

## DIAGNÓSTICOS OPERACIONAIS DE SISTEMAS DE ADUÇÃO DE ÁGUA TRATADA

### **André Luiz de Freitas<sup>(1)</sup>**

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.

### **Kamel Zahed Filho<sup>(2)</sup>**

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.

### **Marcelo Frugoli<sup>(3)</sup>**

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.

### **Renato de Sousa Ávila<sup>(4)</sup>**

Tecnólogo 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<sup>(5)</sup>**

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** <sup>(1)</sup> Rua Costa Carvalho, 300, Pinheiros, São Paulo, São Paulo CEP 05409-010 Brasil Tel. +55(11) 3388-87499 e-mail - andrefreitas@sabesp.com.br

## RESUMO

O trabalho apresenta uma metodologia de diagnóstico operacional de sistemas de adução de água tratada. O estudo de caso é a experiência na operação do Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo (SAM). São detalhados diversos aplicativos desenvolvidos para análise e a proposição de indicadores operacionais. São destacadas as análises de adutoras, estações elevatórias, válvulas e reservatórios de distribuição. O diagnóstico é efetuado com dados operacionais de um banco de dados histórico do sistema de controle do SAM, operado com base em um sistema telemetrizado. Os resultados obtidos foram importantes para adequação de regras operacionais, priorização de investimentos em melhorias da infraestrutura, redução de custos com energia e garantia da segurança operacional.

**PALAVRAS-CHAVE:** sistema de adução de água, diagnóstico operacional, indicadores operacionais

## INTRODUÇÃO

A busca pela universalização dos serviços de abastecimento público de água exige esforços múltiplos em várias partes da cadeia dos processos de uma empresa de saneamento. De forma ampla e resumida, é necessário que se otimize a infraestrutura existente ou projetada, de forma a reduzir os custos e facilitar novos investimentos para atendimento daqueles que ainda não são beneficiados por um serviço essencial a melhores condições de vida.

A gestão do negócio de saneamento é um tema bastante discutido e é objeto de comparação entre empresas, através de indicadores operacionais, financeiros, de gestão e socioambientais.

O diagnóstico nacional mais conhecido é publicado anualmente pelo Ministério do Desenvolvimento Regional e já está em sua 25ª edição (BRASIL, 2020). Envolve aspectos de abastecimento de água e serviços de coleta e tratamento de esgotos. O Sistema Nacional de Serviços de Saneamento (SNIS) contempla 67 indicadores (SILVA, 2003). Em outros países, há outros sistemas de indicadores, podendo-se citar, como exemplo, os do México e Espanha (SILVA, 2003) e Portugal (DUARTE et al.,2004). As associações internacionais como a International

Water Association (IWA) e a International Water Service Association (IWSA) também possuem sistemas de indicadores de desempenho, que algumas vezes são adaptados às condições de cada país que os adotam.

Os indicadores são uma ferramenta de gestão e de planejamento. No contexto do abastecimento de água, os indicadores mais utilizados procuram avaliar a disponibilidade e a qualidade dos serviços, o controle de perdas de água e a qualidade da água, o desempenho financeiro e o esforço em recursos humanos dispendidos.

A operação de um sistema complexo de abastecimento de água, como o da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) envolve várias áreas com especialidades distintas nas diversas etapas do serviço. A abordagem que será apresentada neste trabalho está associada ao controle da operação de adução de água tratada, que representa a missão de transportar a água tratada, produzida nas estações de tratamento de água (ETA) até os reservatórios setoriais de distribuição de água.

O sistema de operação do Sistema Adutor Metropolitano (SAM) da RMSP é apoiado por um sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) há quatro décadas. A equipe de planejamento da operação desenvolve os planos de abastecimento de água, em conjunto com os outros agentes do processo de abastecimento de água. Como o sistema é dinâmico, é normal que haja desvios entre o que foi planejado e o que se realiza de fato. Uma das tarefas do planejamento operacional, consiste em acompanhar essas alterações para que novas obras de infraestrutura de adução ou ampliação ou renovação das existentes sejam feitas para garantir a continuidade do abastecimento com a qualidade e a segurança exigidas. Outro aspecto que é considerado é a avaliação contínua ou periódica do desempenho da operação efetuada, que envolve questões de renovação de ativos, otimização energética e de regras operacionais. Estas avaliações vêm sendo aperfeiçoadas ao longo do tempo, com o desenvolvimento de um sistema de diagnóstico operacional. As informações geradas por este sistema são relatórios com diagnósticos detalhados, indicadores de desempenho e mapas temáticos.

O Sistema de Diagnóstico Operacional do SAM está em evolução contínua. Cada sistema de adução de água tratada pode ser especificidades únicas. Entretanto, imagina-se que a divulgação de um trabalho que está sendo desenvolvido em um sistema complexo possa ser de utilidade para aqueles que pretendem aplicar em outros sistemas, com as adaptações e melhorias que se fizerem adequadas. O retorno dessas novas aplicações poderá gerar um ambiente de troca de informações, que certamente será benéfico a todos.

O sistema de abastecimento público de água, representado esquematicamente na Figura 1, destaca as várias etapas do processo. A etapa de captação de água bruta se constitui na primeira fase. A captação pode se dar em mananciais de superfície, como rios, lagos e represa ou em mananciais subterrâneos (poços). Em uma acepção mais ampla, poderia ser também a saída de uma estação de tratamento de efluentes, com o tratamento adequado para o reuso da água. Uma vez captada, a água bruta é conduzida até uma estação de tratamento de água (ETA), através de adutoras ou canais, por gravidade ou com o auxílio de estações elevatórias (bombeamento). A ETA faz a adequação da qualidade da água, por processos físico-químicos, para que esteja pronta para o consumo humano. O sistema de adução é composto por adutoras e canais, conduzindo a água por gravidade, ou com o apoio de estações elevatórias (Bombeamento) até os reservatórios setoriais de distribuição de água. Estes reservatórios possuem o objetivo principal de regularizar as vazões aduzidas para compensar as flutuações no consumo de água das ligações na rede de distribuição, que são alimentadas por eles. O sistema de adução, na Figura 1, aparece em destaque porque será o objeto da discussão. A infraestrutura é muito mais complexa do que está representado no esquema, mas os elementos apresentados serão discutidos com mais detalhe, por isso estão colocados em realce.



Figura 1: Esquema de um sistema público de abastecimento de água.

O diagnóstico do sistema de adução pode ser feito por diversos ângulos: operacional, de manutenção, econômico-financeiro, ambiental, recursos humanos e cada um deles podendo ser subdividido em aspectos específicos. O relato estará restrito aos aspectos de operação, embora todos os outros tenham a mesma importância.

## UMA BREVE DESCRIÇÃO DO SISTEMA ADUTOR METROPOLITANO - SAM

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) abrange uma área de 8.051km<sup>2</sup> e abriga uma população aproximada de 20 milhões de habitantes, distribuída por 39 municípios. O Sistema Integrado Metropolitano (SIM) inclui os 20 mananciais de superfície (e alguns poços), com 24 represas, a partir das quais a água bruta é conduzida até as 11 ETAs. A produção média, em 2020 foi de cerca de 63,4m<sup>3</sup>/s. O sistema adutor – SAM (Figura 2) – é composto por cerca de 1950km de adutoras e túneis, 155 centros de reservação setorial, com um volume total de 1,8 milhões de m<sup>3</sup>, 62 estações elevatórias, com um consumo anual de 157GWh/ano.

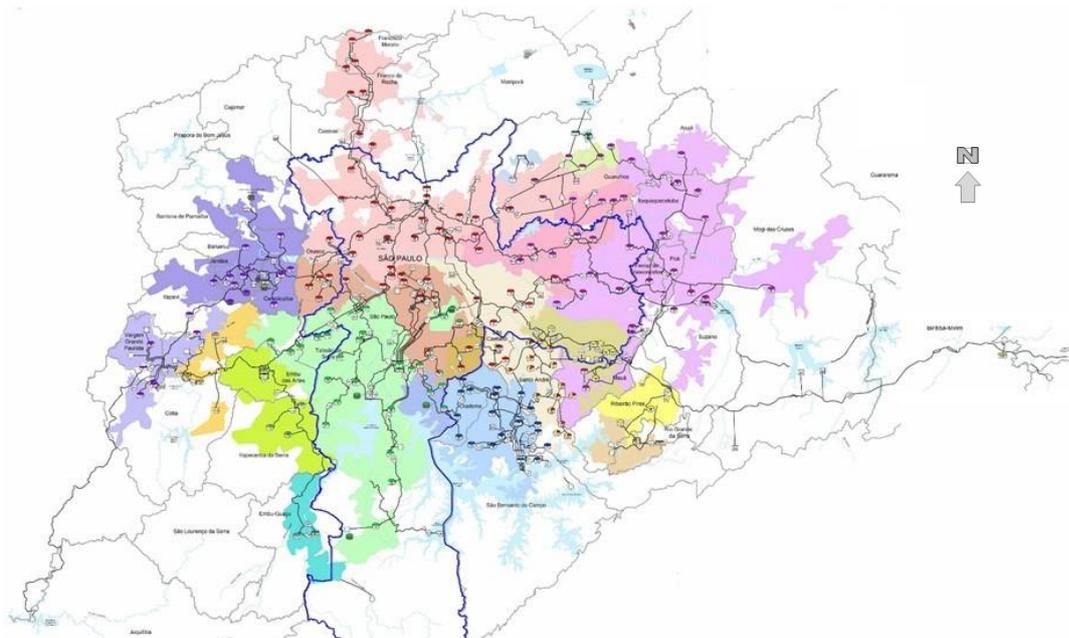


Figura 3: Esquema do SAM, com a rede de adutoras, elevatórias e reservatórios setoriais

## OBJETIVO

Pretende-se apresentar, neste trabalho, um resumo do processo de diagnóstico operacional do SAM, com destaques para as ferramentas e indicadores específicos desenvolvidos.

## METODOLOGIA

O diagnóstico operacional do SAM foi sendo construído ao longo do tempo, desde a implantação do controle centralizado da operação dos reservatórios, por telemetria e telecomandos, através do sistema SCADA implantado, com o nome de SCOA (Sistema de Controle Operacional da Adução). Inicialmente, foi aplicado ao sistema de adução, mas com a evolução do sistema, hoje ele é aplicado em todos os processos do ciclo da água no saneamento (Figura 4), de mananciais a tratamento de esgotos.

Na sua primeira versão, do início da década de 1980, não havia a geração de relatórios de gestão. Os dados eram armazenados em fitas magnéticas, mas sem um procedimento que garantisse a integridade e a rápida recuperação

dos dados. A partir de 1993, passou a gerar o primeiro indicador operacional, o IRA, ou índice de regularidade da adução, que será descrito com mais detalhes adiante. A partir de 1995, iniciou-se a gravação de dados operacionais, a intervalos horários, mas ainda sem uma sistemática para garantir a segurança desses dados. O SCOA passou por diversas evoluções e hoje conta com uma série de dados históricos que tem sido muito útil para o diagnóstico do sistema adutor e dar apoio a estudos de planejamento e de concepção de obras. A base de dados, que se utiliza, atualmente, para as análises, está arquivada em um banco de dados proprietário (PI-System), com uma série iniciada em 2017.

Para os estudos operacionais e para as análises de planejamento, a rede de adução do SAM está modelada no software WaterCad, da Bentley. O modelo é continuamente atualizado, com as novas obras que entram em operação e também calibrado (ajuste dos coeficientes de rugosidade das adutoras) para a garantia da fidedignidade do modelo à realidade do SAM.

Para entender melhor como são feitos os diagnósticos operacionais, serão descritos os aplicativos e sua metodologia de cálculo, que analisam o SAM sob diversos aspectos.



Figura 4: Tela do SCOA, com a representação do ciclo do saneamento.

A Figura 5 ilustra o sistema de adução e reservação de água tratada e destaca os nomes dos aplicativos que são utilizados para os diagnósticos operacionais.



**Figura 5: Esquema de um sistema público de abastecimento de água. Em vermelho, estão os nomes dos aplicativos para o diagnóstico operacional do sistema de adução e reservação de água tratada.**

## IRA – ÍNDICE DE REGULARIDADE DA ADUÇÃO

O **IRA** é o indicador mais antigo do SAM. Indica a disponibilidade de água na saída do reservatório de distribuição, para atendimento dos consumos da rede. Ele mede o número de horas, ao longo do dia, em que o armazenamento do reservatório esteve acima do nível mínimo operacional (Limite de Falta d'Água), dividido por 24 horas.

O registro do nível de água armazenado no reservatório é feito a cada minuto. Quando o nível d'água cai abaixo do nível mínimo operacional, é disparado um contador de tempo. Caso a permanência nesta condição seja superior a 30 minutos, então é considerado como um período de não atendimento e este valor é subtraído do total das 24 horas. Para permanências inferiores a 30 minutos, não se contabiliza nenhuma penalidade no indicador.

O IRA é calculado, inicialmente, para cada reservatório do SAM e para cada dia de operação. Os valores individuais diários são agregados em intervalos maiores, para se obter os IRAs mensais e anuais e também são ponderados para se obter um IRA de uma determinada área atendida por um conjunto de reservatórios. Esta área pode ser um município, uma Unidade de Negócio de Distribuição ou um Sistema Produtor. O valor médio é obtido pela ponderação dos indicadores individuais pelas populações atendidas. As populações são atualizadas anualmente, em função do crescimento demográfico da região e pelas alterações dos limites dos setores de abastecimento.

Toda vez que ocorre uma falha no armazenamento, é apontada uma causa para essa falha. São classificadas como insuficiência de produção (quando há uma descontinuidade ou uma limitação da vazão entregue pela ETA), insuficiência de adução (quando há alguma limitação hidráulica da rede de adutoras ou das estações elevatórias que impedem aduzir uma vazão adequada ao reservatório, para que ele fique com um armazenamento acima do nível mínimo operacional), manutenção programada (interrupção da adução ao reservatório para alguma manutenção preventiva ou alguma obra de melhoria no sistema), manutenção não programada (manutenções corretivas), falta de energia elétrica (que impede uma estação elevatória de aduzir a um reservatório) e falhas operacionais (erros de operação, falhas de instrumentação ou operações de teste).

Mensalmente, é feita uma análise de todos os setores do SAM, publicada em um relatório de diagnóstico. Neste relatório, são apresentados o gráfico dos IRAs diários do SAM, as descrições das ocorrências que afetaram negativamente os IRAs de setores específicos e os impactos dos diversos tipos de ocorrência no IRA mensal. É feita uma discriminação dos setores com IRA mensal com tendência a um índice crítico (entre 96% e 99%) e aqueles já considerados críticos (menores que 96%). Os setores com IRA mensal maior ou igual a 99% são considerados normais.

## DIAGNÓSTICO DA RESERVAÇÃO DO SAM

Outro diagnóstico feito sobre a reservação do SAM consiste em avaliar se o volume útil existente de um reservatório setorial de distribuição de água é suficiente para regularizar as vazões demandadas pelo setor abastecido, para manter uma vazão de adução constante. O **POAR** é um Programa de Otimização e Ampliação da Reservação do SAM, que acompanha periodicamente a necessidade de ampliação ou de construção de novos reservatórios.

O programa, desenvolvido, em Excel, utiliza uma base de dados históricos do SCOA, fazendo um cálculo do balanço hídrico entre as vazões aduzidas a um reservatório e os consumos horários agregados do setor. A vazão de adução é considerada com duas regras teóricas de adução. Quando o reservatório é aduzido por gravidade ou por uma estação elevatória com custos de energia que não variem ao longo do dia, a vazão de adução é constante e igual ao consumo médio do dia simulado. Quando o reservatório é aduzido por estações de recalque, com custos de energia variáveis ao longo do dia, a vazão de adução é constante nos horários de tarifas menores e zero nos horários de tarifas maiores. A vazão é definida de forma que o volume aduzido no dia simulado seja igual ao volume consumido pelo setor. A simulação é executada com dados horários, com ciclos de operação diários, em um horizonte de simulação de um ano. No início de cada dia, admite-se que o reservatório esteja cheio. Avalia-se o maior deplecionamento do armazenamento em cada dia de simulação.

Assim, em um horizonte de simulação de 365 dias, obtém-se 365 volumes úteis como resultado. Escolhe-se como o volume útil necessário, aquele que tenha uma garantia de 95%.

Cada reservatório do SAM é analisado, comparando seu volume útil existente com o volume útil necessário. Esta primeira etapa do diagnóstico permite apenas quantificar quantos estão com déficit ou com superávit de volume útil.

Alguns indicadores são utilizados para permitir uma análise mais detalhada e também para avaliar as medidas possíveis, em casos de déficit de reservação.

O volume útil do reservatório é uma parcela de seu volume total. Existe a folga superior, para evitar extravasamentos e um nível mínimo operacional que garante um bom funcionamento das estruturas hidráulicas de saída e o pleno atendimento dos pontos mais críticos do setor (pontos em cotas mais elevadas e mais distantes do reservatório). Pela experiência, observa-se que essas folgas de segurança e reservas de armazenamentos mínimos representam cerca de 25% do volume total do reservatório. Assim, utiliza-se o indicador denominado Rendimento de Reservação, dado pela equação 1.

$$RR = VU \cdot 100 / VT \quad \text{equação (1)}$$

Onde: **RR** = rendimento de reservação (%)

**VU** = Volume Útil do reservatório (m<sup>3</sup>)

**VT** = Volume total do reservatório (m<sup>3</sup>).

Se um reservatório possui déficit de reservação, mas seu rendimento de reservação é inferior a 75%, pode-se investigar uma possibilidade de otimização do volume útil com a alteração dos limites operacionais.

Outro indicador importante é o de ocupação do reservatório, definido pela Equação 2.

$$OR = VUnec \cdot 100 / VUdisp \quad \text{equação (2)}$$

Onde: **OR** = índice de ocupação do reservatório (%).

**VUnec** = Volume útil necessário do reservatório (m<sup>3</sup>)

**VUdisp** = Volume útil existente do reservatório (m<sup>3</sup>)

Este indicador é útil para avaliar um reservatório que não apresente déficit de reservação ( $OR < 100\%$ ) ao longo do tempo. Pela velocidade com a qual este indicador varia de um ano a outro, permite determinar o momento que haverá a utilização plena do reservatório, necessitando-se de uma ampliação da reservação no mesmo local do existente ou da criação de um novo centro de reservação em outro local.

Associando-se os dois indicadores, utiliza-se o coeficiente de criticidade de reservação, dado pela equação 3.

$$ICR = RR \cdot OR / 100 \quad \text{equação (3)}$$

Onde: **ICR** = índice de criticidade de reservação (%)

**RR** = índice de rendimento de reservação (%)

**OR** = índice de ocupação do reservatório (%)

Quando o valor do ICR é superior a 100%, há uma indicação clara da necessidade de ampliação da reservação, mesmo que haja alguma possibilidade de otimização dos limites operacionais.

Quando o reservatório apresenta um superávit de reservação pode parecer algo positivo, mas que precisa ser analisado com cautela. Se o superávit não for muito grande, indica que o reservatório pode ser operado com uma regra diferente da teórica, para permitir o aumento de vazões aduzidas a reservatórios situados na mesma malha de adução, para operações de contingência. Se o superávit for muito grande, pode ocorrer um tempo de detenção da água no reservatório que venha a prejudicar a garantia da qualidade da mesma (manutenção do teor de cloro). Assim, utiliza-se o tempo de detenção médio ou o tempo de esvaziamento do reservatório, indicado pela equação 4.

$$TD = VU / Consmed / 3600 \quad \text{equação (4)}$$

Onde: **TD** = tempo de detenção médio (tempo médio em que a água permanece no interior do reservatório) ou tempo de esvaziamento (tempo que o reservatório levaria para esvaziar, estando totalmente cheio, com uma vazão de saída igual ao consumo médio do setor) (h)

**Consmed** = consumo médio do setor no horizonte da simulação (h).

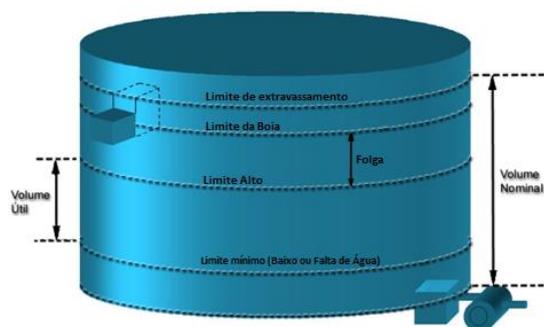
**VU** = volume útil do reservatório (m<sup>3</sup>).

Com os indicadores definidos para cada reservatório, foram construídos os mapas temáticos para déficits de volume útil e para os indicadores descritos. Desta forma, pode-se avaliar uma determinada área do SAM, com relação à sua reservação.

## DIAGNÓSTICO DA SEGURANÇA DOS RESERVATÓRIOS CONTRA EXTRAVASAMENTOS

A segurança operacional de um reservatório é um ponto que deve ser observado com todo rigor. Para evitar extravasamentos dos reservatórios, que além da perda de água indesejada, pode provocar danos materiais a terceiros ou até mesmo causar vítimas, são definidos limites operacionais de segurança para os reservatórios do SAM. Com esta finalidade, existem três níveis operacionais associados, como pode ser observado na Figura 6. Os limites são definidos como:

- Limite de extravasamento: Nível de água referenciado a um ponto do fundo do reservatório (nível de referência), a partir do qual se inicia a extravasão do reservatório.
- Limite de Alarme da Boia: Nível de água, em relação a um nível de referência, a partir do qual a vazão de entrada do reservatório é anulada de forma compulsória, através do fechamento automático da válvula de controle ou do desligamento automático das bombas que aduzem ao reservatório.
- Limite Alto: ou Nível Máximo operacional. É o nível de água Máximo que pode ser armazenado no reservatório em condições normais de operação.
- Limite de Falta de Água: Nível de água, em relação a um nível de referência, abaixo do qual começa a haver alguma deficiência de abastecimento em algum ponto da rede.
- Limite Baixo: É o nível de água mínimo que pode ser armazenado no reservatório em condições normais de operação.



**Figura 6: Limites operacionais de um reservatório de distribuição setorial de água.**

Para a garantia da segurança contra extravasamentos, calcula-se a folga de segurança (Altura correspondente à diferença de cota entre o Limite da Boia e o Limite Alto. A subida do nível terá esta folga mínima para que o controlador atue no fechamento da válvula antes de atingir a Boia de Segurança). Esta folga de segurança depende das características geométricas do reservatório, do perfil de consumos do setor abastecido pelo reservatório e das regras de operação da válvula de controle na entrada do reservatório. Como o sistema é dinâmico e os comportamentos dos controladores, os perfis de consumo do setor e a carga ou energia existente junto à válvula de controle são mutáveis no tempo, há a necessidade de se avaliar, periodicamente, os limites altos ou limites máximos operacionais dos reservatórios.

Para isto, o diagnóstico de segurança é feito com o auxílio de um aplicativo (**LA**) desenvolvido em VBA Excel, par as definições das folgas de segurança.

A folga é uma grandeza física de distância, no caso uma altura. Para calcular esta distância, multiplica-se o tempo necessário para a anulação da vazão de entrada do reservatório pela velocidade de subida do nível da água no

reservatório. O valor encontrado representa a distância mínima do Limite Alto ao Limite de Boia, para que não seja acionada a boia, garantindo assim a segurança operacional do sistema.

São extraídos do PI Server (Banco de dados do SCOA), valores dos níveis d'água em intervalos de 10 minutos. A partir desses dados, obtêm-se as variações das velocidades de subida da lâmina d'água.

Por meio de um banco de dados de manutenção existente no ERP da Sabesp, obtêm-se os tempos de fechamento das válvulas de controle operacional.

Foi assumido que o operador reconheça o alarme do Limite Alto em até 5 minutos, quando ele toma as medidas possíveis para conter a subida do nível d'água.

Existem duas maneiras de se abastecer um reservatório: através de bombeamento ou por gravidade. Quando é utilizado motobombas para aduzir água ao reservatório e o Limite Alto é superado, há duas formas de controle, automatizado ou por atuação do controlador. Para cada caso, utiliza-se uma das equações 5 a 7, na definição da folga, para cada intervalo de 10 minutos da série histórica, para os casos em que o nível de água no reservatório esteja acima de 70% de sua altura útil e com tendência crescente (velocidade de subida positiva).

Adução por Bombeamento Automático:

$$FE = (tc \times q) + [(((2 \times L) / (a)) \times 10) / 60] \times (q - 1) \times [((NA_i - NA_{i-1})) / 10] \quad \text{equação (5)}$$

Onde: **FE** = Folga de segurança contra extravasamentos (m)  
**tc** = Tempo de desligamento do conjunto motobomba (min)  
**q** = Quantidade de conjuntos motobomba Ligados a Desligar (un)  
**L** = Comprimento da adutora (m)  
**a** = Celeridade (m/s)  
**NA<sub>i</sub>** = Nível da câmara no instante i (m)  
**NA<sub>i-1</sub>** = Nível da câmara no instante anterior a i (m)

Adução por Bombeamento Telecomandado:

$$FE = (tc \times q) + [(((2 \times L) / (a)) \times 10) / 60] \times (q - 1) \times [((NA_i - NA_{i-1})) / 10] + trec \quad \text{equação (6)}$$

Onde: **FE** = Folga de segurança contra extravasamentos (m)  
**tc** : Tempo de desligamento do conjunto motobomba (min)  
**q** = Quantidade de conjuntos motobomba Ligados a Desligar (un)  
**L** = Comprimento da adutora (m)  
**a** = Celeridade [m/s]  
**trec** = Tempo de reconhecimento do operador (min)  
**NA<sub>i</sub>** = Nível da câmara no instante i [m]  
**NA<sub>i-1</sub>** = Nível da câmara no instante anterior a i (m)

Adução por gravidade:

$$FE = \{[tf \times \Theta_i / 100 + trec \times CS] \times [((NA_i - NA_{i-1})) / 10]\} \quad \text{equação (7)}$$

**tf** = Tempo de fechamento total da válvula de controle (min)  
**Θ<sub>i</sub>** = Posição da válvula no instante i (%)  
**trec** = Tempo de reconhecimento do operador (min)  
**CS** = Coeficiente de segurança (20%)  
**NA<sub>i</sub>** = Nível da câmara no instante i (m)  
**NA<sub>i-1</sub>** = Nível da câmara no instante anterior a i (m)

Os valores de folgas de segurança calculados, passam por um processo estatístico de consolidação. São expurgados os valores em que a velocidade de subida do nível d'água estiver fora de uma faixa de três desvios-padrão em relação à média das velocidades casos analisados.

As folgas calculadas são associadas às frequências de excedência, colocando-se os valores ordenados em ordem decrescente. O valor escolhido é aquele associado a uma frequência de 98%

Cada caso é analisado, podendo ser necessário elevar o Limite Alto existente, para garantir a segurança ou reduzir o Limite Alto existente, com ganho de volume útil.

## DIAGNÓSTICO DOS PERFIS DE CONSUMOS SETORIAIS

Os consumos setoriais são entendidos como as vazões de saída dos reservatórios setoriais para a rede de distribuição. Os indicadores de consumos setoriais são utilizados na gestão de perdas, no dimensionamento de adutoras e estações elevatórias de água.

A análise das curvas de consumo permite comparar padrões de consumos entre reservatórios com mesmas características de operação, auxiliar nos planejamentos de interrupções de abastecimento, avaliar os efeitos de gestão noturna de consumos sobre os comportamentos das curvas de consumos horários, auxiliar em projeções e previsões de consumos horários, dentre outras aplicações.

O perfil de consumos de um setor é dinâmico, pois o tipo de ocupação pode variar ao longo do tempo, assim como os comportamentos individuais dos consumidores também são variáveis. Desde a última crise hídrica, foi implantada, na RMSP, uma gestão de consumos noturnos, com manobras de Válvulas Redutoras de Pressão (VRP) situadas nas redes de distribuição e, em vários casos, são fechadas as válvulas de saída dos reservatórios nos períodos noturnos. Desta forma, as curvas de consumos foram alteradas, com consequentes modificações dos seus indicadores.

Foi desenvolvido um aplicativo em Excel (*CONSUM*), para tratar os dados de consumos horários do SCOA, obtidos com a ferramenta de importação do PI System. São calculados os consumos médios dos setores, os indicadores de consumo K1, K2, K3 e K1K2 e as curvas neutras de consumos.

O consumo médio diário é calculado com base nos 24 valores horários. Os consumos máximos diários e os consumos mínimos diários são os valores extremos encontrados entre os 24 valores horários.

Os indicadores K1, K2, K3 e K1K2 são obtidos conforme as equações 8 a 11.

$K1 = \text{Consumo médio diário} / \text{Média do consumo no ano anterior}$  equação (8)

$K2 = \text{Máximo consumo horário do dia} / \text{Média do consumo diário do dia}$  equação (9)

$K3 = \text{Mínimo consumo horário do dia} / \text{Média do consumo diário do dia}$  equação (10)

$K1K2 = \text{Máximo consumo horário do dia} / \text{Média do consumo no ano anterior}$

O valor de K1K2 não é a mera multiplicação dos indicadores K1 e K2. Este simples produto admite uma coincidência de que o máximo valor de K2 ocorre no mesmo dia em que K1 é máximo, o que pode não ser verdadeiro. Desta forma, o algoritmo desenvolvido calcula para cada dia, a relação entre o seu máximo consumo horário e a média dos consumos horários dos últimos doze meses.

Uma curva neutra de consumos é uma forma adimensional de se representar os consumos médios horários das horas do dia em um período de análise. Assim, o aplicativo divide o consumo médio de uma determinada hora pelo consumo médio de toda a série analisada. A curva neutra de consumos não pretende representar uma sequência de valores horários, mas apenas definir os comportamentos médios do setor, como, por exemplo, a hora em que costuma ocorrer o máximo consumo de um dia.

Os valores obtidos dos indicadores de consumo são analisados também de forma conjunta. Foram construídas curvas de frequência para cada indicador, de forma a se expurgar valores considerados atípicos (“ouliers”) e também, para se obter os valores dos indicadores associados a garantias específicas.

Foram construídos os mapas temáticos com os indicadores de consumo e com os consumos médios setoriais, a partir de uma base georreferenciada do SAM (SIGNOS é o sistema de informações geográficas da Sabesp) e utilizando a ferramenta ArcMap para sua criação.

## **DIAGNÓSTICO OPERACIONAL DAS VÁLVULAS DE CONTROLE NAS ENTRADAS DOS RESERVATÓRIOS SETORIAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

As válvulas de controle do SAM são utilizadas para controlar o fluxo de entrada nos reservatórios de distribuição setoriais. Esse controle de fluxo está voltado diretamente à garantia do atendimento às demandas do setor abastecido pelo reservatório, à segurança operacional do próprio reservatório (evitando extravasamento e às condições adequadas de operação de estações elevatórias de zona alta, que recalcam a partir do reservatório (mantendo nível de armazenamento que garanta condições de pressões adequadas na sucção das bombas). De forma indireta, o controle de fluxo em um reservatório está associado ao gerenciamento das linhas de energia hidráulica na rede de adutoras, de forma a priorizar o atendimento de algum reservatório que esteja necessitando de maior aporte de vazões.

Do ponto de vista hidráulico, as válvulas de controle são dissipadores locais de energia, para definir uma cota da linha de energia a jusante, que garanta a entrada de uma vazão desejada no reservatório.

O aplicativo desenvolvido em VBA – Excel (**VCO\_Efic**) serve para apoiar o diagnóstico hidráulico-operacional e não esgota a necessidade de avaliação das válvulas de controle sob outros pontos de vista: resistência estrutural, bom funcionamento mecânico de seus componentes e acessórios e outros. Para cada válvula de controle (VCO), são importados, da base do SCOA, as posições de abertura da VCO e as vazões veiculadas, a intervalos de 5min. O aplicativo gera indicadores e curvas de frequência. São consideradas mudanças de posição de abertura ou de vazão, quando as variações entre os valores, a intervalos consecutivos, são superiores a um limiar mínimo definido para cada uma das duas variáveis. Os indicadores gerados são:

- Número médio de manobras por dia - indica eventuais problemas de reservação, dificuldades operacionais para balancear a adução em uma região do SAM ou instabilidade da abertura da válvula, por exemplo.
- Relação entre o número de manobras efetivas (que causaram alteração da vazão aduzida) e o número de manobras significativas (manobras com variações da abertura da válvula de controle maiores que um limiar de sensibilidade). Serve para avaliar a eficácia das manobras das válvulas de controle.
- Relação entre a vazão aduzida com frequência de 98% (próximo da máxima vazão aduzida) e a vazão média aduzida. Indica, por exemplo, uma insuficiência de reservação ou uma regra de operação não otimizada.
- Médias de variação de vazões aduzidas por dia. Também serve para indicar eventuais insuficiências de reservação, regras operacionais não otimizadas ou eventuais mudanças bruscas não previsíveis nas demandas do setor, por exemplo.
- Número médio de manobras efetivas (com variações de abertura da válvula maiores que o limiar de sensibilidade). Serve para avaliar a sensibilidade ou controlabilidade da válvula de controle, que pode exigir diversas manobras para se atingir uma vazão aduzida desejada.
- Aberturas das válvulas de controle nas frequências modais (máxima frequência). Quando essas aberturas tendem a 100%, pode haver uma evidência de insuficiência na capacidade de adução ao reservatório ou do volume útil disponível no mesmo.
- Aberturas das válvulas de controle na frequência de 98% (representando valores próximos de um máximo), na planilha Abert VCO com Freq 98%. Indicam uma operação em dias críticos de consumos elevados. Quando esses valores tendem a 100%, podem indicar uma insuficiência do sistema adutor ou uma restrição muito grande da válvula de controle. Quando comparadas com as demais ou ao longo do tempo, também podem mostrar uma necessidade de troca de válvula, por exemplo.
- Vazões de adução com frequência de 50% (mediana). Informam a magnitude do setor e servem de apoio na decisão de substituição de válvulas, quando estão em uma disputa de prioridade.
- Vazões de adução com frequência de 98%. Servem de apoio no dimensionamento de uma nova válvula para substituir a existente, por exemplo.

Para cada indicador, foram criadas as curvas de frequência, para elencar válvulas críticas ou que tenham comportamento atípico quando comparadas às demais. Também foram criados os mapas temáticos, mostrando a distribuição espacial dos indicadores na área de atendimento do SAM. Foi utilizada a base georreferenciada do SIGNOS e a ferramenta ArcMap.

## DIAGNÓSTICO OPERACIONAL DAS PERDAS DE CARGA NAS TUBULAÇÕES E VÁLVULAS NAS ENTRADAS DOS RESERVATÓRIOS

Os pontos de chegada, nos reservatórios controlados por válvulas de controle, são definidos na modelagem hidráulica, como sendo os pontos onde há os medidores de pressão, junto à válvula de controle.

Para se garantir o pleno atendimento desses reservatórios, admite-se que seja necessária uma pressão residual, junto à válvula de controle, para se prover uma energia a ser dissipada na válvula de controle e nas tubulações internas, na área do reservatório.

Para a operação adequada de uma válvula de controle, é necessário conhecer a curva característica, que relaciona as perdas de carga, distribuídas e localizadas, incluindo a válvula de controle, todas as tubulações e válvulas acessórias na área interna do reservatório e as estruturas de entradas nas câmaras em função do grau de abertura da válvula de controle.

Além do propósito operacional, o levantamento dessas perdas de carga pode diagnosticar situações, onde esses valores sejam elevados, com indicações de possíveis melhorias internas na área do reservatório (troca de válvula ou de tubulações), com ganhos nas capacidades de adução a esses reservatórios ou economia de energia.

O conhecimento de uma curva de perda de carga na entrada de um reservatório também permite que se controle o armazenamento de água, através de regras que orientem as vazões a serem aduzidas ao reservatório ao longo de um dia de operação, garantindo atendimento pleno dos setores e com redução de custos de energia

Para o diagnóstico das perdas de carga nas áreas internas dos centros de reservação, foi desenvolvida uma metodologia, com base em um aplicativo (*PCER*) em VBA-Excel. Os dados operacionais utilizados nos cálculos foram obtidos da base SCOA (a intervalos de 5min), como pressões junto à válvula de controle, vazões aduzidas, aberturas das válvulas e controle e níveis d'água armazenados nos reservatórios. Os dados cadastrais, como cotas de fundo dos reservatórios, cotas dos medidores de pressão e cotas das tubulações de entrada nos reservatórios foram obtidas da base georreferenciada do SIGNOS.

A metodologia de cálculo inicia-se por uma depuração de dados espúrios ou atípicos. A seguir, calculam-se as perdas de carga para cada intervalo de dados e os coeficientes de perda de carga total, que relacionam a perda de carga interna, a partir da válvula de controle até a entrada do reservatório com o quadrado da vazão de entrada no reservatório, conforme a equação 11.

$$K = \Delta h / Q^2 \quad \text{equação (11)}$$

Onde: **K** = coeficiente de perda de carga ( $m^{-5}.s^2$ )  
 **$\Delta h$**  = perda de carga total na entrada do reservatório (m)  
**Q** = vazão veiculada pela válvula de controle ( $m^3.s^{-1}$ )

Foi ajustada uma curva característica aos pontos obtidos entre **K** e abertura, utilizando-se a equação 12.

$$\log_{10} (K) = K_0 + K_t * \log_{10} (\theta) \quad \text{equação (12)}$$

Onde: **K** = coeficiente de perda de carga ( $m^{-5}.s^2$ )  
 **$K_0$**  e  **$K_t$**  = parâmetros de ajuste da equação, obtidos pelo método dos mínimos quadrados  
 **$\theta$**  = Abertura da válvula de controle, em %.

Para cada centro de controle, foi construída uma curva de frequência das perdas de cargas calculadas, para todos os intervalos de dados.

Foi definida uma função entre a perda de carga interna e a abertura da válvula de controle, dada na equação 13.

$$\Delta H = \alpha_1 * e^{\beta_1 * \text{Abert}} \quad \text{equação (13)}$$

Onde:  **$\Delta H$**  é a perda de carga na área interna do centro de reservação (m)  
 **$\alpha_1$**  e  **$\beta_1$**  são os coeficientes de ajuste da equação  
**Abert** = Abertura da válvula de controle (%).

Com base no ajuste, foi calculada a perda de carga teórica para a válvula totalmente aberta.

Com os resultados obtidos de todas as válvulas utilizadas foram construídos os histogramas e as curvas de frequência acumulada das seguintes variáveis.

- Modas das aberturas das válvulas de controle;
- Perdas de cargas teóricas para válvulas totalmente abertas;
- Coeficientes de perda de carga (função do quadrado da vazão) para válvulas totalmente abertas;
- Coeficientes de perda de carga (função do quadrado da velocidade) para válvulas totalmente abertas;
- Pressões máximas a montante, junto às válvulas de controle.
- Coeficiente  $K_T$  e  $K_0$ , da equação 12

Os valores das variáveis e coeficientes calculados foram dispostos em mapas temáticos para análise de sua distribuição espacial. A base georreferenciada utilizada foi obtida do SIGNOS. A ferramenta para elaborar os mapas temáticos foi o ArcMap.

## **DIAGNÓSTICO OPERACIONAL DOS POTENCIAIS DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA NAS ENTRADAS DOS RESERVATÓRIOS**

Em função das condições topográficas e arranjo da rede de adução da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) existem, em alguns casos, pressões elevadas nas chegadas aos centros de reservação, que exige a instalação de válvulas especiais para a dissipação dessa energia e garantir o controle das vazões de adução. Foi efetuado um diagnóstico do potencial de recuperação de energia nesses locais, com o uso de turbinas hidráulicas ou bombas funcionando como turbinas (BFT) para aproveitamento da energia residual nas entradas dos reservatórios de distribuição. A energia gerada pode ser introduzida na rede de fornecimento de energia e ser utilizada como créditos para uso em outros locais ou pode ser utilizada no mesmo local onde é gerada.

Este diagnóstico já está em sua segunda edição, com a atualização dos dados e dos setores analisados. Os dados operacionais foram obtidos da base de dados do SCOA e os dados cadastrais foram obtidos da base georreferenciada do SIGNOS.

Foi desenvolvido um modelo de simulação simplificado da operação de uma turbina na entrada de um reservatório, em VBA – Excel, com interface automática com a base de dados do SCOA (Modelo *GERA*). A regra básica da operação consiste em manter uma faixa de vazão na turbina entre 80% e 100% da vazão de projeto. Quando a vazão de entrada no reservatório é inferior a 80% da vazão de projeto da turbina, a vazão turbinada é zero. Quando a vazão de entrada é maior do que a vazão de projeto, a vazão turbinada é limitada a 120% da vazão de projeto; acima deste valor, a vazão de entrada é complementada por uma válvula de controle auxiliar. Foi utilizada uma curva de eficiência simplificada, em que no melhor ponto de eficiência (vazão de projeto), o rendimento é admitido como um. Para casos reais, pode-se utilizar uma curva de eficiência fornecida pelo fabricante.

Foram simulados os intervalos horários de um ano, com dez cenários de vazões de projeto, variando entre 15% do consumo médio e 150% do consumo médio.

Para cada local simulado, foi criado um gráfico com a potência média gerada e a energia produzida em um ano, em função da vazão de projeto da turbina. Para o ponto de máxima energia produzida, foi calculada a potência média gerada, a energia anual produzida, o número de horas de funcionamento por ano, um gráfico com o número médio de horas de funcionamento e a potência média gerada ao longo das 24 horas e curvas de duração (curva de frequências acumuladas) das potências médias geradas. e das vazões turbinadas.

Foram criados dois indicadores, denominados de VarVaz e VarPot, definidos nas equações 14 e 15.

$$\text{VarPot} = (\text{Pot}_{10} - \text{Pot}_{90}) / \text{Pot}_{50} \quad \text{equação (14)}$$

Onde: **VarPot** = Índice de amplitude de potência.

**Pot<sub>10</sub>** = é a potência da curva de frequência acumulada, na frequência de 10%.

**Pot<sub>90</sub>** = é a potência da curva de frequência acumulada, na frequência de 90%.

**Pot<sub>50</sub>** = é a potência da curva de frequência acumulada, na frequência de 50%.

Quando este indicador se aproxima de zero, significa que a curva de frequência da potência gerada torna-se mais próxima de um valor constante, o que garante melhor eficiência de uma turbina que viesse a ser instalada.

$$\text{VarVaz} = (\text{Vaz}_{10} - \text{Vaz}_{90}) / \text{Vaz}_{50} \quad \text{equação (15)}$$

Onde: **VarVaz** = Índice de amplitude de vazão turbinada.

**Vaz<sub>10</sub>** = é a vazão turbinada da curva de frequência acumulada, na frequência de 10%.

**Vaz<sub>90</sub>** = é a vazão turbinada da curva de frequência acumulada, na frequência de 90%.

**Vaz<sub>50</sub>** = é a vazão turbinada da curva de frequência acumulada, na frequência de 50%.

Quando este indicador se aproxima de zero, significa que a curva de frequência da vazão turbinada torna-se mais próxima de um valor constante, garantindo assim, um maior tempo de funcionamento da turbina, caso fosse instalada.

Com os resultados obtidos de todos os locais analisados, foram construídos histogramas e curvas de frequência acumulada das energias anuais produzidas

Existem, na literatura, algumas classificações das usinas de geração de energia, em função de sua potência. Há algumas variações destas classificações. Adotou-se, neste diagnóstico, a classificação indicada na Figura 7.

Classificação de usinas de geração de energia em função da potência - kW											
0	Pico	5	Micro	100	Mini	1.000	Pequena	10.000	Média	100.000	Grande

**Figura 7: Classificações das usinas de geração de energia em função da potência**

As potenciais turbinas dos locais analisados foram classificadas de acordo com a Figura 7. As localizações destas turbinas com suas classificações foram dispostas em um mapa temática sobre a base georreferenciada do SAM.

## DIAGNÓSTICO OPERACIONAL DAS VÁLVULAS DE BLOQUEIO NOS CENTROS DE RESERVAÇÃO SETORIAIS DE DISTRIBUIÇÃO

Conhecer o consumo de uma região é uma importante medida usada para o dimensionamento de adutoras, reservatórios, estações elevatórias. Esses valores são acompanhados continuamente para serem comparados com os valores previstos no Plano Diretor de Abastecimento de Água (PDAA). Devido às constantes mudanças nas operações do sistema de adução, algumas válvulas de bloqueio nos centros de reservação têm seus status alterados. Em consequência, a fórmula de cálculo do consumo deve ser alterada.

As válvulas de bloqueio foram analisadas, manualmente, através da consulta às telas de operação de cada centro de reservação. Foram classificadas em quatro tipos: *Não importante* (O status da válvula não altera a fórmula do consumo); *Bomba* (Válvulas situadas nos barriletes de sucção ou de recalque das EEA); *Importante* (Válvulas individuais que podem alterar diretamente a fórmula do consumo) e; *Conjunto Importante* (Válvulas que individualmente não alteram a fórmula do consumo, mas em conjunto com outras podem alterar).

O aplicativo **VBQ** foi desenvolvido em uma planilha de Excel e utilizou o PI-Datalink como “add-in” para extrair os dados do banco de dados do SCOA. Ele é automatizado e compara os status das válvulas no primeiro instante do dia do mês atual com o do mês anterior, notificando o usuário caso algo se altere. Esse aplicativo monitora, mensalmente, os status dessas válvulas ou conjunto de válvulas *importantes*, gerando uma notificação quando há alguma alteração.

## DIAGNÓSTICO DA CAPACIDADE HIDRÁULICA DO SISTEMA ADUTOR

Para se efetuar um diagnóstico da capacidade de transporte do sistema adutor, foi criada uma metodologia, baseada em conceitos hidráulicos, que resultou em um indicador denominado Índice de Desempenho da Adução (**IDA**).

Utilizou-se um modelo matemático hidráulico da rede de adução (SAM), calibrado com as condições atuais. Fez-se uma simulação com dados de consumos previstos para um horizonte de cinco anos, para o dia de maior consumo, baseados nas previsões do Plano Diretor de Abastecimento de Água (PDDA).

Para a definição do indicador são analisados os aspectos hidráulicos de velocidade e perda de carga nas adutoras e pressões nas chegadas aos reservatórios setoriais de distribuição, que afetam o atendimento de um reservatório, no horizonte de cinco anos, admitindo-se que a infraestrutura atual seja mantida inalterada.

No primeiro critério de análise, classifica-se um setor, de acordo com as pressões na sua chegada: pressão menor que 5mca – Vermelho; pressão entre 5mca e 10mca – Amarelo e pressão maior ou igual a 10mca – Verde.

No segundo critério, analisam-se as condições das adutoras que atendem um reservatório, de acordo com a velocidade (V) e perda de carga unitária (J): V maior que 3m/s e J maior que 10m/km - Vermelho; V maior que 3m/s e J menor que 10m/km - Amarelo; V menor que 3m/s e J maior que 10m/km - Amarelo; V entre 2,5m/s e 3m/s e J entre 8m/km e 10m/km – Amarelo; V menor que 3m/s e J menor que 10m/km – Verde.

Para cada setor prevalece a condição mais crítica entre os dois critérios. Os setores classificados como Vermelho são considerados como setores com problemas. O IDA é definido pela equação 16.

$$\text{IDA} = \text{N}^\circ \text{ setores com problemas} * 100 / \text{N}^\circ \text{ setores analisados} \quad \text{equação (16)}$$

Onde: **IDA** = Índice de Desempenho da Adução

**Nº setores com problemas** = total de setores classificados como vermelho

**Nº setores analisados** = total de setores envolvidos em um agrupamento analisado. O agrupamento pode ser um Sistema, um município, uma Unidade de Negócio, uma Unidade de Gestão Regional ou todo o SAM.

Com os valores dos IDAs para os diversos agrupamentos são gerados gráficos com as estatísticas de números de setores críticos, tabelas com a identificação das adutoras críticas e um mapa temático com as classificações dos setores. O mapa temático foi feito sobre a base georreferenciada do SIGNOS e com a utilização da ferramenta do ArcMap.

## DIAGNÓSTICO OPERACIONAL DAS ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ÁGUA TRATADA

O SAM é um sistema complexo e inserido em uma região com topografia bastante acidentada, com variações de elevações acima de 300m. Para permitir a adução das vazões das ETAs até os reservatórios setoriais de distribuição, muitas vezes é necessário a utilização de estações elevatórias de água tratada (EEAT).

O parque atual conta com cerca de 62 estações de bombeamento nas adutoras, além de 14 estações de bombeamento nas saídas das ETAs. O consumo de energia é muito elevado e corresponde a uma grande parcela do custo final da água distribuída.

Para a realização do diagnóstico de riscos das EEATs (**GREAT**) foram utilizados os dados históricos da base do SCOA, os coeficientes de consumo (K1) do PDAA, os consumos de energia elétrica e as características técnicas das elevatórias do SSIIS (ERP da Sabesp).

Com base nos dados de um ano de operação foram definidos alguns valores de classificação e calculados alguns indicadores descritos a seguir.

O critério para definição do **grau de relevância** das EEATs, sob o ponto de vista operacional, é a “vazão média de recalque”, que representa, de forma indireta, a população atendida. Foram definidos cinco níveis de importância: Grau alto: acima de 2300 L/s; Grau médio alto: entre 1600 L/s e 2300 L/s; Grau médio: entre 650 e 1600 L/s; Grau médio baixo: entre 300 e 650 L/s; Grau baixo: abaixo de 300 L/s.

A **taxa de ocupação** (TO) é a relação de horas de operação da EEAT pelo tempo total do período analisado. O número de horas de operação da EEAT é obtido através da média do número de horas de operação de cada conjunto motobomba da instalação. Foram definidas cinco faixas: Alta ocupação: acima de 90%; Média Alta ocupação: de 75% até 90%; Média ocupação: de 50% a 75%; Baixa ocupação: abaixo de 50%

O **índice de adequação** (IA) é uma relação teórica entre a capacidade de bombeamento da estação e a vazão média de bombeamento da mesma no período analisado. A capacidade de bombeamento da EEAT, chamado de vazão limite, é obtida através de modelagem hidráulica do SAM, com todos os conjuntos motobomba da instalação ligados com exceção de um grupo, sendo este considerado um grupo reserva. Com base no histórico de vazões do período

de análise do estudo obtém-se a vazão média de bombeamento da instalação. Este valor é ajustado, pela majoração com o coeficiente do dia de maior consumo, K1, adotado como 1,15, conforme indicado no PDAA. Portanto, o Índice de Adequação da Elevatória é calculado pela equação 17.

$$IA = \text{VazMed} * K1 / \text{VazLim} \quad \text{equação (17)}$$

Onde: **IA** = índice de adequação da EEAT (valor positivo);

**VazMed** = vazão média bombeada pela EEAT, no período de análise

**K1** = coeficiente do dia de maior consumo, adotado como 1,15

**VazLim** = Vazão resultante do modelo, com todas as bombas da EEAT ligadas, menos uma (reserva).

Se o resultado for menor ou igual a 1 a instalação está adequada, ou seja, é capaz de operar na vazão necessária e possui pelo menos 1 conjunto motobomba reserva.

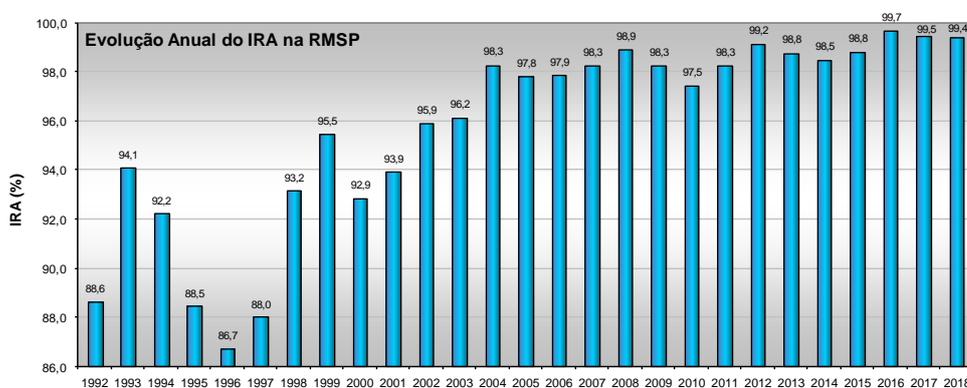
O **índice de revezamento** dos conjuntos motobomba relaciona o índice de ocupação de cada conjunto motobomba de uma EEAT com a ocupação média da instalação. São consideradas desbalanceadas, as EEATs que possuem conjuntos motobomba com uma variação para mais ou para menos de 20% de ocupação em relação à média da instalação.

A **eficiência energética global** é a relação entre a energia efetivamente transferida para a água e a energia elétrica consumida na instalação. Para o cálculo do rendimento, foram analisadas as EEATs que dispunham de medidores de pressão na sucção e no recalque da EEAT e medição da vazão recalçada. Conforme a classificação estabelecida pela IWA - Ph5, as eficiências em elevatórias de água são divididas em três faixas: Bom – 68% a 100%; Mediano – 50% a 68% e; Insatisfatório: inferior a 50%.

## RESULTADOS OBTIDOS

Serão apresentados alguns resultados, a título de ilustração e que servirão de base às discussões finais. Não haveria espaço para apresentar detalhes dos resultados de todos os diagnósticos, mas sem afetar o objetivo deste artigo.

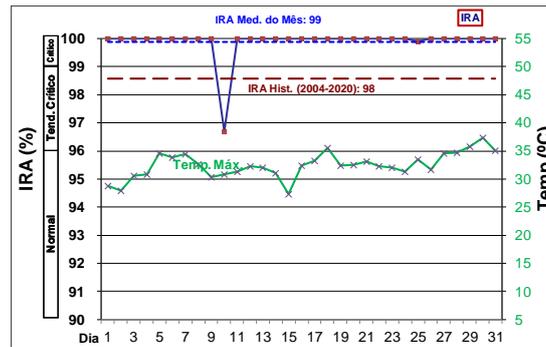
O IRA é o indicador mais antigo que foi criado para o diagnóstico do SAM. Até o final da década de 1990, havia uma parcela significativa da RMSP com rodízios permanentes, o que provocava quedas significativas do IRA. Após um grande programa de obras, no final da década de 1990, o abastecimento foi normalizado e o valor do IRA da RMSP atingiu hoje, valores próximos de 100% (Figura 8).



**Figura 8: Evolução do IRA da RMSP de 1992 a 2018.**

A sua maior utilidade é auxiliar na gestão operacional do SAM. Permite a detecção de algum setor que esteve com alguma restrição como falta de energia elétrica ou manutenção.

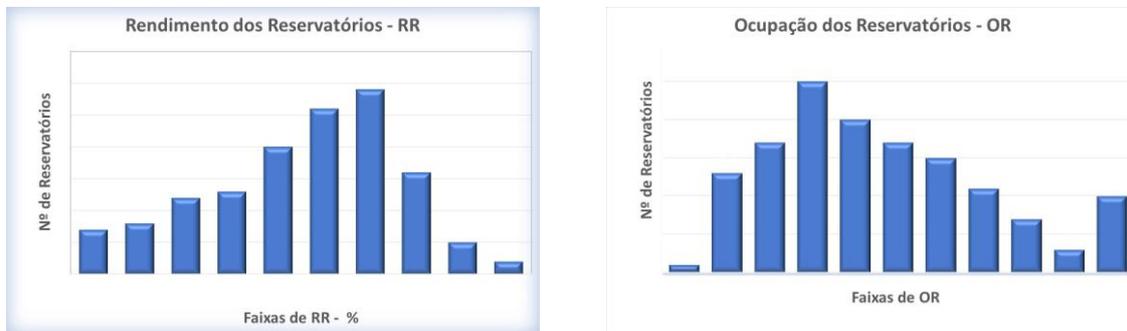
A Figura 9 mostra um exemplo, em que a falta de energia provocou a insuficiência da capacidade de adução, afetando vários reservatórios, causando uma redução no IRA da RMSP.



**Figura 9: Queda no IRA da RMSP, devido a uma falha importante de energia elétrica.**

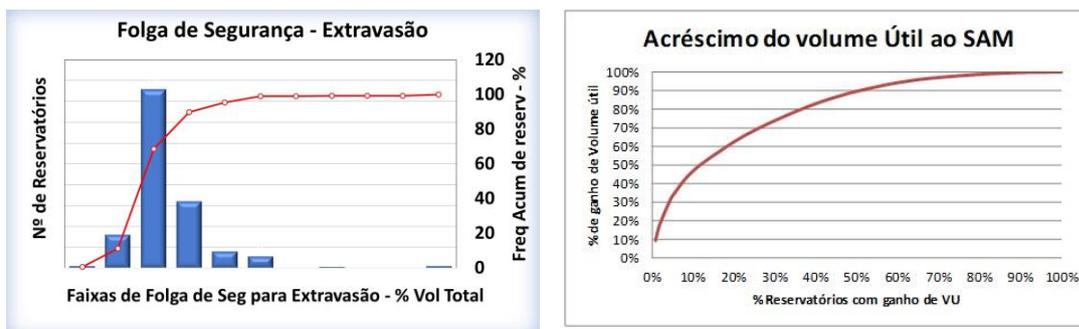
A avaliação da reservação setorial é feita, anualmente, no programa POAR. Para cada reservatório, é possível ter um diagnóstico completo de suas necessidades de reservação. Um exemplo dos resultados agregados está apresentado na Figura 10. Os histogramas permitem avaliar o grau de aproveitamento da reservação existente no SAM. Os valores foram omitidos do gráfico, para preservar o sigilo das informações.

No primeiro caso, se os valores de RR menores que 75% representassem um número grande de reservatórios, isto indicaria a necessidade de reavaliação dos limites operacionais, quer seja por regras operacionais ou por alterações estruturais. No segundo gráfico, pode-se obter uma informação importante de quantos reservatórios estão com OR acima do desejado, para que sejam previstos nos orçamentos de investimentos, a expansão desses reservatórios ou a criação de novos setores, para redução de algum setor crítico em reservação.



**Figura 10: Histogramas dos coeficientes RR e OR dos reservatórios do SAM.**

O diagnóstico dos limites operacionais máximos dos reservatórios (Limite Alto) é feito para cada reservatório, para orientar a sua elevação, com ganho de volume útil ou sua redução, para preservar a segurança operacional. Os resultados apresentados na Figura 11 demonstram resultados muito úteis, quando se analisam o conjunto de todos os reservatórios.



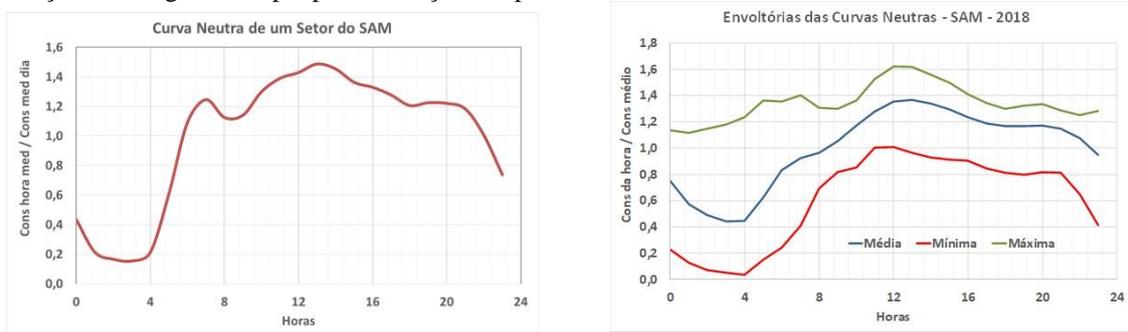
**Figura 11: Histograma das folgas de segurança contra extravasão (e) e curva de ganhos de volumes úteis (d)**

No primeiro gráfico, a moda das folgas obtidas pode ser utilizada como um parâmetro orientativo no projeto de novos reservatórios. Também é possível destacar os reservatórios que estão à direita do histograma e

investigar como estão sendo feitas as regras de operação desses reservatórios, no sentido de conseguir uma redução do limite alto, mantendo a segurança operacional. No segundo gráfico, pode-se verificar quais são os reservatórios mais promissores para se ganhar volume útil, através do aumento do limite alto.

Com a análise das curvas de consumos dos setores atendidos pelo SAM, foi possível definir os coeficientes de consumo K1, K2, K3 e K1K2 específicos para cada setor, que são diferentes daqueles orientados pela norma técnica. Em vários casos, os coeficientes obtidos foram superiores aos indicados por norma, o que garante que se faça projetos com mais representatividade da condição real. Os valores obtidos também foram úteis para as análises de expansão do SAM, efetuadas pelo PDAA. Para setores novos, pode-se utilizar os coeficientes obtidos para setores com perfil de ocupação semelhante e que possuem dados.

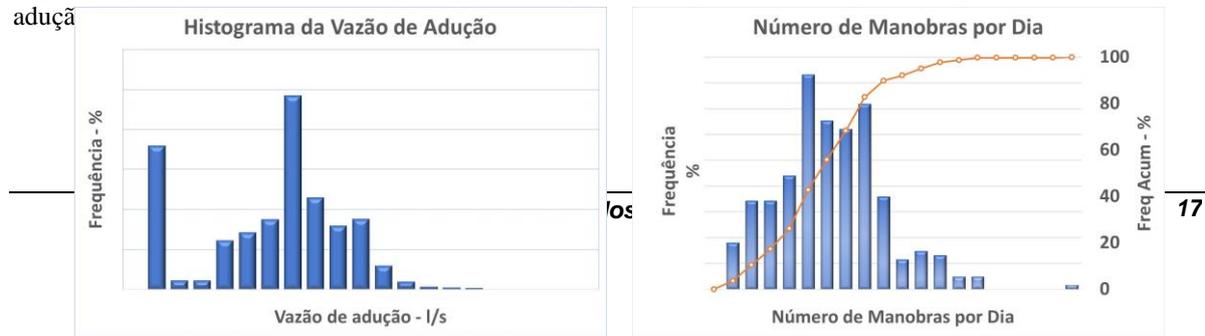
A Figura 12 ilustra um exemplo de resultados obtidos, mostrando as curvas neutras de um setor de abastecimento do SAM e a curva agregada com todos os setores analisados. A curva de um setor pode ser utilizada para planejamentos de intervenção no reservatório, que venha a causar um desabastecimento. Os serviços podem ser programados para as horas de menor consumo, e assim, provocar menos impactos negativos ao abastecimento. O valor mínimo das curvas neutras de um setor (também associado ao coeficiente K3) pode estar associado aos indicadores de perdas reais do setor. Assim, um valor elevado no ponto de mínimo pode indicar que há vazamentos significativos na rede. A curva neutra agregada de todo o SAM mostra a variedade de tipos de ocupação e perfis de consumidores no SAM. Estas curvas podem sofrer alterações ao longo do tempo, por mudanças comportamentais dos consumidores.



**Figura 12: Curva neutra de um setor de abastecimento (e) e envoltórias das curvas neutras de todos os setores do SAM (d).**

A análise de eficiência operacional das válvulas de controle é feita sobre vários indicadores calculados no aplicativo. Seus valores podem indicar a necessidade de substituição de válvulas, a alteração de regras operacionais e até mesmo propor alterações em reservatórios e adutoras. Um número excessivo de manobras, por exemplo, pode sugerir um volume útil insuficiente, que obriga que o ciclo de enchimento e esvaziamento seja menor do que 24 horas. Um indicador que mostre que a válvula permanece totalmente aberta, por grande parcela do tempo, pode indicar uma insuficiência hidráulica de adução, uma válvula inadequada ao controle ou outras questões que devem ser analisadas pontualmente. O ganho que se obtém com os indicadores calculados de forma automática é que se pode salientar locais que precisam de alguma intervenção prioritária.

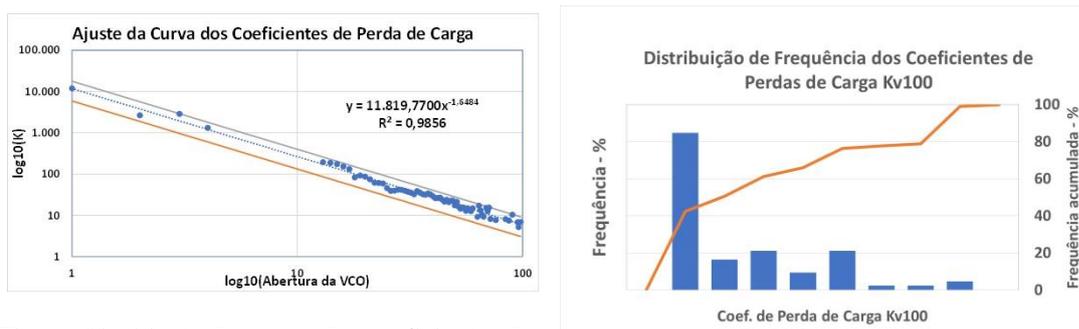
Na Figura 13, o gráfico de vazão média aduzida é resultado da análise de uma válvula específica. Observa-se que há uma vazão com maior frequência de ocorrência (moda), mas há uma grande dispersão. Isto demonstra que a operação de adução ao reservatório está longe de uma regra teórica de vazão constante. Também mostra que a válvula deve permitir uma boa controlabilidade para vazões pequenas, que ocorrem com frequência significativa e que não é restritiva à passagem de grandes vazões. O acompanhamento deste gráfico ao longo do tempo, permite antecipar a necessidade de substituição da válvula, quando as vazões deixarem de estar na faixa de operação recomendada em projeto. O histograma e a curva de frequências acumuladas do número médio de manobras realizadas por dia, é o resumo de todas as válvulas analisadas. Observa-se que a curva de frequências acumuladas cresce de forma relativamente acentuada até cerca de 95%. Isto significa que 5% das válvulas têm uma operação muito distinta das demais. Isto leva a uma investigação mais detalhada sobre a regra de operação adotada, se foi por opção do operador ou por uma restrição de alguma infraestrutura de adução



**Figura 13: Histogramas das vazões de adução por uma válvula de controle (e) histograma e curva de frequências acumuladas do número médio de manobras das válvulas de controle do SAM.**

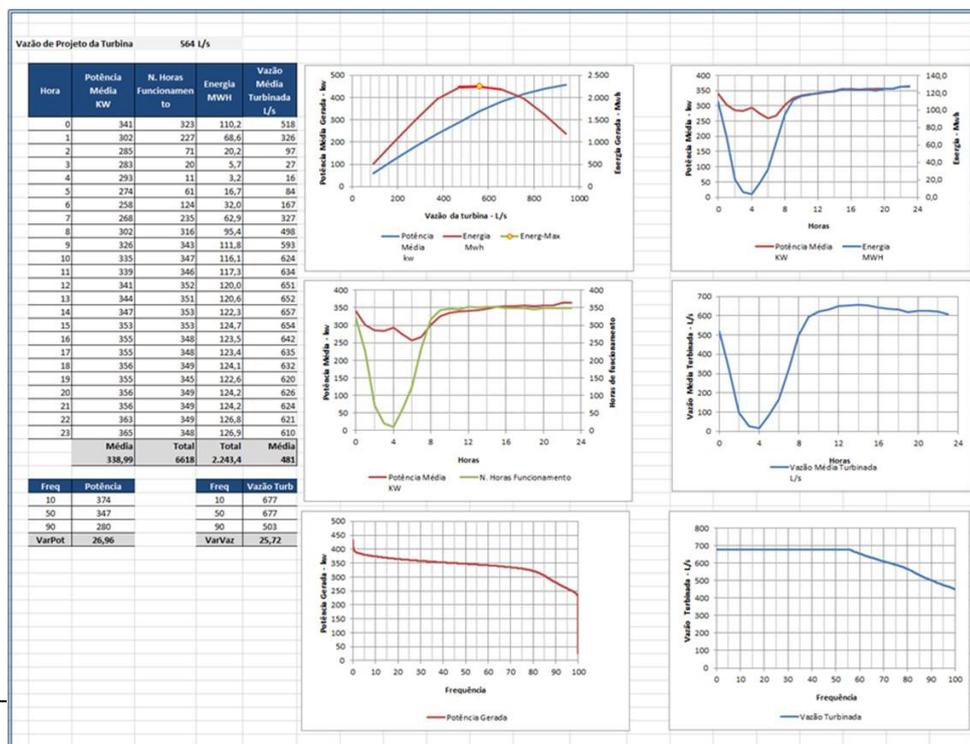
O diagnóstico das perdas de carga nas estruturas internas de adução em um centro de reservação permitiu definir as curvas características de perdas de carga em função da abertura da válvula de controle de um reservatório.

A Figura 14 mostra um exemplo do resultado do ajuste da equação 12 a um caso específico. Observa-se que a aderência do ajuste, em geral, para todos os casos analisados foi muito satisfatória (valores de R2 próximos de 1). Com esta curva pode-se modelar o SAM, em regime contínuo no tempo, contemplando as regras de operação das válvulas de controle. Um resultado obtido de uma análise agregada de todas as entradas dos reservatórios está exemplificado no histograma e na curva de frequência dos coeficientes de perda de carga associados ao quadrado da velocidade, para a condição de válvula totalmente aberta (Kv<sub>100</sub>). Nota-se um número reduzido de locais com altos valores de Kv<sub>100</sub>. Estes locais podem ter válvulas com grande restrição, para quebras de altas pressões (o que pode indicar junto com a análise do GERA uma possibilidade de recuperação da energia dissipada) ou as tubulações internas e singularidades podem estar provocando grandes perdas de carga, motivo para se avaliar a sua substituição.



**Figura 13: Ajuste da curva dos coeficientes da equação 12 (e) histogramas e curva de frequências acumuladas do coeficiente Kv<sub>100</sub>.**

Para exemplificar um resultado do aplicativo **GERA**, apresenta-se, na Figura 14, uma saída do aplicativo para um caso hipotético. Conforme a análise das curvas resultantes, pode-se elencar os locais com maiores potenciais de recuperação de energia. O diagnóstico já foi repetido por duas vezes. Atualmente, há dois locais com aproveitamento energética na entrada de reservatório já operantes: no primeiro local, está sendo operada uma bomba funcionando como turbina (BFT); no segundo, há uma turbina de fluxo inserida na tubulação de entrada de um reservatório. Há um projeto em desenvolvimento, para a instalação de 11 turbinas em entradas de reservatórios.

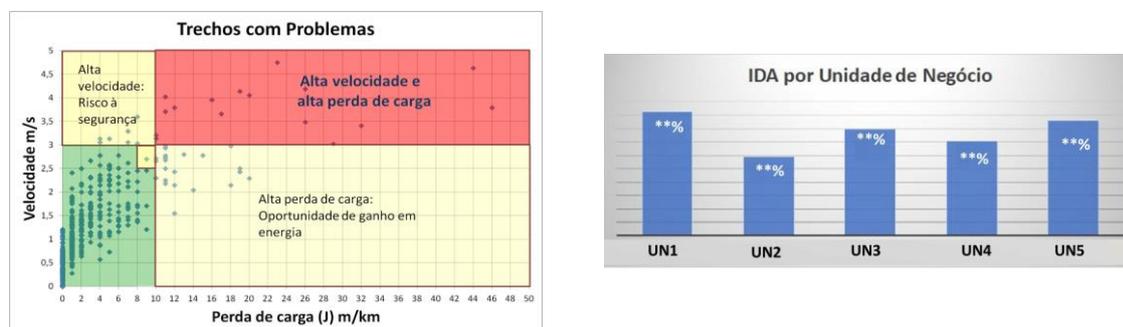


**Figura 14: Exemplo de saída do aplicativo GERA.**

O diagnóstico do potencial de geração de energia em entradas de reservatórios também alterou a concepção de novos projetos de reservatórios, onde já se prevê a instalação de turbina em paralelo à válvula de controle.

O diagnóstico do desempenho feito através do indicador IDA permitiu identificar trechos de adutoras que estariam em condições críticas, caso não houvesse uma melhoria da sua infraestrutura. No modelo matemático hidráulico utilizado para a simulação da adução no SAM, cada adutora é dividida em trechos menores, para garantir a melhor representatividade das características físicas e hidráulicas (diâmetros, materiais, coeficientes de rugosidade).

A Figura 15 ilustra um resultado obtido da simulação do SAM, em um cenário futuro (5 anos) em um dia de maior consumo. O gráfico à esquerda apresenta as áreas coloridas, de acordo com os critérios adotados descritos anteriormente. Este gráfico permite identificar os trechos de adutoras que precisam ser adequados. Associados a essas adutoras que possuem um potencial de restrição de adução, estão os reservatórios classificados como “com problemas” na equação 16. O gráfico com os resultados do IDA, por Unidade de Negócio é um exemplo de cálculo por um tipo de agrupamento. Outros agrupamentos foram feitos, como por Sistema Produtor, Município, UGR e subsistemas de adução.

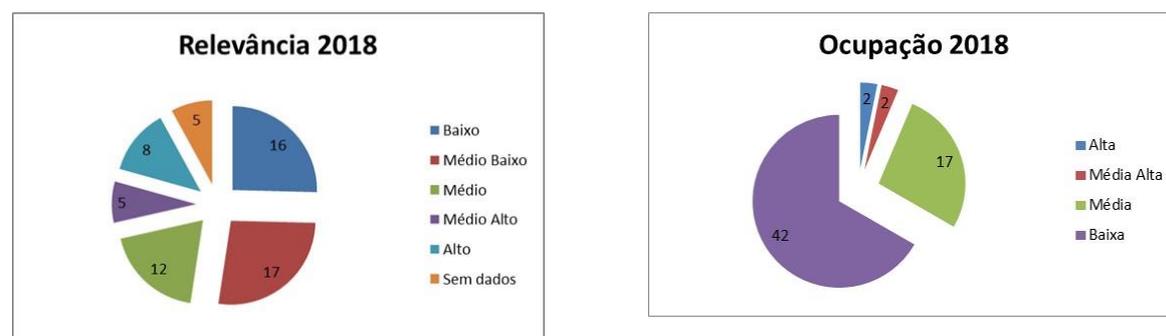


**Figura 15: Resultados do diagnóstico de adutoras, através do IDA.**

Os resultados obtidos permitiram priorizar as obras de adução nos planejamentos de investimentos.

O GREEAT permitiu uma análise individual das elevatórias do SAM. Como resultados práticos do diagnóstico, foram iniciados diversos estudos para solucionar casos específicos, sendo que três deles já foram concluídos.

Os gráficos da Figura 16 mostram as classificações das EEATs analisadas com relação à relevância e ao índice de ocupação.



**Figura 16: Classificação das EEATs por relevância e índice de ocupação.**

Foi detectada a necessidade de se ampliar o parque de monitoramento das pressões nas EEATs, que se mostrou insuficiente para uma análise mais ampla das eficiências energéticas. Como consequência, foi iniciado um trabalho de instalação de novos medidores de pressão e também de medidores de variáveis elétricas.

## **ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Os resultados obtidos até o momento com a criação de diversos aplicativos e indicadores para o diagnóstico operacional do SAM têm se mostrado importantes não apenas para uma gestão operacional do sistema, mas também para apoiar o planejamento da expansão e atualização da infraestrutura do SAM.

Alguns diagnósticos e alguns indicadores já foram repetidos por mais de um ciclo anual. Após a consolidação destes diagnósticos nos próximos anos, será possível uma avaliação evolutiva da performance operacional do SAM.

## **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Os resultados dos diagnósticos efetuados com a metodologia apresentada mostraram-se úteis para a gestão operacional do SAM, com a adequação de regras operacionais, para o planejamento de investimentos, com a priorização das obras de melhoria em infraestrutura, redução de custos de energia, com a adequação de EEATs e a recuperação de energia nas entradas dos reservatórios e garantia da segurança operacional, com os ajustes de limites operacionais, ajustes nas EEATs e seleção de obras necessárias para garantia da capacidade hidráulica do SAM.

O diagnóstico operacional permitiu apontar as intervenções necessárias para garantir a otimização do uso e a segurança da operação das estruturas existentes.

O processo de gestão operacional é evolutivo e dinâmico como o próprio sistema de abastecimento de água. Novas evoluções já estão sendo planejadas para se criar um sistema de diagnóstico que seja integrado aos planos de investimentos e que acompanhe o desenvolvimento tecnológico do processo de operação do sistema adutor.

A divulgação do desenvolvimento efetuado busca disseminar o conhecimento adquirido, para que a metodologia possa ser aplicada com as modificações necessárias às especificidades de cada sistema.

Procura-se provocar uma discussão produtiva para a evolução deste processo, de forma que se possa cada vez mais atender a população com melhor qualidade nos serviços de abastecimento de água e com redução dos custos operacionais e, com isto, contribuir para uma antecipação da universalização dos serviços de saneamento básico no nosso país.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019. Brasília: SNS/MDR, 2020. 183 p.: il.
2. DUARTE, P. et al. - Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água. IWA Publishing / Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC / Instituto Regulador de Águas e Resíduos – IRAR. Lisboa, 2004.276p
3. SILVA, N.A.S. - Pesquisa de indicadores para gestão de sistemas de abastecimentos de água. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Orientador: Edevar Luvizotto Junior. Campinas, SP: [s.n.], 2003.