

MONITORAMENTO ONLINE DE QUALIDADE DA ÁGUA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Kathleen Caroline Ribeiro ⁽¹⁾

Técnica em Sistemas de Saneamento da Divisão de Controle Sanitário da Unidade de Negócio Leste da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP)

Fabiana Aparecida Lima Silva ⁽²⁾

Gerente de Divisão de Controle Sanitário da Unidade de Negócio Leste da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP)

Erivaldo da Rosa Lima ⁽³⁾

Técnico em Sistemas de Saneamento da Divisão de Eletromecânica da Unidade de Negócio Leste da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP)

André Luis Góis Rodrigues ⁽⁴⁾

Gerente de Departamento de Tratamento de Água da Metropolitana na Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP)

Endereço⁽¹⁾: Rua Diego Calado, 149 – São Miguel Paulista – São Paulo - SP - CEP: 08011-420 - Brasil - Tel.: +55 (11) 2030-4893 - Fax: +55 (11) 2030-4907 - e-mail: kcaroline@sabesp.com.br.

RESUMO

As empresas de saneamento enxergam grande oportunidade quanto ao investimento do monitoramento online da qualidade da água no intuito de oferecer aos clientes tecnologias modernas em relação ao tratamento da água e seus efluentes. A divisão de controle sanitário da região leste da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) é pioneira em testes na rede de distribuição com os analisadores online para obtenção de resultados que demonstrem a qualidade da água que os clientes estão recebendo em tempo real, evidenciando pontos positivos trazidos pela automação e oportunidades para um futuro de tomada de decisões imediatas. Atualmente, os equipamentos que atendem às necessidades de monitoramento são preparados para realizar análises de cloro, pH, cor, turbidez e coliformes totais e seus resultados são capazes de manifestar o real objetivo de fornecer água potável segura, pois os instrumentos online seguem os mesmos princípios de medição de um instrumento laboratorial e alinhados para com a otimização do processo de coleta e análises de amostras.

PALAVRAS-CHAVE: monitoramento online, qualidade da água, otimização do processo.

INTRODUÇÃO

A água distribuída pode ser caracterizada por diversos parâmetros, os chamados indicadores de qualidade que caso seus valores sejam superiores aos estabelecidos para determinado uso são considerados não conformes. O corpo hídrico submete-se a uma vasta série de processos físicos, químicos e biológicos, pois a água, além de ser constituída por dois elementos (H₂O), pode adquirir características únicas através da dissolução de muitas substâncias, as quais influenciam diretamente na qualidade que é controlada por meio dos valores máximos permitidas (VMP) de diferentes compostos bem definidos no Anexo XX da PRC GM/MS n° 5/17, alterado pela Portaria GM/MS n° 888/21, do Ministério da Saúde. Os principais indicadores da qualidade da água são separados sob as características físico-químicas e biológicas. ⁽⁴⁾

De acordo com o Anexo XX da PRC GM/MS n° 5/17, alterado pela Portaria GM/MS n° 888/21, o controle da qualidade da água para consumo humano diz respeito ao “conjunto de atividades exercidas regularmente pelo responsável pelo sistema ou por solução alternativa coletiva de abastecimento de água, destinado a verificar se a água fornecida à população é potável, de forma a assegurar a manutenção desta condição”. A Divisão de Controle Sanitário Leste (MLEC) da Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo (SABESP) é responsável por avaliar as condições da qualidade da água distribuída na região metropolitana leste de São Paulo e outros 8 municípios; cabe ao MLEC, avaliar o alumínio, cloro residual livre, cor aparente, ferro, fluoreto, manganês, pH e turbidez dos parâmetros físico-químicos, além dos coliformes totais dos aspectos biológicos para as amostras da rede de distribuição de água

tratada. Em termos quantitativos de ensaios, os mais recorrentes são cloro residual livre, cor aparente, pH, turbidez e coliformes totais.

Por não exigir conhecimentos científicos, a amostragem muitas vezes é julgada uma simples atividade. No entanto, para assegurar a confiabilidade e garantia dos resultados, a amostragem deve ser considerada etapa crucial para a realização dos ensaios relacionados à qualidade da água, o que significa certificar-se da capacidade e treinamento técnico dos responsáveis pela coleta das amostras. Em vista disso, o pleno desenvolvimento dessa atividade e o atendimento aos requisitos técnicos exigem investimento em recursos humanos e tecnológicos para garantir a homogeneidade e representatividade da amostragem, pois, além de reter informações sobre a alíquota amostrada, é possível realizar uma avaliação mais concisa dos efeitos espaciais e temporais aplicados àquela amostra. ⁽²⁾ Atualmente, a SABESP realiza o serviço de amostragem de maneira tradicional, ou seja, é necessário que um colaborador (coletor) seja capacitado para fazer a separação e preservação adequada do material para a coleta de amostras de água, para que esta seja encaminhada para o laboratório sob condições térmicas e higiênicas definidas. O responsável da amostragem ainda deve ser treinado para realizar os ensaios de cloro residual livre e pH em campo, por conta do tempo máximo de medição que os métodos exigem após a coleta. Após o recebimento das amostras, o laboratório MLEC deve atentar-se ao tempo máximo para realizar os ensaios de cor aparente, turbidez e coliformes totais (até 24 horas após a coleta da amostra). Nota-se, portanto, um certo *delay* no tempo de coleta até o tempo de emissão dos resultados, de 48 horas ou mais, sendo assim esse processo se torna dispendioso para os laboratórios que, muitas vezes, precisam de um resultado mais urgente para tratar rapidamente de uma ocorrência ou reclamação, o que é impossível.

O cloro residual livre está presente na água distribuída através da etapa de cloração, a qual é essencial para o tratamento de água, geralmente, o cloro encontra-se sob a forma de ácido hipocloroso e o íon hipoclorito na rede de distribuição, os quais reagem com diversos compostos orgânicos e inorgânicos, sendo seu decaimento inevitável, mas de considerável importância, pois quando em níveis baixos este pode propiciar a proliferação microbiana no meio aquoso. O íon cloreto é instável, pois pode ser dissipado facilmente quando submetido a fatores como, fonte de luz solar ou intensa, agitação e tempo de amostragem. Portanto, as amostras devem ser analisadas imediatamente após a coleta. No MLEC aplica-se o método DPD colorimétrico para a determinação do cloro residual livre em amostras de água. ⁽¹⁾

O monitoramento de pH é uma das medidas mais importantes aplicadas à distribuição de água potável, dada a influência que apresenta nas diversas fases do processo de tratamento e controle, seja na coagulação de partículas, decantação, desinfecção e controle de corrosão. Em certa temperatura, a acidez ou alcalinidade de uma solução é indicada pela medida do pH, ou atividade do íon hidrogênio (H^+), de forma que a água pura é levemente ionizada, na qual os íons hidrogênios presentes estão em equilíbrio em espécies de carga contrária, tornando-a uma solução neutra. Águas naturais geralmente possuem valores de pH na faixa de 4 a 9, sendo a maior parte levemente alcalina devido à presença de bicarbonatos e carbonatos decorrentes de metais alcalinos e alcalino-terrosos. Geralmente, o pH é medido através de potenciômetros ou amperímetros, no MLEC aplica-se a quantificação da atividade dos íons hidrogênios por método potenciométrico. Cabe evidenciar, as medidas de pH são afetadas diretamente pela temperatura, seja por efeitos mecânicos ou mudanças químicas. Bem como a análise de cloro residual livre, o pH também deve ser realizado imediatamente após a amostragem, não ultrapassando o tempo de 15 minutos. ⁽¹⁾

Essencialmente, a cor é uma característica organoléptica oriunda de processos de decomposição no meio ambiente, devido à presença de manganês, ferro, plâncton, despejos industriais, entre outros que afetam a redução da intensidade de passagem de luz pela absorção da radiação eletromagnética por parte do material dissolvido. A presença de cor em águas de abastecimento público não indica, precisamente, problemas de contaminação e, sim, um aspecto estético para o consumidor que causa repulsa psicológica pela associação com águas residuais. Hoje, para a água tratada na rede de distribuição, exige-se a determinação de cor aparente, que é oriunda da presença de substâncias dissolvidas e suspensas no meio, esta é determinada sem necessidade de remover a turbidez, diferente da cor verdadeira que, necessariamente, precisa que a turbidez seja eliminada. Utiliza-se o método tristímulo que representa a somatória das três cores primárias (azul, verde e vermelho) essenciais para se obter a cor através de um equipamento colorimétrico, sendo a porcentagem de luminosidade transmitida pela solução determinada e os valores de transmitância convertidos em coeficientes tricromáticos e valores característicos de cor (unidade de cor (uC) ou unidade de Hazen (uH)). De acordo com o SMEWW, 23rd: Método 1060, o ensaio de cor pode ser realizado em até 24 horas após a coleta da amostra. ⁽¹⁾

Os indícios que podem causar turbidez são materiais coloidais ou suspensos na amostra oriundos de matéria orgânica e inorgânica, argila, algas e, até mesmo, organismos microscópicos resultantes do processo de erosão e

desejos domésticos ou industriais, tais indícios diminuem a passagem de luz no meio. Sendo um padrão organoléptico e um indicativo sanitário, a presença de turbidez é capaz de afetar a desinfecção, pois pode ser escudo e proteção para possíveis microrganismos presentes no meio. Sendo assim, os resultados de turbidez quantificam a interferência de absorção de luz incidente em uma amostra provocada por materiais em suspensão. A unidade nefelométrica de turbidez (NTU) é determinada por um turbidímetro, que se trata de um método que analisa a dispersão de um foco de luz à 90 graus. De acordo com o SMEWW, 23rd: Método 1060, o ensaio de turbidez pode ser realizado em até 24 horas após a coleta da amostra. ⁽¹⁾

O ensaio microbiológico de colimetria baseia-se na determinação da presença ou ausência de bactérias do grupo de coliformes totais na água. Utiliza-se o substrato cromogênico enzimático, em amostras de água potável de 100 mL preservadas com tiosulfato de sódio, que detectam enzimas produzidas por coliformes totais e *Escherichia coli* (E. coli), com a utilização do substrato. As bactérias coliformes totais que produzirem a enzima β -D-galactosidase, fazem com que o substrato cromogênico reaja ao meio para liberar o cromógeno gerando uma mudança de cor na amostra (amarela), já as cepas de E. coli que produzirem a enzima β -glucuronidase, fazem com que o substrato reaja ao meio para liberar fluorogênio, deixando a amostra fluorescente sob a luz UV. Vale ressaltar, quando há presença de coliformes totais, não necessariamente há presença de E. coli, no entanto, quando há E. coli, há coliforme total. A coleta de amostras para o ensaio bacteriológico exige muito cuidado, pois o ambiente e materiais devem ser esterilizados para que fontes de contaminação não interfiram em seu resultado, além disso, a temperatura de transporte e armazenamento que deve respeitar o limite de <10 °C, sem o congelamento. O laboratório de microbiologia deve ser regularmente limpo e higienizado e, também, os responsáveis pelo ensaio devem ser capacitados e manter a assepsia, principalmente, das mãos e bancadas. Após a coleta da amostra, o ensaio deve ser o mais breve possível, não ultrapassando 30 horas após a coleta. Depois da adição do substrato enzimático e homogeneidade da amostra, esta deve ser incubada por 24 horas em uma temperatura de $35 \pm 0,5$ °C. Observa-se que a realização do ensaio de colimetria exige extremo cuidado, atenção, higienização e tempo para que o seu resultado seja validado e confiável. ⁽¹⁾

Para garantir a confiabilidade e validade dos resultados emitidos pelo laboratório, essencialmente, são aplicados os requisitos da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 que dispõe de um sistema de gestão da qualidade para promover a confiança na operação do laboratório, demonstrar que o laboratório opera competentemente e que são capazes de gerar resultados válidos. A implementação deste sistema de gestão requer investimento em recursos humanos que visa capacitações, treinamentos e adequações de procedimentos. Portanto, para um laboratório que contempla aos requisitos da norma, exige-se um número adequado de colaboradores capacitados para atender os requisitos da norma e realizar os ensaios físico-químicos e biológicos, espaço suficiente capaz de promover a isenção de possíveis contaminações cruzadas e, também, controles e garantias de qualidade para validar seus resultados

Diante de todas as interfaces evidenciadas sobre o monitoramento tradicional da qualidade água, são notórios o desenvolvimento e o avanço na incorporação da indústria 4.0 em todas as atmosferas industriais, atribuindo uma tendência à automação que se tornou foco primordial para a otimização e atualização de processos. Na SABESP, tratando-se de estações de tratamento, a automação já é uma realidade efetiva, logo, expandir essa visão para outras camadas, como para rede de distribuição é de grande interesse tecnológico para o saneamento básico. A aplicação de recursos em contratos de compra de dados por desempenho de uso de dispositivos de transmissão remota e armazenamento de dados com administração computacional vêm sendo aplicada não só no saneamento básico, mas também em outros serviços públicos de interesse nacional. Assim sendo, faz-se necessário um controle intenso da qualidade da água que é distribuída à população por meio de analisadores online para obtenção de resultados que demonstrem a qualidade da água em tempo real, evidenciando pontos positivos trazidos pela automação e oportunidades para um futuro de tomada de decisões imediatas. ⁽⁵⁾

Atualmente, há no mercado, equipamentos que atendem aos critérios técnicos de eficácia de funcionamento e, ainda, são passíveis de acreditação de acordo com os requisitos da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 para garantia da qualidade e validade dos dados, bem como é feita no laboratório, entretanto, neste segundo caso utiliza-se uma quantidade excessiva de recursos, além de um quadro maior de funcionários. Os equipamentos para o monitoramento online são capazes de realizar análises exigidas pela Anexo XX da PRC GM/MS n° 5/17, alterado pela Portaria GM/MS n° 888/21, do Ministério da Saúde, tais quais: cor, turbidez, cloro, pH e coliformes totais em um número excepcionalmente maior, por outro lado, em um menor espaço de tempo e recursos. Podendo, portanto, os funcionários serem direcionados para atuar da linha de frente da resolução de problemas, estando suas tarefas elevadas a um outro nível de envolvimento e desenvolvimento intelectual e pessoal, além de aprimorar seus conhecimentos acerca do funcionamento do instrumento e acompanhamento dos resultados produzidos.

A priori, o trabalho presente possui como premissa manter a qualidade e a validade dos resultados emitidos pelas metodologias aplicadas ao monitoramento online, visualizar de maneira simultânea a qualidade da água que está sendo distribuída à população a partir do Centro de Reservação de Água Tratada (CRAT) – Ermelino Matarazzo e realizar comparações analíticas para avaliar a equivalência dos métodos.

OBJETIVOS

O objetivo principal é avaliar a aplicabilidade da internet das coisas (IoT) no âmbito do monitoramento da qualidade água que é distribuída à população a partir dos reservatórios de água e os benefícios que o aumento em tempo integral desse monitoramento pode trazer à administração de dados e à prestação de serviços, através de um contrato de compra de dados por desempenho. Outros objetivos do projeto tratam-se da otimização do processo de amostragem, redução de custos e verticalmente o tempo entre a coleta da amostra e seus resultados, além de aumentar a produtividade, eficiência e confiabilidade do processo, sendo possível eliminar a variável de interferência humana nos casos de alteração de parâmetros, em busca de avaliar diretamente o processo.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada para estudar o monitoramento online foi a prototipação. A prototipagem visa a exploração, identificação, descoberta e validação de requisitos. Sendo assim, o primeiro passo iniciou-se com a elaboração do plano de prototipação com a definição e entendimento dos requisitos mínimos para aplicar a tecnologia, avaliação dos recursos e oportunidades disponíveis no mercado e, por fim, o estabelecimento dos indicadores para avaliar o desempenho do projeto.

Tabela 1: Requisitos para implantação do projeto

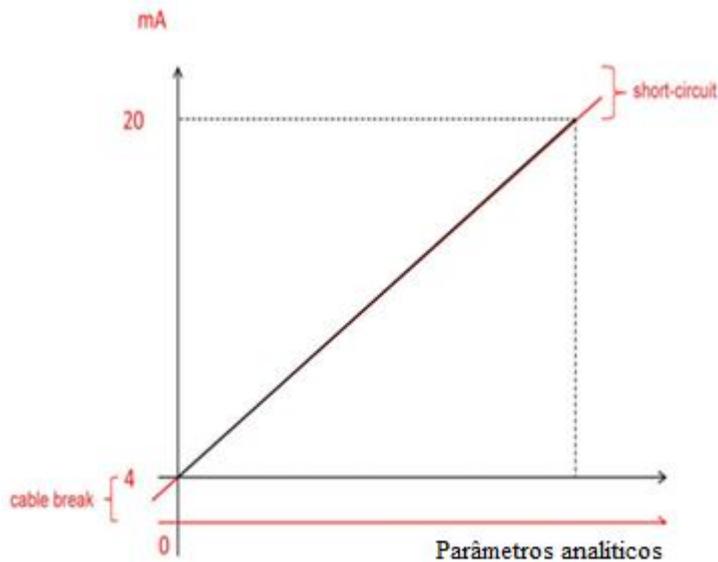
Requisito	Objetivo
Instalação do equipamento	Realizar acordo em parceria com um dos fornecedores da tecnologia
Local	Averiguar reservatório de água tratada que atenda aos requisitos da instalação do equipamento (umidade, abrigo, elétrica, etc.)
Comunicação	Disponibilidade de meio que realize comunicação eficaz para com a interface escolhida (SCOA, plataforma WEB, etc.)
Desempenho	Desempenho da tecnologia será evidenciado através do fornecimento dos resultados dentro do tempo estabelecido e dos critérios de reprodutibilidade
Equipe	A equipe envolvida na etapa de prototipação deverá mostrar engajamento e disponibilidade para o cumprimento de prazos e atribuições de tarefas
Cronograma	A equipe envolvida na etapa de prototipação deverá mostrar engajamento e disponibilidade para o cumprimento de prazos e atribuições de tarefas

Todos os requisitos estabelecidos na Tabela 1, foram discutidos e estabelecidos em equipe. Para a instalação dos equipamentos para o monitoramento online da água na rede de distribuição, fez-se necessário contatar diversas empresas do ramo de equipamentos analíticos de processo para as análises físico-químicas e bacteriológica. Foram realizadas reuniões e apresentações (em formato de PITCH) para demonstrar a idealização do projeto e, então, fosse firmado um acordo para realizar o teste com os equipamentos.

Para a determinação do local optou-se pela realização no âmbito da área de atuação da Unidade de Negócio Leste – ML da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), a qual abrange a região metropolitana leste de São Paulo e os municípios de Arujá, Itaquaquecetuba, Salesópolis, Suzano, Poá, Ferraz de Vasconcelos, Mogi das Cruzes (4% do Município) e Biritiba Mirim. Hoje, há 26 reservatórios de água tratada que fazem parte da rede de distribuição atendida pela Divisão de Controle Sanitário Leste (MLEC), sendo o laboratório situado no bairro de São Miguel Paulista. Por conta da proximidade do laboratório MLEC para com o reservatório de água, a Divisão de Eletromecânica Leste (MLEL) responsabilizou-se por realizar uma inspeção no CRAT – Ermelino Matarazzo para avaliar as condições para a instalação dos equipamentos, além da possibilidade de estabelecer uma comunicação ativa entre a plataforma de comunicação da SABESP e da tecnologia que fosse instalada no local.

Decidiu-se por estabelecer uma comunicação discreta por meio de ligações 4 a 20 mA, sendo a transmissão proporcional a medição dos equipamentos, ilustrada na Gráfico 1.

Gráfico 1: Conversão de parâmetros da leitura para 4 a 20 mA



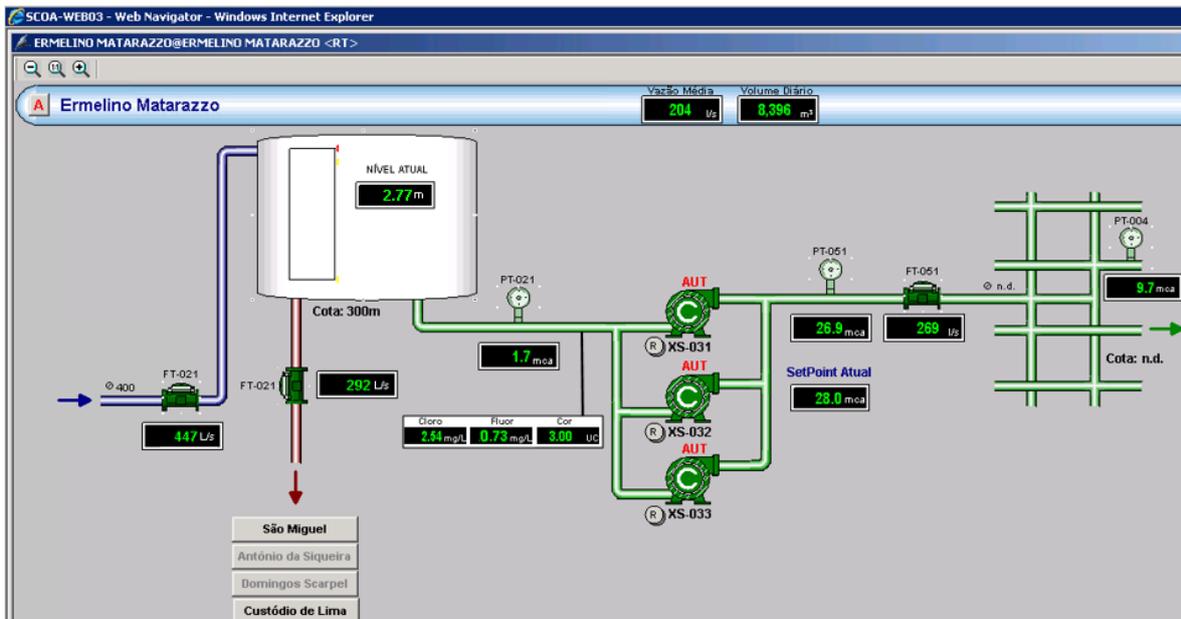
A transmissão de dados através do 4 a 20 mA para uma plataforma web (FielLogger, Novus) efetivou-se com a utilização de um relé programável (vide Figura 1) conectado ao painel de comunicações das instalações do CRAT – Ermelino.

Figura 1: Relé programável com função Logger



O sistema permite conexão com o principal sistema de supervisão da SABESP, o Sistema de Controle Operacional do Abastecimento (SCOA), através da comunicação *Modbus* em tempo real, conforme Figura 2.

Figura 2: Plataforma SCOA para o acompanhamento em tempo integral dos parâmetros de qualidade no local de instalação da tecnologia de monitoramento online



O desempenho dos equipamentos foi avaliado diariamente com a comparação dos resultados do monitoramento online e aqueles realizados com os equipamentos do laboratório e, também, através do acompanhamento dos dados de forma remota pela plataforma online. Foram elaborados indicadores para melhor visualizar o desempenho dos equipamentos, coerência dos resultados e a efetividade da comunicação dos dados.

Na elaboração dos requisitos no plano de prototipação, pontuou-se um possível problema referente a importação do equipamento de coliformes totais, visto que este possui alto custo e trata-se de uma importação oriunda do continente europeu que poderia levar meses para ser efetivada e possuía um custo elevado tanto para a SABESP como para o fornecedor. Diante deste fato, a ação para tratar desse problema, foi um acordo comum às partes (SABESP & Carvalhaes) para fornecer laudos, relatórios e documentos que comprovassem a eficiência e eficácia do equipamento perante ao monitoramento online de água tratada. O Colifast ALARM, da marca Colifast®, é um equipamento eletrônico capaz de detectar a presença de coliformes totais através da amostragem automática (em intervalos programados) da água tratada, onde há adição do substrato enzimático e a incubação da amostra. A tecnologia possui precisão de 1 UFC/100 mL do alvo bacteriano e o período para emitir os resultados pode levar de 6 a 15 horas, somente. Além disso, a tecnologia é verificada pela ETV (Verificação de Tecnologia Ambiental).⁽⁶⁾ Em contrapartida, a realização do ensaio de colimetria P/A em laboratório exige a amostragem in loco, temperaturas adequadas (transporte, armazenamento e incubação), área de manuseio estéril e um tempo mínimo para obtenção do resultado de 24 horas a partir da incubação da amostra.

O período de realização dos testes estendeu por 15 dias consecutivos para o levantamento e comparação dos resultados obtidos pela medição online e laboratorial. Para isso, foi necessário comparecer ao CRAT – Ermelino todos os dias, em diferentes horários, para a realização dos ensaios de cloro residual livre, cor aparente e pH no local, entretanto, o ensaio de turbidez foi realizado no laboratório MLEC cerca de 10 minutos após a amostragem, porque o equipamento existente não possibilita a realização de ensaios em campo.

RESULTADOS

A parceria para realizar a prototipação do projeto de monitoramento online da qualidade da água na rede de distribuição foi firmada com a empresa PoliControl – Instrumentos Analíticos para o fornecimento dos equipamentos de cloro residual livre, cor aparente, pH e turbidez. Na Tabela 2, observa-se a relação dos equipamentos utilizados no monitoramento online e no monitoramento tradicional (laboratorial) da qualidade da água:

Tabela 2: Lista de equipamentos e métodos relativos aos monitoramentos online e tradicional

Parâmetro		Online	Laboratorial
Cloro residual livre	<i>Equipamento</i>	Supratec s200	Pf-12 ^{plus} (Macherey-Nagel)
	<i>Método</i>	Amperométrico	Fotométrico (DPD)
Cor aparente	<i>Equipamento</i>	Cor 450	Aquacolor cor (PoliControl)
	<i>Método</i>	Tristimulus	Tristimulus
pH	<i>Equipamento</i>	Supratec s200	Seven2go s2 (Mettler Toledo)
	<i>Método</i>	Amperométrico	Potenciométrico
Turbidez	<i>Equipamento</i>	Turb track	Turbidimeter 2100 n (Hach)
	<i>Método</i>	Nefelométrico	Nefelométrico
Coliformes totais*	<i>Equipamento</i>	Colifast Alarm	Não há
	<i>Método</i>	Substrato enzimático	Substrato enzimático

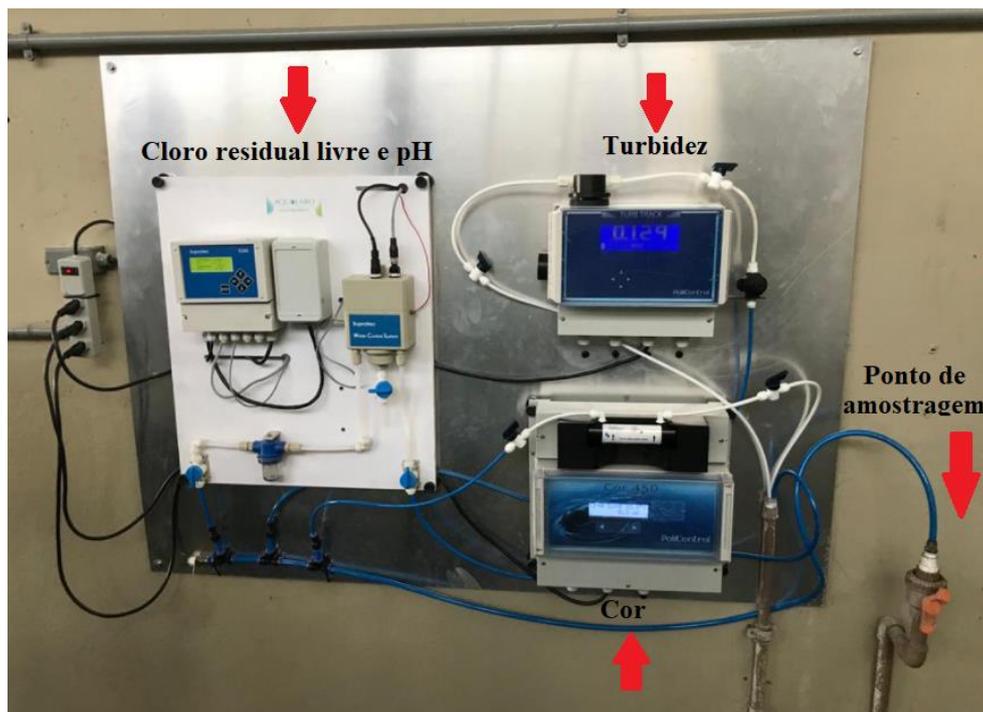
*: método não testado

Os equipamentos para os parâmetros físico químicos foram instalados dentro do CRAT – Ermelino, onde estão instaladas as bombas de recalque da zona alta (vide Figura 3). O ponto de amostragem de água tratada para possibilitar a medição dos parâmetros foi instalado com tubulações de PVC por meio de conexões de ¼ com engate rápido, considerando a saída do reservatório a interligação na sucção das bombas, com pressão em média de 2 mca, sendo a vazão do ponto de amostragem de 10 L/h para o analisador do tipo contínuo.

Figura 3: Casa de bombas do CRAT - Ermelino



Figura 4: Equipamentos para monitorar de forma contínua e online os parâmetros físico-químicos



Após a instalação da tecnologia, ilustrada na Figura 4, por um período de 15 dias consecutivos, os dados emitidos foram registrados em planilhas e armazenados na nuvem para a elaboração e avaliação dos indicadores.

1. Indicador: Desempenho do equipamento e comunicação de dados

O indicador relativo ao desempenho do equipamento avalia a capacidade do equipamento em realizar o ensaio e emitir os resultados dentro do tempo estabelecido. Outro aspecto a ser analisado, são as possíveis ocorrências que podem surgir durante a performance do projeto.

Os equipamentos dos ensaios de físico-química realizam medições instantâneas das amostras de água que passam pelo equipamento, nos 5 primeiros dias, programou-se o Controlador Lógico Programável (CLP) para emitir resultados a cada minuto e, a partir do 6º dia até o 10º dia, os resultados eram atualizados a cada 5 minutos, posteriormente, os dados passaram a ser transmitidos pela plataforma online a cada 15 minutos. Sendo assim, foi possível obter durante os 15 dias de teste, um total de 9.120 resultados dos parâmetros de cloro residual livre, cor aparente, pH e turbidez. Em contrapartida, para realizar este quantitativo no método tradicional de amostragem e execução de ensaios, precisaríamos de um alto investimento em recursos humanos e materiais, tecnicamente, inviável.

2. Indicador: Coerência de resultados

O indicador relativo a coerência dos resultados propõe evidenciar a coerência dos resultados comparando os métodos online x tradicional. Adotou-se um desvio percentual relativo de 20% de tolerância para adequar o resultado como coerente ou incoerente.

Vale ressaltar, os equipamentos laboratoriais utilizados para o comparativo dos resultados emitidos pelo método online, tiveram seus limites de quantificação (LQ) determinados experimentalmente, portanto, para os resultados cujo valores foram abaixo do LQ foram definidos como 'baixa concentração de analito', portanto, conforme à avaliação da DPR. Para os equipamentos da tecnologia online, não houve tempo hábil para avaliar o limite de quantificação prático, sendo assim, não foram considerados LQ. Na Tabela 3, observa-se os limites de quantificação para os parâmetros físico-químicos no método tradicional:

Tabela 3: Relação dos limites de quantificação (LQ) para o método tradicional

Parâmetro	Limite de quantificação (LQ)
Cloro residual livre	0,1 Miligrama por litro (mg/l)
Cor aparente	5 Unidade de Cor (uC)
Turbidez	0,5 Unidade nefelométrica de turbidez (NTU)

A faixa de pH é estabelecida entre 2 a 14 UpH.

Os dados relacionados no Quadro 1 para os ensaios de cloro, pH e cor foram obtidos no mesmo instante de tempo, diferente do ensaio de turbidez que possui um intervalo de aproximadamente 10 minutos entre a coleta dos dados, lembrando que a amostragem para o ensaio de turbidez tem um limite de 24 horas para que suas características sejam modificadas e o resultado da amostragem invalidado.

Quadro 1: Dados para o indicador de coerência dos resultados entre os métodos online e tradicional

PARÂMETROS											
CLORO TRADICIONAL	CLORO ONLINE	DPR	PH TRADICIONAL	PH ONLINE	DPR	COR TRADICIONAL	COR ONLINE	DPR	TURBIDEZ TRADICIONAL	TURBIDEZ ONLINE	DPR
1,52	1,45	4,7%	8,72	8,75	0,3%	8	8,2	2,5%	0,23	0,194	17,0%
2	1,94	3,0%	7,65	7,74	1,2%	10	9,9	1,0%	<-0,5	0,32	conforme
2,41	2,44	1,2%	8,71	8,74	0,3%	9,2	10	8,3%	<-0,5	0,254	conforme
2,16	2,14	0,9%	8,36	8,44	1,0%	10,8	10,4	3,8%	0,54	0,447	18,8%
1,67	1,65	1,2%	8,97	8,91	0,7%	9,2	10,8	16,0%	0,656	0,634	3,4%
1,53	1,49	2,6%	8,68	8,59	1,0%	10,1	10,9	7,6%	0,971	0,888	8,9%
2,02	2,1	3,9%	8,69	8,78	1,0%	12,8	12,2	4,8%	0,538	0,498	7,7%
1,71	1,74	1,7%	8,51	8,59	0,9%	10,9	13	17,6%	<-0,5	0,286	conforme
2,49	2,47	0,8%	9,07	9,04	0,3%	9,2	13,8	40,0%	0,58	0,569	1,9%
1,98	2,01	1,5%	7,98	8,1	1,5%	12,1	13,1	7,9%	<-0,5	0,354	conforme
2,26	2,3	1,8%	8,43	8,51	0,9%	7,3	7	4,2%	0,53	0,253	70,8%
2,09	1,98	5,4%	7,96	8	0,5%	7,9	7	12,1%	<-0,5	0,219	conforme
2,04	2,01	1,5%	8,53	8,6	0,8%	8	7,8	2,5%	2,45	2,345	4,4%
2,17	2	8,2%	8,41	8,59	2,1%	8,6	8,5	1,2%	0,947	1,04	9,4%
2,12	2,3	8,1%	9,01	9,02	0,1%	8	7,8	2,5%	0,579	0,397	37,3%

O desvio percentual relativo (DPR) trata-se de um aspecto estatístico que descreve a distribuição dos dados relacionados à média, sendo este calculado a cada par de resultados e expresso em porcentagem através da equação 1:

$$DPR\% = \frac{\text{Resultado tradicional} - \text{Resultado Online}}{\text{Média dos resultados tradicional e online}} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Observa-se que no Quadro 1 estão evidenciados as DPR em conformidade, ou seja, onde o cálculo não foi possível, pois o dado obtido encontrava-se abaixo do LQ do ensaio e, também, os valores acima do critério de aceitável de 20% da DPR, os quais foram desconsiderados no cálculo final do indicador.

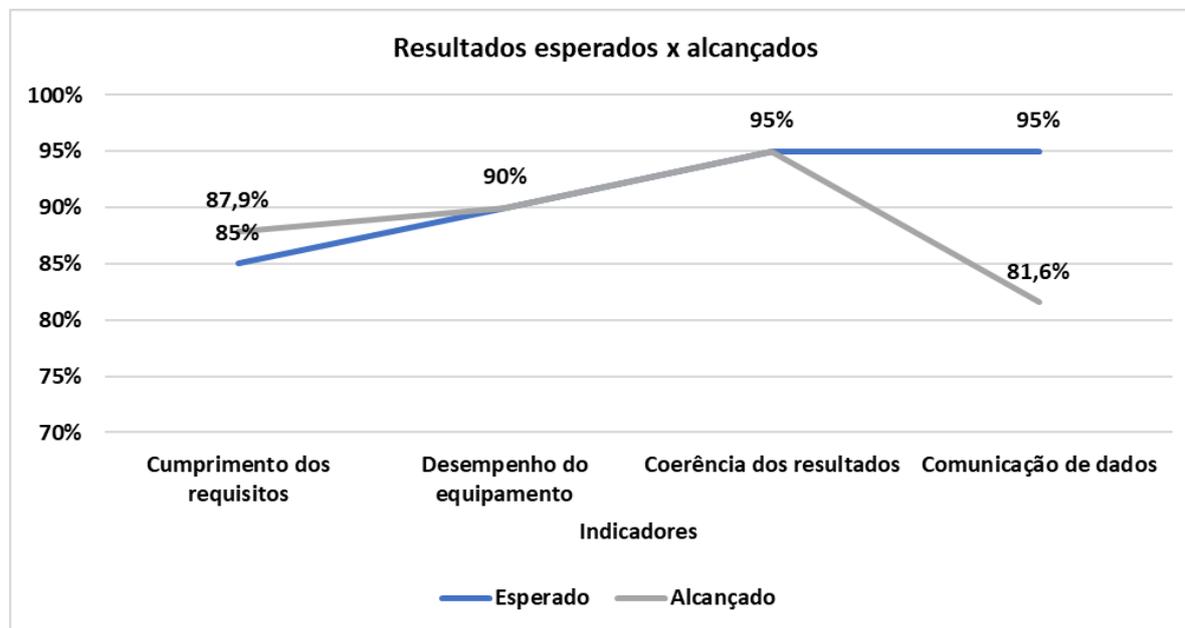
Outros aspectos e indicadores analisados para o sucesso do protótipo do monitoramento online da qualidade da água trata-se do cumprimento dos requisitos propostos na idealização do projeto e as tomadas de ações diante de problemas evidenciados na execução do projeto.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em vista dos objetivos e contextos elencados nos tópicos anteriores, o cumprimento do propósito de realizar o acompanhamento da qualidade da água através do monitoramento online em reservatórios de água tratada concretizou-se mediante a instalação de uma tecnologia que trouxe a confiabilidade e a efetividade dos resultados e da supervisão por meio da plataforma web. Os aspectos avaliados fazem jus ao plano de prototipação elaborado na idealização do projeto.

Os aspectos inseridos nos indicadores avaliados puderam evidenciar melhorias passíveis ao projeto quando este for implementado em larga escala. No Gráfico 2, observa-se os resultados esperados *x* alcançados de todos os aspectos que foram previamente discutidos na idealização do projeto, em conjunto com as definições das metas:

Gráfico 2: Resultados esperados *x* alcançados dos indicadores do protótipo



O indicador relativo ao cumprimento dos requisitos (Tabela 2) traz grande importância para a implantação da tecnologia, pois exige que a SABESP realize a averiguação do abrigo, estrutura física e elétrica dos centros de reservação de água e, se necessário, realize adequações para garantir a disponibilidade e compatibilidade do meio de comunicação, parametrizando-se aos cenários modernos de tecnologia que o mercado vem mostrando.

Tratando-se o desempenho do equipamento, evidencia-se as melhorias identificadas durante o projeto piloto e que são necessárias para a implementação em ampla escala como, por exemplo, a utilização de nobreaks acoplados ao CLP para que este não sofra com possíveis manutenções no quadro de comunicações e elétrico. Cabe ressaltar, o enfoque do presente estudo visa a contratação de dados por desempenho, orientada pelo protocolo MQQT (comunicação em nuvem), desse modo, a avaliação do desempenho do equipamento nos direcionou a aprimorar melhorias de funcionamento e segurança para a modalidade de contratação de compra de dados por desempenho, a qual vem exibindo resultados positivos na SABESP, pois é capaz de aumentar a eficiência na operação e o tratamento de dados.

A coerência de dados visa avaliar a reprodutibilidade dos resultados em comparações das metodologias online *x* tradicional. No Quadro 1, é possível observar e comparação a proximidade dos resultados emitidos pelas análises realizados por meio dos equipamentos de processos e de laboratório. Somente 3 dos 60 resultados obtidos de DPR (critério de tolerância entre os pares de resultados) foram desconsiderados para o cálculo final do indicador. Senão, o mais importante, este indicador demonstra a confiabilidade dos resultados de processo perante aos ensaios realizados sob condições controladas em laboratório, sendo este passíveis de acreditação na norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 que configura a mais qualificada garantia da validade dos resultados.

Cabe salientar, os indicadores acima avaliaram apenas os parâmetros físico-químicos, visto que não foi possível a importação do equipamento para a realização do ensaio de coliformes totais.

Através da etapa de prototipação e avaliação dos indicadores, observou-se, na questão ambiental, o diferencial dos equipamentos de medição online em relação a garantia do cumprimento das legislações e proteção ao meio ambiente, já que, todas as alíquotas amostradas retornam para a reservação de água tratada, visto que não foram utilizados nenhum tipo de reagente químicos ou manuseio humano que poderia submeter a água à uma possível contaminação. De fato, com a eliminação da amostragem tradicional, haveria diminuição do uso de plásticos descartáveis para transportar as amostras até o local de análises, haveria a eliminação dos resíduos analíticos (ensaio de cloro residual livre por DPD), a diminuição do descarte de água potável por conta do volume mínimo exigido para cada parâmetro e, ainda, estima-se a diminuição da emissão de gases poluentes dos carros utilizados pelos colaboradores da SABESP para realizam o serviço de amostragem, os quais não precisariam ser utilizados com a mesma frequência.

Na questão do sistema, é evidente a possível redução de custos e verticalmente o tempo entre a coleta da amostra e seus resultados, além do aumento da produtividade, eficiência e confiabilidade do processo. Dada a implantação de tecnologias, é possível eliminar a variável de interferência humana nos casos de alteração de parâmetros e focar na avaliação concreta do processo de maneira instantânea e sem subjeções. O monitoramento online prevê trazer informação instantânea e integridade dos resultados para poder antecipar a percepção dos clientes para com os possíveis resultados fora do limite de controle da SABESP.

No quesito recursos humanos, através do monitoramento online e remoto da qualidade da água, as equipes receptoras das informações geradas pelo sistema de automação seriam mais proativas e capazes de tomar ações de forma ágil no intuito de melhorar a percepção e satisfação dos clientes, portanto, melhorar a imagem da SABESP. As equipes envolvidas estariam submetidas a um aumento substancial do capital intelectual e seriam direcionadas a aprimorar seus conhecimentos em relação à transformação digital.

CONCLUSÃO

Os resultados expressos através dos indicadores foram considerados satisfatório ao objetivo e proposta apresentada. A metodologia de medições em tempo integral dos parâmetros de qualidade da água introduz o monitoramento à uma nova realidade de gestão de dados que permite otimizar todos os recursos aplicados a esse serviço e eleva significativamente a entrega de água com qualidade a sociedade. Portanto, os ganhos deste projeto refletem diretamente na imagem da SABESP em monitorar integralmente o que ela oferece e realmente distribui, assegurando a confiabilidade e credibilidade da marca no acompanhamento da qualidade da água. Além disso, no âmbito da capacidade analítica, a otimização desse processo poderá trazer desenvolvimento e melhorias aplicadas à qualidade na prestação dos serviços à população. O teste piloto permitiu demonstrar:

- Aumento significativo dos resultados referente a qualidade da água para a realização de uma análise histórica e evidenciar melhorias para a otimização no sistema de abastecimento em determinada região;
- Acompanhamento integral e simultâneo da qualidade da água que está sendo disponibilizada à população;
- Incorporar uma cultura preventiva e minimizar a cultura corretiva para eventuais ocorrências relacionadas a qualidade água;
- Diminuir ou, até mesmo, impedir o número de reclamações pelo cliente, pois haveria uma antecipação no monitoramento da água que deverá ser entregue ao cliente, sendo possível uma tomada de ação imediata e preventiva a fim de restabelecer os parâmetros adequados de qualidade.

A contratação de compra de dados por desempenho vem sendo amplamente aplicada na SABESP e mostrou-se positiva em diversos quesitos, sendo assim, neste projeto a remuneração da contratada estaria condicionada a disponibilidade plena do programa de processamento e análise de qualidade do instrumento, isto é, o sistema estaria submetido à avaliação diante de seu desempenho como em períodos de instabilidade, falha, análises errôneas, atrasos na manutenção, calibração, entre outros serviços contratados; tais períodos serão somados mensalmente e atribuídos às regras de remuneração por desempenho. Neste modelo de contratação, os custos de manutenção estão inclusos e não haveria aumento de ativos para a empresa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standards Methods for the Examination of Water & Wastewater**, 23rd ed. Washington, 2017. Métodos: 1060, 2120 E, 2130, 9060 & 9223 B.
2. BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidas** / Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; Organizadores: Carlos Jesus Brandão ... [et al.]. -- São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011. Disponível em: <<https://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2012/GuiaNacionalDeColeta.pdf>> Acesso em: 22 jun. 2021
3. BRASIL. **Manual prático de análise de água**. Fundação Nacional de Saúde. Brasília: 2006, 2 ed.
4. BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS**/ Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – Brasília: Funasa, 2014. Disponível em: <<http://www.funasa.gov.br/documents/20182/38937/Manual+de+controle+da+qualidade+da+%C3%A1gua+para+t%C3%A9cnicos+que+trabalham+em+ETAS+2014.pdf/85bbdcbc-8cd2-4157-940b-90b5c5bcfc87>> Acesso: 23 jun. 2021
5. FERNANDES, NEITON SANTOS. **Aplicação de conceitos da “Indústria 4.0”, ‘Internet of Things’ (IoT) e telemedicação multimodal na gestão de redes de distribuição de água no sistema público de saneamento básico do município de Morungaba – SP**. Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo (MBA em Saneamento Ambiental) – São Paulo, 2020.
6. **Users Manual**. Colifast® Alarm™: At-Line Automated Remote Monitor. 2006.