AVALIAÇÃO DE TRATABILIDADE DOS ÉSTERES EM LODOS ATIVADOS E SUA TOXICIDADE - USO DA RESPIROMETRIA NO TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

José Gilson Santos Fernandes[(1)]
Mestre em Engenharia Civil na área de Recursos Hídricos/Sub-área Engenharia Sanitária pela Universidade Federal de Campina Grande- PB. Químico Industrial pela Universidade Estadual da Paraíba.
Cassia dos Santos Lopes[(2)]
Engenharia Química pela UNIFACS. Especialista em Recursos Hídricos pelo SENAI.
Mauro Freitas Salatiel[(n)]
Engenheiro Químico pela Universidade Federal da Bahia. Lider da área de efluentes/ETE da Cetrel.
Maria Cecília Leite de Souza Pereira[(n)]
Engenharia Química pelo IFBA. Estaria da área de efluentes da ETE da Cetrel.

Endereço[(1)]**:** Via Atlântica, Km 9 - Polo Industrial - Camaçari - BA - 42810-000 - Brasil - Tel: +55 (71) 98117-2357 e +55 (71) 98122-8886 - e-mail: fernandes@cetrel.com

RESUMO

A técnica da respirometria tem sido utilizada para avaliar a qualidade dos efluentes industriais enviados para tratamento nas estações e, tem sido desafio para os técnicos que operam estas plantas, em especial quando ocorre a chegada de efluentes contaminadas com espécies químicas que demandam controle ambiental e de processo, neste caso, efluentes contendo ésteres. Os afluentes às estações com elevadas concentrações destes contaminantes podem trazer grandes problemas para o sistema de lodos ativados. O presente trabalho apresenta uma avaliação de tratabilidade dos ésteres na principal etapa de tratamento dos efluentes, neste caso, os reatores biológicos e, possíveis impactos na qualidade do efluente tratado final. Neste trabalho foi possível, através da técnica de respirométria em planta piloto, avaliar o perfil respirométrico do licor misto, na presença de ésteres, quanto a possível toxicidade em diversas concentrações, de modo a identificar queda na qualidade do efluente tratado final.

PALAVRAS-CHAVE: Toxicidade de efluentes, respirometria, ésteres.

INTRODUÇÃO

A Cetrel oferece soluções ambientais em água, efluentes, reuso, destinação térmica de resíduos, gerenciamento e remediação de áreas contaminadas, monitoramento ambiental e gestão de dados ambientais. A empresa possui certificação nas normas internacionais ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001 e ISO 17025. Sua estação de tratamento recebe águas residuárias industriais da indústria farmacêutica, de cosméticos, química, petroquímica, óleo e gás, alimentos, bebidas, papel e celulose, mineração e siderurgia, dentre outras.

Com início das operações em 1978, junto ao Polo Industrial de Camaçari (BA), a Cetrel é responsável também pelo fornecimento de água (clarificada, desmineralizada, industrial e potável), tratamento e disposição final de efluentes, além dos programas de gestão dos recursos hídricos e de monitoramento ambiental (água, ar e solo) do Polo, utilizando ainda um modelo compartilhado de gestão do sistema de tratamento de efluentes.

A Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) da Cetrel vem tratando, de forma contínua, efluentes industriais provenientes de mais de 70 empresas do Polo Industrial de Camaçari (PIC). A tecnologia de tratamento de efluentes é por processo biológico aeróbico por lodos ativados.

Alguns poluentes presentes nestes efluentes em determinadas concentrações podem inibir ou promover toxicidade no sistema de tratamento de efluentes por lodos ativados. Consequentemente, a qualidade do efluente final tratado na ETE pode ficar comprometida.

Especificamente, no caso de correntes afluentes à Cetrel, que são provenientes das empresas do Polo, uma das principais preocupações é o possível impacto na estação de tratamento de efluentes associados ao incremento de poluentes que possam trazer demandas de controle de processo.

A avaliação de tratabilidade surge como alternativa para conhecer os aspectos qualitativos e quantitativos da capacidade de tratamento da ETE da Cetrel quando da presença de poluentes, a partir de estudos específicos em planta piloto, com uso da técnica da respirometria. Em sistemas aeróbicos de tratamento de efluentes, como no caso da Cetrel, há o consumo de oxigênio por parte da colônia de microorganismos, em especial bactérias heterotróficas e autotróficas, para oxidação da matéria orgânica e nitrogenada, respectivamente, sendo nesta avaliação de tratabilidade oportunamente avaliar estes microorganismos responsáveis pela oxidação do ciclo do carbono e do nitrogênio, quando da presença dos ésteres.

A título de exemplo, a entrada de uma concentração ligeiramente fora do esperado de um dado poluente pode trazer variações da TCO, indicando a presença de material potencialmente tóxico que possivelmente irá abalar a estabilidade operacional do sistema de tratamento (FERNANDES et al. 2001).

OBJETIVOS

Verificar se os ésteres podem causar algum tipo de impactos no desempenho do processo biológico de tratamento e na qualidade do efluente final tratado.

Obter e avaliar o perfil respirométrico do licor misto dos reatores biológicos da ETE quanto aos organismos autotróficos quando da presença dos ésteres.

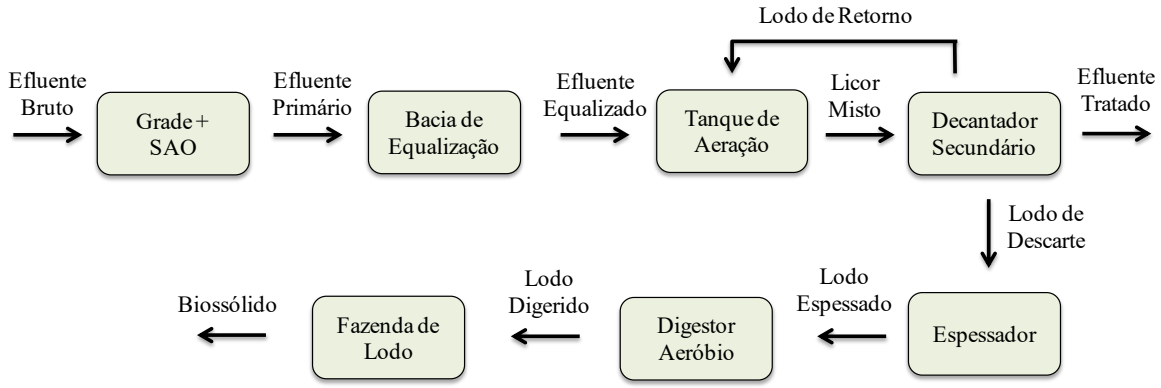
Avaliar os efeitos da toxicidade/inibição aguda na presença dos ésteres.

Estabelecer a concentração máxima dos ésteres a ser tratada na Estação de Tratamento de Efluentes da Cetrel.

METODOLOGIA

Abaixo na Figura 1, um resumo das principais etapas de tratamento da ETE.

Figura 1 – Fluxograma da Estação de Tratamento de Efluentes da Cetrel



Fonte: Autoria própria, 2025.

Em sistemas aeróbios de tratamento de efluentes há o consumo de oxigênio por parte da colônia de microorganismos, em especial bactérias, para oxidação da matéria orgânica ou nitrogenada. A colônia de bactérias é composta principalmente por organismos heterótrofos e autótrofos. Ambos os organismos utilizam o oxigênio dissolvido para crescimento e sobrevivência.

O metabolismo bacteriano é constituído de duas partes, a saber, catabolismo e anabolismo. A transformação química do material orgânico é chamada de catabolismo, representando 1/3 do metabolismo. O restante, (2/3) denominado anabolismo, é a síntese ou assimilação de nova massa celular (HAANDEL e MARAIS, 1999).

É de fundamental importância entender a relação entre a absorção de oxigênio, dado pela taxa de consumo de oxigênio (TCO) e, a oxidação do material orgânico e nitrogenado pelos organismos. Para essa oxidação, faz-se referência a respiração exógena, onde haverá aumento e variação da TCO para degradação dos substratos presentes. Quando há decaimento e uma constância no valor da TCO, tem-se a respiração endógena que é o oxigênio necessário para sustentar as funções das células, isto é, para a respiração do lodo ativado (ANDREOTTOLA et al. 2005).

Para os organismos heterotróficos, a relação de oxidação se dá na proporção de 1:1, ou seja, 1 unidade de matéria orgânica solúvel biodegradável que será oxidada vai requerer 1 unidade de oxigênio para essa oxidação, em concentração.

Já para os organismos autotróficos nitrificantes, essa relação é diferente. Neste caso, para a oxidação de 1 mg/L de nitrogênio na forma de amônia são requeridos 4,57 mg/L de oxigênio caso seja conduzida a nitrificação convencional (SILVA FILHO et al. 2015).

De posse do conhecimento da TCO para oxidação dos materiais orgânico e nitrogenado, somado ao conhecimento prévio da estequiometria de rendimento celular desses organismos, é possível aplicar a respirometria para avaliação dos metabolismos heterotrófico e autotrófico (SILVA FILHO et al. 2015).

RESPIROMETRIA

"Os primeiros a se ocuparem da técnica respirométrica foram Jenkins (1960) e Montgomery (1967), tendo como base seus próprios estudos experimentais sobre a quantificação do consumo de oxigênio dissolvido em sistemas de lodos ativados" segundo Andreotolla et al. (2005).

Em consonância com Spanjers (1995; 1999) *apud* Silva Filho et al. (2015) a respirometria é definida como:

> Uma técnica capaz de auxiliar na caracterização dos parâmetros cinéticos de populações microbianas mistas ou puras através da medida do consumo de algum oxidante mediante pulso anterior de um substrato específico, que, por sua vez, será metabolizado.

Essa ferramenta é útil para operações de estações de tratamento de efluentes, na predição de variações que ocorreram no processo, de modo a antecipar e minimizar seus efeitos e, também, acompanhamento simultâneo do desempenho do sistema, consistindo em uma técnica que avalia o desempenho dos processos biológicos a partir da TCO dos organismos.

De forma mais específica e em concordância com a APHA (2017) os métodos respirométricos são úteis para:

> Avaliar a biodegradação de produtos químicos específicos, a tratabilidade dos resíduos industriais orgânicos, o efeito de quantidades conhecidas de compostos tóxicos na reação de consumo de oxigênio de uma água de teste ou de uma substância química orgânica, a concentração na qual um poluente ou efluente inibe de forma mensurável a degradação biológica.

O princípio de funcionamento do respirômetro baseia-se no consumo de oxigênio dissolvido (OD). São estabelecidos limites superior e inferior para a concentração de OD, composto por períodos com e sem aeração. Durante os períodos com aeração, a concentração de OD sobe até atingir seu valor máximo (OD_{sup}), quando, então, a aeração é interrompida, havendo redução na concentração de OD pelas bactérias, até chegar à concentração de OD mínima (OD_{inf}), pré-estabelecida.

Para realização do experimento foi utilizada a técnica de respirometria para determinar a ocorrência de possível toxicidade e/ou inibição ao tratamento biológico.

Através da respirometria e, consequentemente, a determinação da TCO é possível evidenciar uma possível redução da atividade metabólica dos microorganismos autotróficos e/ou heterotróficos (toxicidade) logo após a adição de poluentes específicos, neste caso, os ésteres.

A Figura 2 mostra a planta piloto utilizada para realização da avaliação de tratabilidade.

Figura 2 – Planta Piloto utilizada nos experimentos.

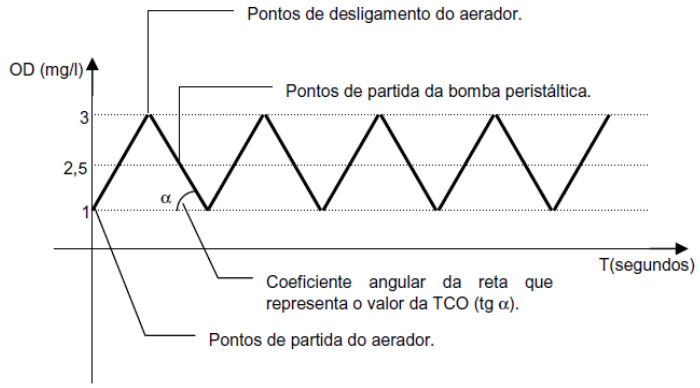


Fonte: Autoria própria, 2025.

Para realização dos testes será utilizada a técnica de determinação da Taxa de Consumo de Oxigênio - TCO. Este método permite determinar a ocorrência de possível toxicidade, que promove a redução da atividade metabólica dos microrganismos logo após a adição de poluentes específicos.

O princípio de funcionamento do respirômetro baseia-se no consumo de oxigênio dissolvido (OD), sendo o perfil ilustrado na Figura 3. São estabelecidos limites superior e inferior para a concentração de OD, composto por períodos com e sem aeração. Durante os períodos com aeração, a concentração de OD sobe até atingir seu valor máximo (ODsup), quando, então, a aeração é interrompida, havendo redução na concentração de OD pelas bactérias, até chegar à concentração de OD mínima (ODinf), pré-estabelecida.

Figura 3 – Perfil do oxigênio dissolvido no cálculo da TCO.



Fonte: Autoria própria, 2008.

Para o caso da Figura 3, a TCO representará a inclinação durante o consumo de oxigênio dissolvido entre 1 e 3 mg/L, assim o comportamento do gráfico assemelha-se a um “zig-zag” entre os valores 1 e 3 (FERNANDES et al. 2001). A Equação 1 resume o cálculo da TCO.

$$TCO = (ODsup - ODinf)/(\Delta t) \quad (1)$$

Onde:

TCO = Taxa de Consumo de Oxigênio (mg/L.h).
ODsup = Oxigênio Dissolvido superior (mg/L).
ODinf = Oxigênio Dissolvido inferior (mg/L).
Δt = Variação de tempo.

TOXICIDADE E/OU INIBIÇÃO

Segundo Goldstein (1988) *apud* Santos (2007), "a toxicidade é uma propriedade inerente à substância ou ao agente químico que produz efeitos danosos a um organismo quando este se expõe, durante um determinado tempo, a uma concentração específica".

Os testes de toxicidade de compostos específicos são de grande relevância no controle de estações de tratamento, pois podem evitar o colapso permanentemente ou temporário (inibição), da atividade do lodo (SANTOS, 2007). A inibição de funções vitais é a maneira mais usada para avaliar efeitos tóxicos. A respiração é um parâmetro confiável para se monitorar a toxidez aguda em microorganismos (GUIMARÃES, 1995, *apud* SANTOS, 2007).

A respirometria permite a avaliação das toxicidades aguda e crônica, que são assim classificadas com base no tempo de resposta. A aguda é aquela em que os efeitos tóxicos são produzidos por uma única ou por múltiplas exposições a uma substância, por um breve período, inferior a um dia. Geralmente as manifestações ocorrem rapidamente. Já a crônica é aquela em que os efeitos tóxicos ocorrem depois de repetidas exposições, por um longo período (FIOCRUZ, 2018).

Para ajuizamento do efeito de toxicidade, a TCO serve como parâmetro fundamental. Materiais tóxicos afetam a velocidade dos processos metabólicos das bactérias, afetando a TCO diretamente (SANTOS, 2007). Haandel e Marais (1999) *apud* Fernandes et al. (2001) afirmam que uma diminuição do valor da TCO, sem redução da carga orgânica aplicada, pode ser indicativa da presença de substâncias tóxicas ou inibidoras na entrada de um dado processo. Nesse caso o teste respirométrico é também chamado de toximetria.

A remoção do material tóxico no sistema de lodo ativado em princípio pode ocorrer por três mecanismos distintos:

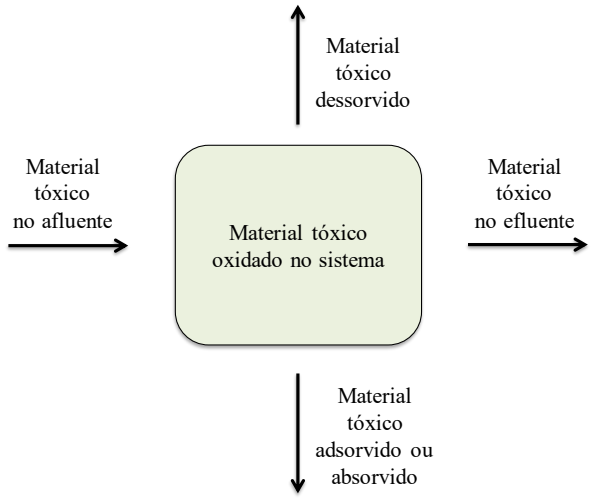
O primeiro é a transformação – onde ocorre a oxidação biológica da substância tóxica com formação de novos produtos.

O segundo é a dessorção – onde ocorre a transferência do material tóxico do licor misto para o ar.

O terceiro e último é a adsorção ou absorção – que é a transferência do material tóxico da fase líquida para fase sólida, denominada lodo.

A Figura 4 apresenta esquematicamente os três mecanismos. Se nenhum dos mecanismos ocorrerem, o material será lançado no efluente tratado final. Nesta avaliação, em se tratando de compostos orgânicos espera-se que ocorra oxidação do material nos reatores e sua dessorção para o ar nas unidades de tratamento.

Figura 4 – Representação dos mecanismos de remoção de material tóxico e/ou inibidor.

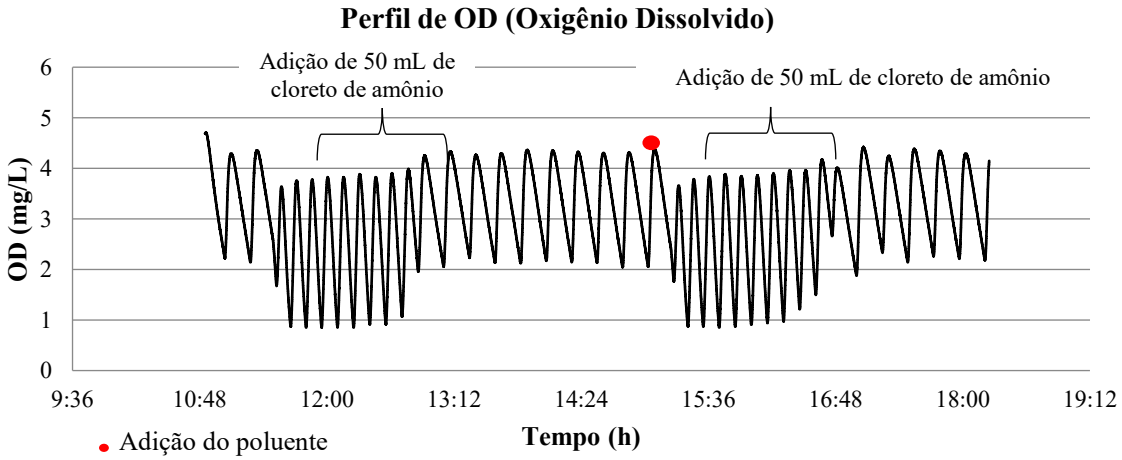


Fonte: FERNANDES et al. 2015.

Nesta avaliação de tratabilidade, em se tratando de compostos inorgânicos do ciclo do enxofre, espera-se que ocorra preferencialmente a oxidação do material nos reatores e sua dessorção para o ar nas unidades de tratamento biológica por lodos ativados com aeração prolongada.

Para evidenciar os efeitos de toxicidade, os perfis do OD, expostos nas Figuras 5 e 6, são excelentes ferramentas. A Figura 5 traz o resultado do perfil de OD durante os experimentos. Observa-se que o comportamento das bactérias frente à adição de cloreto de amônio foi semelhante antes e após a adição dele. Ou seja, essa adição não demandou maior atividade metabólica, como também não ocorreu redução desta atividade por parte desses microorganismos.

Figura 5 – Resultado do OD durante os ensaios.



Fonte: Autoria própria, 2025.

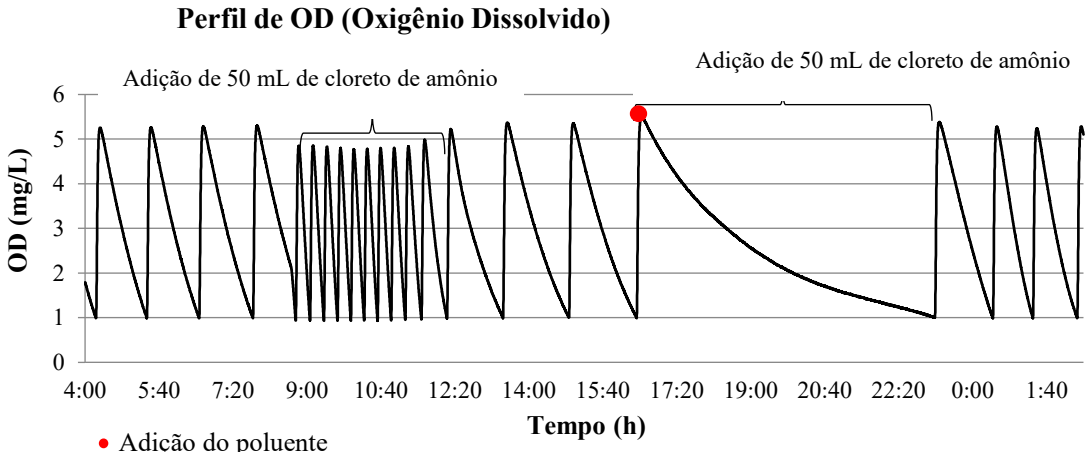
Foi sugerido que o decaimento atendesse o intervalo de 5 minutos e não o set-point de 1 a 3 mg/L, na respiração endógena, que sugere um maior acompanhamento do consumo do OD. Quando da adição do cloreto de amônio, a respirometria das autotróficas atinge o set-point em menos de 5 minutos, por isso há um comportamento distinto associado a atividade metabólica dos microorganismos.

Já no ensaio com concentrações mais elevada de cloreto de amônio, o perfil de OD foi modificado após a adição do poluente. A condicional de tempo de 5 minutos foi desabilitada no *software* de modo a acompanhar a

inclinação nas fases endógena e quando da adição do poluente, para verificar a influência dele nos microorganismos.

Nota-se, pela análise da Figura 6, que o tempo exigido pelas bactérias autotróficas pós-adição do poluente foi bem maior para degradar a mesma concentração de cloreto de amônio. Isso é reflexo da inibição causada pelo poluente e que tornou a oxidação do material nitrogenado de mais difícil assimilação.

Figura 6 – Resultado do OD durante os ensaios.



Fonte: Autoria própria, 2025.

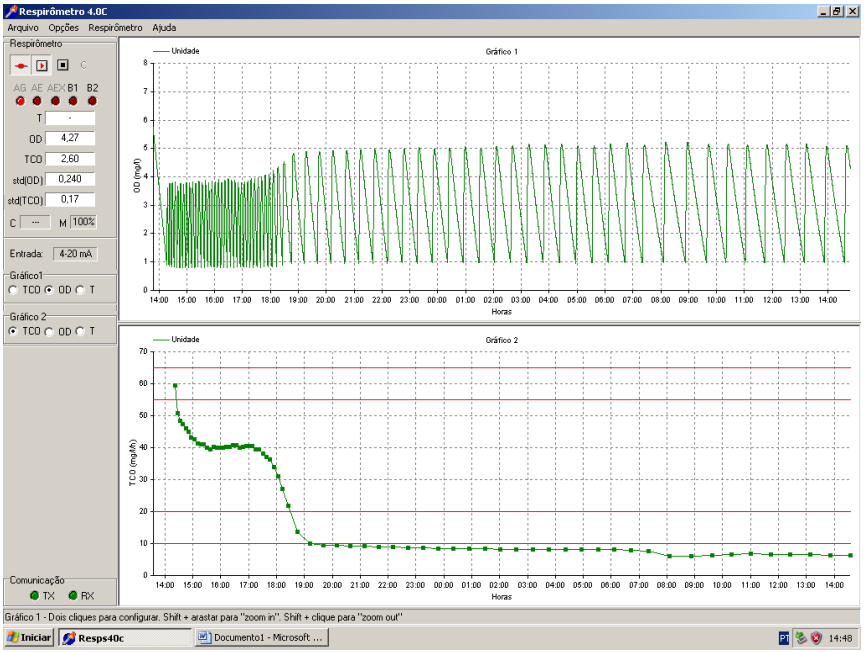
A remoção do material tóxico no sistema de lodo ativado em princípio pode ocorrer por três mecanismos distintos. O primeiro é a destruição, onde ocorre a oxidação biológica da substância tóxica. O segundo é a transferência do material tóxico do licor misto para o ar, denominado de dessorção. O terceiro e último é a adsorção ou absorção que é a transferência do material tóxico da fase líquida para fase sólida, denominado lodo (CETREL, 2018).
Se nenhum dos mecanismos ocorrerem, o material será lançado no efluente tratado final. Em se tratando dos éstres espera-se que ocorra a oxidação para os compostos nos reatores biológicos estritamente aeróbios.

Os ensaios foram realizados sob aquecimento de modo a refletir com fidelidade a temperatura em escala real, que opera na faixa de 28°C a 37°C, pois “a temperatura exerce dois efeitos significantes sobre a população microbiana no lodo: (1) afeta a taxa de difusão de substratos e nutrientes na célula bacteriana e (2) afeta a taxa da atividade enzimática”, em consonância com PUC (2018). Nos reatores, foi utilizado o licor misto (poluente e/ou substrato + lodo ativado) proveniente do sistema de tratamento por lodos ativados, pois representam fielmente as condições de tratamento de uma ETE.

Inicialmente, o licor misto é adicionado aos reatores e a respiração endógena é atingida, com a TCO de menor valor, aproximadamente 10 mg/L.h. Em seguida, adiciona-se o poluente ou efluente, denominado de substrato. Após a utilização do substrato e o retorno à fase endógena, obtêm-se o perfil respirométrico.

Um exemplo de respirograma obtido nos ensaios em escala de bancada está ilustrado na Figura 7 que apresenta o perfil respirométrico do licor misto do reator em planta piloto. Na tela da IHM, o gráfico superior, temos o perfil do oxigênio dissolvido no meio e com o decaimento do mesmo, o cálculo da Taxa de Consumo de Oxigênio - TCO, conforme Equação 1, é realizado, gerando pontos no gráfico inferior.

Figura 7 – Respirograma do perfil respirométrico da fase endógena do lodo do licor misto.



Fonte: Autoria própria, 2021.

ARANJO EXPERIMENTAL

Para simular o sistema de tratamento biológico por lodos ativados foi utilizado uma planta piloto em escala de bancada laboratorial, dotado de um reator em acrílico com volume de seis litros para simular o que ocorre no tanque de aeração em escala real, sendo utilizado um respirômetro para geração dos respectivos respirogramas.

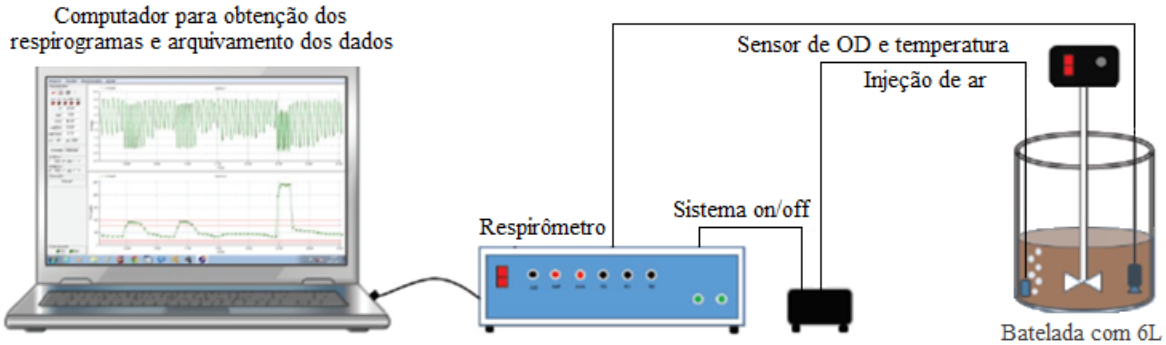
O respirômetro é composto de um computador e unidades periféricas com destaque para o reator biológico, sonda de oxigênio dissolvido do tipo ótico dotado de sensor de temperatura, agitador, aerador e aquecedor. Neste experimento foi utilizado o respirômetro Beluga®.

No reator, foi utilizado o licor misto (lodo ativado) proveniente do sistema de tratamento por lodos ativados em escala real, pois representam fielmente as condições de tratamento da ETE.

A agitação e aeração promovem a homogeneização e oxigenação do licor misto, nessa ordem. O sensor de OD acompanha as variações de oxigênio dissolvido no meio, o qual indica o momento para adição do poluente e/ou substrato.

A Figura 8 mostra um esquema simplificado do respirômetro Beluga® e suas unidades periféricas.

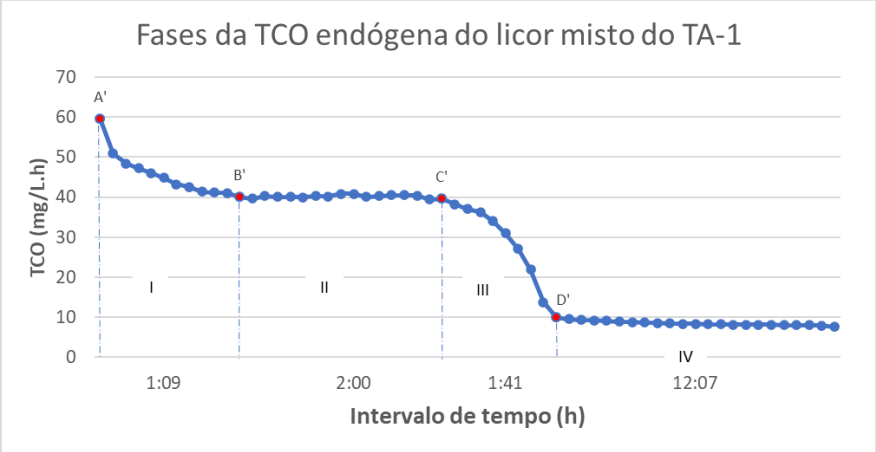
Figura 8 – Esquemático do equipamento utilizado.



Fonte: Adaptado de SILVA FILHO et al. 2015.

A Figura 9 mostra de forma simplificada, as diversas fases da respiração exógena e endógena do licor misto por lodos ativados de um dos reatores em escala real. As áreas identificadas podem ser resumidas conforme considerações abaixo.

Figura 9: Fases da respiração endógena do licor misto do.TA-1



Fonte: Autoria própria, 2025

A TCO máxima Ponto (A') obtida foi de aproximadamente 60 mg/L.h (59,48 mg/L.h).

Área (I)/TCO exógena – Nas condições aeróbias, a TCO cai de 59,48 mg/L.h (ponto A') para 39,94mg/L.h (ponto B') em um período de 1:09h. Esta área representa a oxidação de compostos que foram metabolizados no novo ambiente com maior disponibilidade de oxigênio dissolvido. Importante destacar que em escala real o licor misto opera na maior parte do tempo com uma concentração média de oxigênio dissolvido na saída do reator inferior a 0,5 mg/L.

Área (II)/TCO exógena – Nas condições aeróbias, a TCO se manteve estável na faixa de aproximadamente 40 mg/L.h em um período de 2:00h. Esta área representa a oxidação de compostos lentamente biodegradável.

Área (III)/TCO exógena – Nas condições aeróbias, a TCO cai de 38,28 mg/L.h (ponto C') para 9,90 mg/L.h (ponto D') em um período de 1:41h. Esta área representa o final da oxidação dos compostos lentamente biodegradáveis.

Área (IV)/TCO endógena –. Esta área representa a fase endógena do lodo. Nesta área, a taxa de decaimento do resíduo endógeno é lenta e, pode ocorrer por um longo período. Nesta fase a biomassa de microorganismos respira para manutenção das suas principais funções vitais.

CARACTERÍSTICAS DOS COMPOSTOS

ÉSTERES

- Fórmula molecular: C12H22O
- Peso molecular: 198 g/mol
- Estado físico = Líquido
- Cor = Incolor
- Odor = Éster
- Solubilidade em água: Baixa.
- Viscosidade cinemática = 2,11 mm2/s

CLORETO DE AMÔNIA

- Fórmula molecular: NH4Cl
- Peso molecular: 53,5 g/mol.

- Estado físico: Sólido.
- Cor: Branco.
- Solubilidade em água: 39,6 g/100 mL de água a 25 °C.
- Densidade: 1,5274 kg/L = 1,5274 g/mL.

RESULTADOS OBTIDOS

Foi realizado uma série de experimentos representando o perfil respirométrico das bactérias autotróficas. Para os microorganismos autotróficos foi utilizado o substrato padrão de cloreto de amônia.

A Tabela 1 apresenta as concentrações dos testes realizados com os ésteres com estimativas das concentrações do composto no efluente orgânico durante as campanhas de produção. Considerando um fator de diluição de aproximadamente 350 chega-se à concentração de ésteres variando na entrada da ETE de 0,00060 a 0,06667mg/L.

A tabela abaixo representa um resumo das concentrações testadas nos experimentos.

Tabela 1: Concetrações testadas de Ésteres

Vazão ETE (m³/h)				**3500**
Vazão Cliente (m³/h)				**10**
Diluição				**C1 . V1 = C2 . V2**
Fator de Diluição				**350**
Experimento	**Concentração Padrão testada (mg/L)**	**Volume (mL)**	**Concentração de Ésteres na entrada da ETE (mg/L)**	**Concentração no Cliente (mg/L)**
1	0,036	100	0,00060	0,21
2	0,500	100	0,00833	2,92
3	0,950	100	0,01583	5,54
4	2,000	100	0,03333	11,67
5	4,000	100	0,06667	23,33

Experimento 1 - 0,00060 mg/L de Ésteres na entrada da ETE

No experimento 1, foi adicionado um volume de 100 mL a uma concentração de 0,036mg/L de ésteres ao reator de 6L, o que corresponde a uma concetração estimada de 0,00060 mg/L na entrada da ETE.

O licor misto utilizado no experimento foi proveniente do Tanque de Aeração em escala real denominado TA-

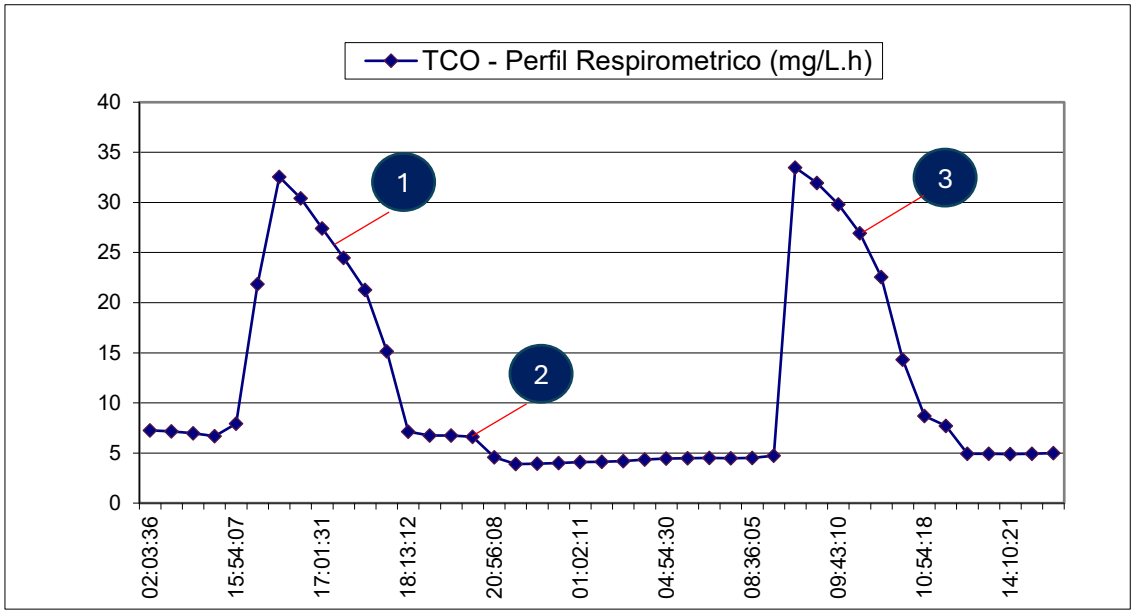
A Figura 10 abaixo traz o respirograma referente a esse ensaio.

A primeira área (1) é referente a adição de Cloreto de Amônia.

A segunda área (2) é o resultado da adição do composto de Ésteres

A terceira área (3) adição de Cloreto de Amônia.

Figura 10: Perfil respirométrico dos Ésteres na concetração de 0,00060 mg/L no licor misto.



Inicialmente foi adicionado o licor misto do TA-1 até observar o perfil de queda da TCO endógena, indicando que todo o material solúvel foi oxidado e as reservas alimentares esgotadas. Na sequência foi adicionado o substrato padrão, neste caso o cloreto de amônia para avaliar o perfil respirometrico das bactérias autotróficas responsáveis pelo ciclo do nitrogênio e considerada as mais sensíveis frente ao tratamento biológico na ETE da Cetrel.

A Área 1 apresenta o perfil respirométrico com uma TCO máxima de 32,55 mg/L.h, representando a oxidação do material nitrogenado adicionado.

Na Área 2, durante a fase endógena, foi adicionado o composto de ésteres. Com a adição observa-se que o perfil da TCO que se apresentava abaixo de 10 mg/L.h caiu mais ainda, indicando que o composto adicionado está promovendo redução na TCO endógena, mas não suficiente para promover toxicidade no metabolismo das bactérias autotróficas do licor misto da ETE da Cetrel.

Na Área 3 ocorreu a adição do cloreto de amônia. O valor da TCO máxima foi de 33,48 mg/L.h, não indicando toxicidade aguda sobre os organismos autotróficos.

Experimento 2 – 0,00833 mg/L de Ésteres na entrada da ETE

No experimento 2 foi adicionado um volume de 100 mL a uma concentração de 0,5 mg/L de ésteres ao reator de 6 L, o que corresponde a uma concentração estimada de 0,00833 mg/L na entrada da ETE.

O licor misto utilizado no experimento foi proveniente do Tanque de Aeração em escala real denominado de TA-1.

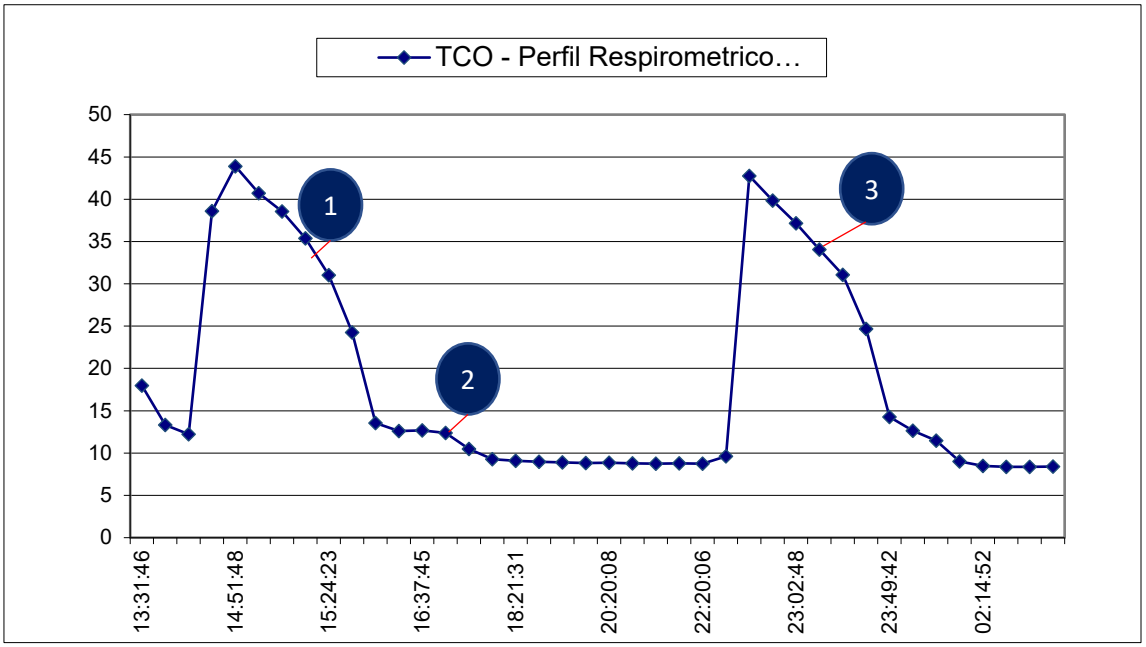
A Figura 11 abaixo traz o respirograma referente a esse ensaio.

A primeira área (1) é referente a adição de Cloreto de Amônia.

A segunda área (2) é o resultado da adição do Ésteres

A terceira área (3) adição de Cloreto de Amônia.

Figura 11: Perfil respirométrico dos Ésteres na concetração de 0,00833 mg/L no licor misto.



Inicialmente foi adicionado o licor misto do TA-1 até observar o perfil de queda da TCO endógena indicando que todo o material solúvel foi oxidado e as reservas alimentares esgotadas. Na sequência foi adicionado o substrato padrão, neste caso o cloreto de amônia para avaliar o perfil respirometrico das bactérias autotróficas responsáveis pelo ciclo do nitrogênio e considerada as mais sensíveis frente ao tratamento biológico na ETE da Cetrel.

A Área 1 apresenta o perfil respirométrico com uma TCO máxima de 43,90 mg/L.h, representando a oxidação do material nitrogenado adicionado.

Na Área 2, durante a fase endógena, foi adicionado os ésteres. Com a adição observa-se que o perfil da TCO que se apresentava abaixo de 10 mg/L.h caiu mais ainda, indicando que o composto adicionado está promovendo redução na TCO endógena.

Na Área 3 ocorreu a adição do cloreto de amônia. O valor da TCO máxima foi de 42,77 mg/L.h. Foi identificado uma redução no metabolismo das bactérias autotróficas de 3% do licor misto da ETE da Cetrel.

Experimento 3 – 0,01583 mg/L de Ésteres na entrada da ETE

No experimento 3, foi adicionado um volume de 100 mL a uma concentração de 0,95 mg/L de ésteres ao reator de 6 L, o que corresponde a uma concentração estimada de 0,01583 mg/L na entrada da ETE.

O licor misto utilizado no experimento foi proveniente do Tanque de Aeração em escala real denominado de TA-1.

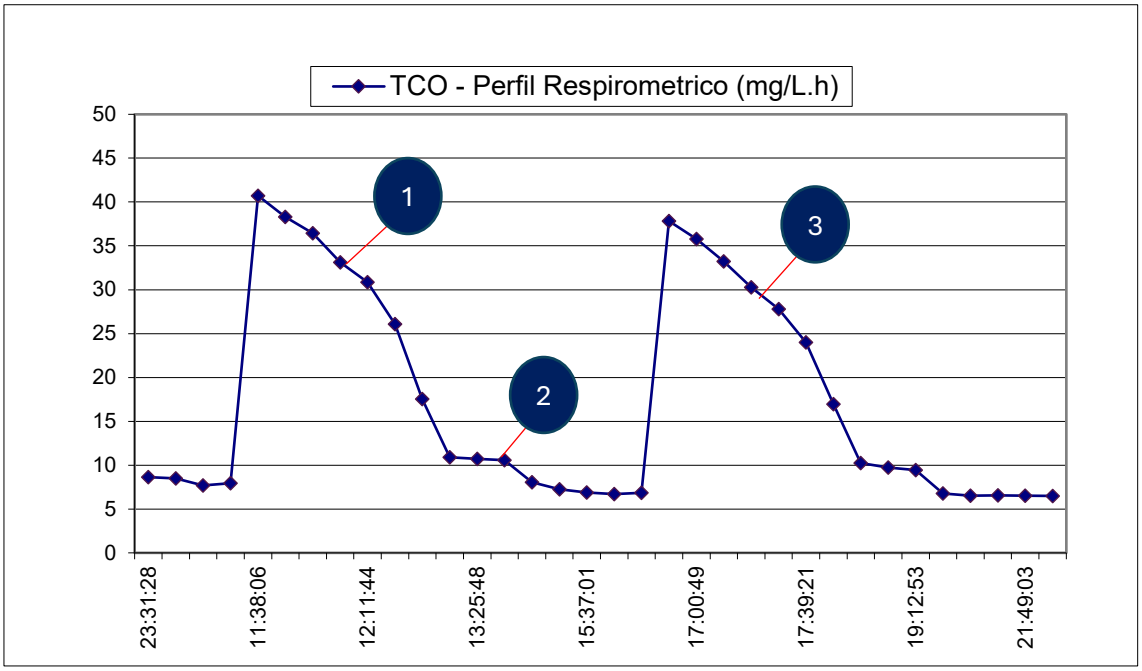
A Figura 12 abaixo traz o respirograma referente a esse ensaio.

A primeira área (1) é referente a adição de Cloreto de Amônia.

A segunda área (2) é o resultado da adição dos Ésteres

A terceira área (3) adição de Cloreto de Amônia.

Figura 12: Perfil respirométrico dos Ésteres na concetração de 0,01583 mg/no licor misto.



Inicialmente foi adicionado o licor misto do TA-1 até observar o perfil de queda da TCO endógena indicando que todo o material solúvel foi oxidado e as reservas alimentares esgotadas. Na sequência foi adicionado o substrato padrão, neste caso o cloreto de amônia para avaliar o perfil respirometrico das bactérias autotróficas responsáveis pelo ciclo do nitrogênio e considerada as mais sensíveis frente ao tratamento biológico na ETE da Cetrel.

A Área 1 apresenta o perfil respirométrico com uma TCO máxima de 40,72 mg/L.h, representando a oxidação do material nitrogenado adicionado.

Na Área 2, durante a fase endógena, foi adicionado o composto de ésteres. Com a adição observa-se que o perfil da TCO que se apresentava abaixo de 10 mg/L.h caiu mais ainda, indicando que o composto adicionado está promovendo redução na TCO endógena,

Na Área 3 ocorreu a adição do cloreto de amônia. O valor da TCO máxima foi de 37,81 mg/L.h. Foi identificado uma redução no metabolismo das bactérias autotróficas de 7% do licor misto da ETE da Cetrel.

Experimento 4 – 0,03333 mg/L de Ésteres na entrada da ETE

No experimento 4 foi adicionado um volume de 100 mL a uma concentração de 2,0 mg/L dos ésteres ao reator de 6 L, o que corresponde a uma concentração estimada de 0,03333 mg/L na entrada da ETE.

O licor misto utilizado no experimento foi proveniente do Tanque de Aeração em escala real denominado de TA-1.

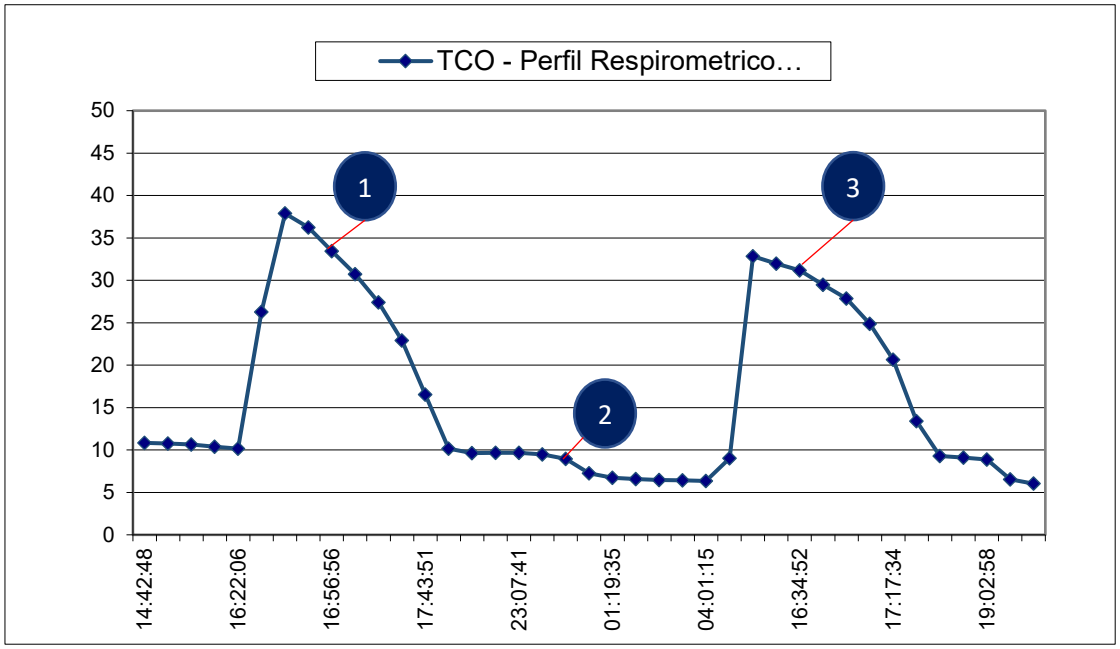
A Figura 13 abaixo traz o respirograma referente a esse ensaio.

A primeira área (1) é referente a adição de Cloreto de Amônia.

A segunda área (2) é o resultado da adição do composto de Ésteres

A terceira área (3) adição de Cloreto de Amônia.

Figura 13: Perfil respirométrico dos Ésteres na concetração de 0,03333 mg/L no licor misto.



Inicialmente foi adicionado o licor misto do TA-1 até observar o perfil de queda da TCO endógena indicando que todo o material solúvel foi oxidado e as reservas alimentares esgotadas. Na sequência foi adicionado o substrato padrão, neste caso o cloreto de amônia para avaliar o perfil respirometrico das bactérias autotróficas responsáveis pelo ciclo do nitrogênio e considerada as mais sensíveis frente ao tratamento biológico na ETE da Cetrel.

A Área 1 apresenta o perfil respirométrico com uma TCO máxima de 37,88 mg/L.h, representando a oxidação do material nitrogenado adicionado.

Na Área 2, durante a fase endógena foi adicionado os ésteres. Com a adição observa-se que o perfil da TCO que se apresentava abaixo de 10 mg/L.h caiu mais ainda, indicando que o composto adicionado está promovendo redução na TCO endógena.

Na Área 3 ocorreu a adição do cloreto de amônia. O valor da TCO máxima foi de 32,80 mg/L.h. Foi identificado uma redução no metabolismo das bactérias autotróficas de 13% do licor misto da ETE da Cetrel, neste caso, do TA-1.

Experimento 5 – 0,06667 mg/L de Ésteres na entrada da ETE

No experimento 5 foi adicionado um volume de 100 mL a uma concentração de 4,0 mg/L de ésteres ao reator de 6 L, o que corresponde a uma concentração estimada de 0,06667 mg/L na entrada da ETE.

O licor misto utilizado no experimento foi proveniente do Tanque de Aeração em escala real denominado de TA-1.

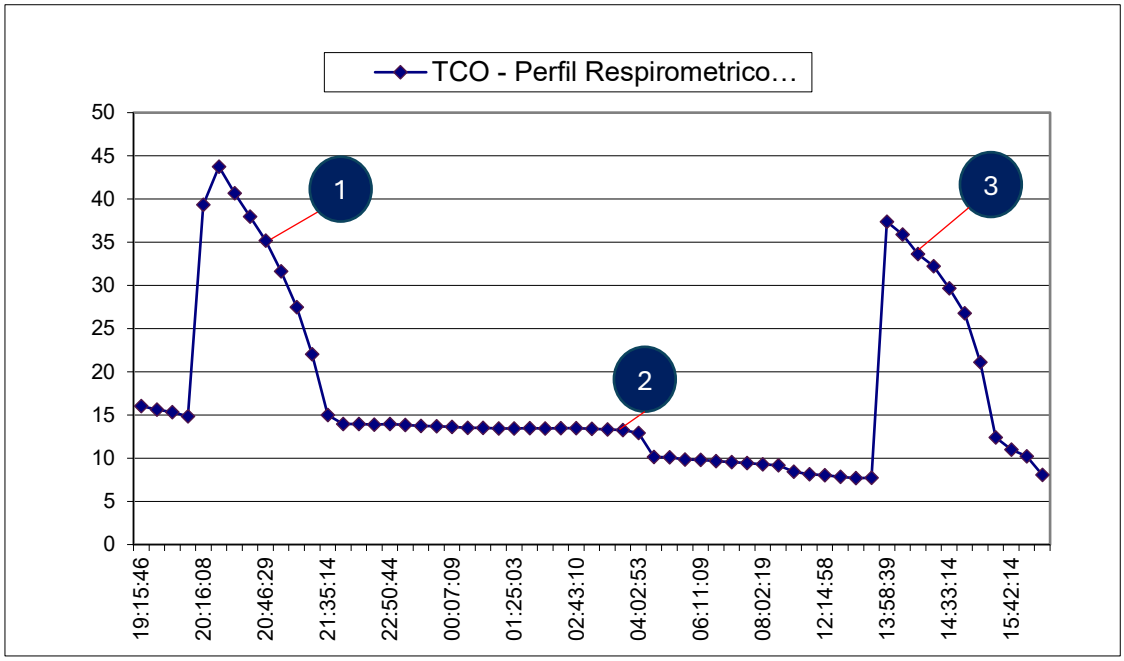
A Figura 14 abaixo traz o respirograma referente a esse ensaio.

A primeira área (1) é referente a adição de Cloreto de Amônia.

A segunda área (2) é o resultado da adição do composto de Ésteres

A terceira área (3) adição de Cloreto de Amônia.

Figura 14: Perfil respirométrico dos Ésteres na concetração de 0,06667 mg/L no licor misto.



Inicialmente foi adicionado o licor misto do TA-1 até observar o perfil de queda da TCO endógena indicando que todo o material solúvel foi oxidado e as reservas alimentares esgotadas. Na sequência foi adicionado o substrato padrão, neste caso o cloreto de amônia para avaliar o perfil respirometrico das bactérias autotróficas responsáveis pelo ciclo do nitrogênio e considerada as mais sensíveis frente ao tratamento biológico na ETE da Cetrel.

A Área 1 apresenta o perfil respirométrico com uma TCO máxima de 43,75 mg/L.h, representando a oxidação do material nitrogenado adicionado.

Na Área 2, durante a fase endógena foi adicionado os ésteres. Com a adição observa-se que o perfil da TCO que se apresentava abaixo de 10 mg/L.h caiu mais ainda, indicando que o composto adicionado está promovendo redução na TCO endógena.

Na Área 3 ocorreu a adição do cloreto de amônia. O valor da TCO máxima foi de 37,38 mg/L.h. Foi identificado uma redução no metabolismo das bactérias autotróficas de 15% do licor misto da ETE da Cetrel, neste caso, do TA-1.

ANÁLISE E DISCUSÃO DOS RESULTADOS

Curva de toxicidade

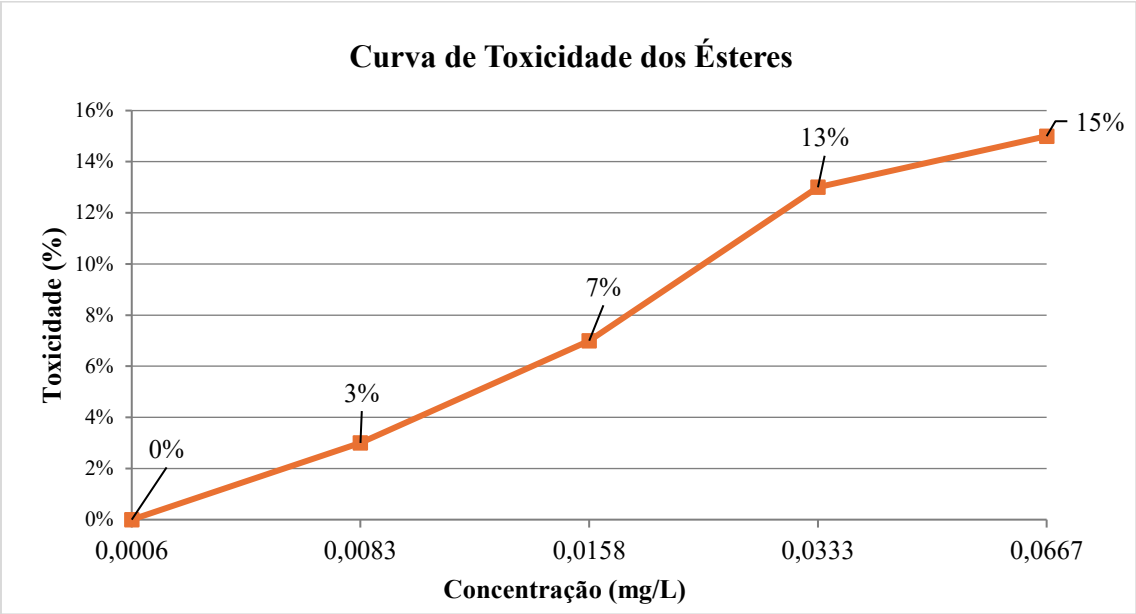
A partir dos respirogramas obtidos das diversas concentrações testadas do composto de ésteres, foi possível construir a Tabela 2 abaixo com os principais valores de concentração avaliados e, a curva de toxicidade é apresentada na Figura 15.

Tabela 2: Efeito da toxicidade com diferentes concentrações de Ésteres

Experimentos	Volume (mL/L)	Concentração Padrão de Ésteres (mg/L)	Concentração entrada da ETE (mg/L)	Concentração cliente (mg/L)	Efeito da Toxicidade (%)	TCO máx. 1° curva	TCO máx. 2° curva
T-1	0,1	0,036	0,0006	0,21	0%	32,55	33,48
T-2	0,1	0,50	0,0083	2,92	3%	43,90	42,77
T-3	0,1	0,95	0,0158	5,54	7%	40,72	37,81
T-4	0,1	2,00	0,0333	11,67	13%	37,88	32,80
T-5	0,1	4,00	0,0667	23,33	15%	43,75	37,38

A curva de toxicidade foi obtida mediante a redução percentual da taxa máxima de consumo de oxigênio dos organismos nitrificantes. Esta redução está associada à exposição dos microrganismos autotróficos com os poluentes ésteres, sendo estes seres autotróficos os mais sensíveis no processo aeróbio por lodos ativados no interior dos reatores biológicos em escala real.

Figura 15: Perfil da curva de toxicidade para os Ésteres no licor misto.



CONCLUSÕES

A obtenção dos perfis respirométricos do lodo ativado da ETE da Cetrel, quando na presença de ésteres indicaram nas concentrações testadas ocorrência de toxicidade para os organismos autotróficos.

De acordo com a avariação tratablidade a toxicidade.para os ésteres para um valor de concentração 0,0083 mg/L.a 0,06667 mg/L na entrada da ETE, houve indicativo de toxicidade numa faixa 3% a 15% para os organismos autotróficos.

Em nenhuma hipótese é considerado o recebimento de ésteres em fase livre, visto a toxicidade aguda já apresentada para os meios aquáticos, a não biodegrabilidade e baixa solubilidade quando da mistura com as diversas correntes de efluentes da ETE.

A avaliação de tratabilidade, pela técnica da respirometria, se mostrou uma boa alternativa para conhecer os aspectos qualitativos e quantitativos dos ésteres a serem tratados na ETE e seus impactos no sistema de tratamento da ETE da Cetrel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABREU, A. F.; CATUNDA, Y. S. C.; GUIMARÃES, P.; VAN HAANDEL, A. Uso da Respirometria para a Determinação Experimental da Cinética de Nitrificação. ABES, 2017.

2. ALLEN, R. Difference Between Heterotrophs e Autotrophs. Sciencing, 2017. Disponivel em: <https://sciencing.com/difference-between-heterotrophs-autotrophs-8274633.html>. Acesso em: 10 Jun. 2018.

3. ANDREOTTOLA, G.; OLIVEIRA, E. L.; FOLADORI, P.; DALLAGO, L.; PETERLINI, R.; CADONNa, M. Método respirométrico para o monitoramento de processos biológicos. Engenharia Sanitaria e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 10, Jan/Mar 2005.

4. **APHA (2017)** (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*).

5. FERNANDES, J. G. S.; HAANDEL, A. V.; CAVALCANTI, P. F. F.; COURA, L. R. Utilização da Respirometria no Controle Operacional de Sistemas Aerobios de Tratamento de Águas Residuárias - A Experiência da Cetrel. Engenharia Sanitária e Ambiental, 6, out/dez 2001.

6. FERNANDES, J. G. S.; SILVA, M. F. S.; LIMA, E. P. C.; BRANDÃO, P. V. R. Toxicidade do arsênio, cobalto e níquel em sistemas de tratamento aerobio por lodos ativados – Uso da respirometria no tratamento de efluentes industriais. In: XXVIII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28, 2015. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental AESABESP - Associação dos Engenheiros da Sabesp.

7. FERREIRA, E. S. Cinética química e fundamentos dos processos de nitrificação e denitrificação biológica. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27, 2017. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental AESABESP - Associação dos Engenheiros da Sabesp. Disponível em <ftp://ftpaluno.umc.br/Aluno/Tatiane_Faustino/DP/Bioqu%EDmica/CIN%C9TICA%20QU%CDMICA%20E%20FUNDAMENTOS%20DOS%20PROCESSOS%20DE.PDF>. Acesso em: 10 ago. 2018.

8. HAANDEL, A. V.; MARAIS, G. O Comportamento do Sistema de lodo Ativado. Campina Grande: Editora Eletronica, v. 1, 1999.

9. LIMA, E. P. C.; HAANDEL, A. V.; KIPERSTOK, A.; FERNANDES, J. G. S. Respirometria aplicada ao tratamento biológico de efluentes com poluentes inibidores da nitrificação. I Congresso Baiano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Trabalho apresentado ao I Congresso Baiano de Engenharia Sanitária e Ambiental - I COBESA. Salvador – BA. 2010.

10. SILVA FILHO, H. A.; BARROS, A. R. M.; DOS SANTOS, E. V. M.; DE SOUSA, J. T.; HAANDEL, A. C. Seleção de substratos padrões para ensaios respirométricos aeróbios com biomassa de sistemas de lodo ativado. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 20, p. 141-150, Janeiro/Marco 2015.

11. SUSCHKA, S.; FERREIRA, E. Activated Sludge respirometric measurements. Water Research, v. 20, n. 2, p. 137-144, February 1986. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043135486900035>. Acesso em: 07 ago. 2018.