



Ensaio s laboratoriais para futura determinação do coeficiente de reoxigenação (k₂) no igarapé sapucajuba em belém/pa

Laboratory tests for future determination of the reoxygenation coefficient (k₂) in the sapucajuba creek in belém/pa

DOI: 10.54020/seasv3n1-002

Recebimento dos originais: 05/12/2021
Aceitação para publicação: 05/01/2022

Milena Jessica Guimarães Monteiro

Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental (UFPA). Rua Augusto Corrêa, 01, Cidade Universitária, Guamá - Belém - PA - Brasil, CEP 66075-110.
E-mail: milenajgmonteiro@gmail.com

Giovanni Chaves Penner

Doutor em Hidráulica e Saneamento (EESC/USP). Professor Adjunto na Universidade Federal do Pará (UFPA). Rua Augusto Corrêa, 01, Cidade Universitária, Guamá - Belém - PA - Brasil, CEP 66075-110.
E-mail: penner@ufpa.br

Ana Paula Baia Oliveira da Costa

Mestra em Arquitetura e Urbanismo (UFPA). Professora EBTT no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA). Av. Couto Magalhães, 1649, Universitário, Conceição do Araguaia - PA - Brasil, CEP 68540-000.
E-mail: ana.costa@ifpa.edu.br

André Lima da Costa

Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental (UFPA). Rua Augusto Corrêa, 01, Cidade Universitária, Guamá - Belém - PA - Brasil, CEP 66075-110.
E-mail: andrelima.esa@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho visou planejar e construir um experimento laboratorial para determinação do coeficiente de reoxigenação superficial e futuramente empregar a técnica no igarapé Sapucajuba inserido no campus Belém da Universidade Federal do Pará (UFPA), considerando a condição de maré seca. Os experimentos laboratoriais foram realizados baseados na técnica por *stripping* ou perturbação do equilíbrio com a utilização dos reagentes sulfito de sódio e cloreto de cobalto para provocar a desoxigenação e reoxigenação de uma solução de 1 L de água, os dados de variação de oxigênio dissolvido (OD) da solução foram monitorados por meio do Sensor Óptico de Oxigênio Dissolvido (OOD) - Vernier Optical DO Probe. A partir dos dados obtidos, foi possível aplicar o modelo para ajuste e cálculo dos coeficientes de reoxigenação K₂ para cada experimento. Os resultados da aplicação da técnica por *stripping* mostraram que é possível determinar os coeficientes de reoxigenação, e também que as proporções entre



massas dos reagentes e tempo para a reaeração acontecer são primordiais para obtenção do K₂. Ao final foi proposta as condições de reprodução do experimento para a determinação no igarapé Sapucajuba baseado na vazão do trecho, velocidade, massas dos reagentes e tempo de ensaio.

Palavras-Chave: *Stripping*, Reoxigenação superficial, Coeficiente de reoxigenação.

ABSTRACT

The present work aimed to plan and build a laboratory experiment to determine the surface reoxygenation coefficient and in the future to employ the technique in the Sapucajuba creek inserted in the Belém campus of the Federal University of Pará (UFPA), considering the dry tide condition. The laboratory experiments were based on the technique by stripping or disruption of equilibrium with the use of reagents sodium sulfite and cobalt chloride to cause deoxygenation and reoxygenation of a solution of 1 L of water, the data of dissolved oxygen (DO) variation of the solution were monitored through the Optical Dissolved Oxygen (OOD) Sensor - Vernier Optical DO Probe. From the data obtained, it was possible to apply the model for adjustment and calculation of the reoxygenation coefficients K₂ for each experiment. The results of the application of the stripping technique showed that it is possible to determine the reoxygenation coefficients, and also that the proportions between the masses of reactants and time for the reaction to take place are essential for obtaining the K₂. In the end it was proposed the conditions of reproduction of the experiment for the determination in the Sapucajuba creek based on the flow rate, velocity, masses of reactants and test time.

Keywords: Stripping, Surface reoxygenation, Reoxygenation coefficient

1 INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos é muito importante para os desenvolvimentos econômico e social do país, pois um bom planejamento resulta em disponibilidade de água em boa qualidade para as gerações atuais e futuras. Na busca por ferramentas que auxiliem na gestão, os modelos matemáticos de qualidade da água que simulam o comportamento de autodepuração hídrica, são aliados para a proteção e tomada de decisões referentes aos corpos hídricos (ÁVILA, 2014; GONÇALVES, 2012; MENEZES et al., 2015).

O conceito de autodepuração de um rio está vinculado ao reestabelecimento do equilíbrio no meio aquático, após alterações induzidas por despejos afluentes (VON SPERLING, 2018). Neste sentido, um dos processos naturais que auxiliam na autodepuração de um recurso hídrico é a reoxigenação superficial por estar intrinsecamente relacionada com os parâmetros hidráulicos de escoamento e diversos fatores ambientais (GONÇALVES et al., 2013). Este



processo natural consiste na troca gasosa da atmosfera com um meio líquido, ela pode ser quantificada pelo coeficiente de reoxigenação superficial (K_2) que está relacionado com a taxa de incorporação, ou reincorporação do Oxigênio Dissolvido (OD) na água (PINHEIRO, 2011).

Ao longo dos estudos, identificou-se na literatura algumas técnicas para a medição do OD in loco, uma delas é a técnica de perturbação do equilíbrio utilizada para a medição da reoxigenação para escoamentos de pequeno porte, que funciona a partir da medição do OD inicial e final, auxiliado pela adição de sulfito de sódio e um catalisador o cloreto de cobalto (PINHEIRO, 2011; GONÇALVES et al., 2013).

Assim, este trabalho buscou aplicar a técnica de perturbação do equilíbrio denominada também “Stripping” em ambiente controlado de laboratório com auxílio de ferramentas de medição do oxigênio dissolvido, utilizando dos reagentes para acelerar o processo de desoxigenação da água e em seguida iniciar a reoxigenação, e por fim aplicar o modelo matemático para determinar o coeficiente de reoxigenação (K_2).

Finalmente, a partir dos resultados obtidos neste trabalho fez-se uma proposta de aplicabilidade da técnica que segundo Bennett & Rathbun, (1972); Queiroz; Matos; Von Sperling (2015), o coeficiente K_2 pode ser estimado por medições em campo, considerando-se as características hidrodinâmicas do igarapé Sapucajuba localizado na Universidade Federal do Pará (UFPA).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Modelagem Por Stripping Para Determinação Da Desoxigenação E Reoxigenação Superficial

O trabalho consistiu na aplicação em condições controladas no laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFPA a técnica da perturbação do equilíbrio sugerida por Bicudo e James (1989), no qual, mede-se as concentrações de oxigênio dissolvido antes depois da adição de reagentes que provoquem a desoxigenação da solução, esta técnica deve ser aplicada para escoamentos com vazão inferior a 1,5 m³/s.

O procedimento de desoxigenação por “Stripping” geralmente é realizado pela adição constate de um gás, em vários casos o nitrogênio, recentemente até o gás butano comercial foi usado, pois o borbulhamento superficial proporciona trocas gasosas e assim causa a diminuição do oxigênio da solução. Para



adaptação a esse trabalho, utilizou-se um reagente que consome o oxigênio dissolvido contido em um determinado volume de água, um catalisador para acelerar a reação e um agitador magnético para que o processo fosse contínuo e ocorresse a homogeneização em todo o volume de água.

A reoxigenação superficial consiste na troca gasosa entre a atmosfera e uma massa d'água, isto ocorre naturalmente e sempre que a concentração de oxigênio for menor do que a concentração estável máxima da situação analisada, a máxima concentração estável geralmente é conhecida como a concentração de saturação (GIORGETTI, 2008). A adaptação para este experimento está na sequência em que o volume de água foi desoxigenado por "Stripping" e por ocorrer um desequilíbrio na concentração de oxigênio o processo de reoxigenação iniciará de forma instantânea. Para que ocorra de forma homogênea utiliza-se o agitador magnético.

2.2 Material Para Os Experimentos

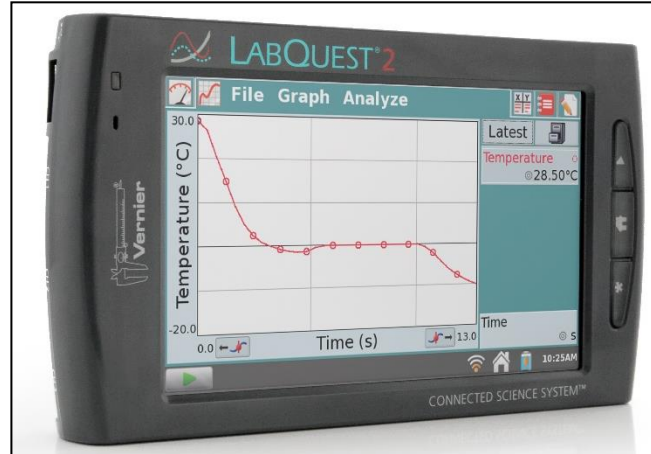
Para a condução dos ensaios foram utilizados os seguintes materiais: o reagente sulfito de sódio e o catalizador cloreto de cobalto, béquer de 2 L ou 1 L, agitador magnético, haste com garra para apoiar o equipamento e sensor óptico de oxigênio dissolvido (OOD).

2.3 Sensor Óptico De Oxigênio Dissolvido (Ood) – Vernier Optical Do Probe

Para a determinação do OD durante os experimentos, utilizou-se o sensor óptico de Oxigênio Dissolvido (OOD) – Vernier Optical DO Probe que fica conectado diretamente ao sistema de aquisição de dados.

A aquisição de dados foi realizada por meio da interface Vernier LabQuest 2 (Figura 1) no modo autônomo, todo o processo foi registrado em tempo real, armazenado em cartão micro SD e transferido para um pen drive.

Figura 1: LabQuest 2 – Hardware de aquisição de dados



Fonte: Labquest 2, (2015).

Segundo o fabricante, o sensor óptico de oxigênio dissolvido (OD) (Figura 2) é utilizado para medições de concentrações de OD em amostras de água testadas em campo ou em laboratório, o procedimento de calibração é opcional pois este sensor é configurado para calibração antes de sair de fábrica.

O mecanismo de funcionamento do sensor é baseado em luminescência. Para Pereira (2016, p. 16) “a luminescência é a emissão de luz ultravioleta, visível ou infravermelha, de uma espécie química a partir de um estado excitado resultante de um estímulo de luz, de uma reação química ou de radiação ionizante”, para a aplicação nesse experimento o estímulo será realizado por meio da reação química.

Figura 2: Sensor Óptico OD



Fonte: Vernier Optical do Probe, (2016).

Para o fabricante a luminescência funciona a partir do princípio da extinção reversível da luminescência de um luminóforo pelo oxigênio, à medida



que este passa através da tampa. A tampa é revestida por uma componente luminescente encerrada numa matriz para proteção, uma luz azul de um LED é transmitida à tampa excitando o luminóforo.

Esta tecnologia reduz a necessidade de calibrar o sensor. O sensor é aprova de água e pode ser submerso até 1,6 m. Para a aquisição de dados, o ponto metálico deve ser totalmente submerso na solução aquosa e a extremidade do sensor OOD deve ser enxaguada suavemente com água destilada antes de qualquer procedimento. As vantagens da utilização destes sensores está no não consumo de oxigênio, pois o processo é fotofísico não envolvendo reação química logo não há consumo de oxigênio pelo sensor, apenas haverá o monitoramento automático do processo (PEREIRA, 2016).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para os experimentos, as massas dos reagentes foram calculadas a partir de Gonçalves (2012), que estipulou a Equação 1, partindo da estequiometria, onde para diminuir a concentração de OD de 7 mg/L, condição de oxigênio dissolvido usualmente observada na água de torneira utilizada, para 1 mg/L, a massa de OD que a ser consumida é de 6 mg/L vezes o volume da solução, que para este ensaio era de 1 L.

$$M_{\text{suf}} = \frac{M_{\text{ODC}} \times PM_{(\text{NO}_2\text{SO}_3)}}{PM_{(\text{O}_2)}} \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

M_{suf} = Massa de sulfito de sódio (mg/L);

M_{ODC} = Massa de oxigênio dissolvido a ser consumida a partir do volume de água (mg/L);

$PM_{(\text{NO}_2\text{SO}_3)}$ = Peso molecular de sulfito de sódio (g/mol);

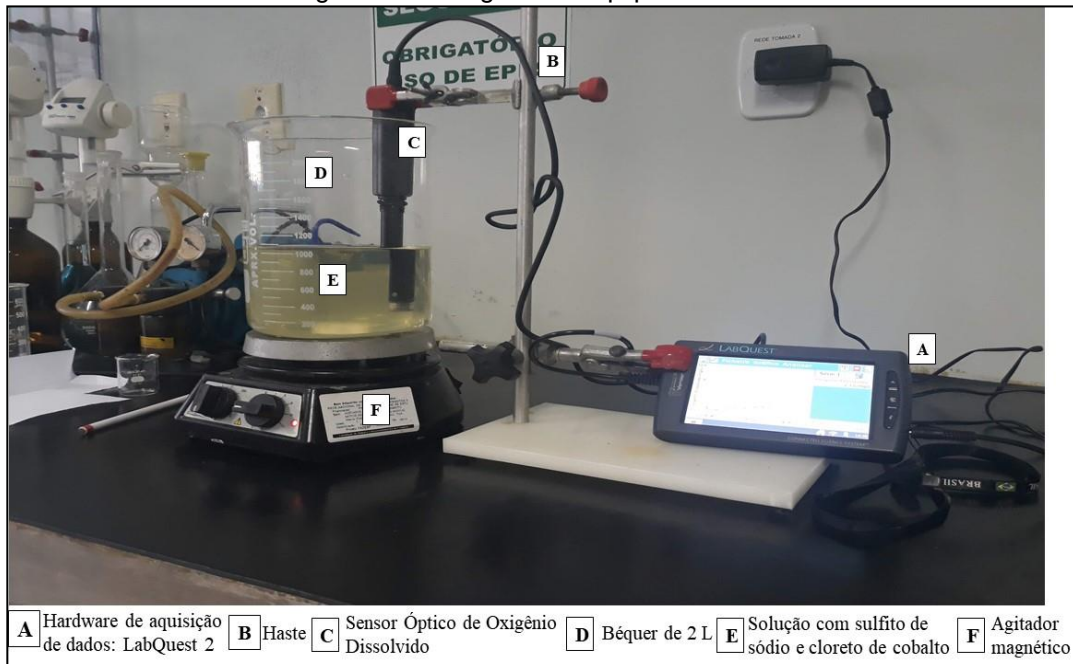
$PM_{(\text{O}_2)}$ = Peso molecular do oxigênio (g/mol).

Com a Equação 1 foram determinadas as massas para o sulfito de sódio (sequestrante do oxigênio dissolvido) e o cloreto de cobalto (catalisador da reação) e em seguida estipulou-se as massas de acordo com os resultados dos experimentos. Ao longo dos ensaios foi observado o comportamento da solução com diferentes massas dos reagentes e a velocidade da reoxigenação.

Em seguida, o ensaio partiu da montagem do equipamento (Figura 3), adição da água da torneira no béquer de 2 L ou 1 L (o que estivesse disponível no laboratório), montagem o sensor de OD dentro da solução e acrescentar as

substâncias químicas. Desta forma, observa-se o momento que o reagente sulfito de sódio provoca o consumo da concentração de OD, causando a desoxigenação da água, com a ajuda do catalisador cloreto de cobalto que acelera este processo, e o agitador magnético para a homogeneização da solução e manter a reoxigenação. Com o sensor, foi monitorado o processo de reoxigenação.

Figura 3: Visão geral do equipamento montado



Fonte: Autores, (2019)

O experimento contou com a determinação do OD em intervalos de tempo sucessivos até um tempo limite estabelecido para o experimento.

4 APLICAÇÃO DO MODELO

Após a aquisição dos dados, os mesmos foram tabulados e tratados em planilha eletrônica Excel 2016. Em sequência foi ajustado o modelo matemático de reoxigenação descrito na Equação 2, para obtenção do coeficiente de reoxigenação K_2 . Segundo Sperling (2018), a Equação 2, descreve as trocas gasosas entre o meio líquido e a atmosfera, que consiste no consumo do oxigênio para os processos de estabilização da matéria orgânica comparando assim os dados dos experimentos, utilizando ferramenta do Excel 2016 para melhor ajuste dos cálculos.

$$C = C_s - (C_s - C_0) \cdot e^{-K_2 \cdot t}$$

equação (2)

Onde:



C = concentração de OD em um tempo t (mg/L);
C_s = concentração de saturação (mg/L);
C₀ = concentração inicial (mg/L);
t = tempo (s);
K₂ = coeficiente de reoxigenação (s⁻¹).

4 MÉTODO MÍNIMOS QUADRADOS (MMQ)

O cálculo dos MMQs foi realizado a partir da Equação 3, onde é determinado o melhor ajuste do modelo (Equação 2) no sentido de descrever a relação entre as variáveis X e Y, ou seja, ajustar corretamente o modelo aos dados experimentais, variando os valores K₂ para obter o menor valor da soma dos MMQs (AYRES, 2012).

$$\text{MMQ} = \sum(a - b)^2$$

equação (3)

Onde:

MMQ = Mínimos quadrados;
a = Dados do modelo de reoxigenação;
b = Dados do experimento.

5 CORRELAÇÃO DE PERSON (R)

A correlação expressa tanto a força quanto o sentido da correlação, destina-se a verificar se há associação entre duas variáveis. A correlação foi calculada a partir da seguinte equação com auxílio da ferramenta Excel. A função utilizada na planilha Excel foi: CORREL.

6 COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO (R²)

Este coeficiente determina a intensidade da relação entre as variáveis, no caso estudado, as variáveis são os dados do modelo e os dados experimentais (AYRES, 2012). Utilizou-se a seguinte função da planilha Excel: RQUAD

7 RESULTADOS

Para este estudo foram realizados 18 experimentos, onde os resultados obtidos permitiram para cada um a determinação do coeficiente (K₂). Na

Tabela 1 observa-se o resumo de cada experimento considerando intervalos de tempo diferentes entre as massas dos reagentes, rotação adotada, duração do experimento, dentre outras.

Os experimentos iniciais do dia 4 de outubro de 2019 obtiveram resultados satisfatórios com a massa determinada pela equação 1, observa-se a variação do tempo e massas para melhor entender os limites do processo. Os experimentos



do dia 10 de outubro de 2019, foram os que tiveram mais dados, porém, não satisfatórios, pois ao variar as condições que se tinha feito inicialmente houve a alteração na proporção das massas dos reagentes não obtendo bons resultados para o processo de reoxigenação. Os experimentos dos dias 10 e 18 de fevereiro e 4 de março de 2020, foram os resultados mais satisfatório ao se visualizar as curvas de reoxigenação no tempo correto.

Tabela 1. Condições experimentais

Data do Experimento	Número do Experimento	Volume (L)	Tempo de Experimento (min)	Massa de sulfato de sódio (mg)	Massa de cloreto de cobalto (mg)	Rotação (rpm)	Saturação do oxigênio dissolvido (mg/L)
04/10/2019	1	1	20	55	27	4	6,553
04/10/2019	2	1	60	55	27	7	7,043
04/10/2019	3	1	20	60	30	7	6,652
10/10/2019	4	1	5	60	60	7	7,675
10/10/2019	5	1	10	60	30	5	7,763
10/10/2019	6	1	20	60	6	4	6,663
10/10/2019	7	1	20	60	6	5	7,780
10/10/2019	8	1	20	60	6	6	7,279
10/10/2019	9	1	20	60	6	7	6,366
10/02/2020	10	1	60	47,2	23,6	5	6,849



Data do Experimento	Número do Experimento	Volume (L)	Tempo de Experimento (min)	Massa de sulfato de sódio (mg)	Massa de cloreto de cobalto (mg)	Rotação (rpm)	Saturação do oxigênio dissolvido (mg/L)
10/02/2020	11	1	30	23,6	23,6	5	7,559
18/02/2020	12	1	30	30	15	6	7,131
18/02/2020	13	1	30	35	18	5	7,026
18/02/2020	14	1	30	40	20	5	7,389
18/02/2020	15	1	30	40	10	5	7,010
04/03/2020	16	1	30	40	5	6	6,894
04/03/2020	17	1	30	40	20	6	7,098
04/03/2020	18	1	30	40	30	6	7,092

A saturação de oxigênio dissolvido inicial, condição necessária para aplicar a Equação 2, foi medida em cada ensaio pelo sensor OD, sendo considerado o maior valor de OD depois de acionado o agitador magnético. Na Tabela 2 descreve-se o resumo da análise dos resultados experimentais.

Alguns testes não foram bem sucedidos, por exemplo o Experimento 4, pois por ser uma estimativa para um futuro experimento em campo, optou-se por variar as massas de reagente, o tempo e a velocidade para tentar identificar a condição ótima. Os primeiros experimentos foram importantes para conhecer a massa e o tempo adequados e assim poder variá-los, nas Figuras 4, 5 e 6 correspondem respectivamente aos Experimentos 1, 2 e 3.

No Experimento 1 observa-se que ocorreu a desoxigenação, atingindo um



valor mínimo de 0,564 mg/L, ver Figura 4. A massa de sulfito de sódio inserida foi de 55 mg e cloreto de cobalto 27 mg, conforme Tabela 2, A rotação de 4 do agitador magnético (entre 400 a 600 rpm), a saturação de OD atingiu um valor final de 6,533 mg/L para este ensaio o coeficiente K2 ajustado foi 0,0005067 s-1. O trabalho de Almeida (2013), estimou um coeficiente K2 de 0,0004883 s-1 (42,19 dia-1) para uma seção de um trecho de rio pela Equação de Owns considerando altura da lâmina d'água de 0,32 m e velocidade de 0,80 m/s.

O resultado para o coeficiente de reoxigenação do Experimento 1 por stripping ficou na mesma ordem de grandeza semelhantes a um dos resultados obtido de um curso d'água com características distintas do ambiente controlado do laboratório.

Tabela 2. Resultados Experimentais

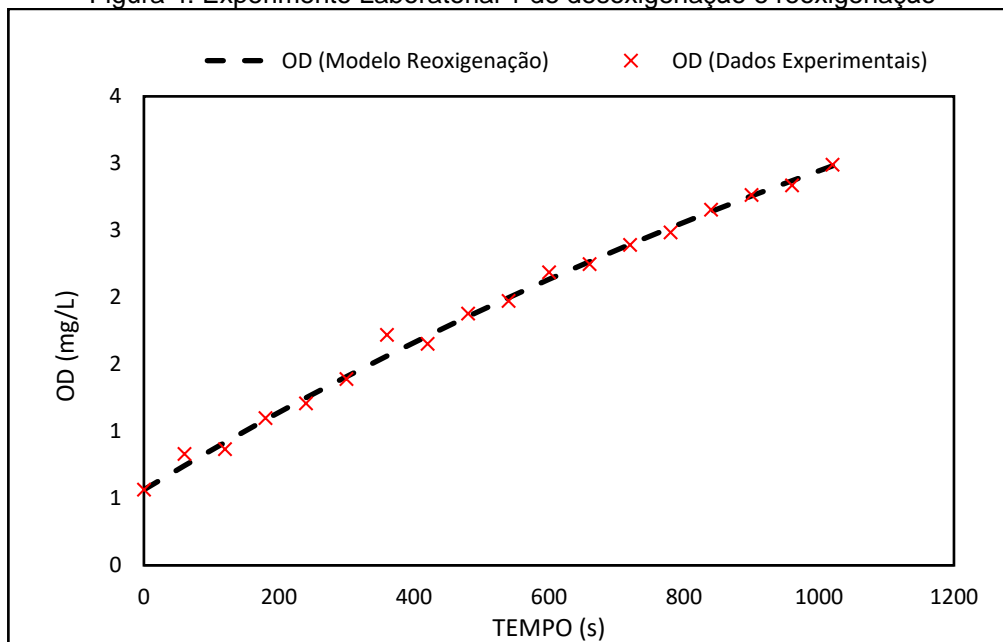
	Coeficiente de Reoxigenação (dia ⁻¹)	Variação de OD no Experimento	Recuperação de OD observada	MMQ	DESVIO PADRÃO			Correlação	Coeficiente de Determinação
					Soma do Desvio	Soma da primeira metade	Soma da segunda metade		
1	0,0005067	5,98884505	3,564	0,0475	0,0650	0,1047	-0,0398	0,9976	0,9952
2	0,0006352	6,04411522	0,506	1,6649	0,0180	-4,2801	4,2981	0,9974	0,9948
3	0,0009378	6,52798352	2,299	0,0746	-0,3419	-0,4937	0,0794	0,9995	0,9989
5	0,0000002	7,63348703	7,633	0,0000	0,0011	0,0009	0,0002	0,5774	0,3333
6	0,0001642	6,52798352	5,868	0,0017	-0,0028	0,0125	-0,0153	0,9984	0,9968
7	0,0001778	7,64423751	6,797	0,0074	-0,1365	-0,0811	-0,0555	0,9967	0,9933
8	0,0002277	7,14917954	5,939	0,0116	0,1497	0,1939	-0,0442	0,9987	0,9974
9	0,0003571	6,23637403	4,977	0,0221	0,1526	0,1839	0,0253	0,9963	0,9926
10	0,0001622	5,59652857	3,140	0,0969	-0,4965	-0,5579	-0,0235	0,9985	0,9970
11	0,0001793	3,29959524	2,881	0,0110	0,0193	0,0274	0,0141	0,9701	0,9411



1 2	0,0004431	4,83393585	2,227	0,2908	- 1,706 9	-2,6786	0,9716	0,9992	0,9984
1 3	0,0004553	3,12361231	1,534	0,4138	1,001 8	1,6521	- 0,5696	0,9822	0,9647
1 4	0,0002693	4,31683764	2,728	0,0474	- 0,202 3	-0,2768	0,0745	0,9981	0,9963
1 5	0,0002947	4,67456788	2,931	0,0229	0,060 2	0,0258	0,0344	0,9995	0,9989
1 6	0,0003226	4,67999317	2,695	0,2157	0,855 0	1,3322	- 0,4772	0,9972	0,9945
1 7	0,0003308	4,81223468	2,667	0,4985	1,366 0	2,2082	- 0,8422	0,9949	0,9899
1 8	0,0003897	4,6142115	2,315	0,3782	1,476 6	2,4792	- 1,0026	0,9974	0,9948

Na Figura 4 fica evidente o processo de reoxigenação pela recuperação do OD. O tempo total de ensaio foi 20 min e OD atingiu 50% da concentração inicial. Adicionalmente os coeficientes de correlação e de determinação ficaram próximos a 1, ver Tabela 2, indicativo de boa aderência da Equação 2 aos dados experimentais

Figura 4: Experimento Laboratorial 1 de desoxigenação e reoxigenação



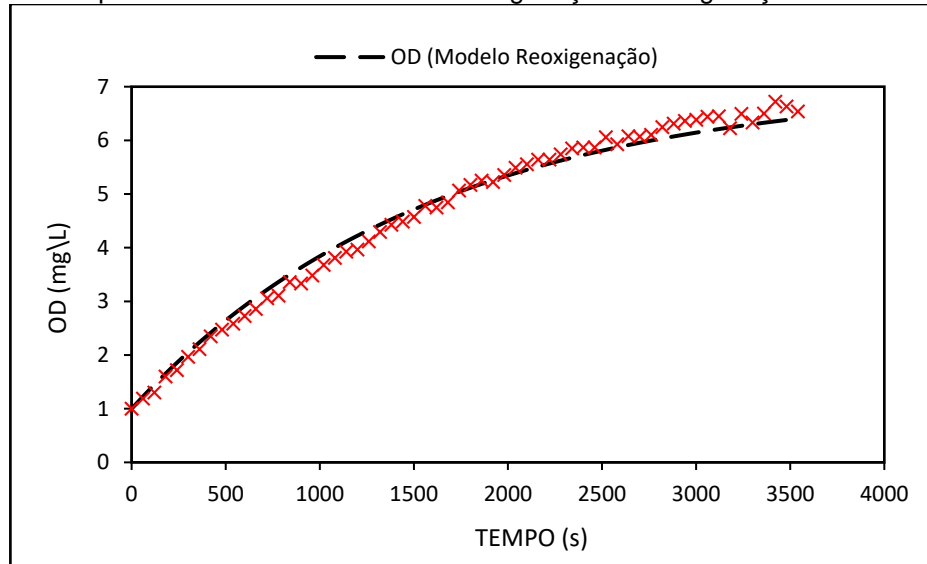
Fonte: Autores, (2020).

Os Experimentos 2 e 3 foram feitos com concentrações de reagentes, tempo e na rotação 7 (700 a 1400 rpm) do agitador distintos do Experimento 1, considerando um tempo de 60 e 20 minutos respectivamente para o Experimento 1 e 2, observa-se a Figura 3 uma recuperação de quase 100% do OD inicial em 1 hora, logo o tempo neste caso foi determinante para melhor mostrar a curva de



reoxigenação.

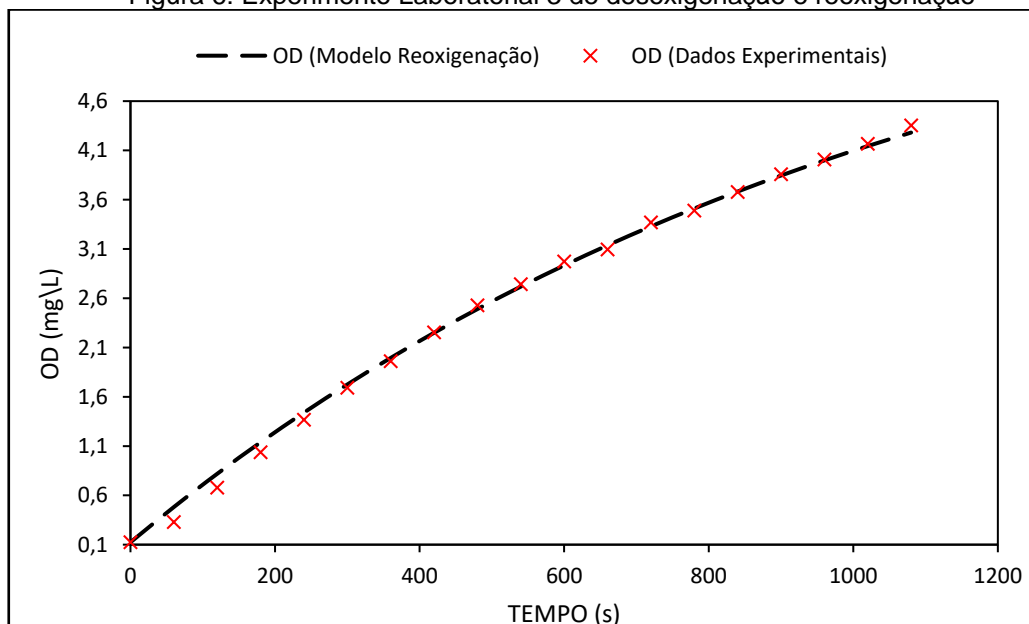
Figura 5: Experimento Laboratorial 2 de desoxigenação e reoxigenação



Fonte: Autores, (2020).

O Experimento 3 (Figura 6) teve um tempo de recuperação menor se comparado ao Experimento 2 e massas de reagentes superiores com relação ao Experimento 1, porém observando o gráfico percebe-se boa recuperação do OD que atingiu quase a metade do seu valor inicial. De modo geral os modelos conseguem representar de forma excelente os Experimentos, tendo uma boa correlação na consistência dos dados (Tabela 2).

Figura 6: Experimento Laboratorial 3 de desoxigenação e reoxigenação



Fonte: Autores, (2020).



Os coeficientes para os Ensaio 2 e 3 respectivamente foram de 0,0006352 s⁻¹ e 0,0009378 s⁻¹, para Von Sperling (2018) corpos d'água que possuem altos valores de coeficiente K₂ são fortemente influenciados pela turbulência do meio, neste caso, levando em consideração que em um rio as suas dimensões são maiores que o béquer de laboratório, os resultados mesmo com semelhança no seu procedimento são diferentes. Os experimentos obtiveram K₂ elevado, sendo que o Experimento 2 teve maior tempo para recuperar, porém, a saturação de oxigênio foi diferente do Experimento 3 (Tabela 2) que teve tempo menor e massas de reagentes diferentes.

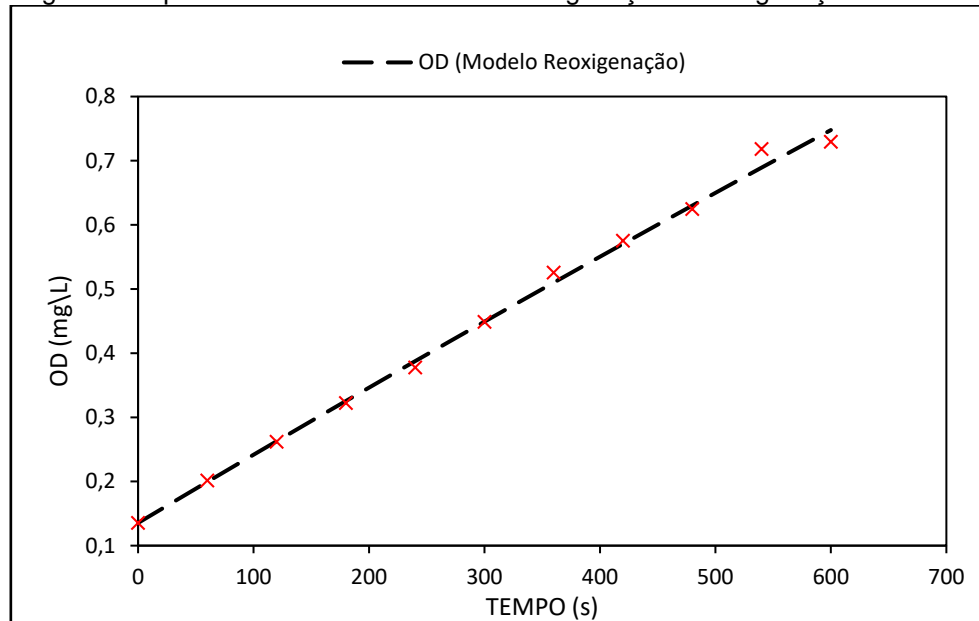
Em cursos d'água, o K₂ calculado empiricamente por Rosa (2019) estiveram na mesma faixa, levando em consideração fatores distintos aos quais foram expostos os experimentos, isso quer dizer que é possível determinar o coeficiente de reoxigenação semelhantes a partir de outras técnicas.

Os Experimentos 4, 5, 6, 7, 8 e 9, podem ser observados por meio da Tabela 1, que alterou-se muitas vezes o tempo, as massas dos reagentes e agitação, pois procurou-se entender o limite de variação das condições que se tinha, isto implicou diretamente na recuperação do OD da solução. De modo geral os experimentos não obtiveram um resultado efetivo, pois não conseguiram atingir nem 30% do OD inicial para o tempo estabelecido, isso implica que a proporção entre a tempo e concentração dos reagentes deve ser bem estabelecida. Na Figura 5 mostra-se uma boa aderência do modelo aos dados, todavia só foi mensurado início da curva de recuperação do oxigênio.

Ao observar os coeficientes K₂ (Tabela 2) é possível notar uma diminuição destes, evidenciando ainda mais que é necessário manter as condições iniciais realizadas nos primeiros ensaios.



Figura 7: Experimento laboratorial 6 de desoxigenação e reoxigenação



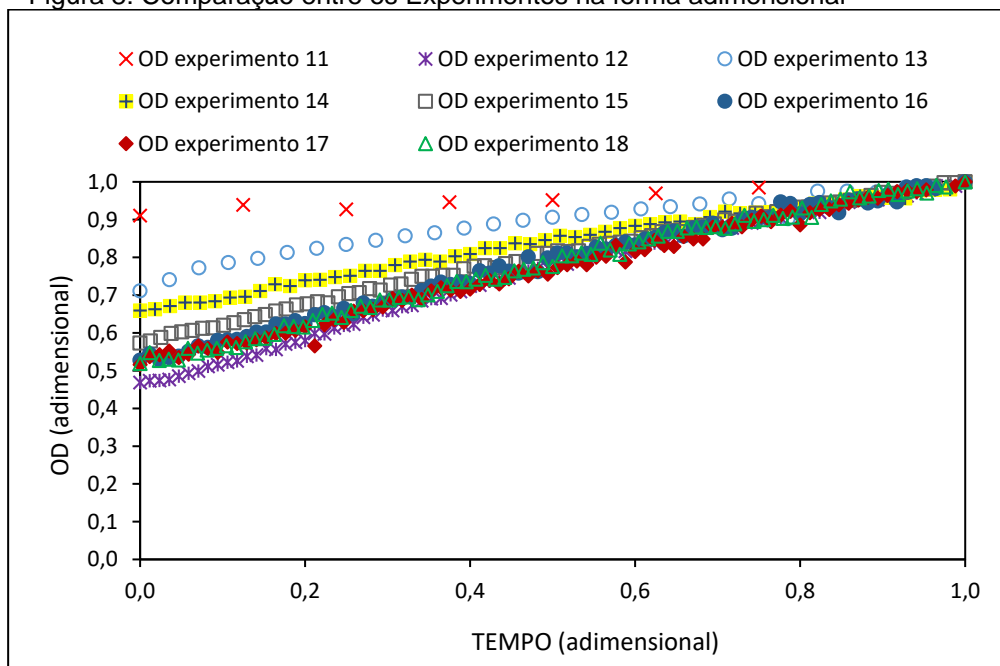
Fonte: Autores, (2020).

A partir do Experimento 11 devido a observação dos ensaios anteriores, já se entendeu a proporção adequada de massa para ocorrer a reoxigenação, então foi determinado um tempo padrão de 30 minutos que possibilita a desoxigenação e a recuperação do OD de saturação inicial de até 50%, todos os gráficos conseguiram ter um padrão de curva, variando-se apenas as concentrações dos reagentes que influenciaram na velocidade da reação.

Na Figura 6, os gráficos foram plotados de forma adimensional para melhor visualizar os resultados e avaliar a semelhança entre o comportamento das curvas dos experimentos, pode ser observado um padrão no processo de reaeração. Exceto o Experimento 11, que usou um intervalo entre as medidas de 180 segundos e não foi possível observar os detalhes do fenômeno, todos os demais apresentaram comportamento semelhante, com inclinação das curvas muito próximas.



Figura 8: Comparação entre os Experimentos na forma adimensional



Fonte: Autores, (2020).

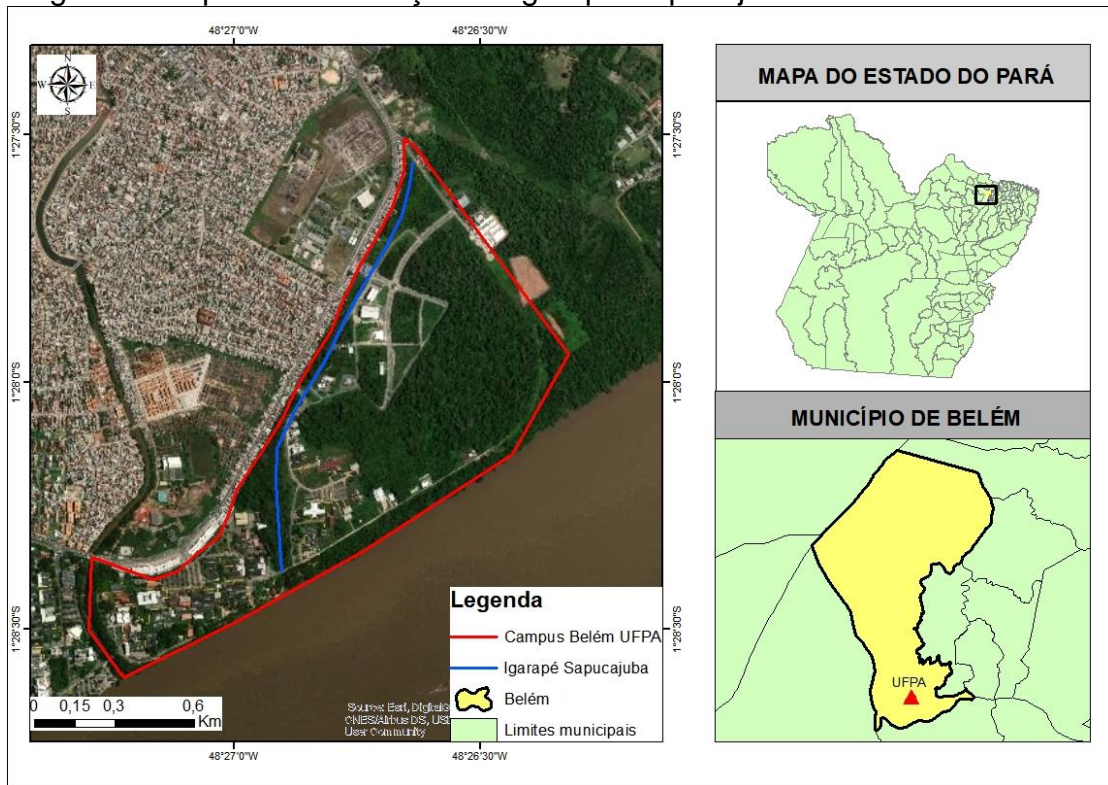
Trabalhos como os de Graepin (2016), Pinheiro; Faht e Silva (2012), Fomentini (2010), aplicaram diferentes técnicas para obtenção do coeficiente K₂, considerando as características hidráulicas dos cursos d'água estudado, os resultados dos coeficientes calculados empiricamente por esses autores foram similares aos obtidos neste trabalho em laboratório que é um ambiente completamente diferente do abordado, no entanto, os coeficientes ficaram na mesma faixa, podendo ser aplicado a técnica de perturbação do equilíbrio com o auxílio do sensor óptico de OD para otimizar a determinação de coeficientes de reoxigenação de pequenos cursos d'água.

8 APLICABILIDADE EM CAMPO

O igarapé Sapucajuca (Figura 9) está localizado na Cidade Universitária José da Silveira Netto, no Campus Belém da Universidade Federal do Pará, este corpo hídrico sofre mudanças nas suas características naturais por estar inserido em uma área de constante mudanças urbanísticas, sendo local de despejo domésticos que desequilibram as condições adequadas para manter a vida aquática (PENNER, 2017; Lessa et. al, 2017).



Figura 9: Mapa de Localização do igarapé Sapucajuba



Fonte: Adaptado de Lessa (2017); Almeida e Penner (2017).

Para aplicação em campo é necessário considerar as características geométricas e profundidade do igarapé (FREITAS, 2016), assim como foi realizado por Matos (2019), os ensaios para determinação da vazão e tempo de concentração foram divididos por trechos nas seções do igarapé.

A técnica de stripping deve ser empregada em trechos de escoamento com vazão inferior a 1,5 m³/s como já mencionado, devido à complexidade entre lâmina d'água e profundidade onde ocorrerá a reoxigenação. A partir dos resultados de Matos (2019) é possível escolher o Trecho 2 por conter as menores vazões 1,64 L/s e 1,57 L/s se comparado aos demais trechos e desta forma poder adequar a aplicação em campo nas condições dos ensaios em laboratório.

As massas dos reagentes serão estimadas de acordo com as vazões encontradas no Trecho 2 (Próximo ao hospital Betina) para serem relacionadas com o volume e concentração de saturação de oxigênio dissolvido do igarapé, sendo calculada a partir da Equação 2. No trabalho de Costa (2020) foi encontrado uma variação média de 2,73 mg/L de OD na maré seca, a determinação da massa deve ser baseada nessas características.

Em média a vazão do Trecho 2 na maré seca é de 1,60 L/s, então a partir



deste dado e utilizando tempo de ensaio em campo feito por Matos (2019) de 480 segundos, tem-se um volume de aproximadamente 790 L (incluindo uma solução de 20 L de um recipiente com o reagente que deve ser preparado para despejar no corpo d'água). Aplicando a Equação 2, considerando a massa de OD a ser consumida a partir do volume de água de 790 L para diminuição de OD de 2,73 mg/L para 2, a massa de sulfito de sódio será de:

$$M_{\text{suf}} = \frac{(790 \text{ L} \times 2 \frac{\text{mg}}{\text{L}}) \times 126,043 \text{ g/mol}}{16 \text{ g/mol}} = 12.446,7 \text{ mg} = 12 \text{ g}$$

com isto as massas serão de 12,5 g de sulfito de sódio e 6 g cloreto de cobalto (baseado nos ensaios em laboratório, pois o cloreto de cobalto teve melhor desempenho nesta proporção).

Considerando o Trecho 2 do igarapé Sapucajuba da pesquisa de Matos (2019), a aplicação deve ser realizada a partir do posicionamento do sensor de oxigênio dissolvido a 26,60 m do ponto de lançamento da solução que fará o stripping do oxigênio dissolvido, podendo ser necessário ajustes em campo. Concomitantemente ao ensaio de stripping para a determinação do coeficiente reoxigenação será necessário realizar um similar ao proposto por Matos (2019) onde será determinada a vazão, velocidade e coeficiente de dispersão longitudinal.

O procedimento deve ser feito com a dissolução dos reagentes em um recipiente utilizando a água do próprio igarapé de maneira rápida e despejar no ponto de lançamento, o sensor deve ser posicionado no centro da seção de jusante. O intervalo de medição será semelhante ao realizado em laboratório, isto é, 5 segundos por medição para melhor detalhamento dos dados.

Nos trabalhos de Queiroz (2015) e Pinheiro; Faht e Silva (2012) foi observado para diferentes profundidades e velocidades distintos coeficientes K₂, portanto se espera diferentes coeficientes de reoxigenação para o trecho do igarapé Sapucajuba com a aplicação da técnica por stripping, semelhante ao que ocorreu em laboratório. Tudo será monitorado pelo sensor óptico de OD.



9 CONCLUSÕES

O principal objetivo do trabalho foi realizar experimentos em laboratório para futuramente adequar a técnica utilizada denominada stripping, para determinar o coeficiente de reoxigenação do igarapé Sapucajuba, que está localizado na Cidade Universitária José da Silveira Netto do Campus Belém da UFPA onde foram realizados os testes laboratoriais.

Os experimentos foram feitos de forma prática com o auxílio da principal ferramenta, o sensor de oxigênio dissolvido para que os dados pudessem ser obtidos em tempo real e assim manter a confiabilidade dos resultados. O processo se deu a partir de desoxigenação e reoxigenação da solução por reagentes, simulando o processo natural. Ensaios como esse podem ser adaptados para fins didáticos para melhor entender o processo de recuperação do oxigênio dissolvido no corpo d'água.

A partir dos resultados obtidos e comparados aos trabalhos em literatura, os dados aderiram corretamente ao modelo, com correlação e coeficiente de determinação próximos a 1, constatou-se que a massas de reagentes e o tempo de monitoramento precisam ser criteriosamente ajustados para a determinação recuperação de OD. Além disso os experimentos em laboratório apontam ser possível reproduzir a reoxigenação pelo método de perturbação do equilíbrio, propondo-se sua adaptação as condições do curso d'água em relação a proporção das massas e o tempo de reaeração para um futuro experimento em campo.

Adicionalmente, para o experimento em campo, após o fim do ensaio de desoxigenação e reoxigenação, recomenda-se um ensaio com traçador salino o cloreto de sódio para a determinação da velocidade, vazão e coeficiente de dispersão longitudinal que serão monitorados por sensor de condutividade elétrica. Tais informações serão usadas na determinação do coeficiente de reoxigenação.



REFERÊNCIAS

1. ALMEIDA, I. R., PENNER, G. C. Caracterização da bacia do igarapé Sapucajuba (Belém-PA). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 29. São Paulo, 2017, Anais [...]. São Paulo: ABES: AESABSP, 2017.
2. ALMEIDA, Juliano da Silva Martins. Condições de oxigenação e desoxigenação de um trecho do rio uberabinha no município de Uberlândia. 2013. 80 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
3. ÁVILA, Lauren Cortezia. Modelagem da qualidade da água utilizando coeficientes bibliográficos e experimentais: aplicação ao Rio Vacacaí Mirim. 2014. 99 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
4. AYRES MANUEL. Elementos de bioestatística. 2ª edição. Belém: Universidade Federal do Pará, 2012.
5. BENNETT, James P.; RATHBUN, R. E. Reaeration in open-channel flow. US Government Printing Office, 1972.
6. BICUDO, J. R.; JAMES, A. (1989) Measurement of reaeration in streams: Comparison of Techniques. Journal Environmental Engineering, 115(5), 992-1010.
7. COSTA, Andre Lima. Monitoramento mensal da vazão dos igarapés Tucunduba e Sapucajuba no campus da UFPA em Belém-PA. 2020. Relatório Técnico do Programa voluntário de iniciação científica – PIVIC. Belém. 2020.
8. FREITAS, Myrlla Oliveira. Condições de oxigenação e desoxigenação do trecho perenizado do Rio Piancó-Piranhas-Açu. 2016. 30 f. Tese de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal.
9. FORMENTINI, Thiago Augusto. Coeficientes de desoxigenação e de reaeração superficial em trechos do rio Vacacaí Mirim. 2010. 90 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área e concentração em recursos hídricos e saneamento ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
10. GIORGETTI, Marcius Fantozzi. Modelagem Física e Matemática de Processos Ambientais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 4, 2008, Serra Negra. Notas de Aula. Serra Negra: Marcius F. Giorgetti, 2008.
11. GONÇALVES, J. C. S. I. Avaliação de metodologias para a determinação indireta do coeficiente de reoxigenação superficial (K₂). 2012. 124 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
12. GONÇALVES, J. C. S. I. et al. Reoxigenação superficial e sumidouro físico de oxigênio dissolvido em um tanque agitado por jatos. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, n. 3, p. 231-240, 2013.
13. GRAEPIN, Cristiane. Viabilidade da utilização do método delta aproximado para determinação do coeficiente de reaeração em rios. 2016. 132 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, área de concentração em recursos hídricos) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
14. LABQUEST 2. Vernier, 2015. Disponível em: <<https://www.vernier.com/product/labquest-2/>>. Acesso em: 17 de agosto de 2020.



15. LESSA, L. C. P et al. PLANO DE MONITORAMENTO AMBIENTAL DA QUALIDADE DE ÁGUAS DO CURSO D'ÁGUA SAPUCAJUBA – BELÉM/PA. 2017. In: Congresso internacional RESAG, 3, 2017, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: RESAG, 2017.
16. MATOS, Thiago Rodrigues. Determinação do tempo de concentração em microbacia hidrográfica utilizando traçador salino: estudo de caso da bacia hidrográfica do igarapé Sapucajuba. 2019. 93 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém.
17. MENEZES, Joao Paulo Cunha de et al. Deoxygenation rate, reaeration and potential for self-purification of a small tropical urban stream. *Revista Ambiente & Água*, v. 10, n. 4, p. 748-757, 2015.
18. PINHEIRO, A.; FAHT G.; SILVA R. M. Determinação do coeficiente de reaeração em rios através do uso de traçador gasoso GLP. *Eng Sanit Ambient*, v. 17, n. 1, p 107-115, 2012.
19. PINHEIRO, Hemerson Donizete. Reoxigenação superficial da água em canais abertos: o efeito da recirculação produzida por bombeamento. 2017. 253 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
20. QUEIROZ, F. M.; MATOS, A. T.; VON SPERLING, M. Estimativa do coeficiente de reaeração da água em canal raso de fundo deslizante. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 20, n. 1, p. 79–88, 2015.
21. ROSA, Nathália Cristina Martins. Estimativa dos coeficientes de desoxigenação e reaeração em trechos do rio Itabirito – MG. 2019. 91 f. Tese de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
22. VERNIER OPTICAL DO PROBE. Vernier, 2016. Disponível em: < <https://www.vernier.com/product/vernier-optical-do-probe/>>. Acesso em: 17 de agosto de 2020.
23. VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 4ª edição. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.
24. PEREIRA Munique Rodrigues. Uso da luminescência como ferramenta de detecção de oxigênio dissolvido para verificação da qualidade de água bruta superficial. 2016. 46 f. Tese de conclusão de curso (Química industrial) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.