

## **XI-033 - MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO DE PERFORMANCE ENERGÉTICA E HÍDRICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E ESGOTAMENTO SANITÁRIO**

**Rita Cavaleiro de Ferreira** <sup>(1)</sup>

Engenheira do Território pela Universidade Técnica de Lisboa (UTL/IST). Pós-Graduação em Engenharia Sanitária pela Universidade Nova de Lisboa (UNL/FCT). Consultora da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH* (GIZ) e Coordenadora do ProEESA - Projeto de Eficiência Energética em Sistemas de Abastecimento de Água.

**Jonas Gonçalves**

Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Consultor do ProEESA - Projeto de Eficiência Energética em Sistemas de Abastecimento de Água junto da Coordenação Geral de Planejamento e Regulação da Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério de Desenvolvimento Regional.); Professor na Unoeste – Universidade do Oeste Paulista

**Giancarlo Lupatini**

Engenheiro Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR) e Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Engenheiro de Pesquisa e Inovação com atuação na área de Saneamento Ambiental.

**Carolina Bayer Gomes Cabral**

Consultora do ProEESA - Projeto de Eficiência Energética em Sistemas de Abastecimento de Água junto da Coordenação Geral de Planejamento e Regulação da Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério de Desenvolvimento Regional.

**Jessica Rocha Gama**

Engenheira de Energia; Mestre em Sistemas de Potência pela Universidade de Brasília (UnB); Consultora do ProEESA - Projeto de Eficiência Energética em Sistemas de Abastecimento de Água junto da Coordenação Geral de Planejamento e Regulação da Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério de Desenvolvimento Regional.

**Endereço**<sup>(1)</sup>: Secretaria Nacional de Saneamento /Ministério de Desenvolvimento Regional, SAUS, Quadra 1, lote 1/6 – Bloco H – Edifício Telemundi II, 9º andar, CEP 70.070-010, Brasília-DF, Brasil, + 55 (61) 2108 1057, [rcavaleirodeferreira@gmail.com](mailto:rcavaleirodeferreira@gmail.com)

### **RESUMO**

O objetivo deste trabalho é definir estratégias de Medição e Verificação para várias tipologias de projetos de eficiência energética em sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário de acordo com o Protocolo Internacional de Medição e Verificação de *Performance* (PIMVP) da EVO – *Efficiency Valuation Organization*. As estratégias incluem a indicação da opção PIMVP, delimitação da fronteira de medição, definição do modelo da linha base, fatores estáticos típicos, fatores interativos e a definição do período e intervalo de medição para elaboração da linha de base, assim como para a determinação das economias. É objetivo facilitar a aplicação do PIMVP em projetos de eficiência energética e hídrica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Medição e Verificação, eficiência energética, água, saneamento, PIMVP.

### **INTRODUÇÃO**

Projetos de eficiência energética e hídrica evitam custos e têm impactos benéficos para a sociedade e para o meio ambiente. Muitos projetos de eficiência realizam-se sem que haja medição e verificação da *performance*. Nesses casos subsiste a dúvida da dimensão da economia gerada, especialmente quando os consumos de água ou energia são superiores aos anteriores às ações de eficiência ou quando as oscilações de consumos ocultam os ganhos hídricos e energéticos de eficiência.

O uso do PIMVP – Protocolo Internacional de Medição e Verificação da EVO – *Efficiency Valuation Organization* confere credibilidade aos custos evitados, atribui ganhos de eficiência de modo inequívoco, o que por sua vez gera maior transparência para o investimento em projetos de eficiência energética e hídrica.

A Medição e Verificação (M&V) definida no PIMVP ainda é uma ferramenta pouco utilizada no setor de saneamento.

M&V é o processo de planejar, medir, coletar e analisar dados com o objetivo de verificar e determinar as economias de energia e de água dentro de uma instalação individual, alcançadas pela implementação de ações de eficiência (adaptado de EVO, 2017) e que pode ser usado para diversas finalidades:

- determinação dos ganhos de produtividade para efeitos de compartilhamento entre os prestadores de serviço e os usuários dos serviços de saneamento básico conforme previsto no art. 21, item IV da Lei nº 11.445, de 2007;
- aplicação em contratos de desempenho com empresas de serviços de energia (ESCO – *Energy Saving Companies*);
- acesso a recursos do Programa de Eficiência Energética da ANEEL (PEE);
- contabilização de custos evitados no âmbito de fundos ou programas corporativos de eficiência energética, com vistas a alocação de recursos para financiamento de novos projetos de eficiência energética; e
- subsidiar a tomada de decisão dos órgãos diretivos pela execução de projetos de eficiência energética e hídrica.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia compreendeu cinco etapas a saber:

- 1) Identificação das opções PIMVP;
- 2) Seleção de projetos de eficiência energética típicos em saneamento;
- 3) Classificação de projetos (ou grupos de projetos) de acordo com as opções do PIMVP mais apropriadas;
- 4) Definição de variáveis independentes, dependentes, fronteiras de medição, modelo de linha base, fatores estáticos e interativos para cada projeto ou grupo de projeto; e
- 5) Rearranjos, caso necessário, de projetos nas de opções PIMVP.

## **PRIMEIRA ETAPA: OPÇÕES PIMVP**

O PIMVP fornece as seguintes 4 opções para desenvolver e implementar um processo de Medição e Verificação.

Opção A – Isolação da Ação de Eficiência Energética (AEE): Medição de parâmetros chave;

Opção B – Isolação da AEE: Medição de todos os parâmetros;

Opção C – Toda a instalação;

Opção D – Simulação calibrada.

Detalhes de cada opção PIMVP podem ser consultadas no documento original que incluem a definição, cálculo da economia e aplicações típicas do setor residencial/industrial como por exemplo iluminação, ar condicionado e gestão energética (genérica). Os exemplos do PIMVP têm poucas referências a projetos de saneamento, motivo pelo qual este trabalho tenta explorar mais a área temática do saneamento.

## **SEGUNDA ETAPA: PROJETOS TÍPICOS DE EFICIÊNCIA HÍDRICA OU ENERGÉTICA NO SETOR DE SANEAMENTO**

Alguns projetos na área de saneamento, devido sua natureza, tem correlação direta com a adoção de medidas de eficiência energética, a exemplo de:

Reabilitação ou substituição de motores, de bombas ou de ambos;

- Melhoria de carga através do uso de inversores de frequência;
- Instrumentação e automação;
- Redução de perdas de água e do volume bombeado (hídrica e energética).

Outros projetos, devido seus efeitos indiretos, são normalmente menos associados a projetos de eficiência energética, apesar de apresentarem potenciais de economia a exemplo de:

- Aumento do volume reservado – redução de demanda na ponta;
- Substituição e renovação de adutoras para a redução das perdas de carga;
- Alteração na disposição do sistema de abastecimento;
- Alteração de engenharia na concepção de sistemas de abastecimento;
- Redução de perdas de carga (remoção da formação de vórtices etc.).

Cabe destacar ainda, um terceiro grupo de projetos de eficiência energética ou hídrica, que está do “outro lado do hidrômetro”, isto é, a sua eficiência reduz os níveis de faturação dos prestadores de serviço e que apenas recebe maior atenção em momentos de crise hídrica (São Paulo 2014-2016, Brasília 2016-2017, Nordeste 2012-2018):

- Redução do consumo de água (e energia) pelo consumidor final.

Os projetos mais populares são os de incidência local (troca de um motor, automação, ect.), porém existem potenciais de economia nos projetos onde os resultados são mais difusos, um dos temas que se pretende evidenciar neste trabalho.

## **TERCEIRA ETAPA: CLASSIFICAÇÃO DE GRUPOS DE PROJETOS DE ACORDO AS OPÇÕES DO PIMVP**

A lista de ações de eficiência energética, acima referida, foi rearranjada na ótica das opções de PIMVP, isto é, pelo método com maior aderência as ações de medição e verificação de economias. Nesse contexto, foram agrupadas as medidas onde a estratégia de M&V era coincidente. Em diversos casos foi necessário subdividir as ações de eficiência hídrica ou energética tendo em conta a abordagem de medir. Por exemplo, redução de perdas de água foi dividido em distintos subprojetos: 1) Redução de pressão na rede; 2) Redução do tempo de reparação de vazamentos; 3) Reabilitação de ramais e de rede; 4) Troca de hidrômetros.

#### QUARTA ETAPA: ELEMENTOS CHAVE NA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO

No presente trabalho para cada ação de eficiência energética anteriormente listada foram definidos os seguintes elementos típicos na estratégia de M&V. Os elementos estão acompanhados de uma explicação que foi adaptada com base nos Conceitos básicos PIMVP (EVO, 2017).

- 1) **Resultados esperados** ou o **potencial de economia**: onde são feitas considerações gerais sobre a ação de eficiência;
- 2) **Opção PIMVP**;
- 3) **Variável dependente** (Água, Energia e/ou Demanda) e **variáveis independentes** típicas, sendo que as independentes variam rotineiramente e que tem um impacto esperado no consumo da variável dependente de um sistema ou instalação;
- 4) **Fronteira de medição**: que constituem os limites imaginários em torno de equipamentos, sistemas ou instalações, para segregar aqueles que são relevantes na determinação da economia de água, energia ou demanda daqueles que não o são. Todos os consumos das variáveis dependentes de equipamentos ou sistemas dentro da fronteira devem ser medidos ou estimados;
- 5) **Modelo da linha base**: sendo a referência para comparar o desempenho obtido após a aplicação de uma ou mais AEE;
- 6) **Fatores estáticos** típicos que são características de uma instalação que afetam o consumo de água, energia ou demanda dentro da fronteira de medição definida, porém espera-se que não se alterem e, portanto, não incluídas como variáveis independentes. Caso se alterem, ajustes necessitam ser calculados para levar em conta essas mudanças. Os fatores estáticos podem ser fixos, ambientais, operacionais ou de manutenção;
- 7) **Fatores interativos**: estes efeitos ocorrem fora da fronteira de medição e não são contabilizados. Para além de impactos na área hídrica ou energética foram enunciados efeitos do âmbito social, econômico ou de imagem pública;
- 8) **Período e intervalo de medição para elaboração da linha base**, que corresponde ao período de tempo definido, escolhido para representar a operação da instalação ou sistema antes da implementação de uma AEE;
- 9) **Período e intervalo de medição para a determinação de economia**, que corresponde ao período de tempo definido, escolhido para o propósito de verificar as economias obtidas após a implementação de uma AEE.

#### RESULTADOS

A seguinte tabela resume os novos agrupamentos de projetos e as respectivas opções PIMVP. Em seguida são apresentados os detalhes e considerações sobre os elementos chave da estratégia de Medição e Verificação para cada ação de eficiência.

**Tabela 1 – Resumo de Ações de Eficiência e Opção PIMVP.**

Ação de eficiência	Varável dependente	Opção PIMVP
1 Troca de conjunto motobomba com melhor rendimento em uma instalação elevatória e / ou instalação de inversor de frequência	Energia	C – Toda a instalação
2 Troca de conjunto motobomba e/ou instalação de inversor de frequência integrados em ETE ou ETA	Energia	B – Isolação da AEE: Medição de todos os parâmetros
3 Areação mais eficiente em estações de tratamento de esgoto	Energia	B – Isolação da AEE: Medição de todos os parâmetros
4 Evitar o uso de energia em horas de ponta em diversas operações unitárias (redução esperada >10%)	Demanda	C – Toda a instalação
5 Evitar o uso de energia em horas de ponta em diversas operações unitárias (redução esperada <10%)	Demanda	B – Isolação da AEE: Medição de todos os parâmetros
6 Redução de vazamentos por redução de pressão na rede de distribuição	Água e/ou energia	C – Toda a instalação
7 Redução de vazamentos por reabilitação de ramais de ligação e extensão de rede	Água e/ou energia	D – Simulação calibrada
8 Redução de vazamentos por redução do tempo de reparação de rede, ramais e cavaletes	Água e/ou energia	A – Isolação da AEE: medição dos parâmetros chave
9 Alterações no layout do sistema de distribuição	Energia	D – Simulação calibrada
10 Redução de perda de carga em barriletes, adutoras e outros pontos do sistema	Energia	Preferencialmente B, podendo também ser A, C ou D
11 Medição individualizada de consumos de água em condomínios	Água e/ou energia	C – Toda a instalação
12 Campanha de sensibilização para redução de consumo de água	Água e/ou energia	B – Isolação da AEE: Medição de todos os parâmetros ou C – Toda a instalação
13 Redução de submedição através de troca de hidrômetros	Perdas aparentes e / ou Dinheiro	A – Isolação da AEE: medição dos parâmetros chave

#### **1) M&V PARA TROCA DE CONJUNTO MOTOBOMBA COM MELHOR RENDIMENTO EM UMA INSTALAÇÃO ELEVATÓRIA E / OU INSTALAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA**

Podem ser medidos com a mesma opção do PIMVP a *performance* em uma instalação elevatória por meio da troca de bombas (hélices, rotores), motores, ou o conjunto completo motobomba por outros com melhor rendimento, assim como a colocação de inversor de frequência. O fator relevante é que o consumo de energia principal desse tipo de instalação está associado à elevação de água e outros consumos de energia existentes são pouco significativos, por exemplo, iluminação, ventilação, dosadores de cloro, vídeo câmera, transmissão de dados de telemetria, etc.

A redução de consumo pela ação de eficiência energética deve ser superior a 10%<sup>1</sup> para que esse efeito possa inegavelmente ser atribuída à ação eficiência com o seguinte processo de medição e verificação, portanto a opção de PIMVP para o cenário é a C – Toda a instalação elevatória de água. A Opção B não é recomendada pois exige a instalação de um medidor específico para isolar o consumo de energia exclusivamente do bombeamento.

A variável dependente, que se pretende explicar é energia consumida (kWh) e a variável independente, água elevada (m<sup>3</sup>).

Energia E (kWh) = f (m<sup>3</sup>) (equação 1),

onde:

V<sub>bombeado</sub> é o volume bombeado em m<sup>3</sup>.

As unidades recomendadas podem ser (kWh/mês) e (m<sup>3</sup>/mês) para coincidir com a periodicidade mensal de faturamento de eletricidade. É necessário fazer coincidir o período de medição do volume de água com o de energia.

A fronteira de medição considera duas grandezas: a eletricidade registrada no medidor da concessionária de energia e o medidor de vazão com totalizador de volume de água bombeado. O medidor de vazão pode estar dentro da estação elevatória, na captação de água ou na estação de tratamento, ou poderá estar à entrada ou saída de um reservatório a montante ou jusante da estação. O volume de água medido corresponde ao volume de água bombeado. O modelo da linha base é definida pela seguinte equação:

Energia (kWh) = consumo específico de energia (kWh/m<sup>3</sup>) x V<sub>bombeado</sub> (m<sup>3</sup>) +b (equação 2),

sendo:

b uma constante que resulte do modelo;

Fatores estáticos típicos e efeitos interativos: o nível de pressão deve ser um fator estático, ou seja, antes e depois da ação de eficiência energética a pressão de abastecimento deve se manter inclusive as suas oscilações diárias. O nível de água (nível de sucção) e as perdas de carga na adutora, associada à rugosidade da tubulação e seu nível de incrustação também são fatores estáticos, caso se verifique desvio significativo nesses valores, é necessária uma medição específica e incluir no modelo da linha de base na forma de variável independente. Outro fator estático é a perda de carga na adutora, associada à rugosidade da tubulação e seu nível de incrustação. Não foram identificados efeitos interativos.

Para determinação da linha de base se recomenda usar um ou mais anos de faturação, correspondendo a doze ou mais medições. Para esse período se registram os volumes de consumo. A disponibilidade destes dados costuma ser habitual. Na sua ausência, é necessária uma coleta propositada de dados, podendo ser uma semana correspondente ao um ciclo de funcionamento normal.

Para determinar a economia se recomenda usar um período correspondente a um período típico de funcionamento da instalação elevatória. O período deve ser representativo não devendo ser medidos em épocas de especial demanda como festivais ou feiras excepcionais na cidade, alta temporada das cidades turísticas, etc. Uma semana pode ser suficiente se usado equipamento de medição específico. Este é o método considerado mais prático e que menos interfere na operação regular de abastecimento de água.

3-6 meses podem ser suficientes se usado utilizado o medidor de energia da concessionária elétrica e de vazão. Constitui também um modo prático de acesso a dados, porém necessita de um período mais longo. Cabe ressaltar que se a bomba operar de modo extremamente variável sujeita a fenômenos climáticos (por exemplo para bombeamento de esgotos com águas pluviais), medir todo o espectro de funcionamento do conjunto moto-bomba para diversas vazões e pressões é necessário.

<sup>1</sup> Pág. 45 do EVO *Efficiency Valuation Organization* - Protocolo Internacional de Medição e Verificação de *Performance*, Conceitos Básicos e Opções para a Determinação de Economias de Energia e de Água Volume 1, janeiro 2012



## **2) M&V PARA TROCA DE CONJUNTO MOTOBOMBA E/OU INSTALAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA INTEGRADOS EM ETE OU ETA**

Podem ser medidos com a mesma opção do PIMVP a *performance* da substituição de conjunto motobomba por outros com melhor rendimento, assim como a instalação de inversor de frequência quando integrados em estações de tratamento, isto é, instalações com outros consumos de energia significativos para além do bombeamento.

O fator relevante para a opção PIMVP é que não seja ocultado os ganhos de eficiência das ações realizadas em função da escala da instalação e ou possíveis variações de consumo. Ou seja, variações na operação na unidade processual de aeração ou de lavagem de filtros, centrifugação de lodos etc., podem não evidenciar a energia evitada, motivo pelo que é necessária uma medição isolada. Dessa forma, a opção de PIMVP adequada para este caso é a B – Isolação da AEE: Medição de todos os parâmetros.

A variável dependente, que se pretende explicar é a energia consumida (kWh) para elevação de água e a variável independente o volume de água elevado ( $m^3$ ).

$$E \text{ (kWh)} = f \text{ (} m^3 \text{)} \quad \text{(equação 3)}$$

A fronteira de medição considera duas grandezas: a medição energia em medidor específico para a elevação de água e o medidor de vazão com totalizador de volume de água bombeado. O modelo da linha base é definida pela seguinte equação:

$$\text{Energia (kWh)} = \text{consumo específico de energia (kWh/m}^3\text{)} \times V_{\text{bombeado}} \text{ (m}^3\text{)} + b \quad \text{(equação 4)}$$

Nesse cenário, exemplos de fatores estáticos são os níveis de colmatação de eventuais grelhas ou dos filtros, associados à sucção e o estado de conservação das tubulações. Para esse cenário também não foram identificados efeitos interativos.

Para a determinação da linha de base se recomenda usar uma semana de medição em um período representativo. Se a bomba operar de modo extremamente variável (por exemplo para bombeamento de esgotos com águas pluviais) se pode medir todo o espectro de funcionamento do conjunto moto-bomba para diversas vazões e pressões. Já para determinar a economia se recomenda usar um período correspondente ao normal de funcionamento da instalação elevatória. Uma semana pode ser suficiente se usado equipamento de medição específico ou alternativamente o ensaio de todo o espectro de funcionamento do conjunto moto-bomba para diversas vazões. Esta alternativa se verifica logisticamente mais exigente, porém com um período de determinação mais curto.

## **3) M&V PARA AERAÇÃO MAIS EFICIENTE EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

Existem diversas opções para reduzir os gastos energéticos do processo de aeração, estes podem ser medidos com a mesma opção do PIMVP a *performance* de aeração em estações de tratamento de esgoto através de troca sopradores, troca de motores, e/ou alteração na tecnologia utilizada. A ação de eficiência pode ser a troca de difusores de ar/oxigênio, alteração de bolha grossa para bolha fina, aeradores superficiais ou profundos, uso de rotores mais propensos à mistura de ar-água e utilização de medidores de oxigênio online variando a frequência do aerador conforme a necessidade em tempo real de oxigênio, a altura da lâmina de água e do tanque de aeração também podem ser reduzidos necessitando de menos pressão de areação, etc.

A opção de PIMVP para estes casos é B – Isolação da AEE: Medição de todos os parâmetros. A variável dependente, que se pretende explicar é energia consumida (kWh) e as variáveis independentes são o volume de esgoto tratado ( $m^3$ ), a Demanda Química de Oxigênio (DQO) (mg/l).

$$E \text{ (kWh)} = f \text{ (quantidade esgoto tratado(m}^3\text{); DQO removido(mg/l)} \text{)} \quad \text{(equação 5)}$$

A DQO é um parâmetro que mede a quantidade de oxigênio necessária para ocorrer a oxidação da matéria orgânica biodegradável, caso se julgue relevante, podem ser medidos os parâmetros temperatura do esgoto ( $^{\circ}C$ )

e o pH da água. No entanto é fundamental conhecer a qualidade da água à entrada e à saída, pois uma redução no consumo de energia pode ser presumida como energia evitada, porém o nível de tratamento do efluente e respectiva carga poluente pode estar abaixo do requerido.

Se dá preferência ao uso da DQO em detrimento da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) por razões de uma determinação mais célere e de melhor controle operacional. A DQO se determina em cerca de 2 horas, a DBO é determinada em 3 ou 5 dias. A fronteira de medição nesse caso, considera quatro ou cinco grandezas:

- O medidor de energia, que pode ser da concessionária, desde que o resultado esperado de economia seja superior a 15%; Caso a economia esperada for inferior se recomenda um medidor específico para os sopradores / aeradores;
- O medidor de vazão de esgoto tratado (não deve incluir volumes relativos a recirculações, caso haja, pois, a eficiência medida é da aeração e não do bombeamento);
- Medidor de DQO do esgoto à entrada da estação ou do tanque de aeração;
- Medidor de DQO do esgoto à saída da estação ou do tanque de aeração;
- Medidor de temperatura e pH (podendo ser fatores estáticos ou variáveis independentes) no tanque de aeração, sendo que estas grandezas são medições normais de controle operacional.

Outra grandeza de medição é o oxigênio dissolvido no tanque de aeração, este parâmetro serve, porém, para regular as necessidades operacionais de aeração e não para efeitos de medição e verificação de desempenho. O modelo da linha base é definido pela seguinte equação:

$$\text{Energia (kWh)} = a \times \Sigma (\text{DQO}_{\text{removida}}) (\text{mg/l.dia}) + b \times \text{temperatura } (^{\circ}\text{C}) + c \times (\text{pH}) + d \quad (\text{equação 6}),$$

sendo:

a, b c coeficientes do modelo e d uma constante resultantes do modelo

$$\text{DQO}_{\text{removida dia } i} (\text{mg/l.dia}) = \text{DQO}_{\text{entrada dia } i} - \text{DQO}_{\text{saída dia } i} \quad (\text{equação 7})$$

Se pode fazer um paralelismo com ações de eficiência energética em sistemas de ar condicionado onde  $\text{DQO}_{\text{removida}}$  corresponde a graus.dia. Nesse contexto, a  $\text{DQO}_{\text{entrada}}$  corresponderia à temperatura ocorrida em determinado dia e  $\text{DQO}_{\text{saída}}$  corresponderia a temperatura de conforto, em sistemas de ar condicionado a variável independente são graus.dia, onde  $\text{graus.dia} = \Sigma (\text{temperatura}_{\text{externa dia } i} - \text{temperatura de conforto dia } i)$ . São fatores estáticos típicos nesse caso o rendimento dos motores dos sopradores, mecanismos de transferência de oxigênio para a água (obstrução e colmatagem de difusores, tamanho da bolha de ar/oxigênio, tempo de contato entre outros). As variações não esperadas na qualidade do esgoto (cargas fora do normal, cargas tóxicas, alterações de significativas de pH ou eventos de *wash-out* da matéria biológica) são fenômenos que requerem ajustes de não rotina na linha de base. Assim como nos cenários anteriores não foram identificados efeitos interativos.

No que tange o período de medição para determinação da linha de base, se recomenda medir estes parâmetros ao longo de 1 mês, desde que seja estável e representativo, com medições de DQO diários. Os demais parâmetros são de medição mais fácil e geralmente coletados em linha de processo de tratamento. Caso haja oscilações significativas na qualidade do esgoto afluente e na qualidade do esgoto tratado, então as medições devem ser prolongadas até se obter um modelo de linha base com boa adesão, de preferência  $r^2 > 0,75$ . Já para a determinação da economia,

o período recomendado é de um mês para estações de tratamento com operação estável em termos de qualidade de entrada e de saída ou de seis meses quando as oscilações são significativas.



#### 4) M&V PARA ECONOMIA DE ENERGIA EM HORAS DE PONTA EM DIVERSAS OPERAÇÕES UNITÁRIAS (REDUÇÃO ESPERADA DE DEMANDA >10%)

Diversas operações onde é possível evitar o uso de energia em horas de ponta podem ser medidos com a mesma opção PIMVP. Pode-se bombear em horário fora de ponta desde que exista capacidade suficiente de reserva de água. Uma medida de eficiência seria a operação em horário diferenciado ou o aumento de reserva. Algumas ações como a lavagem de filtros em estações de tratamento de água, as paradas de aeração em tanques de oxidação (períodos anóxicos), a centrifugação e ou desidratação de lodos podem ser programados para ocorrer fora do horário de ponta.

Neste cenário a economia de demanda dá-se com a seguinte fórmula:

$$\Delta P \text{ (kW)} = P_2 (1 - (t_2 / t_1)) \quad \text{em que: } t_2 > t_1 \quad (\text{equação 8})$$

onde:

$\Delta P$  é a economia de demanda e ;

$t_2$  e  $t_1$  são o tempo de operação antes e depois da ação;

A opção de PIMVP é C – toda a instalação, seja ela uma estação de tratamento de água, ou de esgoto. A seleção da opção C está condicionada a reduções superiores a 10% para que se possa atribuir à ação de eficiência energética a redução de energia. A variável dependente, que se pretende explicar é demanda (kW) e a variável independente horas de funcionamento em ponta ( $h_{\text{ponta}}$ ).<sup>2</sup>

$$\text{Demanda (kW)} = f(T_{\text{ponta}} \text{ (horas)}) \quad (\text{equação 9})$$

A fronteira de medição nesse cenário considera duas grandezas: medição de potência demandada (kW) no medidor da concessionária elétrica e medição de horas e horário de operação do equipamento. A medição de ambas as grandezas pode ocorrer no medidor da concessionária elétrica, não sendo necessário equipamento adicional do prestador de serviço de saneamento. A memória de massa, disponibilizada pela concessionária de energia, com frequência de 5 minutos é uma boa base sobre os dados de demanda ou um conjunto representativo de faturas de eletricidade. O modelo da linha base para esse caso é definido pela seguinte equação:

$$\text{Demanda (kW) em horas de ponta} = \text{Demanda em ponta (kW) em horas de ponta} + b \quad (\text{equação 10})$$

sendo:

b uma constante do modelo.

Neste caso a variável dependente (que se pretende explicar) coincide com a variável independente, os fatores estáticos típicos podem ser os picos de arranque dos motores que devem se manter antes e depois da ação de eficiência e não foram identificados efeitos interativos. A linha de base pode ser obtida com diversos conjuntos de dados, por exemplo as faturas elétricas com regularidade mensal (um conjunto de seis meses a um ano, deve ser suficiente) ou memória de massa com frequência de 5 minutos é uma boa base sobre os dados de demanda em horário de ponta. Para determinar a economia se recomenda usar um período mais prolongado para verificar que realmente a alteração operacional de caráter comportamental ocorreu. Se considera que seis meses a um ano é um bom período.

#### 5) M&V PARA ECONOMIA DE ENERGIA EM HORAS DE PONTA EM DIVERSAS OPERAÇÕES UNITÁRIAS (REDUÇÃO ESPERADA <10%)

As ações desse cenário são idênticas as apresentadas no 4) “Evitar o uso de energia em horas de ponta em diversas operações unitárias (redução esperada >10%)”, todavia a opção de PIMVP é B – Isolação da AEE, onde se mede os parâmetros especificamente dessa ação de eficiência, conforme referidos em seguida. A seleção da opção B está condicionada a reduções inferiores a 10% para que se possa, através de medições específicas, atribuir à ação de eficiência energética a redução de energia.

<sup>2</sup> Não constitui uma eficiência de energia, mas pode ser expresso em um ganho econômico para o prestador de serviço.  $\text{Gasto (R\$)} = f(t_{\text{ponta}})$ . A energia consumida fora de ponta é mais econômica.

As variáveis dependente e independente são idênticas as variáveis apresentadas na equação 9

$$\text{Demanda (kW)} = f(t_{\text{ponta}}) \quad (\text{equação 11})$$

Mas a medição de ambas as grandezas tem de ocorrer no equipamento onde se realiza a alteração do modo operacional, a fronteira de medição considera: a medição de potência demandada (kW) no medidor específico do prestador de serviço e a medição de horas e horário de operação do equipamento

A medição de ambas as grandezas tem de ocorrer no equipamento onde se realiza a alteração do modo operacional.

A memória de massa de toda a instalação estação de tratamento de água ou de esgoto não é adequada, porque reúne informações de todos os equipamentos elétricos dentro da estação. Os fatores estáticos típicos podem ser os picos de arranque dos motores e não foram identificados efeitos interativos.

A linha de base pode ser obtida em medições de uma semana, ou de trinta dias correspondente a um ciclo de operação com coleta de dados cada cinco minutos. Já para determinar a economia se recomenda usar um período prolongado para verificar que realmente a alteração operacional de caráter comportamental ocorreu. Se considera que seis meses a um ano é um bom período.

## **6) M&V PARA REDUÇÃO DE VAZAMENTOS POR REDUÇÃO DE PRESSÃO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO**

A redução de vazamentos por redução de pressão na rede constitui uma medida de economia de água e também economia de energia desde que a água tenha sido previamente bombeada e tratada, o potencial de economia de água é variável dependendo do estado de conservação das redes de abastecimento e ramais de ligação. Com uma gestão adequada de pressões se pode reduzir perdas de água desde 5 a 60%, dependendo do estado de ineficiência inicial, os efeitos de economia por meio do controle de pressões na rede são imediatos.

A opção de PIMVP nestes casos é a C – Toda a instalação, sendo que aqui a totalidade da instalação corresponde à Zona de Medição e Controle (ZMC). A ZMC é uma zona setorizada da rede de abastecimento, sendo que todas as entradas de água nesse setor são conhecidas e de saída, caso haja para outros setores. Para esta estratégia não é relevante as saídas por via dos hidrômetros dos consumidores. A opção B de PIMVP (Isolação da AEE) justifica, neste caso, a medição de todos parâmetros, que seriam pressão e perdas de água. A medição de perdas de água requer medições adicionais nos respectivos períodos junto aos hidrômetros dos consumidores. Percebe-se que a classificação de Opção B ou Opção C não tem diferenças práticas no processo de M&V.

Neste cenário, existem duas abordagens em relação a variáveis dependentes e independentes:

I - A variável dependente, que se pretende explicar são as perdas de água ( $\text{m}^3$ ) e a variável independente é a pressão no setor (mca ou bar).

$$V_{\text{água perdida}} (\text{m}^3) = f(\text{mca}) \quad (\text{equação 12})$$

II - Alternativamente a variável dependente pode ser água usada no setor ( $\text{m}^3$ ) que é o volume constituído pelas perdas e o consumo; e a variável independente é a pressão no setor (mca ou bar).

$$V_{\text{água entrada no setor}} (\text{m}^3) = f(\text{mca}) \quad (\text{equação 13})$$

A segunda disposição tem a vantagem de reduzir uma grandeza de medição (água micro medida, que é imperioso para determinação de perdas de água) e consequentemente reduzir o tempo considerável que é necessário para a coleta desses dados.

Na disposição I a fronteira de medição é:

- Medição de pressão à entrada do setor;
- Medição de volume de água entrada no setor;

- Medição de volume de água consumida, isto é, os hidrômetros dos consumidores do setor

Para a disposição I são necessários dados (com regularidade mensal) do departamento comercial do prestador de serviço de água e dados (disponibilidade imediata) do departamento operacional responsável pelo abastecimento do setor.

Na disposição II a fronteira de medição é:

- Medição de pressão na entrada do setor;
- Medição de volume de água que entrou no setor.

A disposição II é mais prática por não necessitar de dados do departamento comercial do prestador de serviço de água.

Na disposição I o Modelo da Linha base é definido pela seguinte equação:

$$\text{Perdas de água (m}^3\text{)} = a \times \text{pressão (mca)} + b \quad (\text{equação 14})$$

sendo:

a um coeficiente do modelo;

b uma constante do modelo

Em (14), as perdas de água são determinadas por:

$$\text{Perdas de água (m}^3\text{)} = a \times \text{Água}_{\text{entrada no setor}} (\text{m}^3) - b \times \text{Água}_{\text{consumida no setor}} (\text{m}^3) \quad (\text{equação 15})$$

Na disposição II o Modelo da Linha base é definido pela seguinte equação:

$$\text{Água usada no setor (m}^3\text{)} = a \times \text{pressão (mca)} + b \quad (\text{equação 16})$$

sendo:

a um coeficiente do modelo;

b uma constante do modelo

Em (15), as perdas de água são determinadas por:

$$\text{Água usada no setor (m}^3\text{)} = \text{Água}_{\text{entrada no setor}} (\text{m}^3) - \text{Perdas de água (m}^3\text{)} = \text{Água}_{\text{consumida no setor}} (\text{m}^3) \quad (\text{equação 17})$$

Pode se verificar que a disposição II é suficientemente simples para comprovar reduções de perdas ou de consumos. Para mensurar a eficiência em termos de energia as perdas de água são um *proxy*. A economia de energia é:

$$\text{Consumo de energia (kWh/ano)} = \text{Consumo de água evitada (m}^3\text{/ano)} \times \text{Consumo específico de energia para abastecimento nesse sistema (kWh/m}^3\text{)} \quad (\text{equação 18})$$

São fatores estáticos a regularidade de abastecimento (por exemplo 24 horas de sistema pressurizado sem rodízio), o tamanho da rede deveria manter-se sem ampliações ou redução do setor. Não deveria haver consumos excepcionais tais como: água para incêndios, rupturas de rede excepcionais, passagem de cargas elevadas sobre as tubulações ou terremotos e vibrações extraordinárias que provoquem deslocamentos extraordinários de tubulações. A tipologia de uso da água também deveria ser mantida. Ou seja, as características de zona residencial ou indústrias e comércios deveriam permanecer estáveis no período de linha base e de determinação da economia. Efeitos interativos nesta ação de eficiência é uma redução de produtos químicos para o tratamento da água, a postergação de investimentos de expansão do sistema produtivo de água e uma maior disponibilidade de água para o setor produtivo (agrícola por exemplo) ou para uso ambientais e de recreação.

A disposição I requer necessariamente a consideração do período de um ciclo de leitura e faturação, sendo cinco a seis ciclos (meses) desejáveis. Por este fato, o período de determinação da linha de base e de determinação da economia são longos, porém são dados que o prestador de serviço dispõe com facilidade. Os dados instantâneos de pressão e de vazão terão de ser agrupados em médias mensais correspondente ao ciclo de leitura dos hidrômetros.

Na disposição II, para setores maiores com mais consumidores, uma a duas semanas pode ser representativo (desde que não coincida com períodos festivos). A água entrada no sistema terá vazões mais estáveis e seguindo padrões de repetição horária relativamente estáveis. Para setores menores com menos consumidores, o período recomendável poderá ser mais longo e não deve coincidir com períodos festivos. A água entrada no sistema terá vazões mais oscilantes e de acordo com utilizações individuais.

Devem ser coletados dados até que a amostra possibilite elaborar um modelo com uma boa correlação ( $r^2 > 0,75$ , preferencialmente superior a 0,9). Os dados de vazão e pressão podem valores instantâneos, agrupados em médias horárias ou médias diárias. A frequência recomendada de coleta ou de agrupamento de dados instantâneos é horária ou diária. Para determinar a economia se recomenda usar de três a seis meses na disposição I. Nesse período a economia ocorrida deveria ser verificável.

Na disposição II, o período de verificação pode ser uma semana que represente o funcionamento normal e mais longo para os setores pequenos onde a amplitude de variação esperada é maior.

## **7) M&V PARA REDUÇÃO DE VAZAMENTOS POR REABILITAÇÃO DE RAMAIS DE LIGAÇÃO E EXTENSÃO DE REDE**

A reabilitação de ramais de ligação e de rede é uma medida de conservação de água e de energia, seja por reparação de vazamentos visíveis, seja por pesquisa ativa de vazamentos não visíveis. O potencial de economia de água é variável dependendo da pressão de serviço, do tempo de pressurização e do estado de conservação das redes de abastecimento e ramais de ligação. Através da reabilitação de ramais de ligação e de redes pode-se reduzir perdas de água desde 5 a 60%, dependendo do estado de ineficiência inicial. Os efeitos de economia por meio do controle de pressões na rede são graduais e progressivos. A implementação pode ser longa dependendo da extensão da reabilitação. Geralmente a intervenção é longa sendo idealmente contínua para a totalidade do sistema de abastecimento.

Nestes casos, a opção de PIMVP é D – Simulação calibrada. Neste caso é necessário construir um modelo explicando as perdas de água ocorridas e simular as perdas que teriam ocorrido caso não se efetuasse a reabilitação dos ramais e das redes. A modelagem hidráulica usando o *software* EPANET pode ser uma ferramenta útil de apoio para elaborar e calibrar o modelo. A variável dependente, que se pretende explicar são as perdas de água evitadas através da reabilitação ( $m^3$ ) e as variáveis independentes os vazamentos reparados ( $n^\circ$ ), a pressão (mca) e tempo em que o setor se encontra pressurizado (h) em caso de haver rodízios. Poderá também ser uma variável a idade da rede e dos ramais (anos).

$$V_{\text{água perdida}} (m^3) = f(\text{vazamentos } (n^\circ); \text{ pressão (mca); tempo de pressurização (h); idade rede (anos)})$$

(equação 19)

A fronteira de medição considera de quatro a cinco grandezas a serem medidas em diversos locais:

- Medição de pressão em algum ponto representativo do setor;
- Medição das horas de pressurização em caso de rodízios;
- Medição de volume de água entrada no setor;
- Medição de volume de água consumida, isto é, os hidrômetros dos usuários nesse setor;
- Registro do número de vazamentos reparados;

- Classificação da dimensão do vazamento (grave, médio ou menor) ou (rede, ramal de ligação, cavalete).

O modelo da linha de base poderá ter diversas variáveis independentes em conta que deverão ser pesquisados e analisados:

Perdas de água evitadas ( $m^3$ ) = a vazamentos reparados (n.º) + b pressão (mca) + c idade da rede / ramais (anos) + d horas de pressurização (h) + e ) (equação 20)

sendo:

a - d coeficientes do modelo;

e uma constante do modelo

ou

Perdas de água evitadas ( $m^3$ ) = a vazamentos reparados (n.º) + b idade da rede / ramais (anos) + d horas de pressurização (h) + e ) (equação 21)

Os modelos terão de ser pesquisados até a obtenção de uma boa correlação. Eventualmente pode não ser necessário utilizar a variável independente idade da rede e ramais se a correlação estiver boa. A matriz de materiais utilizados na rede (PEAD, FUFA, etc.) certamente é um fator importante, porém entram na variável (e) da equação e são considerados fatores estáticos.

Idealmente se utiliza o modelo que cumpra com uma correlação aceitável e que tenha o mínimo de variáveis para medir, tornado o processo de M&V menos oneroso. É necessário um balanceamento entre rigor científico e operacionalidade prática.

Para mensurar a eficiência em termos de energia as perdas de água evitadas seria um *proxy*. A economia de energia é:

Consumo de energia (kWh/ano) = Perdas de água evitada ( $m^3$ /ano) \* Consumo específico de energia para abastecimento em esse sistema (kWh/ $m^3$ ) (equação 22)

A pressão de serviço, horas de abastecimento/rodízio dentro do setor são fatores estáticos (se não forem considerados como variáveis independentes). Após a implementação da medida de eficiência é esperado que não ocorram alterações significativas na pressão de serviço ou no rodízio de água. A matriz de materiais utilizados na rede a ser reabilitada (PEAD, fibrocimento, FUFA, etc) são um fator estático.

Os efeitos interativos nesta ação de eficiência são: uma redução de produtos químicos para o tratamento da água, a postergação de investimentos de expansão do sistema produtivo de água e uma maior disponibilidade de água para o setor produtivo (agrícola por exemplo) ou para uso ambientais e de recreação. Para o setor elétrico um efeito interativo é o proporcionado pela redução de demanda.

O período e intervalo de medição para elaboração da linha base podem ser bastante variáveis, é útil dispor de uma base de dados histórica pré-existente sobre as variáveis dependentes e independentes. Caso se queira incluir a taxa de degradação natural dos materiais é necessário um período considerável para realizar a calibração do modelo. A opção PIMVP D, neste caso, constitui o processo mais complexo de M&V. Para determinar a economia se considera adequado um período de seis meses a um ano. Nesse período a economia ocorrida deveria ser verificável. Em análises históricas (dez anos) essa economia fica mais evidente para este tipo de ações.

## **8) M&V PARA REDUÇÃO DE VAZAMENTOS POR REDUÇÃO DO TEMPO DE REPARAÇÃO DE REDE, RAMAIS E CAVALETES**

A redução de perdas de água por minimização do tempo de reparação de rede de distribuição, ramais e cavaletes é uma medida de conservação de água e de energia. A antecipação da reparação corresponde à redução do volume de água e energia perdida. O potencial de economia de água expectável é variável dependendo da pressão de serviço e morosidade inicial de reparação pelas equipes do prestador de serviços de

abastecimento. Os efeitos de economia são relativamente pequenos e imediatos, porém a médio e longo prazo ganhos relevantes podem ser auferidos.

A opção de PIMVP é A – Isolação da AEE: medição dos parâmetros chave. Neste caso, os parâmetros chave são o tempo de reparação (h) e o tipo de vazamento (rede, ramal ou cavalete) para definir o volume de água perdido teórico e a energia consumida. Os parâmetros não selecionados para medição no campo são valores estimados, que devem ser baseados em dados históricos ou juízo de engenharia. Estes parâmetros estimados são vazão (l/s) associada às três classes de vazamentos (rede, ramal e cavalete) e consumo específico de energia (kWh/m<sup>3</sup>). A variável dependente, que se pretende explicar são as perdas de água evitadas através de práticas de reparação melhoradas (m<sup>3</sup>) e as variáveis independentes são o tempo de reparação (h) e a quantidade de vazamentos (n.<sup>o</sup>).

$$V_{\text{água perdida}} (\text{m}^3) = f(\text{tempo de reparação (h); vazamentos (n}^{\circ}\text{)}) \quad (\text{equação 23})$$

Se a variável dependente, que se pretende explicar for a energia evitada (kWh), as variáveis independentes são: água não perdida (m<sup>3</sup>) e consumo específico de energia (kWh/m<sup>3</sup>). Nesse caso, a fronteira de medição considera as seguintes grandezas:

Para determinar o consumo específico de energia (kWh/m<sup>3</sup>):

- Medição de energia em todas as elevatórias que bombeiam para a rede de abastecimento;
- Medição de volume de água em todas as elevatórias que bombeiam para a rede de abastecimento.

Para determinar a vazão (l/s) por tipo de vazamento (cavalete, ramal e rede):

- Registros históricos e juízo de engenharia.

Para determinar o tempo de reparação:

- Registro da hora e dia da detecção e notificação do vazamento (habitualmente em ordens de serviço);
- Registro da hora e dia do corte de água em que findou o vazamento (habitualmente em ordens de serviço).

O modelo da linha base é definido pela seguinte equação:

$$\text{Perdas de água (m}^3\text{)} = a \times \text{horas de reparação}_{\text{rede}} (\text{h}) \times \text{vazamentos reparados}_{\text{rede}} (\text{n}^{\circ}) + b \times \text{horas de reparação}_{\text{ramais}} (\text{h}) \times \text{vazamentos reparados}_{\text{ramais}} (\text{n}^{\circ}) + c \times \text{horas de reparação}_{\text{cavaletes}} (\text{h}) \times \text{vazamentos reparados}_{\text{cavaletes}} (\text{n}^{\circ}) + d \quad (\text{equação 24})$$

Para mensurar a eficiência em termos de energia o consumo de água seria um *proxy*. A economia de energia é:

$$\text{Consumo de energia (kWh/mês)} = \text{Perdas de água evitada (m}^3\text{/mês)} * \text{Consumo específico de energia para abastecimento em esse sistema (kWh/m}^3\text{)}_{\text{mês } i} \quad (\text{equação 25})$$

A pressão de serviço é um fator estático, da mesma forma que os procedimentos de registro da hora de notificação da reparação (hora de notificação por telefone, ou registro no sistema) e a hora do corte de água para reparação.

Um dos efeitos interativos nesta ação de eficiência é a imagem do prestador de serviço perante os seus usuários. Em nível econômico se pode referir uma redução de produtos químicos para o tratamento da água, a postergação de investimentos de expansão do sistema produtivo de água e uma maior disponibilidade de água para o setor produtivo (agrícola por exemplo). Em nível ambiental haverá mais disponibilidade hídrica para usos ecológicos e de recreação. Para o setor elétrico um dos efeitos é a redução de demanda no sistema.



O período e o intervalo de medição para elaboração da linha base podem ser bastante variáveis. A medição deve ser tão longa que permita obter um modelo com boa adesão ( $r^2 > 0,75$ , sendo um valor  $> 0,9$  desejável).

É útil dispor de uma base de dados históricos pré-existentes. Para determinação da economia se considera adequado um período de seis meses a um ano. Nesse período deveria ser verificável a manutenção da alteração das práticas no sistema de gestão e a economia ocorrida.

## 9) M&V PARA ALTERAÇÕES NO LAYOUT DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Pode existir um potencial de economia de energia em alterações no layout do sistema que conduzam a maiores níveis de eficiência energética. Exemplos disso são:

- Construção de reservatórios de distribuição em cotas mais baixas, requerendo menos elevação de água, ou gerando menos pressão de serviço no sistema e consequentemente menos perdas;
- Delimitação de setores de pressão e construção de anéis de abastecimento de água em zonas urbanas em detrimento de abastecimento por rede malhada indiferenciada;
- Alterações no traçado de adutoras evitando desníveis altos, realização de tuneis através de elevações topográficas em detrimento a oscilações de cota;
- Redução de pressão de serviço em setores e instalação de *boosters* para zonas topográficas com elevação especial;
- Captação de água em origens com cota que necessitam de menos bombeamento (subterrânea *versus* superficial, por gravidade *versus* por bombeamento);
- Ajustes da altura em tanques de ETE ou ETA.

A viabilidade econômica destas medidas deve ser analisada os custos de investimento devem ser menores que os benefícios resultantes dos ganhos de eficiência. A opção de PIMVP é D – Simulação calibrada. Neste caso é necessário construir um modelo explicando as perdas de carga ocorridas e simular. Na componente de redes (primeiros quatro itens) a modelagem hidráulica usando o software EPANET poderá ser útil na calibração do modelo. Nos últimos dois itens cálculos genéricos de simulação poderão ser suficientemente adequados. A variável dependente, que se pretende explicar é a energia consumida para bombeamento (kWh) e as variáveis independentes a água elevada ( $m^3$ ) e altura de elevação (mca) nas diversas configurações.

$$\text{Energia}_{\text{consumida}} (\text{kWh}) = f(m^3; \text{mca}) \quad (\text{equação 26})$$

A fronteira de medição considera quatro ou cinco grandezas:

- Os medidores de energia relativos aos bombeamentos do sistema que é objeto da alteração de *layout*. Estes poderão ser os medidores da concessionária de energia;
- Medidores vazão de toda a água que é elevada;
- Determinação da altura de elevação (parâmetro chave).

O modelo da linha base é definido pela seguinte equação:

$$\text{Energia (kWh)} = \sum a_i \times \text{Volume elevado}_i (m^3) * \text{Altura de elevação}_i (\text{mca}) + b \quad (\text{equação 27})$$

sendo:

a um coeficiente do modelo;

b uma constante do modelo.

A pressão de serviço, o rendimento dos motores e de bombas, o estado de conservação de adutoras são fatores estáticos e não foram identificados efeitos interativos. O período e o intervalo de medição para elaboração da linha base nesse caso podem ser bastante variáveis. A medição deve ser tão longa que permita obter um modelo com boa adesão ( $r^2 > 0,75$ , sendo valores  $> 0,9$  desejáveis). É útil dispor de uma base de dados e histórico pré-existente. Já para determinar a economia se considera adequado um ciclo de operação podendo ser uma semana, um mês ou 6 meses. Nesse período a economia ocorria pela alteração do *layout* deveria ser comprovável

## **10) M&V PARA REDUÇÃO DE PERDA DE CARGA EM BARRILETES, ADUTORAS E OUTROS PONTOS DO SISTEMA**

Pode existir potencial de economia de energia reduzindo perdas de carga que ocorrem em diversos pontos do sistema de abastecimento: Exemplos de redução de perda de carga são:

- Limpezas internas de adutoras voltadas a redução da rugosidade interna de tubulações, seja ela constituída por incrustações formadas ao longo do tempo pela qualidade da água ou por biofilme constituem boas práticas. A redução das rugosidades das paredes internas de adutoras pode-se efetuar com o uso de *poly pigs*;
- Remoção de vórtices no tubo de sucção de água para bombas;
- Redução de fenômenos de cavitação nas hélices das bombas;
- Suavização de curvas acentuadas no traçado de tubulações ou suavização em estreitamentos e alargamentos bruscos nos diâmetros.

A opção PIMVP pode ser A, B, C ou D dependendo da justificativa utilizada e da quantidade de variáveis que se pretende medir. A opção preconizada é a B – Isolação da AEE: Medição de todos os parâmetros, neste caso: a vazão e a energia (que pode ser contabilizada no medidor da concessionária de energia elétrica). Na sequência, outras opções do PIMVP são justificadas:

A – Isolação da AEE: medição de todos os parâmetros, sendo eles energia, vazão, pressão, cálculo e estimativas de coeficientes de rugosidade;

C – Toda a instalação: medição de energia no medidor da concessionária, porém é necessário pelo menos medir o parâmetro vazão adicionalmente. As opções B e C se assemelham na prática e não trazem demais consequências;

D – Simulação calibrada através de modelos mais complexos podendo se utilizar softwares de fabricantes de tubulações.

A variável dependente, que se pretende explicar é a energia consumida para bombeamento (kWh) e a variável independente a água elevada ( $m^3$ ).

$$E \text{ (kWh)} = \text{Volume}_{\text{elevado}} f \text{ (m}^3\text{)} \quad (\text{equação 28})$$

Nesta proposta, o parâmetro altura de elevação (mca) é um fator estático. A fronteira de medição considera as seguintes grandezas:

- Medidores de energia relativo ao bombeamento do sistema que é objeto da redução de perda de carga. Estes poderão ser os medidores da concessionária de energia ou medidores específicos;
- Medidores vazão a água que é elevada;
- Determinação da altura de elevação necessária (parâmetro chave).

Deliberadamente não se recomenda usar pressão de serviço, pois uma maior pressão não significa um melhor atendimento. Da mesma forma, se evita medir mais um parâmetro que onera o processo de M&V.

O modelo da linha base é definido pela seguinte equação:

$$\text{Energia (kWh)} = a \times \text{Volume}_{\text{elevado}} (\text{m}^3) + b \quad (\text{equação 29})$$

sendo:

a um coeficiente do modelo;

b uma constante do modelo.

Uma alternativa de modelo de linha base que é mais exigente em medições pode ser:

$$\text{Energia (kWh)} = a \times \text{Volume}_{\text{elevado}} (\text{m}^3) + b \times \text{Pressão (mca)} + c \quad (\text{equação 30})$$

sendo:

a-b coeficientes do modelo;

c uma constante do modelo.

Nesse caso, pressão de serviço (se não for considerada uma variável independente), rendimento dos motores e de bombas, demais configurações das adutoras são fatores estáticos. Como efeitos interativos se identificam a redução do desgaste dos materiais, aumentando a vida útil das infraestruturas além do adiamento de investimentos de substituição.

Assim como no caso anterior, o período e intervalo de medição para elaboração da linha base pode ser bastante variável. A medição deve ser tão longa que permita obter um modelo com boa adesão ( $r^2 > 0,75$ , e preferencialmente  $> 0,9$ ). É útil dispor de uma base de dados históricos pré-existent. Alternativamente se pode realizar um dia de ensaios onde o equipamento de bombeamento é submetido a todo o espectro de funcionamento da bomba com diversas pressões e vazões.

Já para determinar a economia se considera adequado um ciclo de operação podendo ser de uma semana, um mês ou seis meses dependendo da periodicidade dos dados coletados na elaboração da linha de base. Alternativamente se pode realizar um dia de ensaios onde se o equipamento de bombeamento é submetido a todo o espectro de funcionamento da bomba com diversas pressões e vazões.

## 11) M&V PARA MEDIÇÃO INDIVIDUALIZADA DE CONSUMOS DE ÁGUA EM CONDOMÍNIOS

A medição individualizada de consumos de água em condomínios por meio da instalação de hidrômetros individuais para cada residência constitui uma ação de eficiência hídrica e energética. O resultado esperado é a redução do volume água consumido em cerca de 10 a 30%. A Lei Federal nº 13.312 promulgada a 12 de julho de 2016 obriga a medição individualizada (MI) em novos empreendimentos em todo território nacional a partir do ano de 2021. Esta lei constitui uma medida política importante que contribui para a redução dos consumos de energia. Os municípios, contudo, poderão antecipar a aplicação da lei e até sempre que viável exigir a hidrometração individualizada em condomínios existentes.

A opção de PIMVP é C – Toda a instalação. Neste caso toda a instalação significa todo o condomínio. A variável dependente (que se pretende explicar) coincide com a variável independente, neste caso, o volume de água consumido ( $\text{m}^3/\text{mês}$ ) e ( $\text{m}^3/\text{ano}$ ) resultante da mudança comportamental após individualização. A unidade recomendada é ( $\text{m}^3/\text{mês}$ ) pois coincide com periodicidade mensal de faturação. A fronteira de medição de água consumida é realizada unicamente à entrada do condomínio. Esse medidor tem de se manter antes e depois da ação de eficiência. Após a comprovação dos ganhos de eficiência pode ser removido o hidrômetro totalizador do condomínio. O modelo da linha base é definida pela seguinte equação:

$$\text{Consumo de água (m}^3/\text{ano)} = \sum a_{1-12} \times V_{\text{base}} (\text{m}^3/\text{mês}) \quad (\text{equação 31})$$

Sendo que  $a_{1-12}$  correspondem a fatores padrão de desvio mensal. Para mensurar a eficiência em termos de energia o consumo de água seria um *proxy*. A economia de energia é:

Consumo de energia (kWh/ano) = Consumo de água evitada (m<sup>3</sup>/ano) \* Consumo específico de energia para abastecimento em esse sistema (kWh/m<sup>3</sup>) (equação 32)

A ocupação e atividades dentro do condomínio são fatores estáticos. Se espera que após a implementação da medida de eficiência não ocorram alterações significativas como por exemplo, apartamentos que fiquem vazios, ou alterações em atividades intensivas em água (piscinas, saunas, cabeleireiro, lavagem de roupa intensiva, irrigação de áreas verdes novas etc.). Caso isso ocorra, será necessário um ajuste na linha de base para aferir a economia de água. Um ano particularmente quente ou frio, ou com racionamento de água também são fatores não esperados, mas que terão de ser considerados no cálculo da economia, caso ocorram.

Como efeito interativo se pode esperar uma melhor aplicação do princípio utilizador – pagador, gerando maior equidade entre os usuários. Dependendo do prestador de serviço e respectivo regime tarifário a faturação individualizada pode aumentar a receita. Para determinação da linha de base se recomenda usar um ou mais anos de faturação, correspondendo a doze ou mais medições. Para esse período se registram os volumes de consumo. Para determinar a economia se recomenda usar um período de seis a 12 meses. Nesse período deveria ser verificável a economia ocorrida.

## **12) M&V PARA CAMPANHA DE SENSIBILIZAÇÃO E INFORMAÇÃO PARA REDUÇÃO DE CONSUMO DE ÁGUA**

A redução no consumo de água pela população e atividades econômicas constitui uma medida de economia de água e também de energia. A crise hídrica do estado de São Paulo ocorrida entre 2013 e 2015 mostra que após a crise a população adotou padrões de consumos inferiores ao período anterior à seca. A redução de consumo de água pode ser alcançada através do uso de dispositivos de baixo consumo ou também pela sensibilização da população com campanhas informativas. Para os prestadores de serviço pode ser atrativo realizar campanhas de redução de consumo, instalação de dispositivos de baixo consumo e realizar acordos com grandes consumidores que geralmente beneficiam de tarifários que não cobrem os custos reais (escolas, instalações desportivas, edifícios públicos, regas de zonas recreativas). A experiência mostra que campanhas informativas pela mídia podem reduzir até 15% do consumo de água.

A opção de PIMVP é B – Isolação da AEE: Medição de todos os parâmetros, sendo a medição realizada em todos os hidrômetros instalados. A medição dos volumes consumidos nos hidrômetros não constitui um trabalho adicional para o prestador de serviço, porque essa medição mensal ocorre geralmente para efeitos de faturação. A variável dependente, que se pretende explicar é o consumo de água evitada que coincide com a variável independente através da campanha de sensibilização (m<sup>3</sup>). A unidade recomendada é (m<sup>3</sup>/mês) pois coincide com periodicidade mensal de faturação. Se variável dependente, que se pretende explicar for a energia evitada (kWh) as variáveis independentes são: água não perdida (m<sup>3</sup>) e consumo específico de energia (kWh/m<sup>3</sup>). Alternativamente, uma variável independente poderia ser a eficácia da campanha de sensibilização, sendo que nesse caso a opção PIMVP deveria ser a D ou A.

A fronteira de medição é a medição em todos os hidrômetros do prestador de serviço, ou no subconjunto que são o alvo das campanhas informativas ou de acordos por exemplo economias residenciais ou de grandes consumidores (escolas, instalações desportivas etc.). O Modelo da Linha base é definida pela seguinte equação:

$$\text{Consumo de água (m}^3\text{/ano)} = \sum a_{1-12} \times V_{\text{base}} \text{ (m}^3\text{/mês)} \quad (\text{equação 33})$$

Sendo que  $a_{1-12}$  correspondem a fatores padrão de desvio mensal. Se for objetivo determinar a economia de energia o modelo seria:

$$\text{Consumo de energia (kWh/ano)} = \text{Consumo de água evitada (m}^3\text{/ano)} * \text{Consumo específico de energia para abastecimento em esse sistema (kWh/m}^3\text{)} \quad (\text{equação 34})$$

A ocupação e atividades dentro no sistema de abastecimento são fatores estáticos. Também são fatores estáticos a disponibilidade de água, isto é a ausência de restrições ao consumo como crises hídricas. Efeitos interativos nesta ação de eficiência é a postergação de investimentos de expansão do sistema produtivo de água e uma maior disponibilidade de água para o setor produtivo (agrícola por exemplo) ou para uso

ambientais e de recriação. Também é um efeito interativo a imagem do prestador de serviço junto dos seus clientes, transmitindo preocupações de sustentabilidade ambiental.

Para determinação da linha de base se recomenda usar um ou mais anos de faturação, correspondendo a doze ou mais medições. Para esse período se registram os volumes de consumo. Para determinar a economia se recomenda usar 6 meses a 12 meses. Nesse período deveria ser verificável a eficácia da campanha informativa.

### **13) M&V PARA REDUÇÃO DE SUBMEDIÇÃO ATRAVÉS DE TROCA DE HIDRÔMETROS**

A redução de perdas aparentes de água, isto é, a redução de submedições nos hidrômetros constitui uma medida de aumento de receitas a arrecadar. Hidrômetros que medem fora da sua vazão nominal ou que já mediram um volume superior à sua vida útil estão sujeitos a submedição do volume realmente fornecido ao usuário, esta submedição gera uma faturação inferior à devida. A troca de hidrômetros onde ocorrem as maiores submedições, constitui uma medida de eficiência econômica. Valores típicos de submedição são de 6% a 15% do volume medido, dependendo, porém do estado inicial dos hidrômetros a substituir. Este é o potencial de economia e geralmente tem um *payback* de poucos meses (15- 24 meses).

No entanto, esta medida não é em primeira instância uma medida de eficiência energética ou hídrica. Podem ser feitas associações para a eficiência hídrica e energética, porém o maior benefício é a faturação correta de volumes consumidos. Reduções no consumo de energia e de água estão consideradas nos efeitos interativos e que não são objeto de medição e verificação, no entanto outra estratégia de a M&V pode ser realizada nesse sentido.

A opção de PIMVP é A – Isolação da AEE: medição dos parâmetros chave. O parâmetro chave é o erro de submedição em cada categoria de hidrômetro. A variável dependente, que se pretende explicar é o volume de água submedido ( $m^3$ ) e a variável independente o erro de medição do hidrômetro,  $\epsilon$ , (%).

$$V_{\text{água submedido}} (m^3) = f(\epsilon (\%)) \quad (\text{equação 35})$$

Adicionalmente ou alternativamente, os parâmetros: volume acumulado medido pelo hidrômetro ( $m^3$ ) ou a idade do hidrômetro (anos) poderão ser uma variável independente. Deverão ser usadas as combinações de variáveis com a melhor correlação e que expliquem os volumes submedidos de maneira razoável.

A fronteira de medição considera as seguintes grandezas e locais de medição:

- Medição de volume de água na totalidade dos hidrômetros a substituir, antes da ação de eficiência;
- Hidrômetros a substituir (antes da realização da ação de eficiência): Aferição do erro de submedição em banca de laboratório em amostra representativa de hidrômetros. Se recomenda subdividir os hidrômetros em categorias podendo ser:
  - modelos (volumétrico, velocimétricos, eletromagnético etc.);
  - faixas de consumo do usuário;
  - idade (anos).
- Hidrômetros substituídos (após a realização da ação de eficiência): Aferição em banca de laboratório do erro de submedição em amostra representativa de hidrômetros substituídos, subdivididos pelas categorias anteriormente definidas <sup>3</sup>;
- Medição de volume de água na totalidade dos hidrômetros a substituídos, depois da ação de eficiência. A medição da amostra poderia ser suficiente, porém como é prática operacional do prestador de

<sup>3</sup> Este passo pode ser omitido se o dono do projeto de eficiência concordar para redução de custos de medição e verificação. O PIMVP exige uma verificação posterior por amostragem.

serviço a medição mensal de todos os hidrômetros para efeitos de faturação, se utiliza a totalidade dos hidrômetros substituídos.

Vários modelos de linha base devem ser testados para averiguar qual se ajusta melhor:

$$\text{Água submedida (m}^3\text{)} = \Sigma \text{ erro de medição}_{\text{categoria i}} (\text{m}^3) \times \text{hidrômetros}_{\text{categoria i}} (\text{n.º}) \quad (\text{equação 36})$$

Para mensurar a subfaturação o parâmetro água submedida seria um *proxy*. A economia é:

$$\text{Receitas faturadas (\$/mês}_i\text{)} = \Sigma \text{ Perdas aparentes de água evitadas}_i (\text{m}^3/\text{ano}) * \text{tarifa}_i \text{ de faturação (\$/m}^3\text{)} \quad (\text{equação 37})$$

A amostra a analisar é finita, não sendo em geral necessário mais de 67 unidades. Para a troca de 30 hidrômetros a amostra a analisar é de 21, para a troca de 500 hidrômetros é de 59, para a troca de 1000 hidrômetros é de 63 assim sucessivamente. A definição do tamanho da amostra segue critérios de estatística relativos a precisão e confiança descritos em Estatística e Incerteza para o PIMVP.

A ocupação e atividades dentro no sistema de abastecimento são fatores estáticos. Também são fatores estáticos a disponibilidade de água, isto é a ausência de restrições ao consumo como crises hídricas. Devido a um aumento na conta da água para o usuário, um dos efeitos interativos nesta ação de eficiência é uma redução esperada do consumo de água e consequentemente e no consumo de energia. A redução de perdas aparentes de água gera maior equidade entre os usuários, sendo que os adimplentes (ou contribuintes fiscais) cobrem todos os custos de operação do prestador de serviço. Ao aumentar os volumes faturados, os custos se dividem por uma base de usuários maior (ou de contribuintes fiscais).

O período e intervalo de medição da linha de base corresponde ao tempo necessário de remover a amostra de hidrômetros e realizar os ensaios na bancada de laboratório. Será necessário realizar tantos ensaios e classificações de hidrômetros até obter um modelo com boa adesão ( $r^2 > 0,75$ , e preferencialmente  $> 0,9$ ). É útil dispor de uma base de dados e histórico pré-existente. Para efeitos de PIMVP a determinação da economia ocorre com a medição de uma amostra significativa de hidrômetros a substituir. O uso das especificações do fabricante de hidrômetros não é suficiente para o PIMVP, embora para donos de projetos de eficiência esta abordagem poderá ser suficiente.

## CONCLUSÕES GENÉRICAS SOBRE AS OPÇÕES PIMVP

As opções de Medição e Verificação aqui apresentadas para vários projetos de eficiência no setor de abastecimento de água e esgotamento sanitário admitem variações ou outras abordagens. As opções do PIMVP, assim como os seus elementos de estratégia são flexíveis.

Para a seleção da estratégia de M&V deve ser privilegiada a operacionalidade prática e a simplicidade em detrimento de modelos científicos holísticos de maior complexidade. O uso do menor número possível de variáveis independentes e respectivas medições implica em menores custos para o processo de M&V devendo esse princípio ser priorizado.

A complexidade do modelo aumenta a medida que alguns fatores estáticos são considerados variáveis independentes, porém, este tipo de decisão deve tomada na prática perante cada instalação e cada ação de eficiência. Em algumas instalações uma variável é um fator estático, ao passo que, essa mesma informação em outras instalações pode ser caracterizada como uma variável independente. Sempre que possível deve se atentar a minimizar o esforço de monitoramento em alternativa a modelos de monitoramento mais detalhados. O nível de confiança da economia deve ser o mínimo necessário e deve ser balanceado com os custos de M&V.

M&V é um processo que requer recursos tecnológicos, humanos e financeiros. Em geral o processo de M&V não deveria superar 10 % da economia a verificar. Nesse contexto, valores de 3 a 5% da economia são considerados como orientativos.



Os projetos aqui listados podem ser combinados entre si e também com outras ações acessórias como iluminação, ar condicionado e geração de energia. Ao acumular diversas ações de eficiência na mesma instalação a melhor opção de PIMVP pode alterar-se, principalmente entre as opções B e C, porém elementos de cada uma das estratégias (variáveis independentes, fronteira de medição, modelo da linha base, fatores estáticos e interativos) podem ser utilizados.

## **CONCLUSÕES SOBRE A RELEVÂNCIA DO SETOR DE SANEAMENTO PARA O PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

O setor de serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário têm um peso pequeno no consumo de energia elétrica nacional, porém em muitas cidades o prestador de serviço de saneamento básico é um cliente importante das concessionárias elétricas e o potencial de economia neste setor energia é relevante, motivo pelo qual ele pode e deve ser especificado nas chamadas públicas.

Em especial, os projetos de redução de perdas de água constituem medidas de redução do consumo de energia que devem ser objeto do Programa de Eficiência Energética (PEE). Dentro dos vários projetos, o mais competitivo em termos de Razão Custo Benefício (RCB) costuma ser a setorização das redes acompanhado de controle de pressões para redução de perdas de água e energia.

## **CONCLUSÕES SOBRE A APLICABILIDADE DO PIMVP NO SETOR DE SANEAMENTO**

No setor de saneamento é necessária uma maior familiarização do PIMVP, pois este serve para comprovar economias de energia, de recursos financeiros e também de perdas de água. O PIMVP é uma ferramenta útil para medir ganhos de eficiência e pode ser usado para:

- determinação dos ganhos de produtividade para efeitos de compartilhamento entre os prestadores de serviço e os usuários dos serviços de saneamento básico conforme previsto no art. 21, item IV da Lei nº 11.445, de 2007;
- aplicação em contratos de desempenho com empresas de serviços de energia (ESCO – *Energy Saving Companies*);
- acesso a recursos do Programa de Eficiência Energética da ANEEL (PEE);
- contabilização de custos evitados no âmbito de fundos ou programas corporativos de eficiência energética, com vistas a alocação de recursos para financiamento de novos projetos de eficiência energética;
- subsidiar a tomada de decisão dos órgãos diretivos pela execução de projetos de eficiência energética e hídrica.

M&V constitui uma parte de um programa de gestão de perdas de água e energia com benefícios no controle operacional. Dispor de uma base de dados, com informação de gestão mais completa, é condição básica para melhorar a operação e o conhecimento dos processos produtivos tornando o processo de Medição e Verificação mais simples e menos oneroso.

## **AGRADECIMENTOS**

Se agradece às seguintes instituições e pessoas físicas pelas contribuições e trabalhos desenvolvidos na área de Medição e Verificação de performance em saneamento que tiveram relevância e que foram base para o presente trabalho:

- Enerenge na pessoa de Julian Vilella Padilla;

- Eficiência Energética Eireli – ME na pessoa de Sérgio Gatti;
- Eletrobrás Distribuição Rondônia na pessoa de Ildefonso Dorizete e Silva Madruga e Edmilson de Lima Santos;
- Companhia Riograndense de Saneamento na pessoa de Ricardo Rover Machado, Eduardo Moreira, Adroaldo Resendes Kulmann Junior e Gustavo Rucks;
- Departamento de Águas e Esgoto de Valinhos na pessoa de Ricardo Rogério Gardin;
- Energias do Brasil na pessoa de Newmar Spader;
- Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Cacoal na pessoa de José Luiz de Souza Leite e José Vanderlei de Araújo;
- Companhia de Saneamento Básico de São Paulo na pessoa de Celso Haguiuda e Cassio Augusto Maldonado dos Santos;
- Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto de Caxias do Sul na pessoa de Márcio Custódio de Oliveira e Adriano Bolesina,
- Saneago - Saneamento de Goiás, na pessoa de Alexandre Gomes de Souza, Alberto Söjbom, Augusto Antônio e Osmar Qualhato.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. EVO *Efficiency Valuation Organization* - 10000-1:2016 (BR) - Conceitos Básicos – Protocolo Internacional de Medição e Verificação de *Performance*, setembro 2017
2. EVO *Efficiency Valuation Organization* - 10100-1:2014 (BR) – Estatística e Incerteza para o PIMVP – Protocolo Internacional de Medição e Verificação de *Performance*, junho 2014
3. EVO *Efficiency Valuation Organization* - Protocolo Internacional de Medição e Verificação de *Performance*, Conceitos Básicos e Opções para a Determinação de Economias de Energia e de Água Volume 1, janeiro 2012
4. EVO – *Efficiency Valuation Organization*. **Protocolo Internacional de Medição e Verificação de *Performance* – Conceitos e Opções para Determinação de Economias de Energia e de Água – Vol.1.** Sofia: EVO, 2012.
5. TSUTIYA, M.T. **Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água**, 1ª Edição. São Paulo: ABES, 2001.
6. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **PROPEE – Procedimentos do Programa de Eficiência Energética.** Brasília: ANEEL, 2013.
7. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Guia de Medição e Verificação para o Programa de Eficiência Energética Regulado pela Aneel.** Brasília: ANEEL, 2014.