QUANTIFICAÇÃO TELEMÉTRICA DO IMPACTO DA INOPERÂNCIA DO CONTROLE NOTURNO EM VÁLVULA REDUTORA DE PRESSÃO E O PAYBACK DO SEU RESTABELECIMENTO EM UM DISTRITO DE MEDIÇÃO E CONTROLE

Bruno Araújo Albuquerque([1])

Engenheiro Civil pela Universidade do Distrito Federal (UDF), com especialização em Saneamento Ambiental e Ciência de Dados. Possui 10 anos de experiência no setor de saneamento básico. Tem experiência em análises geoespaciais com QGIS, ArcGIS e ferramentas de BI. Atualmente integra a equipe de planejamento dos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário da CAESB. Atua na otimização da infraestrutura e da operação dos sistemas por meio de análises e gestão de projetos.

Felipe Albuquerque Carvalho([2])

Graduando em Engenharia Ambiental e Ciências Ambientais pela Universidade de Brasília (UnB) e atua como Técnico em Edificações pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB). Possui experiência em geoprocessamento, sensoriamento remoto e modelagem aplicada ao saneamento, com foco na automação de rotinas e análise espacial utilizando linguagem de programação Python. Participa de projetos de pesquisa e extensão nas áreas de recursos hídricos, saneamento e geotecnologias.

Diogo Correia Marques dos Santos([3])

Engenheiro Ambiental pela Universidade de Brasília (UnB). Atua como Técnico em Edificações na Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), desenvolvendo projetos de redes de água e esgoto, análises e modelagem hidráulica. Possui proficiência em geoprocessamento (QGIS e ArcGIS Pro) e na criação de dashboards em Power BI para monitoramento de indicadores operacionais, suporte à otimização e operação de sistemas de saneamento.

Juceli Dias Chaves([4])

Tecnóloga em Construção de Edifício pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Graduanda em Engenharia Civil pela Instituição de Ensino Superior de Brasília (IESB). Possui 4 anos de experiência em saneamento, conhecimento em análises geoespaciais com QGIS, ArcGIS e ferramentas de BI. Atualmente integra a equipe de planejamento como Técnica em Edificações na Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).

Bruno Cabral Neves([5])

Engenheiro Florestal pela Universidade de Brasília (UnB) e pós-graduado com especialização em Gestão Ambiental pela Universidade Paulista (UNIP). Atua no setor de saneamento ambiental na elaboração de projetos de redes de água e esgoto além de análises de modelagem hidráulica, com ampla vivência em QGIS, ArcGIS e Power BI na produção de mapas, georreferenciamento e dashboards. Atualmente atua como Técnico em Edificações Pleno pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).

Endereço: SIND QI 1 - Gama - DF - CEP: 72445-010 - Brasil - Tel: +55 (61) 99226-4198 - e-mail: al-bruno@outlook.com.

RESUMO

Este trabalho quantifica, com base em telemetria contínua, o impacto volumétrico e financeiro da inoperância do controle noturno de uma Válvula Redutora de Pressão (VRP) instalada em um Distrito de Medição e Controle (DMC) residencial com 1.250 ligações. Entre janeiro e junho de 2026, o monitoramento registrou a falha do controlador binário de dois patamares em meados de abril, quando a pressão de jusante deixou de reduzir de 26 mca para 12 mca durante a madrugada e estabilizou em 22 mca ao longo das 24 horas. A vazão mínima noturna subiu de 5 L/s para 7 L/s, um excedente de 2 L/s que representa 50,4 m³ desperdiçados por noite e 18.396 m³ por ano. A valoração revelou prejuízo anual de R$ 39.367,44 em custo de produção e de R$ 79.102,80 em receita não faturada. O tempo de retorno do reparo do controlador situa-se entre 12 e 19 dias

quando avaliado pela tarifa básica. O estudo recomenda ainda a evolução para a modulação por faixa horária de vazão, baseada no consumo em tempo real, que suaviza a operação da válvula, amplia a eficiência da redução noturna e aumenta a longevidade da rede e dos seus componentes.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de pressões, Perdas reais, Telemetria.

INTRODUÇÃO

O abastecimento público de água no Brasil enfrenta um desafio estrutural persistente. As companhias de saneamento empregam energia elétrica em estações elevatórias, produtos químicos em estações de tratamento e mão de obra especializada para entregar água potável à população, mas uma fração expressiva desse produto se perde nas redes de distribuição antes de alcançar o hidrômetro do consumidor. Segundo os diagnósticos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (BRASIL, 2020), o índice de perdas na distribuição permanece próximo de 40% em média nacional, o que compromete o fluxo de caixa das prestadoras, limita a capacidade de investimento e atrasa a universalização do acesso prevista no marco legal do setor.

Dentro do conjunto de perdas, as perdas reais ou físicas merecem atenção particular da engenharia. Elas correspondem aos volumes que escapam por furos, fissuras, rupturas de tubulações e falhas de vedação em juntas e conexões. Cada metro cúbico perdido dessa forma incorpora a totalidade do custo de produção já incorrido e, adicionalmente, suprime a receita que seria gerada com a sua comercialização. O combate a essas perdas é estruturado internacionalmente pela metodologia consagrada na chamada Cruz de Lambert, difundida pela International Water Association (LAMBERT, 2002). O modelo organiza as ações em quatro pilares: agilidade e qualidade dos reparos, gestão da infraestrutura, controle ativo de vazamentos por pesquisa acústica e gerenciamento de pressões.

Entre os quatro pilares, a gestão de pressões ocupa posição singular. Ela é a única ação que atua simultaneamente sobre a vazão dos vazamentos existentes e sobre a taxa de surgimento de novas rupturas, pois alivia o esforço mecânico imposto às tubulações e conexões (THORNTON; STURM; KUNKEL, 2008). Na prática, reduzir a pressão em períodos de baixo consumo significa diminuir a velocidade de saída de água pelos orifícios já abertos e, ao mesmo tempo, prolongar a vida útil dos materiais enterrados. É a estratégia de melhor relação entre custo e benefício documentada na literatura de controle de perdas.

A base física desse comportamento é descrita pela teoria FAVAD, sigla em inglês para caminhos de descarga de área fixa e variável (MAY, 1994; LAMBERT, 2001). Diferentemente da intuição comum, a área de um vazamento não é constante. As redes de distribuição modernas são compostas majoritariamente por materiais elásticos, como o PVC e o polietileno de alta densidade, além de juntas com anéis de borracha. Quando a pressão interna sobe, as microfissuras se dilatam e a área de escape aumenta. Quando a pressão cai, essas mesmas fissuras se contraem. O resultado é que a vazão perdida responde à pressão de forma mais sensível do que preveria a hidráulica clássica de orifícios rígidos.

A normatização brasileira estabelece a janela operacional desse controle. A norma ABNT NBR 12218 determina que a pressão estática máxima nas redes de distribuição não deve ultrapassar 50 mca e que a pressão dinâmica mínima necessária ao abastecimento adequado dos imóveis é de 10 mca (ABNT, 1994). Operar dentro dessa faixa, aproximando a pressão do limite inferior seguro sempre que o consumo permite, é o objetivo central da setorização em Distritos de Medição e Controle, os DMC, abastecidos por Válvulas Redutoras de Pressão.

Uma VRP convencional dissipa a energia hidráulica excedente proveniente de reservatórios e adutoras e garante uma pressão constante a jusante, independentemente das flutuações de carga a montante (SABESP, 1999). Entretanto, um único ponto de ajuste raramente atende de forma adequada às duas condições opostas de um dia típico. Durante os horários de pico, a rede precisa de pressão suficiente para vencer as perdas de carga do escoamento intenso. Durante a madrugada, quando o consumo se aproxima de zero, as perdas de carga tornam-se mínimas e a mesma pressão de ajuste converte-se em excedente aplicado diretamente sobre os vazamentos.

Para resolver essa limitação, a indústria do saneamento desenvolveu controladores de duplo patamar, conhecidos no jargão técnico como sistemas day night. Por meio de válvulas solenoides comandadas por um relógio temporizador, o circuito de pilotagem alterna entre dois ajustes distintos: uma pressão mais elevada e

confortável durante o dia e uma pressão reduzida e protetiva durante a madrugada (ENOPS, 2001). Trata-se de tecnologia madura, de baixo custo relativo e amplamente difundida no parque instalado das concessionárias brasileiras.

A realidade operacional, contudo, frequentemente diverge das condições de projeto. Falhas de bateria, vandalismo, desgaste de solenoides e desativações temporárias que se tornam permanentes por insuficiência de equipes de manutenção fazem com que muitos controladores noturnos permaneçam inoperantes por longos períodos. Quando isso ocorre, a rede passa a receber pressão plena justamente no período em que ela é menos necessária e mais prejudicial à infraestrutura. Trata-se de uma perda de difícil detecção, pois não gera vazamentos visíveis, reclamações de usuários ou alarmes operacionais. A água tratada flui continuamente pelas fissuras não visíveis da rede ao longo de todo o período noturno.

A partir dos registros de telemetria de um DMC em operação, este trabalho documenta o momento em que um controle noturno deixou de operar, mede o incremento imediato provocado na vazão mínima noturna, converte esse incremento em volume e em valores monetários e demonstra que o reparo do equipamento apresenta retorno financeiro em poucas semanas. O estudo propõe, ainda, a modulação por faixa horária de vazão com base no consumo em tempo real como evolução do controle binário, capaz de suavizar a operação da válvula e ampliar a longevidade da infraestrutura. Embora a literatura demonstre amplamente a relação entre pressão e perdas, poucos estudos quantificam economicamente o impacto da falha operacional de dispositivos de duplo patamar a partir de séries telemétricas contínuas. Este trabalho busca preencher essa lacuna ao associar a ocorrência da falha, o incremento hidráulico observado e a sua repercussão financeira.

OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é mensurar, por meio de telemetria contínua, o impacto volumétrico, financeiro e estrutural causado pela inoperância do dispositivo de controle noturno de uma Válvula Redutora de Pressão que abastece um Distrito de Medição e Controle residencial. Para sustentar o diagnóstico, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Quantificar o volume real reduzido pela atuação do controle noturno nos momentos de consumo baixo, isolando o incremento de vazão mínima noturna provocado exclusivamente pela elevação da pressão durante a madrugada;
- Demonstrar o impacto financeiro da inércia operacional sob duas óticas complementares, o custo estrito de produção da água e o custo de oportunidade representado pela receita não faturada;
- Calcular o tempo de retorno do investimento, o payback, associado ao reparo ou à substituição do controlador noturno;
- Verificar a aderência do comportamento observado em campo à teoria FAVAD, estimando o expoente aparente da relação entre pressão e vazão de perdas;
- Propor a transição para a modulação por faixa horária de vazão, baseada na demanda real, como cenário de máxima eficiência e de preservação da rede e da própria válvula.

METODOLOGIA UTILIZADA

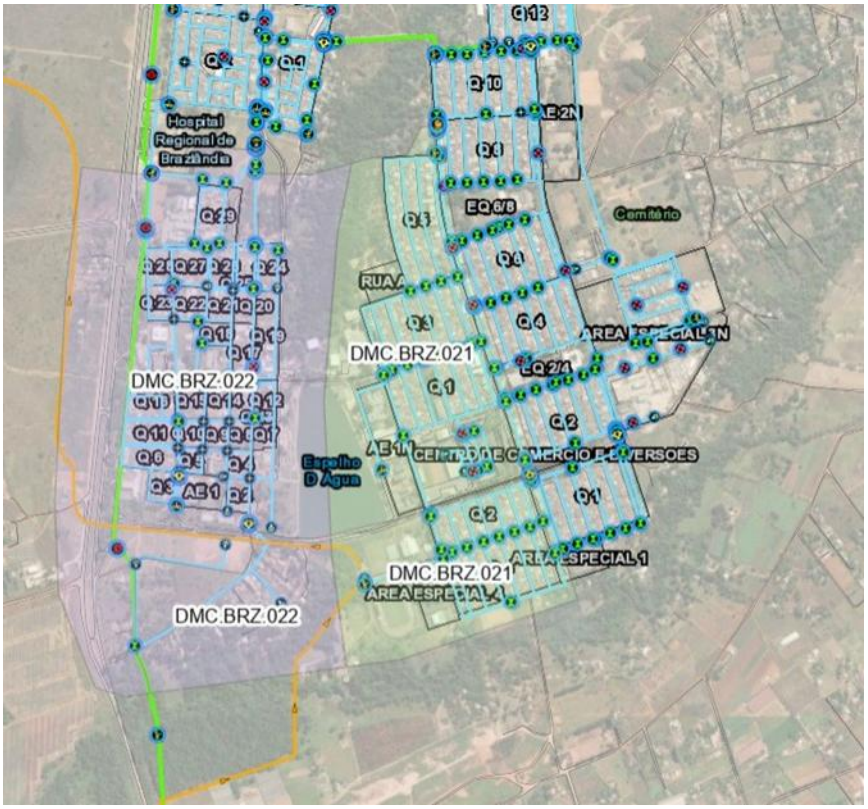
A pesquisa foi estruturada como um estudo de caso observacional, alimentado por um sistema de telemetria e supervisão aplicado a um Distrito de Medição e Controle em operação plena. A arquitetura metodológica foi dividida em cinco etapas: caracterização da área de estudo, instrumentação e tratamento dos dados, fundamentação física do comportamento dos vazamentos, definição dos cenários operacionais comparados e estabelecimento das premissas financeiras.

Caracterização da área de estudo

O distrito analisado, identificado no sistema supervisório como DMC.BRZ.022, possui ocupação predominantemente residencial e abriga aproximadamente 1.250 ligações pressurizadas de água. O abastecimento é contínuo, sem intermitência, e a topografia apresenta desníveis moderados, condição que

justificou a implantação original da Válvula Redutora de Pressão para proteger as edificações situadas nas cotas mais baixas e garantir o atendimento à NBR 12218. O perfil de consumo segue o padrão clássico da engenharia sanitária, com picos no início da manhã e no início da noite e uma redução natural e acentuada da demanda entre as 22h e as 5h. A Figura 1 apresenta a setorização da área, com a delimitação do distrito estudado e do distrito vizinho, ambos monitorados pelo mesmo sistema.

Figura 1 - Setorização dos Distritos de Medição e Controle da área de estudo



Fonte: sistema de informações geográficas da concessionária, 2026.

Instrumentação, telemetria e tratamento dos dados

O ponto único de entrada do distrito é equipado com macromedidor eletromagnético de vazão e com transdutores de pressão instalados imediatamente a montante e a jusante da VRP. Os sinais são registrados por datalogger com intervalo fixo de 15 minutos e transmitidos a um painel de supervisão, no qual três canais foram acompanhados ao longo de todo o estudo: a Pressão 1, medida a montante da válvula, a Pressão 2, medida a jusante e portanto sob a ação do controle, e a Vazão de pulsos do macromedidor. A Figura 2 ilustra a configuração de extração do histórico de dados utilizada na pesquisa.

Figura 2 - Configuração da extração do histórico de dados de telemetria



Fonte: sistema de telemetria da concessionária, 2026.

O período de observação compreendeu os registros consolidados de 1º de janeiro a 2 de junho de 2026. Além das séries brutas, o painel calcula automaticamente indicadores derivados que se mostraram decisivos para o diagnóstico: a média diária de vazão, o recorte da vazão às 4h da manhã e a média móvel de 7 dias do Fator de Pesquisa. O Fator de Pesquisa, também chamado de vazão mínima noturna, corresponde à parcela de água que atravessa o macromedidor na janela das 22h às 5h excedendo o pequeno consumo das residências. Tecnicamente, ele constitui a melhor estimativa disponível do somatório de vazamentos não visíveis de um setor, pois é medido no momento em que o consumo real se aproxima do seu limite inferior e a rede atinge sua pressão máxima de serviço.

Fundamentação física: a teoria FAVAD

Para interpretar a resposta dos vazamentos às variações de pressão observadas na telemetria, o estudo adotou a formulação clássica da teoria FAVAD, expressa pela equação (1):

$$Q_1 / Q_2 = (P_1 / P_2)^{N1} \qquad \textbf{equação (1)}$$

Na equação, Q1 e Q2 representam as vazões de perda observadas sob as pressões P1 e P2, e o expoente N1 caracteriza a elasticidade do conjunto de vazamentos. Valores próximos de 0,5 indicam orifícios rígidos em comportamento de descarga clássica, valores próximos de 1,0 indicam comportamento misto típico de redes reais e valores superiores a 1,0, que podem alcançar 1,5 a 2,5, indicam predominância de fissuras em materiais plásticos que dilatam com a pressão (MAY, 1994; LAMBERT, 2001). A literatura recomenda adotar N1 próximo de 1,0 quando a composição da rede é heterogênea e não há ensaio específico de degrau de pressão no setor.

Cenários operacionais comparados

O núcleo comparativo da metodologia contemplou três cenários evolutivos de operação da mesma válvula:

- Cenário 1, a inércia: falha ou supressão do controle noturno, com a rede submetida a pressão fixa ao longo das 24 horas, inclusive na madrugada;
- Cenário 2, o controle binário: operação restaurada do controlador de dois patamares do tipo day night, com redução fixa de pressão programada das 22h às 5h;
- Cenário 3, a modulação por faixa horária de vazão: expansão proposta pelo estudo, na qual o controle deixa de ser governado apenas pelo relógio e passa a responder à vazão de consumo em tempo real, ajustando a pressão de jusante de forma gradual e proporcional à demanda.

Premissas financeiras e custo de oportunidade

Uma decisão metodológica central deste artigo foi avaliar o desperdício sob dois prismas distintos e complementares. O primeiro é o custo direto de produção, fixado em aproximadamente R$ 2,14 por metro cúbico, valor que remunera a energia elétrica das elevatórias, os produtos químicos do tratamento e a manutenção eletromecânica primária. Ele responde à pergunta de quanto a companhia gastou para produzir a água que se perdeu. O segundo é o custo de oportunidade, que responde a uma pergunta diferente e frequentemente ignorada: quanto a companhia deixou de faturar, já que a água perdida na madrugada é produto final potável que não chegou a ser comercializado.

Para traduzir o custo de oportunidade em valores reais, adotou-se a estrutura tarifária vigente, estabelecida pela Resolução ADASA nº 70/2026 para o período de junho de 2026 a maio de 2027, reproduzida na Tabela 1. Por prudência metodológica e para resguardar o estudo de superestimativas, todo o cálculo de receita evadida utilizou exclusivamente a alíquota da primeira faixa residencial, de R$ 4,30 por metro cúbico, ainda que parte relevante do consumo real se enquadre em faixas superiores com alíquotas que chegam a R$ 28,88 por metro cúbico.

Tabela 1 - Estrutura tarifária residencial vigente (junho de 2026 a maio de 2027)

Faixa de consumo (m³)	Volume da faixa (m³)	Alíquota (R$/m³)	Valor da faixa (R$)
0 a 7	7	4,30	30,10
8 a 13	6	5,15	30,90
14 a 20	7	10,21	71,47
21 a 30	10	14,81	148,10
31 a 45	15	22,22	333,30
Acima de 45	Sem limite	28,88	Variável

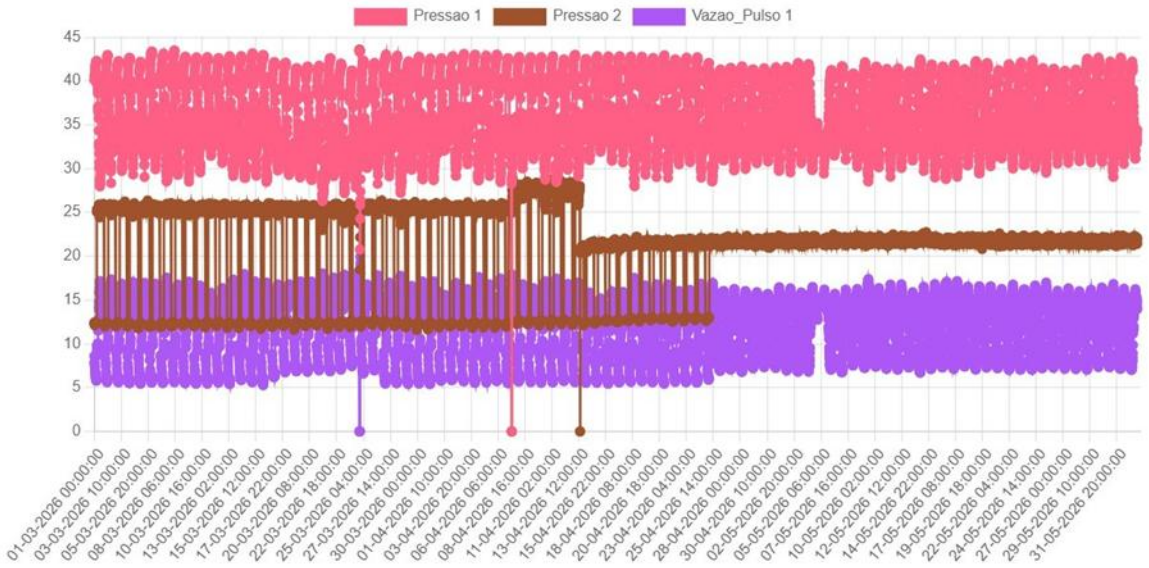
Fonte: elaboração própria a partir da Resolução ADASA nº 70/2026 (ADASA, 2026).

RESULTADOS OBTIDOS

O comportamento da rede com o controle noturno operante

Entre janeiro e a primeira quinzena de abril de 2026, a telemetria registrou operação estável e dentro dos parâmetros esperados. A Pressão 1, a montante da válvula, flutuava sazonalmente entre 30 e 45 mca acompanhando a carga das adutoras. A jusante, a VRP executava a modulação programada: a Pressão 2 apresentava o perfil em degrau característico do controle binário, sustentando cerca de 26 mca durante o dia e decaindo de forma programada para a faixa de 12 mca durante a madrugada. Sob essa condição de redução noturna, a vazão atingia seu valor mínimo em torno de 5 L/s, valor que reúne o consumo legítimo basal e a parcela de vazamentos contida pela baixa pressão. A Figura 3 apresenta a série completa de pressões e vazão entre março e maio, na qual esse regime é claramente visível no primeiro terço do gráfico.

Figura 3 - Séries de pressão a montante, pressão a jusante e vazão do distrito (março a maio de 2026)



Fonte: telemetria do DMC.BRZ.022, 2026.

A falha de 11 de abril e a resposta imediata da vazão

Em torno de 11 de abril de 2026, os registradores documentaram a inoperância do circuito de comando noturno. A partir dessa data, o degrau da Pressão 2 deixa de ser registrado na série. A pressão de jusante deixou de modular e estabilizou de forma linear em torno de 22 mca, mantida ao longo das 24 horas. Cabe registrar um aspecto relevante para a análise: o novo ajuste fixo de 22 mca é inferior aos 26 mca diurnos anteriores. A falha, portanto, não elevou a pressão diurna. Ela suprimiu exclusivamente a redução noturna, elevando a pressão da madrugada de 12 mca para 22 mca, um acréscimo de 10 mca aplicado precisamente no período em que o consumo é mínimo e o excedente de pressão se converte diretamente em perda.

A resposta da rede foi imediata e está registrada nas curvas do painel de supervisão reproduzidas na Figura 4. O recorte da vazão às 4h, que historicamente se mantinha no patamar de 5 L/s, elevou-se para a faixa de 7 a 8 L/s nos dias imediatamente seguintes à falha. A média móvel de 7 dias do Fator de Pesquisa, indicador concebido para filtrar oscilações diárias e evidenciar tendências estruturais, acompanhou o degrau e consolidou um acréscimo permanente de no mínimo 2 L/s na vazão mínima noturna. Não foram registradas obras na região, rompimentos visíveis de grande porte ou alterações no padrão de consumo capazes de explicar o fenômeno. A única variável alterada foi a pressão noturna.

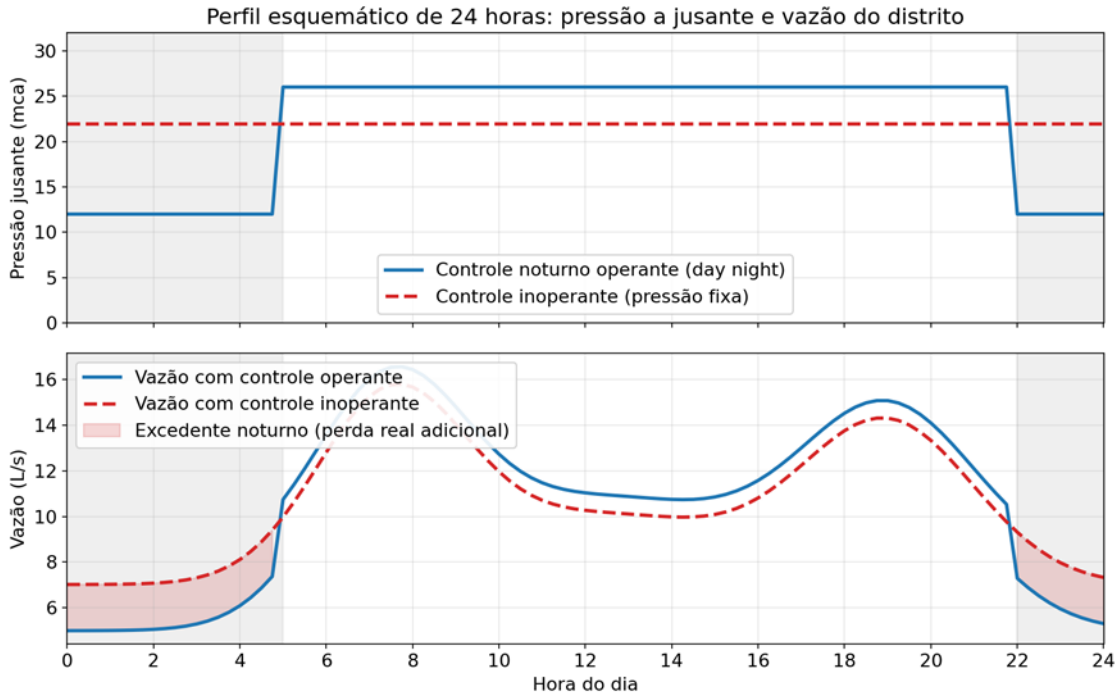
Figura 4 - Painel de supervisão: vazão às 4h, média diária e média móvel de 7 dias do Fator de Pesquisa (janeiro a junho de 2026)



Fonte: painel de supervisão da concessionária, 2026.

A Figura 5 sintetiza o mecanismo em um perfil esquemático de 24 horas, construído a partir dos patamares medidos. A área sombreada entre as duas curvas de vazão, concentrada na janela das 22h às 5h, é exatamente o volume que o controle noturno deixou de economizar. Esse é o aspecto central evidenciado por este trabalho: a atuação do day night não reduz o consumo dos usuários, e sim a parcela de vazamento alimentada pela pressão excedente nos momentos em que a demanda real é mínima.

Figura 5 - Perfil esquemático de 24 horas: pressão a jusante e vazão nos cenários com e sem controle noturno



Fonte: elaboração própria a partir dos patamares medidos pela telemetria, 2026.

Quantificação volumétrica do desperdício

O excedente contínuo de 2 L/s equivale a 7,2 m³ por hora. Aplicado à janela noturna de 7 horas, das 22h às 5h, ele soma 50,4 m³ desperdiçados a cada madrugada. A Tabela 2 consolida a projeção desse volume nos horizontes diário, mensal e anual. Em um ano sem intervenção, a falha não reparada resulta na perda de 18.396 m³ de água tratada, volume suficiente para abastecer integralmente, durante um mês, cerca de 1.200 residências com consumo médio de 15 m³, quantidade equivalente à demanda do próprio distrito estudado.

Tabela 2 - Quantificação do excedente noturno de 2 L/s provocado pela inoperância do controle

Horizonte de projeção	Janela considerada	Volume perdido (m³)
Por hora	1 h	7,2
Por madrugada	7 h (22h às 5h)	50,4
Por mês	30 madrugadas	1.512
Por ano	365 madrugadas	18.396

Fonte: elaboração própria a partir dos dados de telemetria, 2026.

Valoração financeira: produção e oportunidade

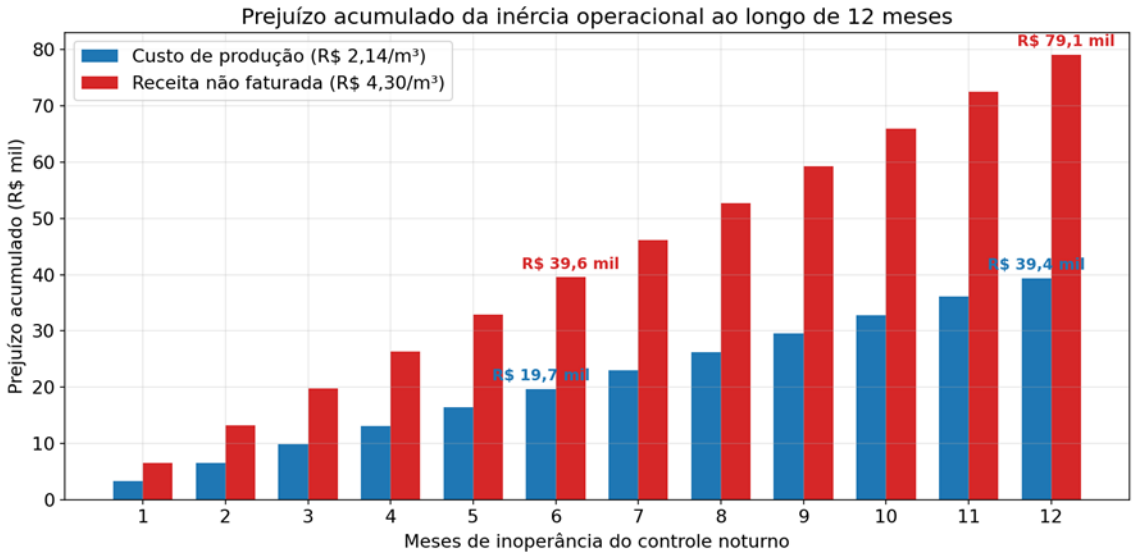
A Tabela 3 aplica as duas premissas financeiras sobre o volume anual de 18.396 m³. Sob a ótica conservadora do custo de produção, a inércia operacional ou ausência representa um dispêndio anual de R$ 39.367,44, correspondente à energia elétrica e aos produtos químicos empregados no tratamento de um volume que não será faturado. Sob a ótica do custo de oportunidade, calculado com a menor alíquota da estrutura tarifária, a receita evadida alcança R$ 79.102,80 por ano. Em termos diários, cada madrugada sem intervenção representa R$ 107,86 em custo de produção e R$ 216,72 em faturamento não realizado. A Figura 6 mostra como esse prejuízo se acumula mês a mês ao longo de um ano de inoperância.

Tabela 3 - Impacto financeiro anual e diário da inoperância do controle noturno

Critério de valoração	Prejuízo diário (R$)	Prejuízo anual (R$)
Custo de produção (R$ 2,14/m³)	107,86	39.367,44
Custo de oportunidade (R$ 4,30/m³)	216,72	79.102,80

Fonte: elaboração própria, 2026.

Figura 6 - Prejuízo acumulado da inércia operacional ao longo de 12 meses

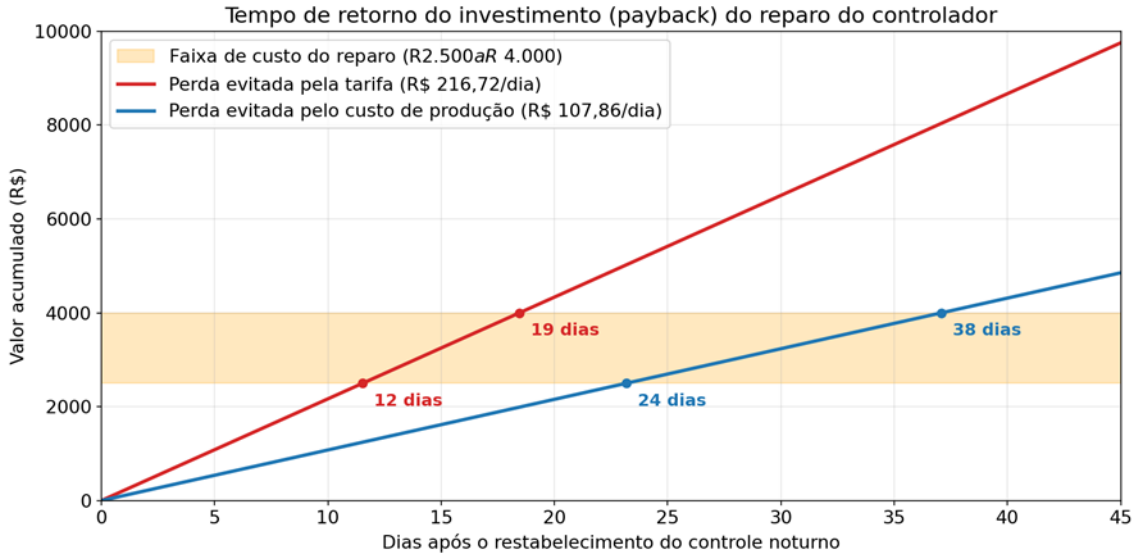


Fonte: elaboração própria, 2026.

O payback do restabelecimento do controle

O custo global de aquisição, instalação e comissionamento de um circuito controlador completo, incluindo válvulas solenoides, relógio temporizador, bateria e pequenos acessórios de pilotagem, orbita entre R$ 2.500,00 e R$ 4.000,00 nas condições usuais de mercado. Confrontando essa faixa com a perda diária evitada, verifica-se que o tempo de retorno é da ordem de dias. Avaliado pela tarifa básica, o investimento no reparo é recuperado entre 12 e 19 dias. Mesmo na hipótese mais conservadora possível, considerando apenas o custo de produção, o retorno ocorre entre 24 e 38 dias. A Figura 7 ilustra graficamente esse cruzamento. Poucas intervenções em uma companhia de saneamento apresentam retorno financeiro tão rápido, mensurável e de baixo risco quanto o restabelecimento da modulação em uma válvula já instalada.

Figura 7 - Tempo de retorno do investimento no reparo do controlador noturno



Fonte: elaboração própria, 2026.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Cenário 1: o passivo financeiro

O evento de 11 de abril configura um experimento natural, uma vez que a elevação de 10 mca na pressão noturna, de 12 mca para 22 mca, elevou a vazão mínima do setor em 40%, de 5 L/s para 7 L/s, sem a interferência de outras variáveis. Esse resultado confirma em campo o comportamento previsto pela teoria FAVAD e contraria uma percepção de gestão recorrente, segundo a qual um controlador noturno inoperante constituiria uma falha de baixa prioridade de manutenção. Os dados demonstram que essa falha representa perda de receita próxima de 80 mil reais anuais em um distrito de apenas 1.250 ligações. Extrapolado para uma concessionária com dezenas ou centenas de VRP em condição semelhante, o passivo agregado se torna extremamente significativo.

Cabe examinar o expoente aparente da relação entre pressão e vazão observada. Aplicando a equação (1) diretamente sobre a vazão total medida, a razão de 7 para 5 L/s sob a razão de pressões de 22 para 12 mca resulta em N1 aparente de aproximadamente 0,56. Esse valor, contudo, subestima a elasticidade real dos vazamentos, porque a vazão mínima noturna ainda contém uma parcela de consumo legítimo que não responde à pressão. Descontando um consumo basal plausível da ordem de 2 L/s para 1.250 ligações, a parcela de perdas teria saltado de 3 para 5 L/s, o que conduz a N1 próximo de 0,84, coerente com o comportamento misto descrito pela literatura para redes que combinam trechos plásticos elásticos e trechos rígidos (LAMBERT, 2001; THORNTON; STURM; KUNKEL, 2008). Em termos práticos, nesse setor a vazão de perdas responde de forma quase proporcional à pressão, e cada metro de coluna de água reduzido durante a madrugada converte-se imediatamente em volume economizado.

Há ainda um efeito de segunda ordem que as avaliações de curto prazo não capturam. Pressões noturnas elevadas e sustentadas aceleram a fadiga dos materiais e aumentam a taxa de surgimento de novas rupturas nas semanas e meses seguintes. O prejuízo calculado neste estudo constitui, portanto, um limite inferior. Ele mede apenas a água adicional perdida pelos vazamentos já existentes, sem contabilizar os rompimentos futuros cuja ocorrência é favorecida pela pressão excedente, com seus custos associados de reparo emergencial, recomposição de pavimento e interrupção do abastecimento.

Cenário 2: a eficácia e as limitações ocultas do controle binário

O restabelecimento do controlador de dois patamares interrompe imediatamente a perda adicional e restabelece o regime operacional anterior. Nesse sentido, o cenário 2 constitui medida obrigatória e prioritária.

Ele não representa, porém, o estágio final da evolução técnica. O controle binário comanda a alternância entre dois pilotos por meio de solenoides acionadas em horários fixos. A cada transição, a câmara de controle da válvula sofre uma mudança brusca de carga, o diafragma é estirado de forma repentina e a rede recebe um transiente hidráulico de pequena magnitude, análogo a um golpe de aríete de baixa intensidade, que se repete duas vezes ao dia. Individualmente, cada evento tem efeito reduzido. Acumulados ao longo dos anos, esses choques reduzem a vida útil do diafragma, das molas do atuador e das próprias juntas da malha, gerando manutenções corretivas que poderiam ser evitadas.

Além do aspecto mecânico, o degrau binário carrega uma ineficiência intrínseca de calibração. Os dois patamares são ajustados para o pior caso de cada período: o patamar diurno precisa atender ao pico de consumo, e o patamar noturno precisa respeitar o ponto crítico da madrugada. Em todos os demais momentos, em que a demanda real fica abaixo desses extremos, a rede recebe mais pressão do que precisa. O degrau das 22h, por exemplo, ocorre de forma instantânea, enquanto o consumo declina de forma gradual ao longo da noite. Existe, portanto, uma faixa de economia adicional que o sistema binário, por construção, não consegue capturar.

Cenário 3: a modulação por faixa horária de vazão como estado da arte

A evolução natural proposta por este estudo é transferir o comando do relógio para a própria demanda. Na modulação por faixa horária de vazão, o controlador mede continuamente o escoamento na entrada do distrito e ajusta a pressão de jusante de forma gradual e proporcional ao consumo em tempo real, em analogia direta com o que um inversor de frequência faz em um conjunto motobomba. Quando a demanda cresce, a pressão sobe suavemente o necessário para garantir os 10 mca normativos no ponto crítico. Quando a demanda declina, a pressão acompanha a queda de maneira contínua, sem degraus, reduzindo-se ao patamar mínimo seguro nos períodos de consumo mínimo da madrugada.

Os ganhos dessa arquitetura se acumulam em três camadas. Na camada de eficiência hídrica, a pressão média noturna resulta ainda menor do que no controle binário, pois deixa de existir a folga de calibração do pior caso, e a redução da vazão mínima noturna se torna ainda mais eficiente. Na camada mecânica, a curva de operação da válvula é suavizada, os transientes desaparecem, o diafragma trabalha em movimentos lentos e a longevidade do componente e da própria rede aumenta, já que a tubulação passa a receber sempre a pressão adequada e associada ao que realmente precisa em cada minuto do dia. Na camada de gestão, o sistema se ajusta automaticamente a variações sazonais, climáticas e de ocupação, dispensando reprogramações manuais de horário que, na prática, raramente são executadas.

Cabe registrar que a modulação contínua não elimina a necessidade de manutenção, e sim eleva o valor de cada hora de funcionamento correto. Por isso, a recomendação central deste trabalho permanece em duas frentes complementares: tratar o controlador de pressão como ativo crítico, com indicador de tempo de resposta para falhas, e planejar a migração gradual dos setores de maior perda para a modulação baseada em vazão, priorizando aqueles em que a telemetria já comprova, como aqui, a alta sensibilidade da vazão noturna à pressão.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Em conclusão, a ocorrência dessa falha no sistema proporcionou uma oportunidade singular para mensurar diretamente os retornos positivos e negativos da operação. Ao avaliar o cenário em que o controle *day/night* funcionava de forma plena em comparação ao momento em que ele deixou de operar, foi possível observar o comportamento dinâmico da rede sob uma condição atípica e restritiva. Esse evento representou, portanto, uma chance de amadurecimento técnico para a gestão, permitindo à operação transcender a análise puramente conceitual e compreender as reais respostas da infraestrutura.

Nesse contexto, a situação viabilizou a percepção direta do contraste entre os dados teóricos das simulações hidráulicas e os dados reais e físicos entregues pelo sistema de saneamento. A partir desse confronto empírico, foi possível mensurar de fato o custo operacional e financeiro que a ausência dessa estratégia de controle acarreta ao abastecimento. Assim, a falha converteu-se em uma base de validação prática, consolidando as métricas exatas necessárias para otimizar o planejamento e elevar a segurança operacional da rede.

A falha do controle noturno registrada em 11 de abril de 2026 converteu um sistema eficiente em fonte contínua de perdas, elevando a vazão mínima noturna de 5 L/s para a faixa de 7 a 8 L/s como consequência direta de 10 mca adicionais aplicados à madrugada. O volume real que o controle noturno reduz nos momentos de consumo baixo ficou quantificado com precisão: 2 L/s, 50,4 m³ por noite, 18.396 m³ por ano. São R$ 39.367,44 anuais em custo de produção e R$ 79.102,80 anuais em receita que deixa de ser faturada, mesmo adotando a menor alíquota da estrutura tarifária. Em contrapartida, o restabelecimento do controlador, com custo entre R$ 2.500,00 e R$ 4.000,00, se paga entre 12 e 19 dias pela ótica tarifária e em no máximo 38 dias pela ótica mais conservadora possível.

Por fim, o estudo demonstra que a mitigação definitiva das perdas reais e a preservação da infraestrutura requerem a evolução tecnológica do controle binário para a modulação contínua baseada na vazão em tempo real. Essa transição elimina transientes hidráulicos nocivos, ajusta o fornecimento à demanda dinâmica do setor e maximiza a vida útil dos componentes, consolidando um modelo de gestão de pressões proativo, financeiramente viável e de máxima eficiência operacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL (ADASA). Resolução nº 70, de 2026. Tabela de Tarifa Mensal e Preços Públicos, período de 01/06/2026 a 31/05/2027. Publicada no DODF em 23/04/2026. Brasília, 2026.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1994.
3. BEZERRA, S. T. M.; CHEUNG, P. B. (org.). Perdas de água: tecnologias de controle. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2013.
4. BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos. Brasília, 2020.
5. COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). Manual de operação e manutenção de válvulas redutoras de pressão. São Paulo: Diretoria de Tecnologia e Operação, 1999.
6. ENOPS ENGENHARIA. Controle automatizado de pressões e estratégias de redução de perdas físicas de água. Relatório técnico. São Paulo, 2001.
7. LAMBERT, A. What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems? In: IWA CONFERENCE ON SYSTEM APPROACH TO LEAKAGE CONTROL AND WATER DISTRIBUTION SYSTEMS MANAGEMENT. Proceedings. Brno: IWA, 2001.
8. LAMBERT, A. International report: water losses management and techniques. Water Science and Technology: Water Supply, v. 2, n. 4, p. 1-20, 2002.
9. MAY, J. Pressure dependent leakage. World Water and Environmental Engineering, oct. 1994.
10. TARDELLI FILHO, J. Controle e redução de perdas. In: TSUTIYA, M. T. Abastecimento de água. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. cap. 10.
11. THORNTON, J.; STURM, R.; KUNKEL, G. Water loss control. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
12. TSUTIYA, M. T. Abastecimento de água. 3. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.