 0,71 \times 0,9} = 23,15 \text{ CV ou } 17,03 \text{ kW}$$

5.2.1.4 Estimativa do parâmetro consumo de energia

A energia que a estação elevatória irá consumir, funcionando 24 horas por dia, será de:

$$E = 17,03 \text{ kW} \times 24 \text{ horas} = 408,68 \text{ kWh}$$

5.2.2 Adução intermitente

Foi seguida a mesma metodologia usada para os cálculos da adução contínua, porém variando os tempos de bombeamento. Para melhor apresentação dos resultados, os dados obtidos a partir das simulações foram organizados em tabelas. A Tabela 9 apresenta as vazões calculadas para cada tempo de bombeamento.

Tabela 9. Vazões de projeto para os diferentes t_{b_s}

Tb (Horas)	12	14	16	18	20
Q1 (m³/d)	4320	3702,86	3240	2880	2592

Os diferentes volumes encontrados para o reservatório foram organizados na Tabela 10.

Tabela 10. Volume do reservatório para os diferentes t_{b_s}

Tb (Horas)	12	14	16	18	20
Volume m³	3278,05	2354,19	1599,08	1097,03	810,99

As Tabelas 11 e 12 apresentam os resultados de diâmetro econômico e altura manométrica para bomba funcionando nos diferentes tempos.

Tabela 11. Altura manométrica para t_{b_s} de 12,14,16 horas.

Tb (Horas)	12		14		16	
Recalque/ Sucção (mm)	300	350	250	300	250	300
velocidade (m/s)	0,59	0,44	0,71	0,50	0,62	0,44
J (mca/m)	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001
H_{pc} (mca)	0,050	0,004	0,087	0,006	0,068	0,005
H_{pl} (mca)	0,18	0,10	0,26	0,13	0,20	0,10
H_{pt} (mca)	0,23	0,10	0,35	0,14	0,27	0,10
H_{man} (mca)	39,23	5,10	39,35	5,14	39,27	5,10
H_{man} Total (mca)	44,33		44,48		44,37	

Tabela 12. Altura manométrica para tb_s de 18 e 20 horas.

Tb (Horas)	18		20	
Recalque/ Sucção (mm)	250	300	250	300
velocidade (m/s)	0,55	0,39	0,50	0,35
J (mca/m)	0,001	0,001	0,001	0,0004
Hpc (mca)	0,055	0,004	0,045	0,003
Hpl (mca)	0,16	0,08	0,13	0,06
Hpt (mca)	0,21	0,08	0,17	0,07
Hman (mca)	39,21	5,08	39,17	5,07
Hman Total (mca)	44,29		44,24	

Seguindo a mesma metodologia usada na adução contínua, as eficiências encontradas, conforme catálogos da bomba KSB ETA, para cada estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13. Melhor eficiência para os diferentes tb_s

Tb (Horas)	12	14	16	18	20
Eficiência	0,79	0,78	0,76	0,79	0,76

E, assim, calcularam-se as potências para os diferentes tb_s . Os resultados estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Potência para os diferentes tb_s

Tb (Horas)	12	14	16	18	20
Pb(CV)	37,41	32,59	29,19	24,92	23,28
Pb (kW)	27,51	23,97	21,47	18,33	17,12
Pe (CV)	41,56	36,21	32,43	27,69	25,87
Pe (kW)	30,57	26,63	23,85	20,36	19,03

Os valores de energia gasta para cada caso estão organizados na Tabela 13.

Tabela 15. Energia consumida pelo conjunto elevatório para os diferentes tb_s

Tb (Horas)	12	14	16	18	20
Energia (kWh)	366,85	372,83	381,68	366,55	380,55

5.3 Definição do tb ótimo

Para definição do tb ótimo avaliou-se o seu comportamento em função dos parâmetros energia consumida, volume do reservatório, além dos indicadores eficiência hidroenergética (E/Q), E/V e a análise financeira.

5.3.1 Análise dos parâmetros

Para avaliar o comportamento do volume em função do t_b elaborou-se o Gráfico 1 apresentado a seguir.

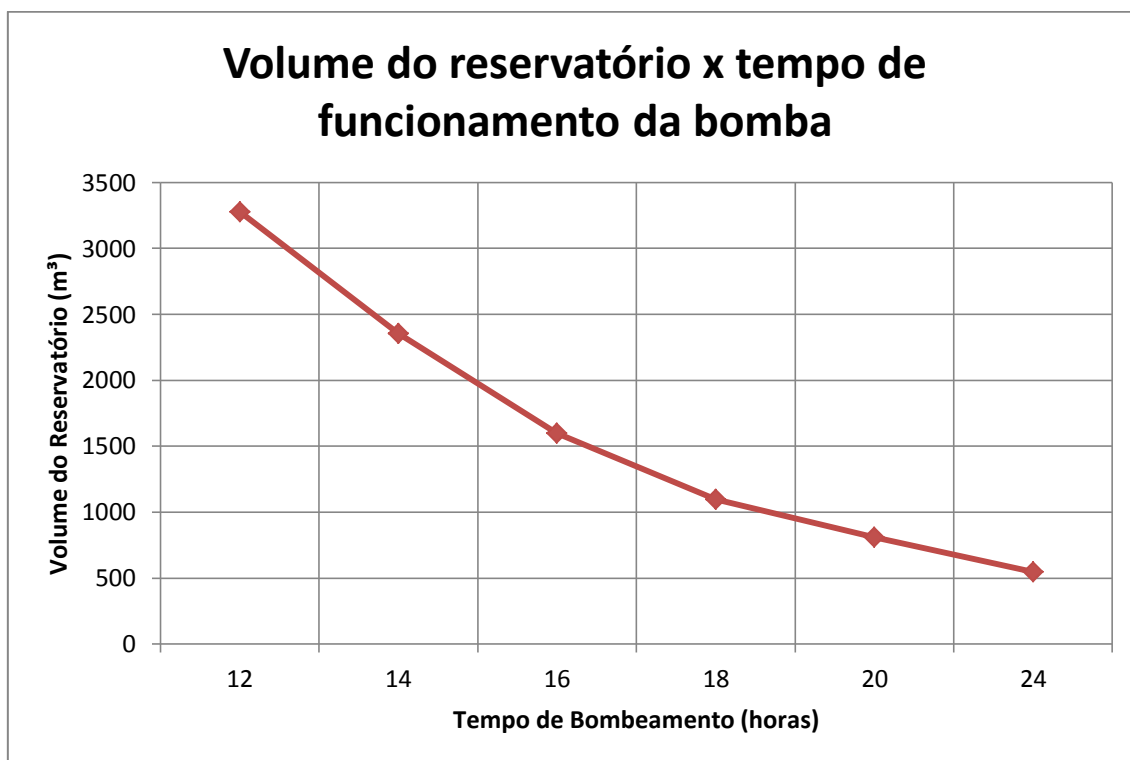


Gráfico 1. Volume do reservatório em função dos diferentes t_b s

Analisando o Gráfico 1 conclui-se que para bombas funcionando por menores períodos o tamanho do reservatório a ser construído deverá ser muito maior que para bombas funcionando por períodos maiores. Como o consumo requerido é o mesmo para todos os casos, o volume do reservatório estimado para $t_b=12$ horas será aproximadamente seis vezes maior que o reservatório estimado para $t_b=24$ horas. Ou seja, sistemas em que a bomba funcione por períodos maiores necessitam de menores volumes para armazenamento de água e assim o resultado encontrado para esses parâmetros condiz com o esperado.

Para avaliar o comportamento da energia consumida em função do t_b elaborou-se o Gráfico 2 apresentado a seguir.

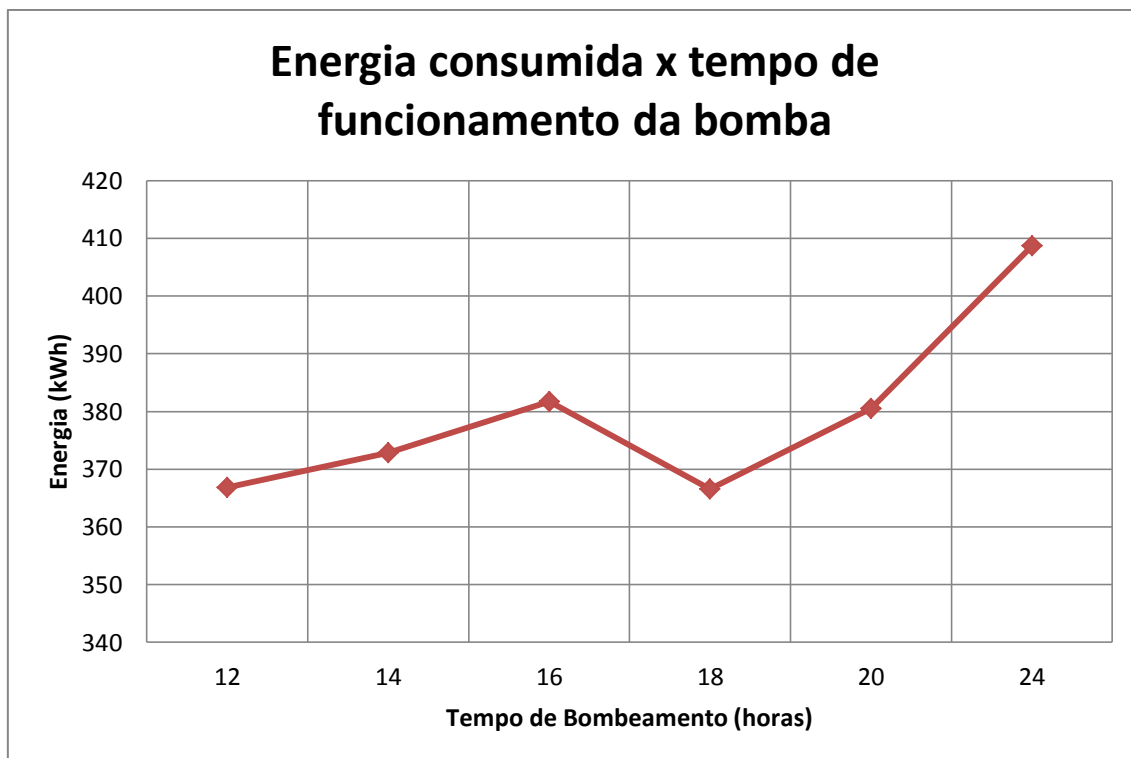


Gráfico 2. Energia consumida em função dos diferentes tbs

Quando o parâmetro energia gasta pelo conjunto moto-bomba foi analisado em função dos diferentes tbs , delineou-se o consumo de energia para cada tb . Todos os tbs foram examinados particularmente, para então encontrar a maior eficiência correspondente a cada caso. Nos tbs de 12 e 18 horas os resultados obtidos foram os mais satisfatórios em termos de consumo de energia, já que as eficiências adquiridas no catálogo da bomba KSB ETA para esses tempos foram as mais altas, alcançando os 79%. Assim nos mesmos tempos obtiveram-se os menores consumos de energia, sendo para $tb=12$ horas a energia gasta em um dia igual a 366,85 kWh e para $tb=18$ horas a energia gasta no mesmo dia igual a 366,55 kWh.

Para avaliar o comportamento da energia consumida função do volume do reservatório elaborou-se o Gráfico 3 apresentado a seguir.

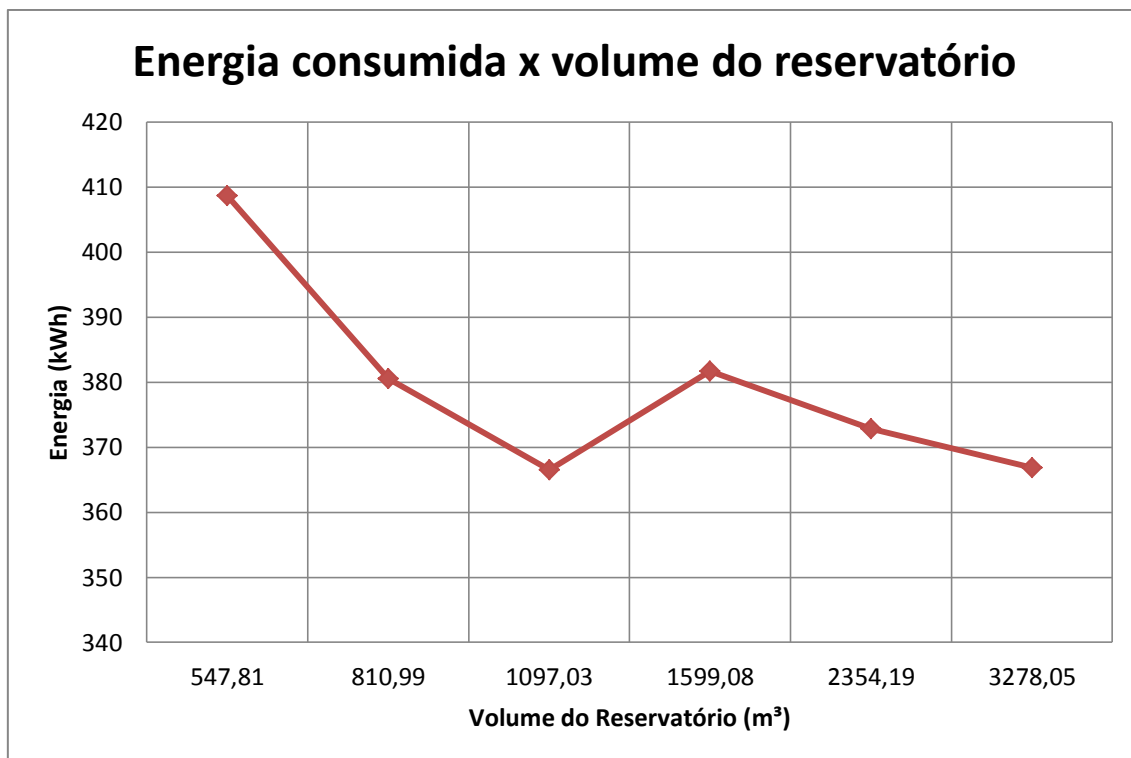


Gráfico 3. Energia consumida em função dos diferentes volumes do reservatório

Os resultados obtidos com o Gráfico 3 afirmam os resultados obtidos pelo Gráfico 2, já que os volumes de reservatórios que obtiveram melhores resultados quanto ao consumo de energia foram os reservatórios correspondentes ao $t_b = 12$ e $t_b = 18$ horas. Assim, conclui-se que para diferentes volumes de reservatório, diferentes níveis de energia estão sendo consumidas, resultando em um comportamento não linear da função que expressa a relação entre o consumo de energia e o volume do reservatório. Percebe-se também, que novamente a eficiência energética do conjunto motor bomba foi o parâmetro que mais influenciou para esse resultado.

Para avaliar o comportamento do parâmetro eficiência hidroenergética em função do t_b o Gráfico 4 foi elaborado e apresentado a seguir.

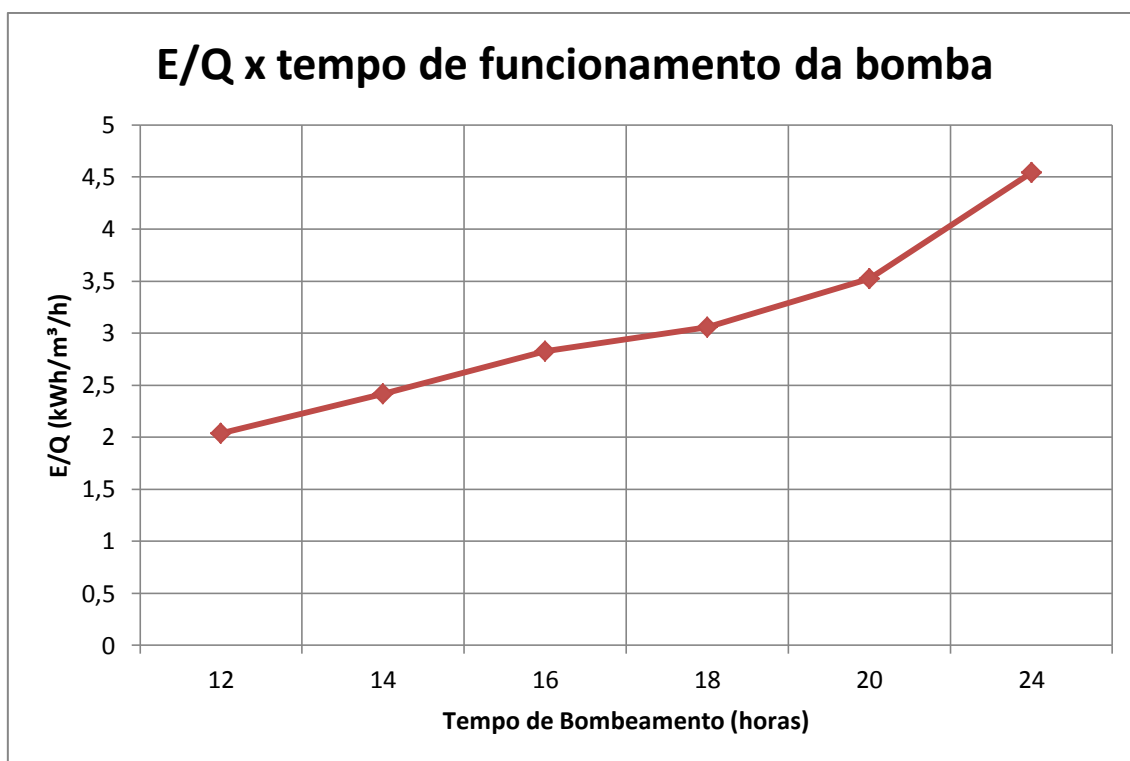


Gráfico 4. Parâmetro E/Q em função dos diferentes t_{b_s}

É possível concluir por meio do Gráfico 4 que quanto menor for o t_b , menor será o valor correspondente ao consumo específico em função da vazão bombeada. Isso significa que quanto menor o valor desse índice, menor energia está sendo consumida por metro cúbico bombeado. Deduziu-se então, a partir desses resultados, que o projeto de $t_b=12$ horas funcionaria com uma melhor consumo de energia elétrica, já que neste tempo, esse critério está atingindo valores mais baixos que nos t_{b_s} de 14, 16, 18, 20 e 24 horas.

O projeto de $t_b=24$ horas apresenta o maior índice para o parâmetro em questão. Isso ocorreu devido aos grandes gastos de energia apresentados pelo mesmo.

Já para avaliar o comportamento do parâmetro E/Volume diário em função do t_b o elaborou-se o Gráfico 5 e apresentado a seguir.

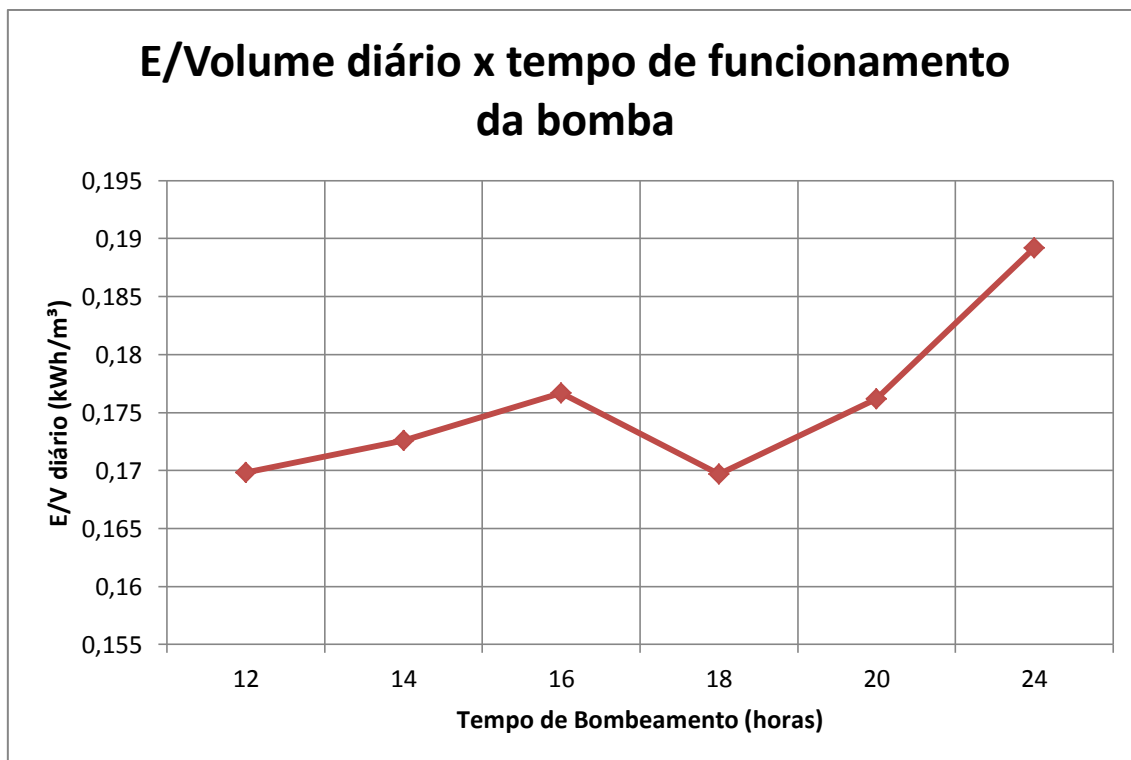


Gráfico 5. Parâmetro E/V diário em função dos diferentes t_{b_s}

O parâmetro E/Volume diário tem o intuito de representar um valor correspondente ao consumo específico em função do volume diário requerido pelo município hipotético (2160 m³ de água por dia). É possível notar que o comportamento desse gráfico é semelhante aos Gráficos 02 e 03. Isso ocorre pelo fato de novamente a eficiência da bomba ser o parâmetro que mais influencia nos resultados.

De acordo com o Gráfico 5, os t_{b_s} de 12 e 18 horas apresentam menores índices referentes ao consumo específico em função do volume diário requerido, ou seja, tem um consumo de energia menor que os outros t_{b_s} . Já o $t_{b_s}=24$ horas apresenta um índice elevado se comparado com os de 12 e 18 horas, isso ocorre devido ao grande consumo de energia, causado por uma baixa eficiência do conjunto motor-bomba, quando comparado aos t_{b_s} de 12 e 18 horas.

5.3.2 Análise econômica

Para o parâmetro preço do m³ do reservatório em reais, utilizou-se um orçamento realizado em dezembro de 2011, pelo departamento municipal de água e esgoto da prefeitura municipal de Poços de Caldas, para um reservatório de 1000 m³. A Planilha de orçamento estimativo está em Anexo III.

Segundo o departamento de água e esgoto esse reservatório foi orçado um valor de 599.018,15 reais. Para fazer a análise econômica utilizou-se esse valor dividido por 1000, para assim ter um valor base para o preço do m³ de um reservatório.

Quanto à energia, o preço do kWh foi consultado no site da COPEL, Companhia Paranaense de Eletricidade. A tarifa utilizada foi da classe de serviços públicos B3 convencional, com impostos como ICMS, PIS e COFINS já inclusos no custo.

Para o parâmetro preço do metro das tubulações tanto de recalque como de sucção, os valores foram retirados de uma planilha de orçamento disponibilizada pela empresa CONSULT Engenharia Ltda, em Anexo IX. O preço das tubulações aparece para cada 3 metros, assim para essa análise o valor presente nessa planilha para os DN_s 200, 250, 300 e 350 foram divididos por 3, para ter um valor base do preço do metro para cada DN requerido por cada tb.

A Tabela 16 detalha os valores utilizados como parâmetros para a análise da viabilidade econômica e a Tabela 17 apresenta os cálculos prévios utilizados no VAUE.

Tabela 16. Valores estipulados para os parâmetros utilizados na análise econômica

Parâmetro	Valor em reais (R\$)
Preço do m³ de um reservatório (R\$/m³)	599,02
Preço do kWh R\$/kWh	0,64
Preço do metro da tubulação DN 200 R\$/m(200)	70,98
Preço do metro da tubulação DN 250 R\$/m(250)	85,95
Preço do metro da tubulação DN 300 R\$/m(300)	104,12
Preço do metro da tubulação DN 350 R\$/m(350)	122,71

Tabela 17. Cálculo dos parâmetros para os diferentes Tb_s

Tb	12	14	16	18	20	24
R\$ do reservatório	1.963.612,06	1.410.202,03	957.880,34	657.139,68	485.795,57	328.149,33
R\$ tubulação	5.440,25	4.510,79	4.510,79	4.510,79	4.510,79	3.724,94
R\$ energia gasta por mês	7.103,26	7.219,02	7.390,46	7.097,55	7.368,57	7.913,31

Com base na Tabela 16 calculou-se o VAUE. Os valores encontrados tanto para A quando para P, com taxas de 10% e 15% ao ano estão organizados na Tabela 18.

Tabela 18. P e A com taxas de 10% e 15% ao ano para os diferentes Tb_s

Tb	12	14	16	18	20	24
P (10%)	677.539,87	688.581,37	704.934,37	676.994,81	702.845,69	754.806,16
A (10%)	347.957,55	276.528,03	219.209,58	175.996,75	156.868,21	142.869,98
P (15%)	531.827,15	540.494,05	553.330,15	531.399,31	551.690,66	592.476,44
A (15%)	452.612,49	359.699,17	285.141,09	228.931,17	204.049,35	185.840,88

Os gráficos 6 e 7 apresentam os VAUE para as respectivas taxas.

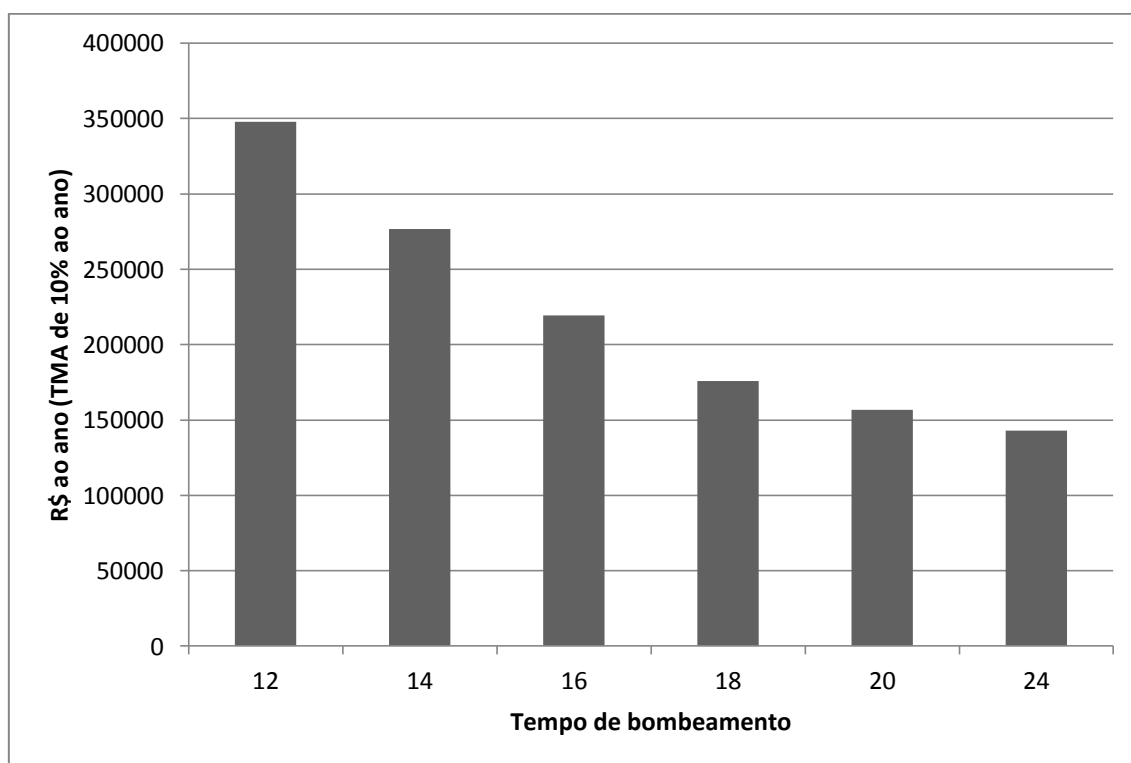


Gráfico 6. VAUE com juros de 10% ao ano

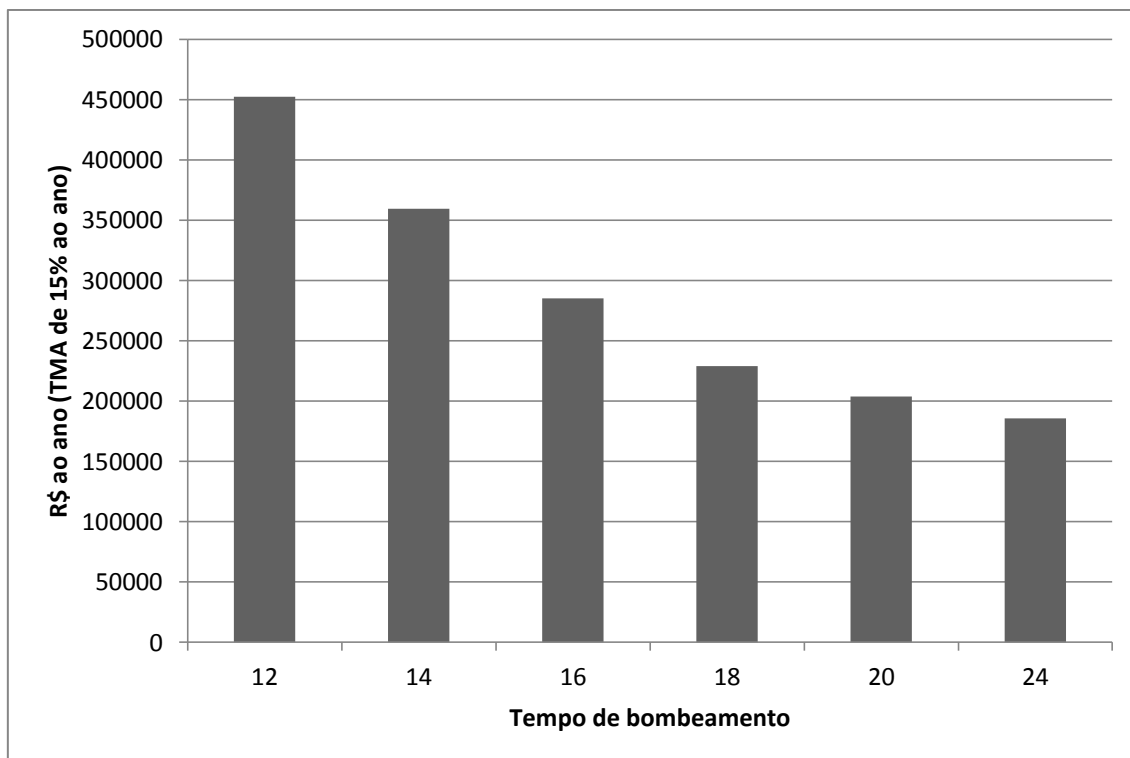


Gráfico 7. VAUE com juros de 15% ao ano

Se fossem analisados apenas os parâmetros preço para implantação do reservatório e gasto com tubulações, sem considerar a energia gasta pelo conjunto moto-bomba, o projeto mais viável seria o com tb de 24 horas, pois seriam gastos 331.874,27 reais para sua implantação. Se contraposto esse valor com o valor dos gastos para implantação do projeto de tb=12 horas (projeto com o preço de implantação mais elevado), a economia gerada seria na ordem de 1.637.178,62 reais.

Se, em contrapartida, apenas o parâmetro energia gasta pelo conjunto motor-bomba fosse analisado, o projeto com tb=18 horas seria o mais econômico, mesmo que o projeto com tb=12 horas tivesse resultados muito próximos ao de tb=18 horas. Os gastos com energia elétrica em kWh, no período de 15 anos, de ambos os projetos seriam equivalentes a 1.278.587,29 e 1.277.558,70 reais para os tb_s de 12 e 18 horas, sem considerar as TMA_s. O projeto de tb=24 horas, proporcional ao projeto com maiores índices de consumo de energia, no mesmo período, gastaria aproximadamente 1.424.396,70 reais.

A partir dos resultados mostrados pelos Gráficos 10 e 11, em que todos os parâmetros foram unidos e considerando também as TMA_s, inferiu-se que a

melhor escolha de projeto para implantação, tanto com taxa de 10% ao ano como de 15%, seria o projeto em que a bomba funcionasse por 24 horas. Como a análise foi feita considerando um período de 15 anos, notou-se que a diferença do valor, em reais, de energia consumida nos diferentes projetos é de uma ordem muito menor que a diferença do valor, em reais, gasta para implantar os mesmos projetos.

Assim, é possível concluir a partir dos resultados gerados pela análise econômica para esses dados, que a diferença gasta na implantação do projeto com menor custo de reservatório e tubulação não seriam supridas pelos maiores gastos de energia ao longo desse mesmo período.

5.4 Avaliação do desempenho energético para o Tb ótimo

A partir dos resultados obtidos com a análise econômica, concluiu-se que para implantação, o projeto mais viável seria o de $t_b=24$ horas. Assim, usando a mesma metodologia anterior, obtiveram-se respostas de como seria o funcionamento dos parâmetros desse projeto fora do seu tempo ótimo (24 horas). Os resultados estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19. Desempenho do projeto implantado

Tb	12	14	16	18	20	24
Vazão m³/dia	4320,0000	3702,8571	3240,0000	2880,0000	2592,0000	2160,0000
Vazão m³/s	0,0500	0,0429	0,0375	0,0333	0,0300	0,0250
Volume do reservatório (m³)	547,8120	547,8120	547,8120	547,8120	547,8120	547,8120
Hman Total (mca)	45,4951	45,1043	44,8494	44,6739	44,5479	44,3830
Energia	-	-	-	369,7059	383,2157	408,6844

É possível notar que não há resultados para o consumo de energia do conjunto moto-bomba nos tempos de 12, 14 e 16 horas. Isso ocorreu devido ao fato da curva da bomba KSB ETA usada para o caso de 24 horas não exibir informações sobre a eficiência nesses intervalos.

Quanto ao consumo de energia nos tbs de 18 e 20 horas, os valores encontrados foram satisfatórios, sendo as eficiências usadas para os respectivos tempos, iguais a 79% e 76%.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O dimensionamento otimizado do SAA para o município hipotético em questão, foi gerado para os diferentes regimes de adução ($t_b = 12, 14, 16, 18, 20$ e 24 horas). Dimensionou-se, para cada caso, um volume de reservatório, de modo a atender o consumo diário requerido, e uma estação elevatória que atendesse aos parâmetros calculados para cada t_b .

Como era esperado, o t_b é inversamente proporcional ao volume do reservatório. Ou seja, quanto maior é o período de funcionamento da bomba, menor é o volume requerido para reservação da água. Entretanto, quanto maior o volume do reservatório, maiores são os custos com sua implantação.

Para os diferentes pares de parâmetros (vazão versus altura manométrica total), encontraram-se diferentes eficiências da bomba centrífuga, utilizada na estação elevatória. Como concebido na revisão da literatura deste trabalho, quanto maior a eficiência da bomba, melhor é o desempenho quanto a fatores energéticos do sistema motor-bomba da estação.

A eficiência energética da bomba é um parâmetro importante para a tomada de decisão durante a elaboração e análise de projetos de SAA, pois quanto maior sua porcentagem, maior é a economia com gastos de energia da empresa de saneamento, afetando diretamente na conta do consumidor.

Observou-se que os t_{b_s} que tiveram a bomba centrífuga funcionando com um percentual de eficiência maior, também tiveram os melhores resultados quanto ao consumo de energia.

A análise econômica, para o período de alcance do projeto estimando para este trabalho (15 anos), mostrou que o parâmetro mais influente na escolha do projeto, quanto à viabilidade econômica, foi o volume do reservatório. Para este caso, os valores estimados quanto ao preço de implantação seriam de uma ordem muito maior que os valores estimados para os gastos de energia, mesmo que esses gastos tenham sido considerados como eventos contínuos durante todo o período e a implantação um evento único.

Os resultados alcançados se basearam nos procedimentos definidos por bibliografias reconhecidas e normas técnicas vigentes a projetos de saneamento, portanto, as simulações realizadas e apresentadas neste trabalho

mostraram a viabilidade de sua aplicação no setor de engenharia das empresas de saneamento urbano.

Prospectando novas simulações, fatores que mudariam os rumos dos resultados seriam parâmetros como outros cenários para implantação do projeto, com maiores escalas referente à população e vazão consumida, o período do projeto e o decaimento do rendimento do conjunto motor-bomba ao longo dos anos. Por exemplo, se a vazão requerida pelo município hipotético aumentasse significativamente, o parâmetro consumo de energia poderia vir a ser mais importante quando a viabilidade econômica do projeto, que o volume do reservatório.

Desta forma, conclui-se que a promoção da eficiência hidroenergética em SAA tem papel fundamental, tanto para o desenvolvimento sustentável de cidades como para redução dos custos de implantação. E diante do cenário exposto, de preocupação com ambos esses recursos, a tomada de medidas que vissem atingir essa eficiência hidroenergética em SAA são essenciais.

7 BIBLIOGRAFIA

ALLIANCE. Aliança para Conservação de Energia. **Água e energia: Aproveitando as oportunidades de efficientização de água e energia não exploradas nos sistemas de água municipais**. PROCEL/ELETROBRAS. Rio de Janeiro, 2002

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12211**: estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água. Rio de Janeiro: ABNT, 1992a.

AZEVEDO NETTO, J. M. et al., **Planejamento de Sistemas de Abastecimento de Água**, Universidade Federal do Paraná/Organização Pan-Americana da Saúde, Curitiba, 1973.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F. ; ARAÚJO, R. ; ITO, A, E. ; **Manual de hidráulica**. 8. Ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1998.

BRASIL. **Portaria nº 1469 de 29 de dezembro de 2000 do Ministério da Saúde**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: MME; EPE, 2007.

CASAROTTO, N.; KOPITKE, B. H. **Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2006.

CLINGENPEEL, W.H. **Optimizing pump operating cost**, Journal of American Water Works Association, v. 75, n. 10. 1983.

Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução do CONAMA**: resoluções vigentes publicadas entre julho de 1984 e novembro de 2008. 2 ed. Brasília: CONAMA, 2008.

COPEL. Companhia Paranaense de Energia. Disponível em <<http://www.copel.com>> acessado em 9 de novembro de 2016.

GOMES, H. P. **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento**: Análise Econômica de Projetos. ABES, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, 2005.

GOMES, A. S. **Seminário de gestão do uso de energia elétrica no saneamento**: Importância e dimensões do problema. AESBE- Associação brasileira das empresas estaduais de saneamento. Rio de Janeiro, 2013.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia e meio ambiente no Brasil**, Estudos Avançados 21 (59), 2007.

HERING, H. **Energy efficiency – a critical view**. Energy, Amsterdam, v. 31, 2006.

LEME, F. P. **Engenharia do saneamento ambiental**, LTC – Livros técnicos e científicos, 1982.

PATTERSON, M. **What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological 262 issues**. Energy Policy, Amsterdam, v. 24, n. 5, 1996.

Prefeitura Municipal de Poços de Caldas. Disponível em <<http://www.pocosdecaldas.mg.gov.br/site/>> acessado em 07 de outubro de 2016.

PROCEL SANEAR. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 2005.

SANTOS, D. C. **Caderno de Saneamento Ambiental**. Volume I: Sistema de Abastecimento de Água. UFPR. Curitiba, 2013.

SNIS. **Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto - 2011**. Sistema Nacional de Informação sobre o Saneamento. Brasília, junho de 2013.

SNIS. **Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto - 2014**. Sistema Nacional de Informação sobre o Saneamento. Brasília, fevereiro de 2016a.

SNIS. Sistema Nacional de Informação sobre o Saneamento. Ministério das cidades. Disponível em <<http://www.snis.gov.br/>> Acessado em 20 de novembro de 2016b.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. 4 ed. São Paulo, 2006.

TSUTIYA, M.T. **Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água**, 1a ed., São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

UNITED STATES EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. **The United Nations world water development report 3: Water in a changing world**. Paris: UNESCO, 2009.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2010

**ANEXO I – CATÁLOGO DE FERRO FUNDIDO, TUBO CLASSE K7 – JGS,
PAM**

ANEXO II – CATÁLOGO UTILIZADO DA BOMBA KSB ETA

**ANEXO III – PLANILHA DE ORÇAMENTO ESTIMATIVO DE UM
RESERVATÓRIO**

**ANEXO IV – ORÇAMENTO DISPONIBILIZADO PELA EMPRESA CONSULT
ENGENHARIA LTDA**