PROJETO BELUGA – ASSOCIAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA DETECÇÃO DE PERDAS HÍDRICAS NÃO VISÍVEIS – ESTUDO DE CASO NA ÁREA PILOTO NO JARDIM SÃO LUIZ/ SÃO PAULO

RESUMO

O Projeto Beluga é uma iniciativa inovadora que visa aprimorar a detecção e correção de vazamentos não visíveis em redes de distribuição de água. A estratégia central do projeto é combinar duas tecnologias avançadas para maximizar a eficiência e a precisão nas operações de manutenção corretiva. A primeira tecnologia utilizada é a detecção via satélite, que permite identificar vazamentos que não são visíveis a olho nu. Esse método aproveita imagens de satélite para monitorar grandes áreas, detectando anomalias na superfície que possam indicar a presença de um vazamento subterrâneo. Essa tecnologia é especialmente eficaz em locais de difícil acesso ou em áreas onde a inspeção manual seria inviável ou muito dispendiosa. As tecnologias secundárias empregadas são o correlacionador de ruído, haste de escuta e geofone. Estes dispositivos são utilizados para localizar vazamentos de maneira precisa, através da análise dos ruídos produzidos pelo escape de água nas tubulações. Quando combinado com os dados fornecidos pela detecção via satélite, as tecnologias aumentam significativamente a assertividade na localização exata dos vazamentos, permitindo que as equipes de manutenção realizem intervenções mais rápidas e eficientes. A sinergia entre essas duas tecnologias possibilita uma abordagem proativa na gestão das redes de distribuição de água, permitindo a identificação precoce de problemas e a execução de reparos com maior precisão. Isso não apenas minimiza as perdas de água, mas também reduz os custos operacionais associados às manutenções, evitando intervenções desnecessárias e prolongando a vida útil da infraestrutura. O Projeto Beluga, portanto, representa um avanço significativo na modernização das técnicas de manutenção corretiva, destacando-se pela sua capacidade de integrar inovações tecnológicas de ponta para solucionar desafios complexos na gestão de recursos hídricos.

PALAVRAS-CHAVE: gestão de perdas; imagem por satélite; abastecimento urbano; vazamento não visivel; tecnologia acustica.

INTRODUÇÃO

A crescente escassez de recursos hídricos e o aumento da demanda por água potável tornam urgente a adoção de tecnologias inovadoras para gerenciar e conservar este recurso vital, especialmente em áreas urbanas. O uso de imagens de satélite para a detecção de perdas de água no meio urbano surge como uma solução altamente eficaz e economicamente viável. Esta tecnologia não apenas permite a identificação precoce de vazamentos e outras formas de desperdício, mas também gera benefícios financeiros e operacionais, impactando positivamente diversos indicadores de eficiência, como o Fator de Universalização (Fator U), que mede a eficiência no fornecimento de água.

A perda de água, seja por vazamentos ou desvios, é um dos maiores desafios enfrentados por companhias de saneamento. Estima-se que em algumas cidades brasileiras as perdas possam ultrapassar 40% da água distribuída, o que representa um desperdício considerável de recursos que afeta o abastecimento e gera perdas financeiras significativas. Com o uso de satélites equipados com sensores espectrais, é possível monitorar grandes áreas de forma contínua e com alta precisão, detectando pontos críticos onde vazamentos ou infiltrações possam estar ocorrendo. Essa abordagem é mais abrangente e eficiente do que as inspeções manuais, que muitas vezes são demoradas, caras e limitadas a áreas específicas.

Um dos principais benefícios dessa tecnologia é o impacto direto na melhoria do Fator U. O uso de imagens de satélite permite que as empresas identifiquem vazamentos antes que eles se tornem graves, minimizando interrupções no fornecimento de água e maximizando a quantidade de água entregue aos consumidores finais. Com a redução nas perdas, há um aumento na eficiência do sistema de distribuição, o que contribui para o cumprimento das metas de universalização do serviço. Além disso, a detecção precisa de perdas ajuda a garantir que a água fornecida seja efetivamente medida e faturada, otimizando as receitas e reduzindo o déficit financeiro.

A recuperação do volume de água distribuído e medido é outro fator relevante. Ao identificar e corrigir vazamentos de forma mais rápida e precisa, a quantidade de água perdida no sistema de distribuição diminui, aumentando o volume de água efetivamente entregue aos usuários. Isso não só contribui para a sustentabilidade ambiental, como também melhora a eficiência operacional e financeira da empresa de saneamento, visto que o volume de água faturado aumenta. Em longo prazo, o investimento em tecnologia de sensoriamento remoto se paga por meio da redução nas perdas e do aumento nas receitas, garantindo o retorno financeiro esperado.

Além do impacto direto na eficiência operacional e financeira, o uso de imagens de satélite também traz benefícios à imagem da empresa perante a sociedade. Ao adotar tecnologias de ponta para solucionar problemas críticos, a empresa demonstra seu compromisso com a inovação, a sustentabilidade e a responsabilidade social. Isso melhora a percepção da companhia entre os cidadãos e órgãos reguladores, fortalecendo sua reputação como uma entidade comprometida com a preservação de recursos hídricos e com a prestação de um serviço de qualidade.

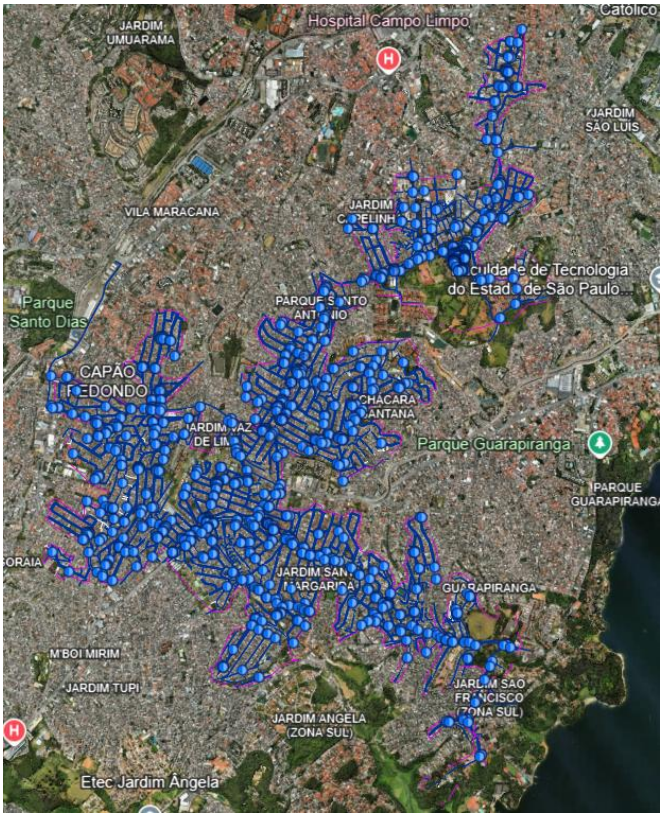
Do ponto de vista econômico, o valor investido em tecnologia de sensoriamento remoto por satélite é amplamente recuperado. Além da economia direta gerada pela redução das perdas de água, a empresa também se beneficia da maior eficiência na alocação de recursos, uma vez que a tecnologia permite direcionar os esforços de manutenção e reparo exatamente para os locais onde os problemas estão ocorrendo. Isso reduz os custos operacionais associados às intervenções emergenciais e evita desperdícios em manutenções desnecessárias.

Em resumo, o uso de imagens de satélite para detecção de perda de água no meio urbano oferece uma solução tecnológica de alto impacto que combina inovação, eficiência operacional, recuperação financeira e melhoria de indicadores de desempenho, como o Fator U. A tecnologia permite que as empresas de saneamento não só recuperem volumes de água desperdiçados e aumentem o faturamento, mas também fortaleçam sua imagem pública, demonstrando um compromisso claro com a sustentabilidade e a prestação de serviços de qualidade à população. Assim, o investimento inicial em tecnologia é rapidamente compensado pela economia gerada, consolidando-se como uma estratégia essencial para a gestão eficiente dos recursos hídricos no ambiente urbano.

Origem da demanda

O Jardim São Luiz é um distrito da zona sul da região metropolitana de São Paulo e destaca-se por suas características demográficas, segundo dados do censo de 2022, o distrito do São Luiz possui uma extensão de aproximadamente 25 km² com um adensamento populacional de 260 mil habitantes. Uma das características demográficas dessa região é a formação de conjuntos habitacionais e favelas o que torna dificultoso a atuação de

manutenções na região. Sendo identificado com o mesmo nome do distrito o setor de abastecimento do São Luiz possui uma extensão de rede de 635 km de rede, sendo 235 km a área do experimento, com 112 mil ligações cadastradas (Integra 4.0), sendo hoje um dos maiores setores de abastecimento da superintendência de operação e manutenção da sul (OS) essa região foi indicada como área piloto do projeto Beluga devido as características da urbanização e criticidade de abastecimento considerando a malha hidráulica, pressão média do setor e serviços de manutenção de vazamento visiveis advindas de ramal e rede.



Setor de abastecimento São Luiz (área piloto)

OBJETIVOS

O objetivo desta modelagem é desenvolver e validar uma metodologia eficaz para a detecção de vazamentos não visíveis em infraestruturas subterrâneas, utilizando a tecnologia via satélite e tecnologias acústicas. A pesquisa busca aprimorar as técnicas de identificação e localização de vazamentos em redes de abastecimento de água, proporcionando uma abordagem não invasiva e precisa. Especificamente, a dissertação visa:

1. Analisar a viabilidade e a precisão da associação dessas tecnologias na identificação de vazamentos subterrâneos em diferentes tipos de solo e condições ambientais.

2. Desenvolver um protocolo de operação para a aplicação desse método na detecção de vazamentos, considerando as variáveis técnicas e ambientais.

3. Validar a eficácia da metodologia proposta através de estudos de caso e experimentos controlados, comparando os resultados obtidos com outras técnicas tradicionais de detecção de vazamentos.

4. Avaliar o impacto econômico e operacional dessa correlação em comparação com métodos convencionais, destacando os benefícios e possíveis limitações.

Ao atingir esses objetivos, a iniciativa pretende contribuir significativamente para a melhoria da gestão de recursos hídricos e a manutenção de infraestruturas subterrâneas, oferecendo uma ferramenta avançada e confiável para a detecção precoce de vazamentos.

METODOLOGIA UTILIZADA

A partir de uma imagem bruta via satélite será realizada uma na avaliação das condições de infraestrutura, modelagem de substituição de tubulações e detecção de vazamentos em redes urbanas e rurais, de água ou esgoto, usando radar de abertura sintética (SAR) de banda L acoplado em um satélite. A tecnologia é baseada em um algoritmo proprietário que detecta a umidade do solo resultante de vazamentos de água tratada ou efluentes, por meio da análise de dados SAR. A partir de 2016 a tecnologia sofreu vários refinamentos entre eles o ajuste para detecção de água potável por analise espectral e apuro de revelar vazamentos subterrâneos de até 0,5l/ minuto.

Com a localização dos possíveis pontos de vazamento recém – detectados a área a ser pesquisada é beneficiada pela limitação de pesquisa de detecção acústica de vazamento na tubulação, focando os esforços hora/homem em pontos com maior taxa de assertividade.

Considerando o tempo de vida do contrato de pesquisa de vazamento que será o executante do projeto, a iniciativa Beluga já se inicia na fase 03 do projeto inicial, readequando- se para apresentar os primeiros resultados nos dois meses seguintes da entrega da varredura via imagem por satélite, ficando dessa forma:

Mês 1: Operações Piloto e Expansão Gradual

Com a infraestrutura já instalada, o foco é iniciar a operação piloto e avançar rápido na execução.

Semana 1 a 2:

i. Seleção das Áreas Piloto: identificar rapidamente as áreas críticas, priorizando locais com maior criticidade, como por exemplo, maior número de pontos apontados como possíveis vazamentos.

ii. Detecção via Satélite nas Áreas Piloto: Realizar as primeiras varreduras via satélite nas áreas selecionadas. Essa etapa pode ser feita simultaneamente com a seleção das áreas, para ganhar tempo.

iii. Implementação do Correlacionador de Ruído: Aplicação dos correlacionadores de ruído imediatamente após as detecções via satélite para localizar os vazamentos com precisão.

Semana 3 a 4:

i. Análise de Resultados Iniciais: Avaliar os dados encontrados durante as operações piloto, verificando a eficácia das tecnologias e identificando possíveis ajustes.

ii. Correções de Curso: Implementar correções imediatas com base nos resultados, ajustando procedimentos, reconfigurando equipamentos ou mudanças nos procedimentos operacionais.

Mês 2: Expansão Completa e Monitoramento

O segundo mês será dedicado à expansão das operações para cobrir toda a área priorizada.

Semana 1 a 2:

i. Cobertura Total das Áreas Priorizadas: Expandir as operações para cobrir todas as áreas previamente identificadas como prioritária.

ii. Monitoramento Contínuo: Implementar o sistema de monitoramento contínuo, que deve ser automatizado para detectar novos vazamentos e alertar as equipes de manutenção em tempo real.

Semana 3 a 4:

i. Documentação e Relatórios: Gerar relatórios detalhados sobre os resultados obtidos nas primeiras varreduras.

ii. Avaliação e Ajustes Finais: Realizar uma revisão completa do projeto utilizando uma avaliação 360° associado a um KPIs (*Key Performance Indicators*).

iii. Planejamento Futuro: Definir um plano de manutenção contínua do sistema agregando estudos de renovação e/ou expansão do projeto.

Partindo da premissa que a taxa de assertividade dos tradicionais métodos de detecção acústica para vazamentos fica entre 70 a 75%, a associação de tecnologias que o projeto Beluga descreve, considera aumentar a taxa de assertividade das pesquisas de vazamento em 20%.

VIABILIDADE ECONOMICA

O projeto Beluga conta com duas vertentes econômicas:

I. Contratação do serviço de fornecimento da imagem por satélite e entrega do material final com as devidas indicações de vazamento por meio digital;

II. Utilização de parte do contrato de pesquisa de vazamento para compor a assertividade do ponto e posterior programação para execução do serviço de reparo.

Para o primeiro caso a contratação por modalidade de dispensa de licitação por disponibilidade de valor já foi autorizada via aprovação de quadro financeiro junto a diretoria de operação e manutenção, requisitando um valor orçamentário de investimento de 213 mil reais, onde o km varrido sai por 915 reais, seguindo para a próxima etapa que é a contratação do fornecedor. O contrato de pesquisa de vazamento já está em andamento com previsão de término em março de 2025 podendo ser aditado conforme necessidade onde já foram pagos 482 mil em medição.

VIABILIDADE TECNICA

Toda a mão de obra intelectual e técnica para o andamento do projeto será disponibilizada pelo departamento de operação sul (OSO) sendo representado pela Sulamita França junto ao analista de estatística e projeção de perdas Paulo Renato Vieira em parceria com o polo estendido de água da divisão de operação de água sul (OSOAg) que programa e gerencia o contrato de pesquisa de vazamento, sendo esse composto por equipes treinadas e experientes que serão dimensionadas conforme áreas priorizadas e períodos de sondagem. Enquanto o fornecimento do serviço de imagem via satélite correlacionada com o mapa hidráulico, analise algorítmica e portal de monitoramento fica a cargo da empresa Nortech que detém de forma exclusiva acesso à tecnologia da Asterra.

INDICADORES

As métricas utilizadas atualmente contemplam a mensuração necessária para verificar a performance da concepção da metodologia associativa, sendo elas: Índice de Perdas por ligações totais (IPDT), Índice de água não contabilizada (IANC), Relação VD/ VM (Volume distribuído por volume medido), Índice de Vulnerabilidade na Infraestrutura (IVu) e Índice de vazamento encontrado por quilometro de rede/ km de rede. E indiretamente o Índice de Vazamentos Visíveis (IVV) com apresentação dos resultados a longo prazo, onde entende- se que vazamentos solucionados sem que haja afloramento não são contabilizados nesse indicador estando ele com um do índice que compõe o Índice Geral da Qualidade (Fator Q).

COMPARATIVO COM A METODOLOGIA UTILIZADA

Ao desenvolver esse estudo de caso, modelar e validar uma metodologia associativa para a detecção de vazamentos não visíveis em infraestruturas subterrâneas o experimento controlado tem por pressuposto promover e estimular ecossistemas inovadores dentro do contexto de perdas, apresentando por meio de resultados factíveis os benefícios sustentáveis do investimento em tecnologias inovadoras em associação a procedimentos consolidados. Comparando- se financeiramente, a metodologia atual pratica um preço de 1.617,00/ km de rede pesquisado enquanto a varredura espacial no projeto piloto custa 915 reais/ km.

O método utilizado atualmente sem a associação da tecnologia entrega uma média de 0,5 vazamento/ km de rede pesquisada, enquanto a literatura aponta que associando com uma tecnologia de varredura espectral esse número

pode subir para 1,5 vaz/km de rede.

Projetando 1 vazamento confirmado e corrigido por km/rede, temos esses dados:

Pressão Média do Setor	**30 mca**
Extensão de Rede Total	635 km
Extensão de Rede Pesquisada	235 km
Vazamentos por km	1
Volume Necessário para Recuperar 1 L/lig.dia	40.965 m³/ano

Nesse caso se consideramos encontrar:

	% vaz encontrados	m3/h (50 mca)	Tempo Total (em dias)	Volume Recuperado (m³)
Rede	10,00%	6	50	153.528
Ramal	90,00%	1,6	100	530.065
Total				683.593

Trabalhando com um histórico de 12 meses:

	IPDT	VPDT	VPDR	Perdas Recuperáveis com Pesquisa de VNVs
ago/23	280	997.446	678.263	473.610
set/23	284	922.147	627.060	451.528
out/23	286	1.021.524	694.636	474.227
nov/23	291	1.065.522	724.555	534.995
dez/23	297	1.198.067	814.685	603.587
jan/24	299	1.079.602	734.129	526.833
fev/24	303	992.107	674.633	467.961
mar/24	302	1.057.889	719.364	537.189
abr/24	303	970.384	659.861	459.255

mai/24	303	1.039.122	706.603	579.051
jun/24	301	925.286	629.194	444.443
jul/24	298	953.343	648.273	467.716

Redução do IPDT	**17**
Custo da Água	2,01
Valor Total Perdido	24.567.102

Temos uma recuperação de faturamento:

Custo dos Serviços	**Custo Unitário (R$)**	**Custo Total (R$)**
Localização	250.000	250.000
Manutenção de Redes	3.200	76.800
Manutenção de Ramais	320	67.840
		394.640
Valor da Água Economizada		1.374.022

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados parciais mensuráveis

Operacionalização

A área total varrida por satélite indicou 50 pontos de interesse (POI's) totalizando aproximadamente 50km de rede com possíveis vazamentos não visíveis o que indica aproximadamente 21,5 % da rede com no mínimo 1 ponto de vazamento.





Treinamento da equipe de pesquisa 18/02 e 19/02

Foram treinadas para utilizar o aplicativo de campo 10 colaboradores de mão de obra própria e a equipe terceirizada do contrato de geofone. O treinamento consistiu em apresentar a tecnologia, o que a varredura trazia de informações ao usuário e o manuseio do aplicativo com as suas funcionalidades e como inserir os dados encontrados em campo. Assim que estavam aptos para o uso iniciou- se os trabalhos de averiguação dos pontos utilizando ferramentas de detecção acústica.





Treinamento prático 19/02

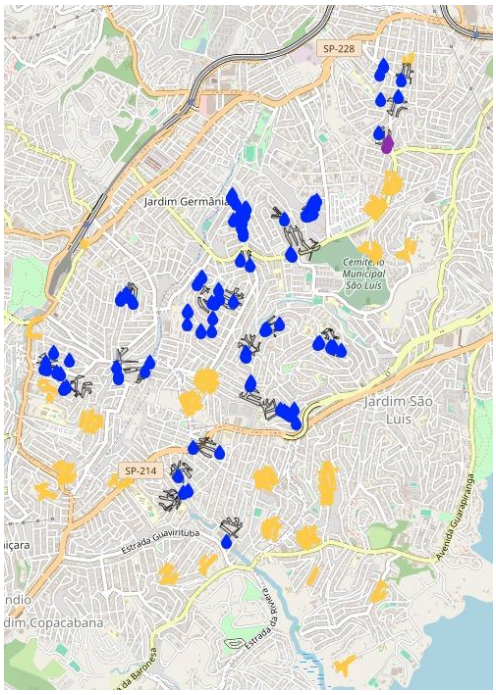


Vazamento detectado no treinamento prático – Borracha da Luva 50’ estava mastigada na conexão.

Em números absolutos já foram detectados com taxa de assertividade de 98%, 111 vazamentos, todos com provas por imagem e/ou vídeo, sendo 94 redes/ 15 ramal/ 1 cavalete lado cliente/ 1 adutora. Comparando com a metodologia tradicional de varredura sem um ponto focal a ser investigado, temos esse cenário:

	Tradicional	C/ Satélite
Km varrido/ dia	≈1km	≈ 2,5km
Vaz./ dia	≈1,3	≈11
Vaz./ km	≈0,5	≈2,4

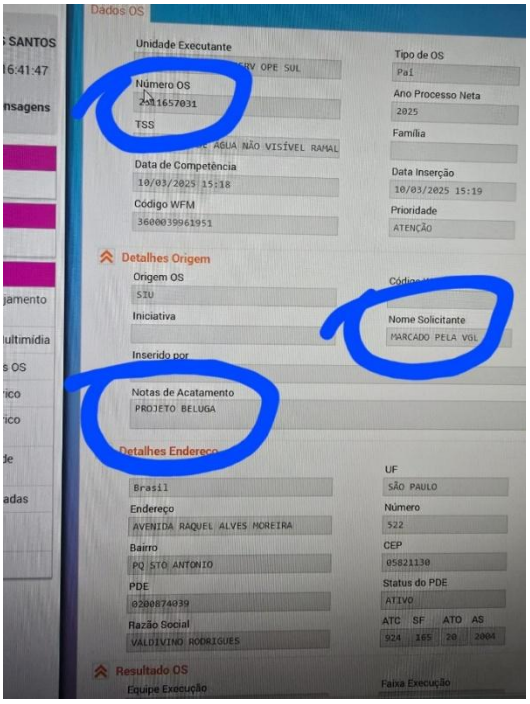
Cada ponto de interesse investigado apresentou ≈4 vazamentos.



Pontos azuis (Investigados com vazamentos) / Pontos amarelos (a serem investigados)

Manutenção

Por ser um projeto piloto, criou- se uma metodologia de rastreabilidade das ordens de serviços (OS) que seriam abertas a divisão que realiza a manutenção da área de interesse. Todas as OS's abertas do projeto são indicadas pelo nome PROJETO BELUGA, afim de não haver concorrência com a rotina de trabalho da manutenção e tão pouco a rotina da própria equipe terceirizada que está atuando no projeto, são abertas 10 ordens diárias de serviço, estando as mesmas no cronograma de reparo das equipes terceirizadas de manutenção.



Ordem de serviço aberta pelo projeto (Rastreabilidade)

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A implantação do Projeto Beluga envolve uma sequência de fases cuidadosamente planejadas e executadas. Desde o planejamento inicial até a avaliação final, o projeto requer uma integração eficiente de tecnologias, ajustes contínuos e um forte foco na melhoria da eficiência e precisão das manutenções corretivas, além de um relacionamento justo entre área planejadora e executora. Ao combinar a detecção via satélite com tecnologias acústicas, o Projeto Beluga tem o potencial de transformar a maneira como os vazamentos em redes de distribuição de água são detectados e corrigidos, proporcionando benefícios significativos em termos de economia de recursos e melhoria na gestão da infraestrutura.

RESULTADOS ESPERADOS

Resultados Esperados com a Implantação do Projeto Beluga

1. Redução Significativa de Vazamentos na Rede de Distribuição de Água: Com a combinação das tecnologias de detecção via satélite e tecnologia de detecção acústica, espera-se uma identificação mais rápida e precisa de vazamentos na rede de distribuição de água. Isso permitirá que os vazamentos sejam corrigidos antes de se tornarem maiores e mais dispendiosos. A redução de vazamentos contribui para a preservação dos recursos hídricos, garantindo que mais água potável esteja disponível para a população. Além disso, minimiza interrupções no fornecimento de água, melhorando a confiabilidade do serviço.

2. Diminuição dos Custos Operacionais com Manutenção: A precisão na detecção dos vazamentos reduzirá a necessidade de escavações e reparos extensivos, resultando em operações de manutenção mais eficientes e menos dispendiosas. Isso inclui economia de tempo e recursos, bem como a redução de danos colaterais à infraestrutura. Com a diminuição dos custos operacionais, as empresas de saneamento podem investir em outras áreas críticas, como a expansão da rede de distribuição ou melhorias na qualidade da água. A longo prazo, essa economia pode resultar em tarifas mais estáveis ou até mesmo mais baixas para os consumidores.

3. Melhoria na Sustentabilidade e Gestão dos Recursos Hídricos: A detecção precoce e correção eficiente dos vazamentos contribuem para uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos. Isso inclui a redução do desperdício de água e a melhoria da eficiência na distribuição. A gestão sustentável dos recursos

hídricos assegura a disponibilidade de água de qualidade para as futuras gerações. Além disso, uma rede de distribuição mais eficiente reduz o impacto ambiental, promovendo um ambiente mais saudável e sustentável para a população.

Esses resultados esperados com a implantação do Projeto Beluga trazem benefícios diretos para a população, assegurando um fornecimento de água mais eficiente, confiável e sustentável.

BENEFICIOS A CURTO E LONGO PRAZO

1. Redução Imediata de Vazamentos

   - Descrição: A aplicação das tecnologias de detecção via satélite e tecnologias para detecção de ruído permite a identificação rápida e precisa de vazamentos na rede de distribuição de água. Isso resulta em correções mais rápidas e eficazes.

   - Impacto: A diminuição dos vazamentos evita desperdícios de água e pode reduzir imediatamente as interrupções no abastecimento, melhorando a qualidade do serviço para a população.

2. Diminuição dos Custos com Manutenções Emergenciais

   - Descrição: Com a detecção precoce e precisa, há uma redução significativa na necessidade de intervenções emergenciais, que são geralmente mais caras e disruptivas.

   - Impacto: A economia gerada pode ser reinvestida em melhorias na infraestrutura ou em outras áreas prioritárias, beneficiando diretamente os consumidores.

3. Melhoria na Eficiência Operacional

   - Descrição: A implementação de tecnologias avançadas torna as operações de manutenção mais eficientes, com menor tempo de resposta e menos necessidade de reparos desnecessários.

   - Impacto: A eficiência operacional aprimorada resulta em um serviço mais confiável e consistente para a população.

Benefícios de Longo Prazo

1. Preservação dos Recursos Hídricos

   - Descrição: A redução contínua de vazamentos ao longo do tempo contribui para a conservação dos recursos hídricos, um benefício crucial em regiões com escassez de água.

   - Impacto: Garantia de um fornecimento sustentável de água para as futuras gerações, promovendo a segurança hídrica e a sustentabilidade ambiental.

2. Estabilidade ou Redução das Tarifas de Água

   - Descrição: Com a diminuição dos custos operacionais e de manutenção, as empresas de saneamento podem evitar aumentos nas tarifas de água ou até mesmo reduzir os custos para os consumidores.

   - Impacto: A estabilidade ou redução das tarifas alivia o orçamento das famílias e contribui para a equidade no acesso à água potável.

3. Aumento da Vida Útil da Infraestrutura

   - Descrição: Com a detecção precoce de problemas e a realização de reparos preventivos, a vida útil da infraestrutura de distribuição de água pode ser prolongada.

- Impacto: A longevidade da infraestrutura reduz a necessidade de investimentos em reparos extensivos ou substituições, permitindo que os recursos sejam direcionados para melhorias e expansões da rede.

Esses benefícios, tanto de curto quanto de longo prazo, são essenciais para garantir a eficiência, sustentabilidade e acessibilidade dos serviços de água, gerando um impacto positivo e duradouro na qualidade de vida da população.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alegre, H., Baptista, JM, Cabrera, E., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., & Parena, R. (2016). Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água. Publicação IWA.

- Al-Nuaimy, W., Huang, Y., Nakhkash, M., Fang, MTC, Nguyen, VT, & Eriksen, A. (2000). Detecção automática de utilidades enterradas e objetos sólidos com GPR usando redes neurais e reconhecimento de padrões. Journal of Applied Geophysics, 43(2-4), 157-165.

- Hunaidi, O., & Giamou, P. (1998). Radar de penetração no solo para detecção de vazamentos em canos de distribuição de água de plástico enterrados. Journal of Applied Geophysics, 40(1-3), 101-107.

- Jol, HM (Ed.). (2009). Teoria e aplicações do radar de penetração no solo. Elsevier.

- Liu, Z., Wang, P., & Zhang, H. (2020). Detecção de vazamento de dutos subterrâneos usando radar de penetração no solo. IEEE Access, 8, 132914-132922.