

APLICAÇÃO DE TECNOLOGIA INOVADORA DE INJEÇÃO DE SOLUÇÃO SUPERSATURADA DE OXIGÊNIO NO RIO PINHEIROS

Bruno Sidnei da Silva⁽¹⁾

Gerente do Departamento de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico. Engenheiro Sanitarista e Ambiental formado pela Universidade Federal de Santa Catarina e com Mestrado em Ciências com ênfase em Hidráulica e Saneamento pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Ana Lúcia Silva

Engenheira no Departamento de Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico. Engenheira Química pela Faculdade Osvaldo Cruz, Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Doutora em Saúde Pública pela Universidade de São Paulo.

Endereço ⁽¹⁾: Rua Nicolau Gagliardi, 313, Pinheiros, São Paulo – SP. CEP: 05429-010. Brasil. Tel: +55 (11) 3388-9751 – e-mail: bsidnei@sabesp.com.br

PALAVRAS-CHAVE: oxigênio dissolvido, autodepuração, Rio Pinheiros.

RESUMO

O Rio Pinheiros, localizado na Capital do Estado de São Paulo, é um rio urbano que passou por uma série de interferências antropogênicas, sendo atualmente um canal retificado e operado, ou seja, apresenta uma hidrodinâmica própria, com suas águas correndo no sentido natural (do reservatório da Billings para o Rio Tietê), no sentido inverso (para controle de cheias, a partir da operação de estações elevatórias da EMAE – Empresa Metropolitana de Águas e Energia), e por vezes, se comportando como um lago artificial, especialmente no canal superior do rio, devido ao fechamento das comportas localizadas na atual Usina São Paulo (antiga Usina Traição). A retificação do canal natural do Rio Pinheiros reduziu sua capacidade de reaeração natural, resultando em um corpo hídrico extremamente sensível e sujeito à impactos ambientais, especialmente na redução da qualidade da sua água, geração de maus odores e perda de atratividade paisagística. A SABESP, como ator relevante das ações de despoluição da bacia do Rio Pinheiros, intensificada nos últimos quatro anos como amplamente noticiado pela mídia, implementou uma tecnologia inédita no Brasil para acelerar o processo natural autodepuração do rio, em um trecho específico do rio, para fins de estudo e avaliação do potencial dessa prática como complemento às ações estruturantes de despoluição da bacia. O sistema foi contratado através de licitação pública no início de 2021. O objetivo principal do projeto é a manutenção do oxigênio dissolvido em 2,0 mg/L no trecho em estudo. A planta de oxigenação passou a operar de forma contínua em maio de 2022. Diferente dos métodos convencionais de aeração e/ou oxigenação, que de modo geral transferem o oxigênio para a água por meio de bolhas, a tecnologia adotada nesse estudo injeta uma solução supersaturada de oxigênio. A SABESP vem a público apresentar de forma inédita a tecnologia e os principais resultados obtidos até a presente data.

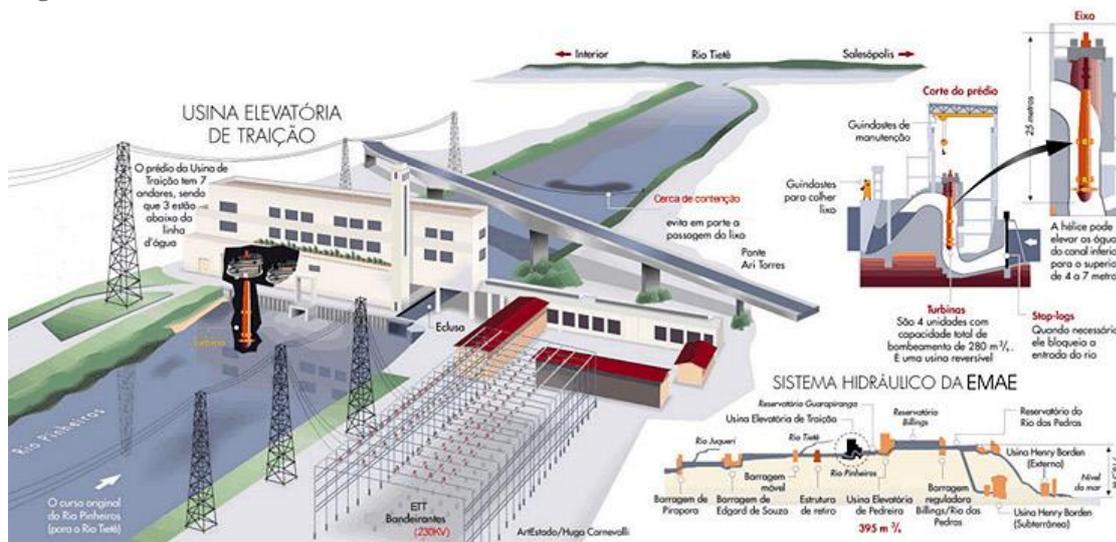
INTRODUÇÃO

O Rio Pinheiros encontra-se dentro da 4ª cidade mais populosa do mundo. Ao longo de sua história passou por inúmeras alterações, desde a sua margem até o leito, evoluindo inclusive para o sentido natural de desemboque de suas águas, o que o tornou um corpo hídrico extremamente peculiar. Após obras de retificação do seu leito, que se estenderam de 1928 até a década de 50, passou a ser chamado também como Canal do Rio Pinheiros. O Rio Pinheiros nasce do encontro do Rio Guarapiranga com o Rio Grande, atravessa parte da cidade de São Paulo e desagua no Rio Tietê. No passado, os rios Grande, Jurubatuba e Pinheiros formavam um único rio, com nascentes diversas alimentando e renovando a qualidade das suas águas. Entretanto, na década de 20, a construção do barramento que originou a Represa Billings criou uma ruptura em seu curso natural, descaracterizando-o completamente. Ocorreram as remoções de várzeas para a implantação em que hoje se situam bairros altamente adensados. As obras de retificação desse rio tiveram por objetivo acabar com as inundações que ocorriam de forma cada vez mais intensa na cidade. As águas altamente poluídas após essas

chuvas intensas, assim como os esgotos não coletados, eram lançadas no canal do Rio Pinheiros. Outra intervenção foi a inversão do sentido desse canal, com o direcionamento das suas águas, quando na ocorrência de enchentes, para a Represa Billings. Desde a década de 70, ao longo de suas margens passa um dos principais eixos viários da cidade, o que submete esse rio a maciças cargas de poluição atmosférica oriundas dos escapamentos e movimentações de veículos de pequeno e grande porte. As margens desse rio estão quase que absolutamente desprovidas de mata ciliar. Nas pequenas faixas de terra restantes encontram-se implantadas linhas de transmissão de energia, interceptores e emissários de esgotos, oleodutos, cabos de telecomunicações, galerias de águas pluviais, sistemas de coleta e afastamento de esgotos, drenos, ciclovias, além de resíduos das operações de desassoreamento e pontos para atracar embarcações utilizadas para dragagem e limpeza superficial das suas águas.

O Rio Pinheiros possui 25 km de extensão, e atualmente é dividido em 2 trechos – Canal Pinheiros Inferior (CPI) e Canal Pinheiros Superior (CPS) – divididos pela estrutura da Usina São Paulo – vide Figura 1.

Figura 1 - Usina São Paulo. Fonte: EMAE (2023).



A Usina São Paulo (antigamente chamada de Usina Elevatória de Traição) permite a alteração do curso original do Rio Pinheiros. A capacidade total de bombeamento é de 280 m³/s.

A largura média do Rio Pinheiros varia entre 80m e 90m e sua profundidade é variável ao longo do canal, devido a ocorrência de assoreamento. O rio é considerado como Classe 4, porém não atendia a condição de classe 4 conforme preconizado no Resolução CONAMA 357/05 (BRASIL, 2005), já que suas águas apresentavam concentração de oxigênio dissolvido menor que 2 mg/L, conforme dados apresentados a seguir.

Na figura a seguir o ponto PINH04500 – ponto próximo ao local onde a SABESP vem realizando os testes de oxigenação – o histórico de dados da CETESB entre os anos de 2015 a 2019 indicam que em 36% do tempo o oxigênio dissolvido nesse ponto esteve abaixo de 0,5 mg/L.

Dados dos últimos 5 anos indicam que em 90% do tempo o Rio Pinheiros apresentou concentração de OD menor do que 2 mg/L. Já o ponto PINH04250, no mesmo período, embora apresente concentrações abaixo de 2 mg/L de oxigênio dissolvido em 69% (aparentemente numa condição não tão ruim quanto o ponto anterior), os resultados abaixo de 0,5 mg/L ocorreram com maior frequência – em 43% do tempo, conforme indica a figura 3 a seguir.

Os picos com residuais de oxigênio dissolvido acima da concentração de saturação indicavam a provável presença de algas em alguns períodos do ano, em concentrações altas o suficiente para supersaturar o rio com oxigênio dissolvido em determinados horários de maior insolação - o que na verdade acaba sendo um indicador da condição deteriorada desse corpo hídrico.

Gráfico 1 – Dados de oxigênio dissolvido para o ponto PINH04500. Fonte: INFOAGUAS, CETESB (SÃO PAULO, 2000).

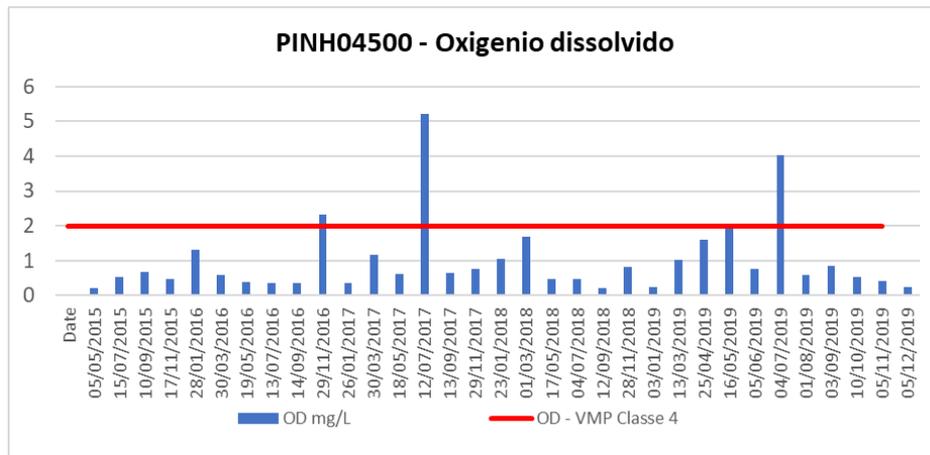
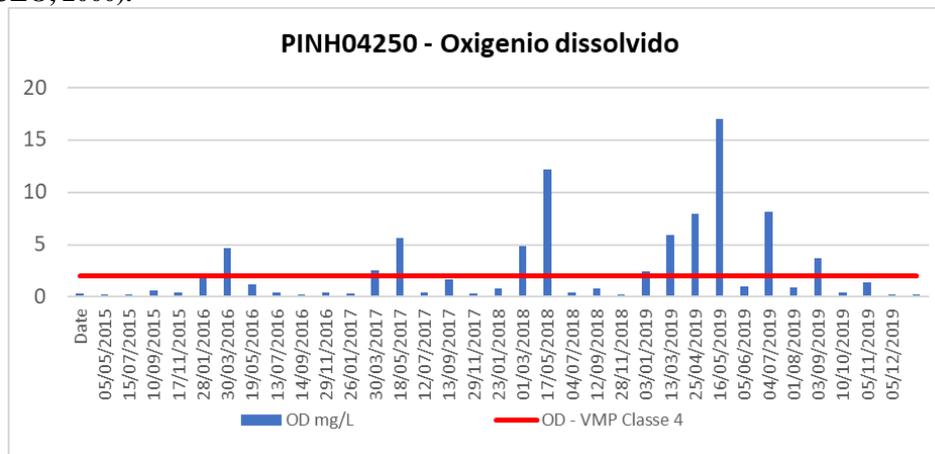


Gráfico 2 - Dados de oxigênio dissolvido para o ponto PINH04250. Fonte: INFOAGUAS, CETESB (SÃO PAULO, 2000).



Importante ressaltar que a poluição que adentra o Rio Pinheiros não foi o principal fator responsável pelas condições de baixo OD. A retificação desse canal retirou uma de suas principais formas de reoxigenação dentro do conhecido processo de autodepuração. Apesar dos outros fenômenos físicos que também estão associados a autodepuração (tais como a sedimentação), a reaeração pode ser considerada o fenômeno mais importante e essencial em um corpo d'água por proporcionar as condições mínimas para que microrganismos aeróbios interfiram e transformem a matéria orgânica poluente em elementos não nocivos para o meio ambiente. Além de, em concentrações suficientes, o oxigênio dissolvido propiciará a ocorrência de formas de vida mais complexas no corpo d'água, tais como peixes. A reaeração se dá por meio da troca de gases na interface do meio físico e líquido, de forma a resultar em um incremento da concentração do oxigênio até o limite de saturação. Conforme SPERLING (1996) essa transferência do meio gasoso para o líquido se dá principalmente através de dois mecanismos: a difusão molecular e a difusão turbulenta. Em rios não retificados ou em corpos d'água naturais, e especialmente aqueles que não se encontram sob pressão oriundas de certos tipos de ocupação e uso do solo, o fenômeno de reoxigenação através da reaeração natural é, em geral, suficiente para a manutenção dos níveis necessários de oxigênio dissolvido, de forma que a autodepuração ocorra e alcance resultados satisfatórios. Entretanto, em rios urbanos, e mesmo com boa capacidade de autodepuração, a ausência de várzeas e mata ciliar, o excesso de poluição antrópica pode gerar condições em que seja necessária a introdução de meios artificiais de “reforço” para introdução de oxigênio em suas águas.

Inicialmente, quando da busca por soluções para as condições de alta deterioração que esses corpos hídricos apresentavam há algumas décadas, uma entre as alternativas adotadas sempre é a implantação de sistemas de

tratamento de esgoto, inclusive do tipo avançado, cujo objetivo era o de remover a matéria poluidora e evitar a redução dos níveis de oxigênio dissolvido. Segundo os registros bibliográficos, os resultados não foram nada animadores, uma vez que a condição de baixa oxigenação se dá por fatores inclusive físicos. Afinal, esses rios, antes naturais, transformaram-se em obras de engenharia. Antes contavam com várzeas que faziam parte do sistema natural de retenção de poluição natural e também autodepuração. Essas massas d'água passaram a transitar sem que as condições naturais de reoxigenação pudessem ser realizadas como antes – não que o processo natural, caso ainda existisse, pudesse também fazer frente a toda a carga de poluição gerada em grandes centros urbanos. Além das cargas pontuais de poluição que podem até certo ponto ser removidas em estações de tratamento de esgoto na capacidade máxima que a engenharia dispõe hoje de tratamento, há que se considerar a entrada de cargas difusas de poluição, extremamente complexas de se controlar. A reoxigenação natural, que é uma das principais funcionalidades dos rios para assegurar a qualidade da água e toda a vida aquática que torna um rio vivo foi, portanto, anulada - ou tornou-se insuficiente frente ao grau de poluição residual.

A exemplo do que se observa no Rio Pinheiros, canais e rios retificados ou que sofrem com poluição antrópica – pontual, difusa, e até mesmo esgotos já tratados e com qualidade de tratamento adequada conforme as leis locais, não apresentam em toda a sua extensão ou em boa parte dela uma qualidade de água desejável, e em geral encontram-se degradados. Como exemplo, citamos o Rio Tâmisa, no Reino Unido, ou o Canal de Chicago, EUA (SHEEHAN et al, 1984), onde a entrada de cargas de poluição antrópica (principalmente as cargas difusas) e as baixas velocidades apresentadas na configuração desses corpos hídricos propicia condições para que os níveis de oxigênio dissolvido mantenham-se abaixo do necessário para assegurar a autodepuração e a vida aquática. A primeira introdução de oxigênio de forma artificial, no mundo, teria sido em meados de 1940, no Lago Bret, Suíça (WILSON & BEUTEL, 2005). No Rio Tâmisa, como as ações de saneamento realizadas haviam sido insuficientes para revitalizar o rio, optou-se pela aeração em pontos com depleção de OD através de barcas. Algum tempo após o início dessa operação voltou-se a observar o salmão, um peixe extremamente sensível até mesmo em condições de oxigênio dissolvido relativamente altas (HORNE & GOLDMAN, 1982). Nos corpos d'água onde essa técnica vem sendo aplicada constata-se:

- Aumento da biodiversidade aquática;
- Na Represa Douglas, EUA, o gás sulfídrico não foi mais observado;
- Diminuição dos teores de manganês, ferro, amônia, fósforo e sulfetos (40–80%) com melhorias visíveis na qualidade das águas.

A introdução do oxigênio dissolvido na água, de forma não natural, forçada, pode se dar por diversas maneiras, sendo as mais comuns a **reaeração** (introdução de ar atmosférico, onde temos 21% de oxigênio) utilizada em sistemas de tratamento de esgotos ou para correção das qualidades de uma água que apresente características indesejáveis, tais como presença de cor devido a excesso de ferro ou manganês.

Tecnologias desenvolvidas mais recentemente permitem a **reoxigenação** (introdução de oxigênio puro) de massas d'água através da injeção de solução supersaturada de oxigênio dissolvido. Nesse tipo de processo, a eficiência está diretamente relacionada com a capacidade de transferência do oxigênio na forma pura e dissolvida para a massa líquida.

Entretanto, a oxigenação artificial não pode ser considerada um processo de tratamento, uma vez que ela prevê atribuir novamente aos rios, canais e lagos uma funcionalidade que lhe foi retirada pela ação humana, e que é encontrada na natureza em rios não alterados pelo homem. Nesses, a aeração se dá pelo contorno natural, quedas d'água, desníveis, entre outros fatores físicos que permitem gradientes de velocidade, misturas e consequentemente a oxigenação necessária para que na interação com o meio ambiente as concentrações mínimas de oxigênio dissolvido se mantenham na massa líquida.

OBJETIVOS

O objetivo da SABESP foi o de avaliar em escala real a variação da qualidade da água após a introdução de tecnologia de injeção de solução supersaturada em trecho específico do Rio Pinheiros, conforme o que segue:

- A interação da solução tecnológica em relação aos aspectos físicos, de introdução da solução supersaturada;
- As interações das diversas variáveis ao longo do canal, em relação ao tempo e espaço, com a solução supersaturada, considerando aí as variações climáticas e alterações associadas as características desse corpo hídrico, devidamente conhecidas e bem controladas;
- Estudar a possibilidade de replicar a tecnologia em outros corpos hídricos de interesse da SABESP, que apresentem portes, tipos e condições de degradação diversos.
- A capacidade de atingimento da concentração meta de OD ≥ 2 mg/L.

A escolha pela viabilidade de implantação de um sistema de oxigenação, para testes, no Rio Pinheiros, decorreu especialmente pelo fato de que esses testes não iriam interferir nos usos desse manancial, tais como as atividades de navegação para serviços de dragagem e limpeza superficial, nem tampouco prejudicasse os usuários da ciclovia e do Parque Linear Bruno Covas, na época ainda em construção ao longo da margem esquerda do Rio Pinheiros.

METODOLOGIA – PROSPECÇÃO DE TECNOLOGIAS

O mercado oferece diferentes tecnologias para transferência de oxigênio para o meio aquoso, as quais podem ser divididas em 2 grupos principais: um grupo que realiza a transferência do oxigênio do ar (aeração) e outro grupo que utiliza o oxigênio puro (oxigenação). As tecnologias de aeração têm a vantagem de a fonte de oxigênio estar disponível em abundância e sem custo. Já nas tecnologias de oxigenação, o oxigênio puro precisa ser adquirido no mercado e/ou produzido. O que diferencia esses dois grupos é a taxa de transferência, ou seja, o rendimento de cada tecnologia em resultados de oxigênio dissolvido. Essa comparação é possível de ser feita através da seguinte relação:

- De acordo com a **Lei de Henry**, a concentração de saturação de um gás no líquido é diretamente proporcional a pressão parcial desse gás.
- Já segundo a **Lei de Dalton**, a pressão total de uma mistura de gases é igual a soma das pressões parciais dos gases que compõe a mistura. Assim, para uma temperatura de 25°C e no nível do mar, a concentração de saturação do oxigênio na água será de 8,7 mg/L (21% de oxigênio no ar em volume). Para as mesmas condições a concentração de saturação do oxigênio será da ordem de 42 mg/L se utilizarmos o oxigênio puro.

Para aeração de corpos hídricos degradados, quanto mais elevada a taxa de transferência de OD menor será o número de unidades necessárias. Em contrapartida, a potência necessária será maior. A tecnologia deverá ser selecionada de acordo com o objetivo e características do corpo hídrico. Obviamente, em grandes volumes de água degradados, maior a necessidade de tecnologias com maior capacidade de transferência.

TECNOLOGIA ESCOLHIDA

A tecnologia escolhida pelo consórcio vencedor da licitação pública foi a tecnologia denominada como SDOX[®], da empresa norte americana BlueInGreen. Essa tecnologia foi resultado de uma pesquisa aplicada realizada na Universidade do Texas e incubada posteriormente na incubadora de tecnologia Genesis da Universidade do Arkansas. Os direitos de comercialização são de exclusividade da empresa BlueInGreen. A injeção de oxigênio dissolvido supersaturado é um novo método para adicionar OD na água. A tecnologia SDOX[®] utiliza um processo pressurizado para dissolver rápida e eficientemente o oxigênio na água. A Figura 2 ilustra o fluxograma de processo do sistema, que em linhas gerais, funciona da seguinte forma:

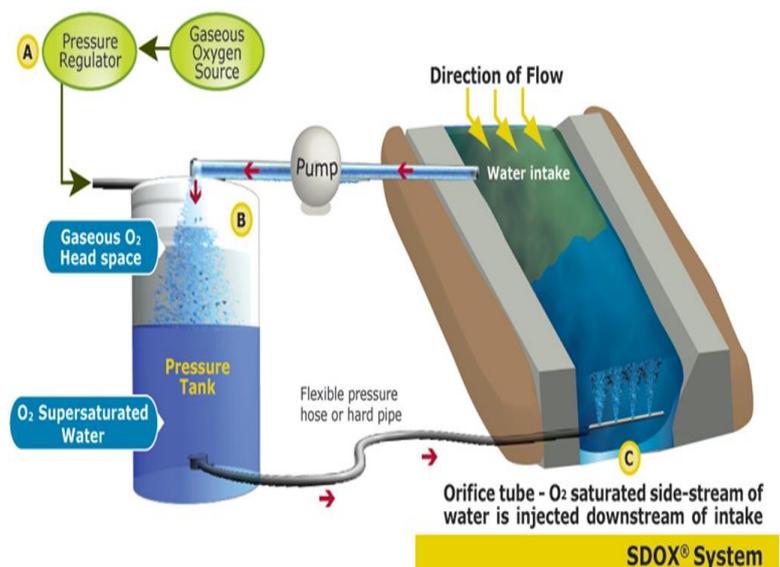
- Uma fração da água do rio, a montante da unidade de oxigenação, é bombeada para uma câmara pressurizada (até 120 psi). A água é introduzida na parte superior da câmara de forma pulverizada para aumentar a superfície de contato gás/líquido e, por consequência, a velocidade de transferência de oxigênio no líquido;

- O oxigênio puro é injetado na parte superior da câmara onde o mesmo entra em contato com o líquido pulverizado. Nesse contato o oxigênio é dissolvido no líquido;
- O líquido supersaturado é então retornado para o rio a jusante do ponto de captação.
- Para evitar que ocorra efervescência do oxigênio dissolvido, na saída do líquido supersaturado há um dispositivo de mistura especial.

A BlueInGreen possui diferentes modelos de supersaturação de oxigênio. O equipamento em teste no Canal do Rio Pinheiros é o Dual SDOX 600, que apresenta as seguintes características:

- Capacidade de transferência de oxigênio: 10.000 lbs/dia (4.536 kg/dia);
- Potência instalada: 149 kW;

Figura 2 - Sistema SDOX®



A planta de oxigenação do Rio Pinheiros apresenta as seguintes características:

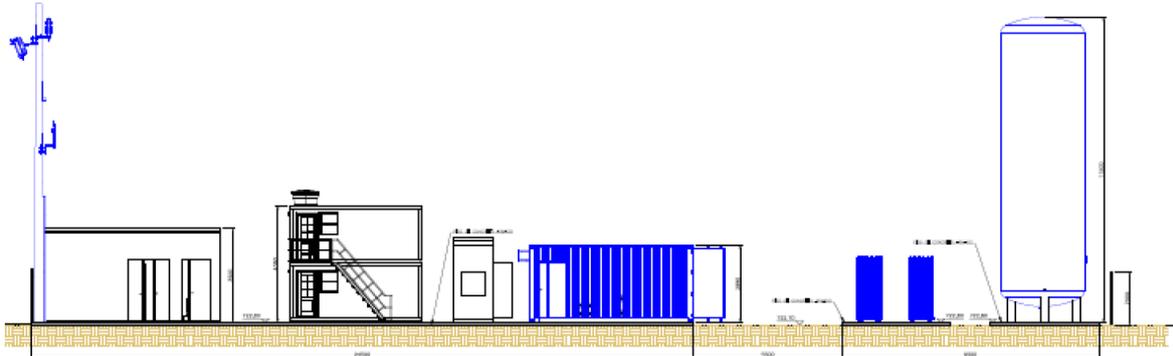
- Equipamentos e edificações em área de 200m²;
- SIO - Container as dimensões 6,1m x 2,44m x 2,9m (C x L x A);
- 2 Linhas de Sucção de água do rio e 2 linhas de injeção de Oxigênio;
- Edificação com 30m² destinada a escritório, sala de controle e almoxarifado;
- Tanque de oxigênio líquido puro com capacidade de 50.000 kg e evaporador (fornecimento Sabesp) com 30m²;
- Guarita com 1,0m²;
- Reservatório de água potável;

O sistema de oxigenação do Rio Pinheiros conta também como uma rede de monitoramento da qualidade da água, sendo quatro estações fixas localizadas no canal superior do Rio Pinheiros, conforme descrito a seguir:

- UMR 1 – Monitoramento de Vazão, localizado próximo à Ponte Velha do Morumbi;
- UMR 2 – Monitoramento de Qualidade, localizado imediatamente à montante e próximo da Planta do Sistema de Oxigenação;
- UMR 3 – Monitoramento de Qualidade, localizado no ponto intermediário entre o ponto de injeção de solução supersaturada de oxigênio e o ponto de controle (localizado na comporta sangradouro da Usina São Paulo);

- UMR 4 – Monitoramento de Qualidade e de nível, localizado na comporta do sangradouro da Usina São Paulo.

Figura 3 - Sistema SDOX® - elevação frontal



A planta opera 7 dias por semana, 24 horas por dia. A figura a seguir apresenta uma imagem do sistema supervisório contendo a rede de monitoramento fixa.

Figura 4 - Unidades de Monitoramento Fixas - UMR's

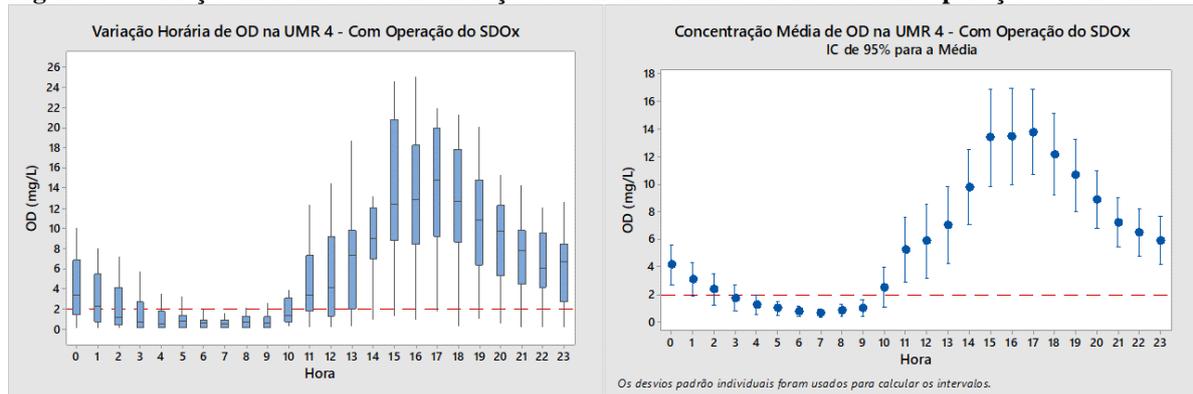


RESULTADOS PRELIMINARES

Os resultados preliminares aqui apresentados são referentes a um mês de operação, onde a planta operou em diferentes condições devido a questões operacionais, permitindo que se pudesse comparar períodos com operação do equipamento SDOX® e períodos sem operação. A discussão apresentada a seguir se restringirá ao parâmetro oxigênio dissolvido, que retrata o principal objetivo desse projeto, ou seja, manter as águas do rio Pinheiros no trecho em estudo com concentração de oxigênio dissolvido acima de 2 mg/L.

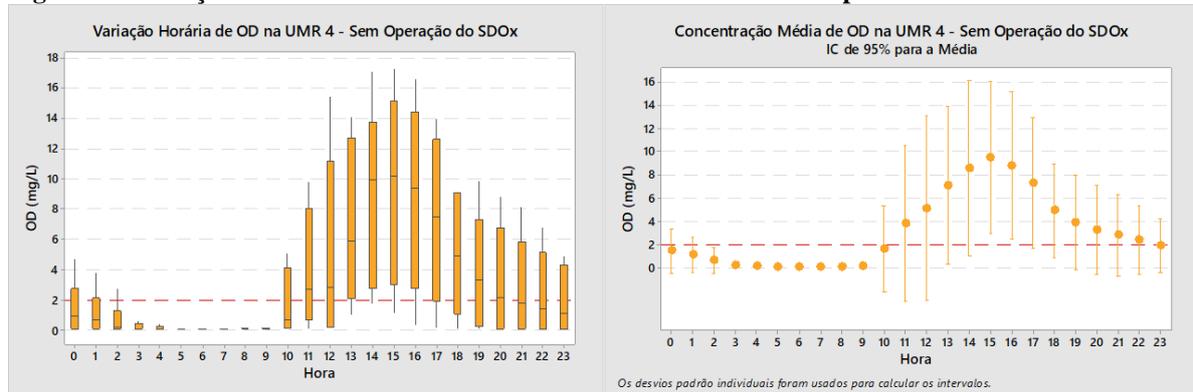
A figura 7 apresentada demonstra uma variação significativa na concentração de oxigênio durante ao longo das 24 horas do dia, atingindo picos acima de 24 mg/L, e à noite, com mínimos próximas a 0 mg/L. Vale ressaltar que durante o dia, as ocorrências de picos de OD devem estar associadas à floração algal no canal pinheiros superior, situação essa que vem se mostrando frequente conforme se vai avançando na melhoria da qualidade da água do rio pinheiros em termos de matéria orgânica e turbidez.

Figura 5 - Variação Horária da Concentração de OD na UMR 4 - Período Com Operação do SDOX®



Com a redução da turbidez da água, a luz solar consegue penetrar toda a coluna de água do Rio Pinheiros, propiciando eventos de floração algal, já que ainda há aporte de nutrientes para o meio líquido, possivelmente a partir do próprio sedimento de fundo.

Figura 6 - Variação Horária de OD na UMR 4 - Período com SDOX® inoperante.



A figura 8 apresenta o mesmo comportamento da figura 7, com menores picos de OD (~17 mg/L) em relação ao período com o sistema de oxigenação operante, porém, ainda bastante superiores às concentrações de saturação de oxigênio no meio líquidos nas condições normais de temperatura e pressão, corroborando a hipótese de produção primária de oxigênio devido a eventos de floração algal.

De modo a comparar as concentrações médias de oxigênio no ponto de controle nos períodos com operação do sistema de oxigenação com períodos em que o sistema se encontrava inoperante devido a questões de manutenção, foram plotados gráficos de box-plot e de variação da concentração média de OD. Para minimizar a influência da produção de oxigênio pelas algas, foram selecionados períodos noturnos, entre às 18h00 e 05h59.

Observa-se da figura 9 que a concentração média de OD nas estações de monitoramento fixo após o ponto de injeção de oxigênio apresentaram concentrações de OD acima de 2 mg/L, com médias em torno de 3,9 mg/L na UMR 3 e 5,4 mg/L na UMR 4 (ponto de controle, localizado na Usina São Paulo).

A figura 10 apresenta a concentração média de OD nas estações de monitoramento fixo durante o período analisado em que o sistema de oxigenação se encontrava fora de operação. Observa-se que as medianas das concentrações de OD se apresentaram abaixo de 0,6 mg/L em todas as estações de monitoramento. A concentração média de OD se apresentou abaixo de 2 mg/L em todos os pontos. Comparativamente ao período com operação do SDOx, a concentração média no ponto de controle (UMR 4) se apresentou 1/3 da concentração média de OD quando o sistema se apresentava em plena operação.

Figura 7 - Box-plot para OD e concentração média de OD nas UMR's - Período com SDOX® operante.

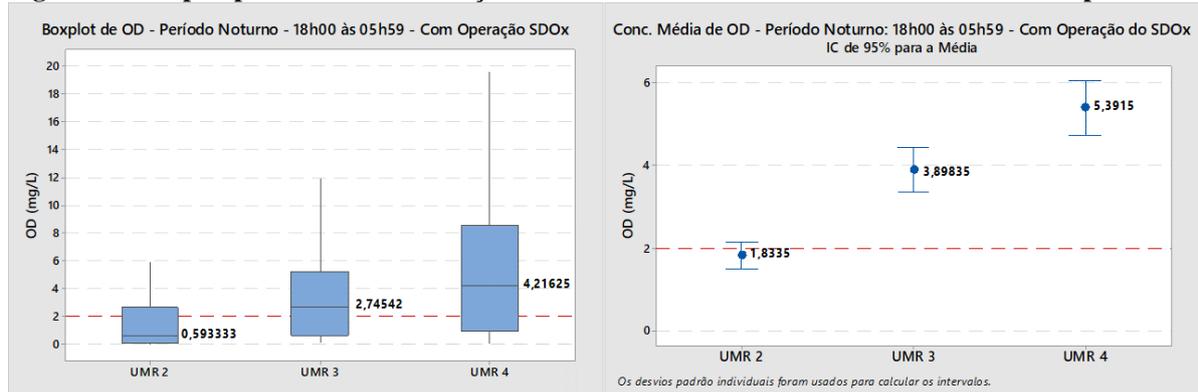
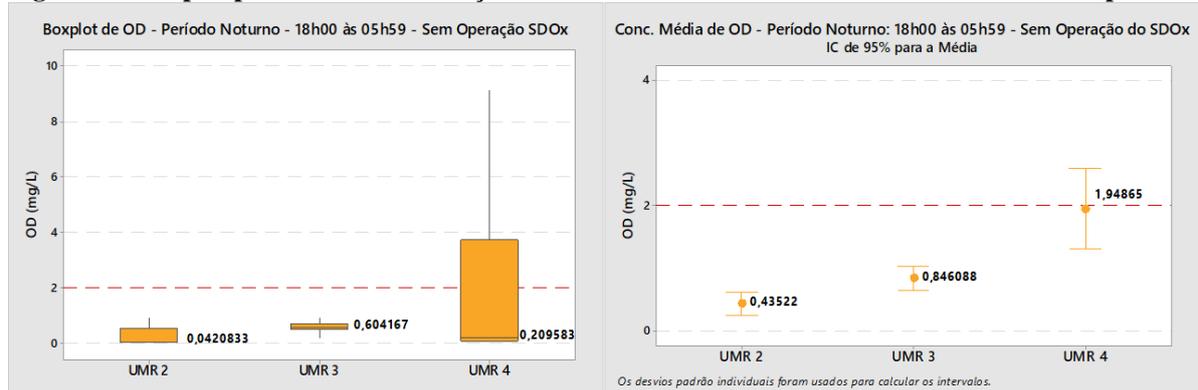


Figura 8 - Box-plot para OD e concentração média de OD nas UMR's - Período com SDOX® inoperante.



RESULTADOS DE MONITORAMENTO NO CANAL DO RIO PINHEIROS

Para subsidiar a avaliação da efetiva interferência do sistema de injeção de solução supersaturada de oxigênio dissolvido no Rio Pinheiros, fez-se necessário estabelecer um sistema de monitoramento que fornecesse informações confiáveis, em quantidade e na qualidade mínima necessária para interpretações matemáticas e estatísticas aplicáveis, para parâmetros pré-definidos de qualidade da água, assim como de vazão. A definição desses parâmetros passou, em primeiro lugar, pela análise de especialistas em qualidade da água quanto aos tipos de interações e respostas que se desejava obter. Em seguida, foi definida a frequência e o período mínimo de realização desse monitoramento, que fosse suficientemente representativo de todas as variações externas e alterações internas (na massa líquida) que poderiam influenciar o corpo d'água e tivessem alguma correlação com o oxigênio dissolvido.

O sistema de monitoramento está associado a supervisório de operação e automação do sistema de oxigenação (figura 6), compostos por:

- 4 Unidades de Monitoramento Remoto (UMR) que são sondas multiparâmetros em instalações afixadas em pontos estratégicos, com medição online da qualidade da água e vazão a cada 5 minutos;
- Monitoramento dinâmico da formação das plumas de oxigênio dissolvido e envio dos dados e mapas gerados em campo em tempo real, por meio de uma embarcação autônoma não tripulada – *Unmanned Surface Vehicle (USV)*, que contará com uma sonda multiparâmetros. A USV também possui capacidade para a coleta de amostras de água para posterior realização de ensaios em bancada, cuja funcionalidade permitirá que sejam levantados dados que não poderão ser obtidos através de monitoramento online. A USV realiza também em tempo real medição de OD, turbidez, pH, temperatura, POR e condutividade.

- Coleta de amostras para ensaio em laboratório, realizadas em 8 (oito) seções dentro de um trecho do Rio Pinheiros (Figura 3).

Outra função do sistema de monitoramento integrado (sistema fixo e móvel e de laboratório), além de avaliar as interações do corpo d'água com e sem a introdução do oxigênio dissolvido, é fornecer *feedback* para a planta operacional. Como a planta de oxigenação deverá atender as metas de concentração de 2 mg/L durante 24 h por dia e 7 dias por semana, o sistema prevê um sistema de monitoramento contínuo e *online* com envio de dados para que a planta de operação realize ajustes e garanta a manutenção das condições desejáveis.

Figura 11 – Topologia final do sistema de automação e CFTV – Contrato SABESP 3.363/20

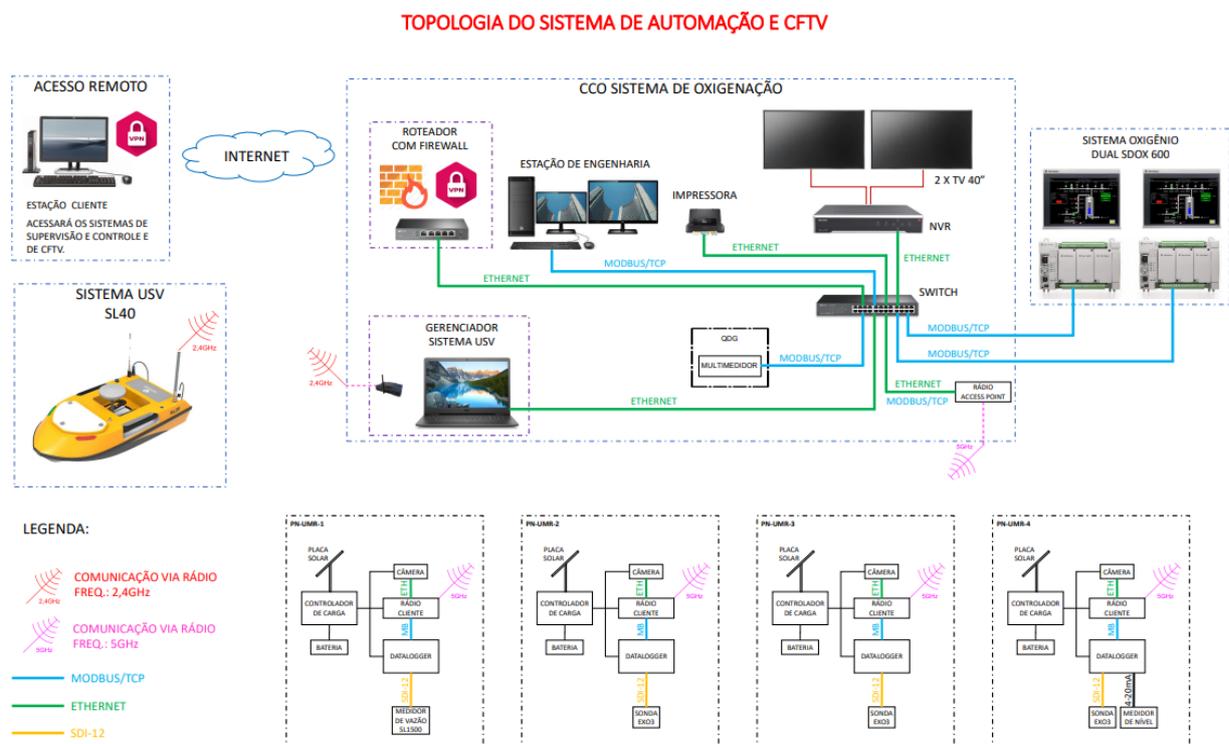


Figura 12 - Seções ao longo do trecho do Rio Pinheiros. No destaque, o ponto de montante PPS1 e o ponto PPS4 que são, respectivamente, o ponto a montante da dosagem do SDOX® e o ponto “meta” de OD ≥ 2 mg/L.



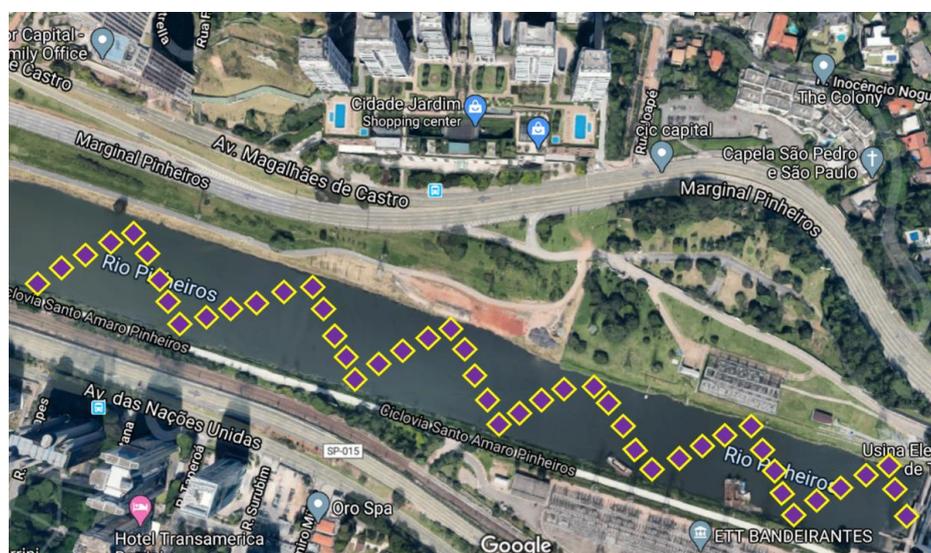
A Tabela 1 apresenta os parâmetros monitorados, Limites de Quantificação, método de obtenção do resultado e detalhes de acreditação pela ISO 17025, quando aplicável.

Tabela 1 - Parâmetros de monitoramento.

PARÂMETRO	SONDA	ENSAIO EM BANCADA	LQ (PPM)	ACREDITADO
DBO	Não se aplica	✓	5	✓
DQO	Não se aplica	✓	5	Não se aplica
COT	Não se aplica	✓	5	Não precisa
Condutividade	✓	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
P-orgânico	Não se aplica	✓	0,005 em P	Não precisa
Fosfato - PO ₄	Não se aplica	✓	0,005 em PO ₄	✓
N-albuminóide	Não se aplica	✓	0,3 em C	✓
N- amoniacal	Não se aplica	✓	0,05 em N	✓
Nitrato	Não se aplica	✓	0,05 em N	✓
Nitrito	Não se aplica	✓	0,01 em N	✓
OD	✓	Não se aplica	0,21 em O ₂	✓
pH	✓	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Sulfato total	Não se aplica	✓	0,5 em SO ₄	✓
Sulfeto total	Não se aplica	✓	0,5 em S	✓
Sulfeto (H ₂ S não dissociado)	Não se aplica	✓	0,02 em S	✓
POR	✓	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Temperatura	✓	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Turbidez	✓	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica
Vazão	✓	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica

A SABESP realiza calibrações semanais com equipe técnica especializada, em campo, em todas as UMRs para acompanhamento da acurácia dos equipamentos instalados, além de manutenções preventivas, preditivas e corretivas.

Figura 13 - Exemplo de varredura para avaliação da dispersão e decaimento da Pluma de Oxigênio a partir do monitoramento através da USV.



Como não existem ainda dados de um ciclo hidrológico completo com o SDOX[®] operante, apresentamos a seguir dados comparativos entre os meses de agosto a dezembro de 2021, e agosto e dezembro de 2022 **no ponto “meta”, PPS4**. O SDOX[®] passou a operar de forma contínua em 16/05/22. Nessas comparações é possível verificar a variação da concentração de um ano para o outro.

Gráfico 3 – Concentração de DBO nos pontos PPS1 (montante do SDOX) e PPS4 (ponto meta, após a dosagem de solução supersaturada de oxigênio).

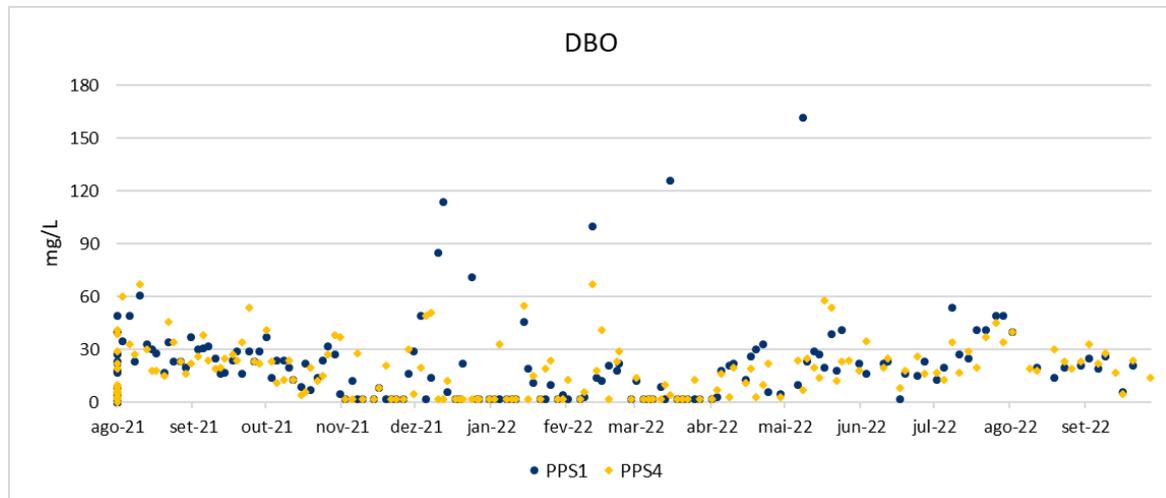


Gráfico 4 – Comparação dos resultados médios de DBO dos meses de agosto a dezembro, 2021 e 2022.

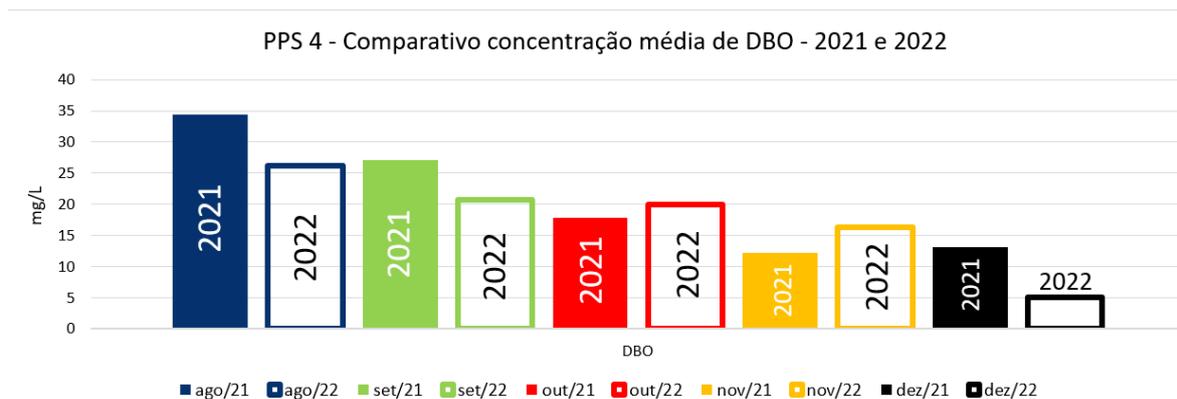


Gráfico 5 – Comparação dos resultados médios de DQO dos meses de agosto a dezembro, 2021 e 2022.

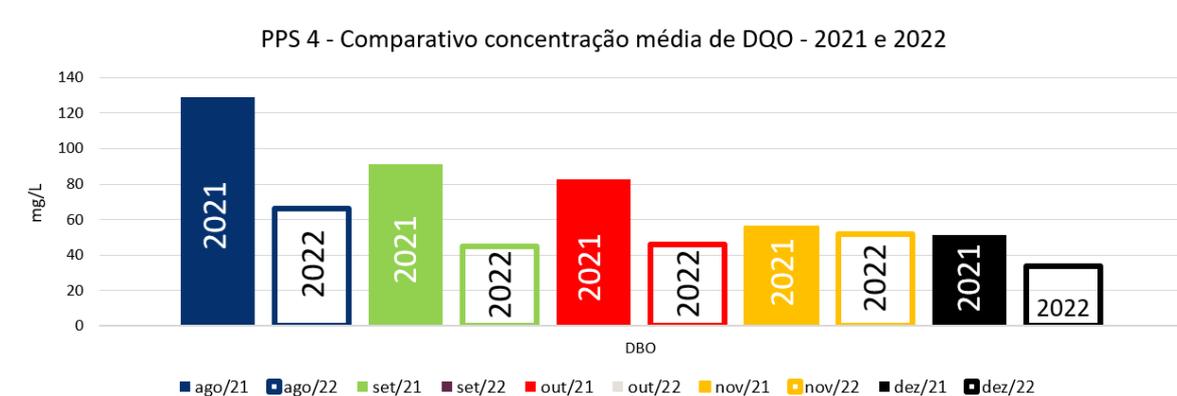
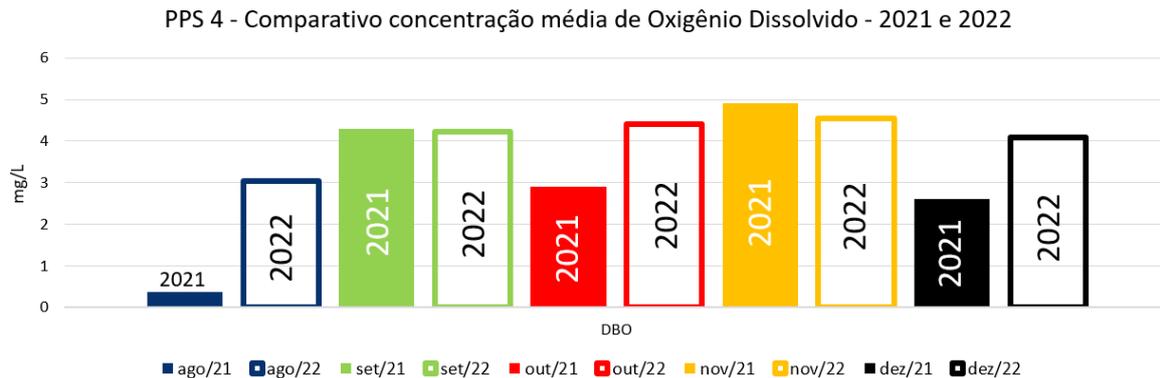


Gráfico 6 – Comparação dos resultados médios de OD dos meses de agosto a dezembro, 2021 e 2022.



ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos resultados de monitoramento, foram realizadas análises comparativas entre os resultados do ponto PPS1 (a montante do ponto de injeção cerca de 1 km) e o ponto PPS4, ponto meta para atingimento de concentrações de OD ≥ 2 mg/L.

O Gráfico 3 demonstra a queda da concentração da DBO em ambos os pontos de agosto/21 para cá, com valores médios abaixo de 30 mg/L antes mesmo da entrada em operação do SDOX[®]. Essa melhoria é atribuída às obras estruturantes, que em 2022 já havia conectado 600.000 imóveis que antes lançavam seus esgotos diretamente na Bacia do Rio Pinheiros, além da remoção de 100.000 toneladas de lixo. O número de ligações representa volume de esgotos de cerca de 3.000.000 de pessoas. No ponto PPS1 a **concentração média de DBO** chegou a cair de 33 mg/L em agosto/21 para 4,8 mg/L em dezembro/22. A maior diminuição de concentração recaiu para a DQO, que apresentou concentração média de 135 mg/L em agosto/21 e passou a apresentar-se com 32 mg/L em dezembro/22.

Já o parâmetro OD, que é o ponto focal neste projeto, requer análise mais apurada do ponto PPS4. Observa-se pelo Gráfico 6 que as concentrações médias de OD nesse ponto tenderam a ser maiores a partir de 2022, e acima de 2 mg/L. Em agosto de 2021 a concentração média de OD encontrava-se bem abaixo desse patamar. A observação que nos indica o atendimento da meta do teste com o SDOX é traduzida pela diminuição dos eventos de anoxia, e da constância dos resultados iguais ou acima de 2 mg/L. Entretanto, como o Canal do Rio Pinheiros passa por eventos de reversão em períodos chuvosos, ou seja, são realizadas manobras pela EMAE que alteram o fluxo do rio, é necessário que na análise a ser realizada, essas situações sejam segregadas. Após a melhoria da qualidade da água nesse rio, principalmente após meados de outubro/21, a queda na concentração de turbidez trouxe a ocorrência de blooms algais que antes não eram observados na frequência em que se apresentam no momento. Essas ocorrências de algas elevam o OD para picos acima de 20 mg/L em momentos do dia, e não são constantes, pois dependem das condições atmosféricas. Quando não há condições propícias, ou nos períodos noturnos, essas algas não contribuem positivamente para a manutenção dos níveis de OD. Aí entra a importância de um sistema que garanta condições aeróbicas nesses “intervalos” em que o OD pode tender a zero, por ausência de condições naturais de reaeração nesse rio.

Para avaliar a real contribuição do SDOX[®] foram construídos cenários utilizando períodos específicos e dados das sondas online (UMRs) no ponto PPS4. Para tanto, foram analisados 2.592 dados, divididos em 3 cenários distintos. Os cenários foram construídos conforme listados abaixo e que geraram o Gráfico 7:

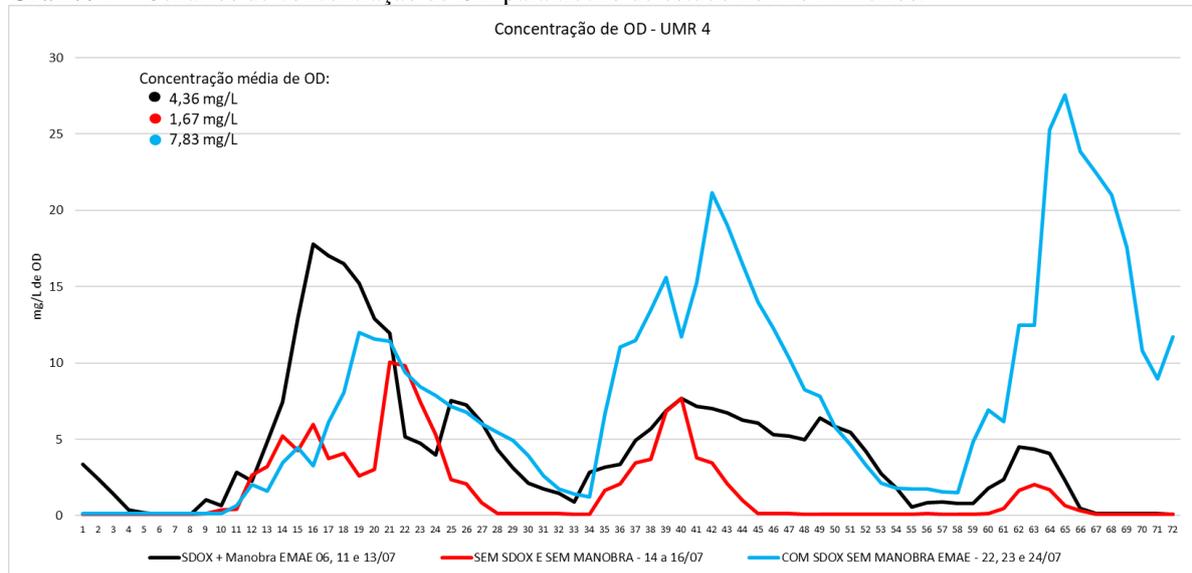
- Período 1: dias 6, 11 e 13: SDOX dosando + ocorrência de manobras da EMAE;
- Período 2: dias 14, 15 e 16: sem SDOX e sem manobras da EMAE;
- Período 3: dias 22, 23 e 24: SDOX dosando sem manobras da EMAE.

A análise dos dados gerados no Gráfico 5 é apresentada mais detalhadamente na Tabela 2:

Tabela 2 – Resultados dos cenários de OD

CENÁRIO	Total de dados	OD <0,5 mg/L	0,5 a 1,9 mg/L	OD >= 2 mg/L
Cenário 1	864	200	175	489
Cenário 2	864	538	142	184
Cenário 3	864	138	157	569

Gráfico 7 – Cenários de concentração de OD para trecho de estudo no Rio Pinheiros.



Verifica-se na Tabela 2 e no Gráfico 7 que o cenário 2, em que apenas as algas estão atuando (Cenário 2 – vermelho) na geração de OD, ocorrem mais eventos com OD <0,5 mg/L (538 eventos) do que nos dois cenários seguintes.

Considerando os cenários estudados temos que:

- O cenário 2 apresenta períodos com maior ocorrência de eventos de anoxia (OD < 0,5 mg/L) – cerca de 62% do tempo;
- Os cenários 1 e 3, com o SDOX® operando, ainda registram períodos com OD < 0,5 mg/L. Entretanto, essas ocorrências são bem menores do que os dados históricos da CETESB, permanecendo entre apenas 23% a 18% do tempo – dependendo da operação ou não da EMAE, os valores são melhores ou piores;
- Com o SDOX® operando garante-se a ocorrência de OD > 2 mg/L durante 66% do tempo, e acima de 0,5 mg/L por 84% do tempo;
- O equipamento de superoxigenação demonstra ser necessário para evitar que ocorram períodos longos com anoxia no trecho de estudo, que podem ser fatais para a manutenção da vida aquática que já vem sendo observada nesse trecho do rio, após a entrada em operação do sistema SDOX®;
- Conforme cenário 2, apenas a ação das algas ou de reatuação do próprio rio não é suficiente para assegurar concentrações de OD iguais ou acima de 0,5 mg/L por longos períodos de tempo.

CONCLUSÃO

Considerando-se que o objetivo do presente projeto é a manutenção dos níveis de OD no ponto PPS4 ≥ 2 mg/l, temos que esses níveis são melhor mantidos/assegurados quando o SDOX se encontra em operação. Verifica-se também a interferência das operações da EMAE, mas que não são suficientes para anular os efeitos positivos dessa tecnologia.

O equipamento SDOX[®] ainda se encontra em fase de ajustes finos, em que um deles é a operação 100% automatizada, com a modulação da dosagem visando diminuir a ocorrência dos picos de concentração de OD, embora a maior contribuição para esses eventos sejam as algas, em horários específicos de maior incidência dos raios solares, entre outros fatores meteorológicos favoráveis.

Além disso, temos ainda a acrescentar que, embora se observe redução nos níveis de DBO e DQO, essas reduções parecem estar mais correlacionadas com as obras estruturantes do Programa Novo Rio Pinheiros. Para esses nutrientes e outros parâmetros de monitoramento, a ação do SDOX[®] poderá ser melhor definida a partir da análise dos dados comparativos de ciclos hidrológicos completos, ou seja, a partir do final de 2023.

Os resultados preliminares aqui apresentados indicam que o sistema de oxigenação vem apresentando resultados significativos na melhoria da qualidade da água do Rio Pinheiros, especificamente no trecho em estudo. O monitoramento da qualidade da água, associado aos estudos de vazão do canal e estudos de modelagem matemática poderão indicar a viabilidade técnica de implementação desse tipo de instalação em outros pontos do rio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDRADE, L. N. *Autodepuração dos corpos d'água* (2010). Revista da Biologia–v.5 –dezembro de 2010.
2. BRASIL. (2005). Resolução CONAMA Nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. BRASIL (2015).
3. HORNE, A J, GOLDMAN C R. *Limnology*. 2ª edição. Editora McGraw-Hill. Cap. II, pág. 499 a 520. 1986.
4. LUZ, R. A. *Mudanças geomorfológicas na planície fluvial do Rio Pinheiros, São Paulo (SP), ao longo do processo de urbanização*. 2014. 245 f. Tese (Doutorado) -Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
5. SPERLING, V M (2007). *Estudos de modelagem da qualidade da água de rios*. ESA/UFMG. Belo Horizonte – MG.
6. WILSON, D E, BEUTEL, M. *Review of the feasibility of oxygen adition or accelerated upwelling in hood canal, Washington*. Final Report, 2005.
7. SHEEHAN, P J, MILLER D R, BUTLER G C e Ph. BORDEAU. *Effects of pollutants at the ecosystem level*. 1984. Publicado por John Wiley & Sons Ltd.