

ESTIMATIVA EXPEDITA DE VOLUMES DE RESERVATÓRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Aline Frederice⁽¹⁾

Engenheira da Divisão de Planejamento, Gestão e Desenvolvimento Operacional da Produção – MAGG – Unidade de Negócio de Produção de Água – MA - Sabesp – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

Kamel Zahed Filho⁽²⁾

Engenheiro da Divisão de Planejamento, Gestão e Desenvolvimento Operacional da Produção – MAGG – Unidade de Negócio de Produção de Água – MA - Sabesp – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

Viviana Marli Nogueira de Aquino Borges⁽³⁾

Gerente da Divisão de Planejamento, Gestão e Desenvolvimento Operacional da Produção – MAGG – Unidade de Negócio de Produção de Água – MA - Sabesp – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

Endereço ⁽¹⁾ Rua Costa Carvalho, 300, Pinheiros, São Paulo, São Paulo CEP 05409-010 Brasil Tel. +55(11) 3388-8962 e-mail - afrederice@sabesp.com.br

RESUMO

O cálculo do volume útil necessário para um reservatório de distribuição de água pode ser feito através do balanço hídrico entre as vazões de adução e as vazões do consumo do setor de distribuição, ao longo do dia, armazenados na base de dados históricos disponível. Com base nos resultados do dimensionamento de reservatórios do Sistema Adutor Metropolitano (SAM) da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), foi efetuada uma análise de correlação entre os volumes úteis necessários obtidos e as vazões médias de consumos dos setores. A partir da regressão linear obtida, é possível se fazer uma estimativa do volume útil necessário de reservatórios que não possuam dados de vazão de adução reais, quer seja por serem novos reservatórios ou por não possuírem registros históricos de dados operacionais. Os volumes estimados foram comparados ao método de Frühling, que ainda é utilizado por alguns projetistas, e conclui-se que as equações obtidas para o dimensionamento de volumes úteis de reservatórios setoriais de distribuição de água são bastante robustas para serem utilizadas como um método expedito. O método de Frühling mostrou-se muito conservador com superestimativas de 38% a 87% quando comparado com o método aqui descrito.

PALAVRAS-CHAVE: reservatório setorial, dimensionamento, volume útil.

INTRODUÇÃO

Os reservatórios de distribuição de água tratada têm a função de regularizar as vazões aduzidas provenientes das estações de tratamento de água, em função das variações dos consumos do setor abastecido pelo reservatório, ao longo do dia.

O Sistema Adutor Metropolitano (SAM) da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) abrange uma área de 8.051km² e abriga uma população aproximada de 20 milhões de habitantes, distribuída por 39 municípios. Existem 155 centros de reservação setorial, com um volume total de 1,8 milhões de m³. Como toda região urbana, existe um dinamismo de alterações de ocupação populacional e de seus hábitos de consumo de água. Desta forma, é necessário um acompanhamento contínuo dos volumes disponíveis, para se planejar eventuais expansões de capacidades ou criação de novos setores de abastecimento.

A disponibilidade de volumes de regularização adequados permite otimizar o controle da adução, garantindo atendimento pleno dos setores e com redução de custos de energia. Em situações de contingências que envolvam uma adutora ou conjunto delas, a flexibilização da adução é facilitada quando os reservatórios setoriais estão bem dimensionados.

O diagnóstico da reservação deve ser feito a intervalos anuais ou bienais, para se poder priorizar as necessidades de ampliação de reservação em setores mais críticos.

Desta forma, existe um monitoramento contínuo das necessidades de reservações setoriais no SAM. Para isto, foi desenvolvido um aplicativo para o dimensionamento dos volumes úteis necessários, com base no método do balanço hídrico, descrito com mais detalhes adiante.

O volume útil necessário para um reservatório de distribuição depende do comportamento das variações dos consumos ao longo do dia e da regra de adução adotada para alimentação do reservatório.

Os reservatórios de distribuição são dimensionados para um ciclo de enchimento e esvaziamento de um dia. Quando se conhecem os dados de consumos de um setor, é possível fazer um cálculo mais preciso, levando em consideração os dias mais críticos de consumos.

O reservatório de distribuição é operado de forma a complementar as vazões aduzidas ao reservatório, quando o consumo do setor é superior à vazão de adução afluyente ao reservatório (horas de grandes consumos) e armazenar água nos demais períodos.

Na Norma Brasileira NBR 12217 – “Projeto de Reservatório de Distribuição de Água para Abastecimento Público – Procedimento” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1994), não há uma indicação direta de como se pode estimar esses volumes, mas apenas uma orientação. No item 5.1.2 está descrito: “O volume necessário para atender às variações de consumo deve ser avaliado a partir dos dados de consumo diário e do regime de alimentação do reservatório, aplicado um fator de segurança de 1,2, para levar em conta as incertezas nos dados utilizados.”

Vale ressaltar que os volumes referenciados na norma e neste trabalho são os volumes úteis dos reservatórios. Um reservatório de distribuição setorial de água opera entre limites operacionais, conforme ilustrado na Figura 1.

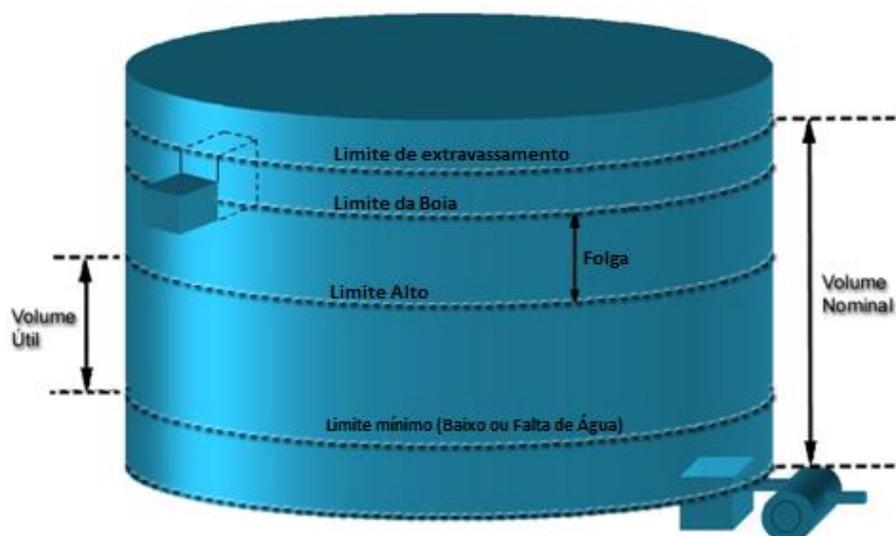


Figura 1: Limites operacionais de um reservatório de distribuição setorial de água.

O volume total ou nominal do reservatório é aquele compreendido entre o fundo do reservatório e o limite de extravassamento. O volume útil do reservatório é aquele compreendido entre o limite mínimo operacional e o limite máximo operacional (ou limite alto). A determinação destes limites é feita com base em critérios estatísticos de segurança, de características hidráulicas da saída do reservatório e dos equipamentos a ela associados e com base em ensaios de campo, para casos específicos. Não cabe detalhar esses cálculos, neste texto.

Normalmente, operam-se os reservatórios em ciclos diários. Ao longo do dia, há duas operações teóricas possíveis. Na primeira, assume-se que as vazões de adução sejam constantes ao longo de todo o dia. Isto ocorre quando o

reservatório é aduzido por gravidade. Na segunda, quando os reservatórios são alimentados por aduções oriundas de estações elevatórias, admite-se que as vazões sejam constantes nos períodos de custo de energia normal e que não recebam água no período de tarifas mais elevadas. Atualmente, o chamado horário de pico, em que a energia é mais cara em alguns contratos, se estende das 17:30 às 20:30. Quando o reservatório é aduzido por uma estação elevatória, cujos custos de energia elétrica não são variáveis ao longo das horas do dia, pode ser considerado, para efeito de cálculo de volume útil, como se fosse aduzido por gravidade, isto é, as vazões de adução são constantes ao longo de todo o tempo.

No Sistema Adutor Metropolitano (SAM), há vários reservatórios existentes, cujos volumes úteis necessários são avaliados com a técnica do balanço hídrico, utilizando as séries históricas, para verificar sua adequação aos padrões de consumos de seus setores.

Admite-se que o reservatório esteja cheio, às 6:00 e que o ciclo de enchimento e esvaziamento seja de 24 horas. Para cada dia, determina-se o maior deplecionamento calculado que é igual ao volume que o reservatório deveria ter armazenado às 6:00, para suprir os consumos horários, mantendo as vazões de adução constantes (regra 1 ou 2).

Com a disposição de uma série de dados de consumos horários, que contemple um período suficiente para representar as sazonalidades dos consumos (em geral, um ano de dados), repete-se o cálculo diariamente, o que resulta em uma quantidade de resultados de volumes necessários igual ao número de dias da série histórica. Esses valores são colocados em uma curva de frequência, de onde se escolhe o volume necessário associado a uma certa garantia. Normalmente, tem-se utilizado, uma garantia de 95% para o dimensionamento.

Como consequência do tipo de adução, se por gravidade ou por bombeamento, com tarifas de energia variáveis para horas de pico, os resultados dos cálculos dos volumes úteis para estes reservatórios aduzidos por bombeamento são superiores àqueles aduzidos por gravidade. Desta forma, foram calculados pelo método do balanço hídrico os dois volumes para cada setor, independentemente de sua forma de adução, apenas para gerar as informações para esta técnica empírica aqui apresentada.

Quando não se dispõe de uma série histórica de consumos, como em setores em fase de projeto, é necessário que se faça uma estimativa do volume útil necessário, de uma forma indireta.

Para se estimar um reservatório de um setor novo, pode-se fazer uma estimativa com base em algum setor existente, com características de ocupação semelhantes (densidade populacional, perfil sócio econômico, distribuição de consumos residenciais sobre o total etc.) e proporcionar o volume útil com as relações entre os consumos do setor existente e do setor “análogo” existente.

Uma outra alternativa, que será apresentada adiante, propõe equações empíricas, obtidas com os volumes úteis já calculados para os setores existentes do SAM. Essa forma, bastante expedita, pode ajudar em outras localidades que não dispõem de dados para comparação.

Como toda técnica empírica e expedita, o grau de precisão dos resultados não pode ser comparado com aqueles obtidos com base em dados reais.

Um método bastante antigo, mas ainda utilizado por alguns projetistas, é a estimativa do volume útil baseado numa relação proposta por Frühling (CETESB, 1976). Neste método, adota-se uma relação em que o volume útil necessário de um reservatório de distribuição setorial de água é igual a 1/3 do volume consumido pelo setor em um dia crítico (dia de maior consumo). Este método será detalhado no capítulo de Metodologia.

Os resultados obtidos com as equações empíricas aqui propostas serão comparados àqueles calculados pela expressão de Frühling.

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar duas equações empíricas para obtenção do volume útil de um reservatório de distribuição setorial de água, para os casos com adução constante (por gravidade) e adução por bombeamento (com vazão de adução nula no período de pico da tarifa de energia).

Como objetivo secundário, propõe-se comparar os resultados obtidos com aqueles derivados com a regra de Frühling.

DADOS UTILIZADOS

Foram utilizados os dados de 140 reservatórios setoriais do SAM, analisados com dados de 2019. Os dados dos consumos foram obtidos a intervalos horários. Os volumes utilizados são aqueles obtidos pelo método do balanço hídrico, para os dois casos de regras de operação: adução por gravidade e adução por bombeamento.

METODOLOGIA UTILIZADA

A regra de Frühling foi obtida a partir de uma série de hipóteses simplificadoras, em função da ausência de dados operacionais de consumos, diferente de quando se tem sistemas automatizados, com operações feitas com SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), onde as variáveis do processo são medidas continuamente e, por telemetria, são transferidas a uma central de operações, onde são posteriormente armazenadas em bancos de dados.

O trabalho mais antigo a que se pôde ter acesso foi apresentado por Malta (MALTA, 1939). Segundo o autor, o método foi desenvolvido em 1926 e havia se tornado norma nos projetos de distribuição de água em São Paulo.

A curva de consumo de um setor foi representada por uma senoide, cujo máximo valor é igual à máxima vazão horária (adotada como sendo 1,5 vezes a vazão média). A vazão mínima de consumo foi adotada como sendo a metade da vazão média diária. A Figura 2 ilustra a curva adimensional utilizada.

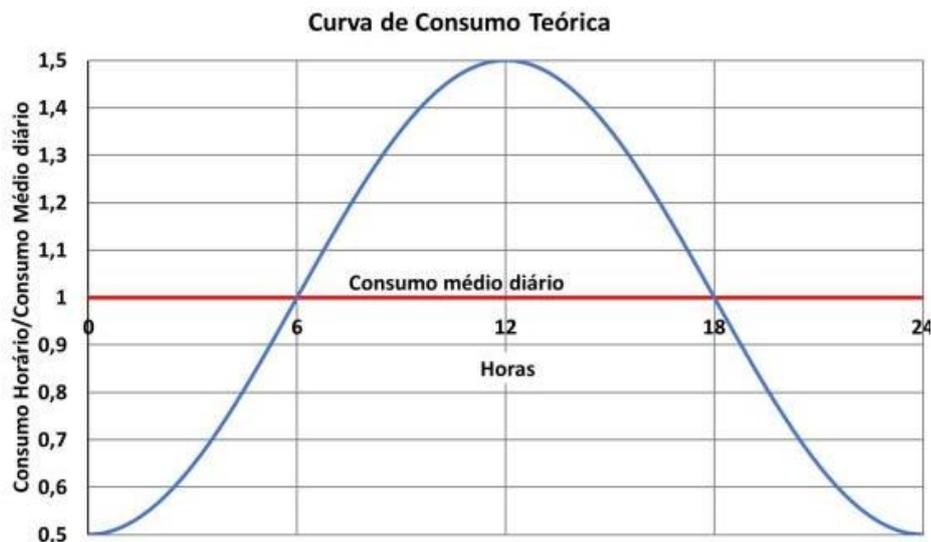


Figura 2: Curva adimensional de consumos horários, adotada no método de Frühling.

A expressão que representa a Figura 1 é dada pela equação 1.

$$\text{Cons} = (k2-1) \cdot (V/24) \cdot \text{seno}[\pi \cdot (t-6)/12] + (V/24) \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

Cons = consumo médio horário (m³/s);

k2 = coeficiente da hora de maior consumo (adotado como 1,5);

t = hora do dia (h);

V = Volume diário de consumo (m³).

Introduziu-se, por liberalidade, na equação 1, um deslocamento de 6 horas, para que a curva ficasse mais próxima de um perfil real de consumos. Entretanto, isto não altera em nada a metodologia original.

A integral da senoide no período em que os consumos são maiores do que o consumo médio (adotado como sendo igual a vazão de adução constante) situado entre as 6 horas e as 18 horas resulta na expressão dada na equação 2.

$$\text{Vol Útil Grav} = (k2-1)*V/\pi \quad \text{equação (2)}$$

Onde:

Vol Útil Grav = volume útil necessário do reservatório, aduzido por gravidade, (vazão de adução constante e igual ao consumo médio diário), em m³;

k2 = coeficiente da hora de maior consumo (adotado como 1,5);

V = Volume diário de consumo (m³).

Com a hipótese de que k2 vale 1,5, resulta que o volume útil é igual a $V/(2*\pi)$ ou aproximadamente V/6.

Para garantir reservas de emergência e contingência para incêndios, este valor foi multiplicado por 2. Assim chegou-se no valor do volume útil do reservatório dado pela equação 3.

$$\text{Vol Útil Grav} = V/3 \quad \text{equação (3)}$$

Onde:

Vol Útil Grav = volume útil necessário do reservatório, aduzido por gravidade, (vazão de adução constante e igual ao consumo médio diário), em m³;

V = Volume diário de consumo (m³).

Neste trabalho, foram utilizadas as curvas de consumos reais dos reservatórios do SAM. Os volumes úteis dos reservatórios foram calculados com base nos dados horários, com o método do balanço hídrico. Foi utilizada uma planilha em Excel, para o processamento dos cálculos. Para cada reservatório, foram obtidos os volumes úteis necessários, para as condições de adução por gravidade (vazão de adução constante e igual ao consumo médio do dia) e por bombeamento (vazão de adução constante e igual a 24/21 do consumo médio do dia, entre as 6:00 e as 17:00 e entre as 20:00 e as 6:00 do dia seguinte e vazão nula entre as 17:00 e as 20:00). Como se trabalhou com dados horários, fez-se um deslocamento do horário de pico de 30 minutos, mas sem perda da qualidade dos resultados.

Fez-se uma análise simples, para exclusão de resultados considerados “*outliers*” (ou pontos fora da curva). Analisou-se, isoladamente, as relações entre os volumes úteis obtidos com adução por gravidade e por bombeamento, com as vazões médias do período analisado de cada setor, por gravidade e por bombeamento. Os valores situados fora da faixa de três desvios-padrões acima ou abaixo da média das relações, foram expurgados. Desta forma, a análise de correlação foi efetivamente efetuada com os dados de 126 reservatórios.

Foram efetuadas análise de correlação entre os volumes úteis obtidos e as vazões médias dos dias de maior consumo. Para converter o consumo médio de cada setor em consumo do dia de maior consumo, seu valor foi majorado em 20%.

As equações de regressão entre os volumes úteis necessários e as vazões médias dos dias de maior consumo, foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados, que já existe como função nativa no Excel. Foram ajustadas duas equações, uma para a condição de reservatório aduzido por gravidade e outra para reservatório aduzido por bombeamento.

Os resultados obtidos neste trabalho foram comparados àqueles definidos pela regra de Frühling.

RESULTADOS OBTIDOS

A regressão linear entre os volumes úteis necessários para regularizar uma vazão de adução constante igual ao consumo médio do dia de maior consumo e os consumos médios diários resultou na Figura 3. Os pontos indicados no gráfico são os resultados obtidos pelo método do balanço hídrico, efetuado para cada um dos 126 reservatórios analisados. No mesmo gráfico está representada a fórmula de Frühling, transformada para representar a relações dos volumes úteis necessários com os consumos médios diários (ao invés da equação original que relaciona os volumes úteis necessários com os volumes diários de consumos).

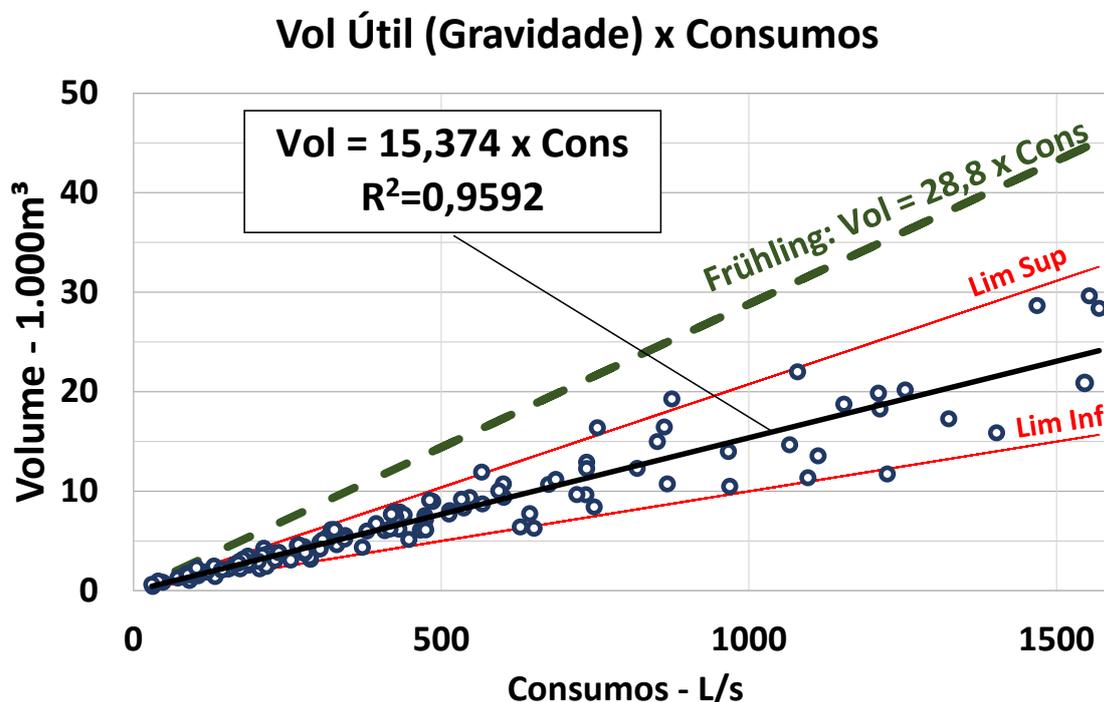


Figura 3: Relações entre o volume útil de um reservatório setorial de distribuição de água, aduzido por gravidade, e os consumos do dia de maior consumo do setor.

A equação obtida está expressa em função dos consumos do dia de maior consumo (em l/s). Caso se opte por expressar os volumes úteis necessários em função do consumo total do dia de maior consumo (em m³), a equação fica alterada, conforme expressa a Equação 4.

$$\text{Vol Útil Grav} = \text{Cons Total} / 5,620 \quad \text{equação (4)}$$

Onde:

Vol Útil Grav = volume útil necessário do reservatório, aduzido por gravidade, em m³;

Cons Total = consumo total do dia de maior consumo, em m³.

Cons Total = consumo total do dia de maior consumo, em m³.

Para uma comparação com a regra de Frühling, foram traçadas duas retas envoltórias, com valores da reta média majorada em 35% (Lim Sup) e minoradas em 35% (Lim Inf). A banda foi definida de forma que 95% dos pontos da amostra ficassem inseridos entre os dois limites. A equação 5 representa o limite superior da banda.

$$\text{Lim Sup Vol Útil Grav} = \text{Cons Total} / 4,163 \quad \text{equação (5)}$$

Onde:

Lim Sup Vol Útil Grav = Limite superior da banda do volume útil necessário do reservatório, aduzido por gravidade, em m³;

Cons Total = consumo total do dia de maior consumo, em m³.

Com os dados dos volumes úteis calculados para reservatórios aduzidos por bombeamento, foi obtida a regressão linear em função dos consumos médios do dia de maior consumo, conforme está apresentado na Figura 4.

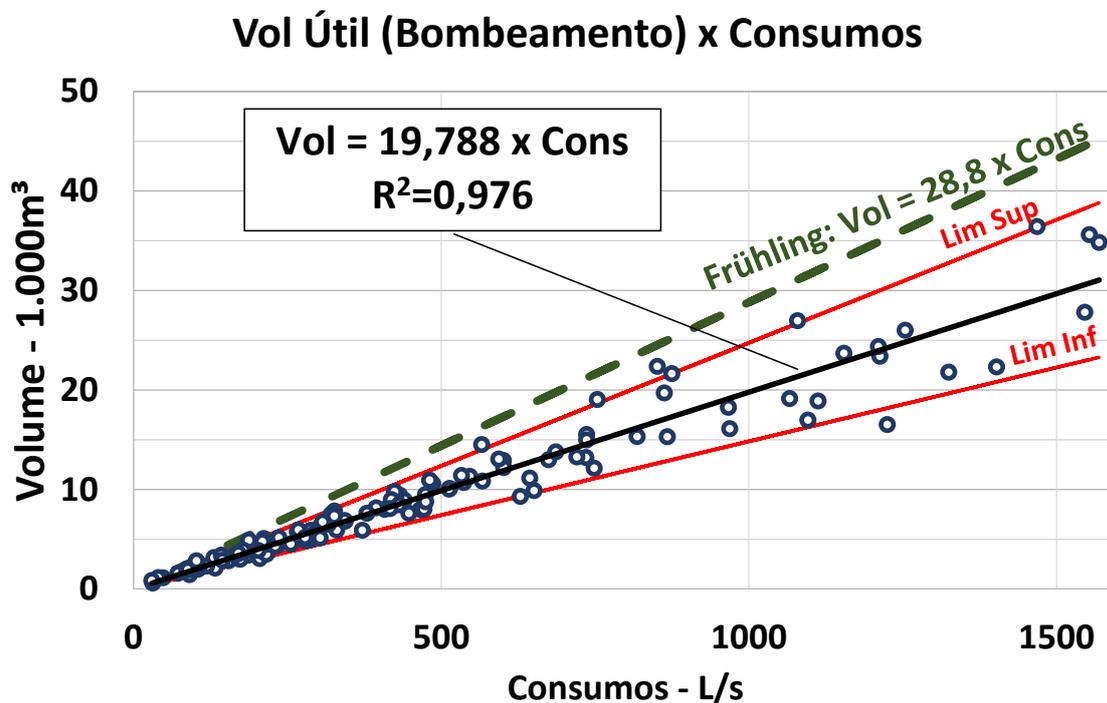


Figura 4: Relações entre o volume útil de um reservatório setorial de distribuição de água, aduzido por bombeamento, e os consumos do dia de maior consumo do setor.

A expressão obtida convertida para relacionar o volume útil com o consumo total do dia de maior consumo fica transformada na Equação 6.

$$\text{Vol Útil Bomb} = \text{Cons Total} / 4,366 \quad \text{equação (6)}$$

Onde:

Vol Útil Bomb = volume útil necessário do reservatório, aduzido por bombeamento, em m³;

Cons Total = consumo total do dia de maior consumo, em m³.

As envoltórias foram obtidas pela majoração dos valores ajustados em 30% (Lim Sup) e minorados em 30% (Lim Inf). A banda foi definida de forma que 95% dos pontos da amostra ficassem inseridos entre os dois limites. A equação 7 representa o limite superior da banda.

$$\text{Lim Sup Vol Útil Bomb} = \text{Cons Total} / 3,359 \quad \text{equação (7)}$$

Onde:

Lim Sup Vol Útil Bomb = Limite superior da banda do volume útil necessário do reservatório, aduzido por bombeamento, em m³;

Cons Total = consumo total do dia de maior consumo, em m³.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A equação obtida para a estimativa expedita do volume útil necessário de um novo reservatório setorial, ou para reservatórios sem registro de dados operacionais, aduzido por gravidade, em função dos consumos médios do setor, apresentou boa aderência aos pontos amostrais, com um erro padrão da estimativa (r^2) de 0,9592.

Comparando-se os resultados do método proposto para reservatórios aduzidos por gravidade (Equação 1) com aqueles indicados pela regra de Frühling, conclui-se que o método de Frühling superestima os volumes em 87%.

Se for admitida uma estimativa ainda mais conservadora, considerando a reta média majorada em 35% (Lim Sup), de forma a contemplar 95% dos pontos da amostra (Equação 3), ainda há uma superestimação de cerca de 39%.

Para o caso de reservatório aduzido por bombeamento, o ajuste obtido foi ainda melhor, com um erro padrão da estimativa (r^2) de 0,9760.

Se este volume for comparado ao indicado pela regra de Frühling (que adota uma situação mais favorável, com vazões de adução constante), conclui-se que o método de Frühling ainda superestima o volume em cerca de 45%. Comparando-se o resultado da regra de Frühling com a envoltória superior da regressão obtida pelo método proposto (Equação 4), ainda há uma superestimação de 12%.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em função dos resultados obtidos, conclui-se que a regressão obtida para o dimensionamento de volumes úteis de reservatórios setoriais de distribuição de água, com os consumos médios do dia de maior consumo é bastante robusta para ser utilizada como um método expedito.

Os resultados obtidos neste trabalho estão associados a perfis de consumos setoriais horários que se observa no SAM da RMSP. Os valores propostos não poderiam ser extrapolados para locais com perfis de consumo diversos.

Como o SAM da RMSP é um sistema integrado, não se consideram reservas emergenciais e para incêndios, pois em situações de contingência, há possibilidade de se atender o consumo de um setor, através de manobras operacionais no SAM. Outra característica a ser salientada é que as operações de enchimento e esvaziamento dos reservatórios são efetuadas em ciclos diários. Há locais em que as operações são feitas em ciclos de vários dias. Se, por um lado, aumenta a disponibilidade de água, no caso de falhas na adução, por outro lado, pode impactar na qualidade da água pelo grande tempo de detenção no reservatório.

A comparação dos resultados obtidos com aqueles indicados pela regra de Frühling demonstra que há grande superestimação dos volumes úteis, quando se adota a regra de Frühling.

Sempre que possível, recomenda-se que os volumes sejam dimensionados pelo método do balanço hídrico. Na falta de dados operacionais históricos, caso haja um setor com perfil de consumos parecidos com aquele para o qual se deseja dimensionar o volume útil, é possível a extrapolação do volume útil com uma proporcionalidade entre os consumos.

Deve-se salientar, que no dimensionamento do volume útil necessário de novos reservatórios setoriais de distribuição de água, devem ser considerados os consumos estimados para o horizonte de projeto, levando-se em consideração o crescimento da demanda estimada para o setor.

A proposta de apresentar este método expedito visou a possibilitar que projetistas tenham um método alternativo de dimensionamento de volume útil de reservatórios setoriais de distribuição de água mais próximo da realidade das curvas de consumo do que o método de Frühling.

Os valores de superestimação dados pelo método de Frühling justificam a adoção do método proposto, com o objetivo de se racionalizar os investimentos em obras de reserva setorial de água, trazendo economias que podem favorecer a busca pela universalização dos serviços de abastecimentos públicos de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12217: projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro. 1994.
2. AZEVEDO NETTO, J.M. et al. Técnica de abastecimento e tratamento de água. Vol. 1. Abastecimento de Água. 2 ed. São Paulo, CETESB/ASCETESB, 1976.
3. MALTA, J.M.T. Capacidade dos reservatórios. Boletim da Repartição de Águas e Esgotos, edição 8, n. 1375, p.20-31, dez. 1939.