



AValiação de Tratabilidade do Sulfeto 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.

Dailson Meira dos Santos⁽ⁿ⁾

Engenharia Sanitária e Ambiental pela UNIFACS. Especialista em Recursos Hídricos pela UFBA/BA.

Mauro Freitas Salatiel⁽ⁿ⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Federal da Bahia. Líder da área de efluentes/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

Nas últimas décadas, o uso da 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 sulfeto. 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 do sulfeto 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 respirometria em planta piloto, avaliar o perfil respirométrico do licor misto, na presença do sulfeto, quanto a possível toxicidade em diversas concentrações, de modo a identificar queda na qualidade do efluente tratado final.

PALAVRAS-CHAVE: Toxicidade de efluentes, respirometria, lodos ativados, sulfeto.

INTRODUÇÃO

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.

Todas essas empresas que são interligadas ao sistema de coleta e transporte de efluentes da Cetrel devem atender aos limites de lançamento, estabelecidos na Licença de Operação (LO) do PIC, a saber, Portaria INEMA 16.507/18, Anexo II. No que concerne a Cetrel, essa Licença estabelece os padrões de lançamento contidos no Anexo IV (INEMA, 2018).

Além da Licença do Polo, como toda empresa situada no PIC, a Cetrel responde, ainda, a mais uma licença estabelecida na Portaria INEMA nº 1.985/12 que concede permissão para operar o sistema de tratamento de efluentes líquidos, constituído de coleta, transporte, tratamento e disposição final, com atenção à qualidade desse lançamento (INEMA, 2008).

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, podendo até violar a legislação.

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 associado ao incremento de poluentes que possam trazer demandas de controle de processo e controle ambiental.

Segundo o Anexo II da Portaria INEMA 16.507/18 a concentração máxima de sulfeto expresso como sulfeto total a ser lançado no sistema orgânico (SO) de tratamento de efluentes é de 10 mg/L.

Nesta mesma portaria e, segundo o Anexo IV, estabelece um limite de concentrações para lançamento no sistema de disposição oceânica para sulfeto expresso como H_2S de 0,48 mg/L.

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 de sulfeto.

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 o sulfeto pode 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 e heterotróficos quando da presença do sulfeto.

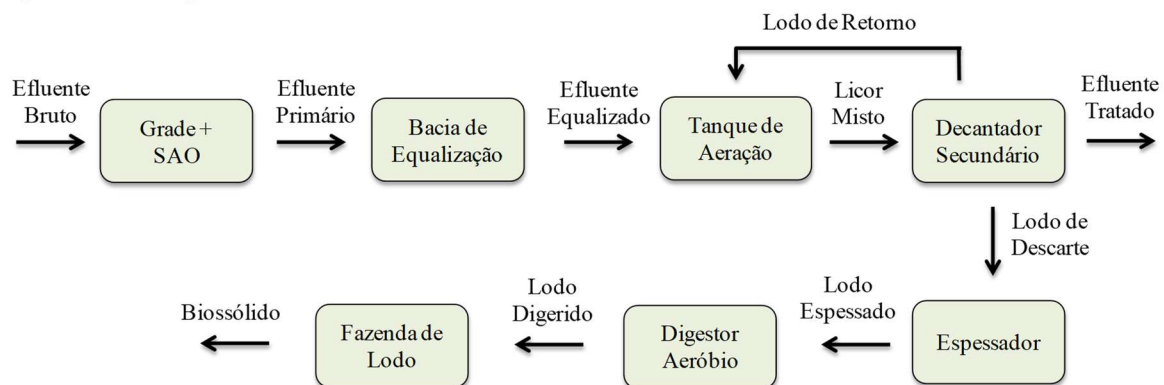
Avaliar os efeitos da toxicidade/inibição aguda na presença do sulfeto.

Estabelecer a concentração máxima de sulfeto 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 deveras 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, conseqüentemente, 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, o sulfeto.

A Figura 2 mostra a planta piloto utilizada para realização da avaliação de tratabilidade. Foram utilizadas duas unidades piloto de modo a permitir análise em duplicata.

Figura 2 – Planta Piloto utilizada nos experimentos.

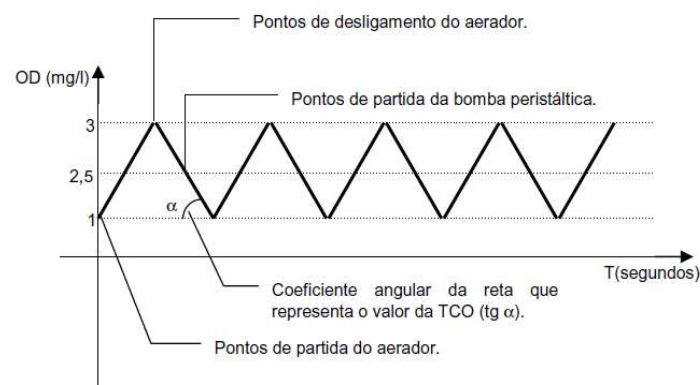


Fonte: Autoria própria, 2025.

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: Adaptado de Cetrel, 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.

$$TCO = (OD_{sup} - OD_{inf})/(\Delta t) \quad (1)$$

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:

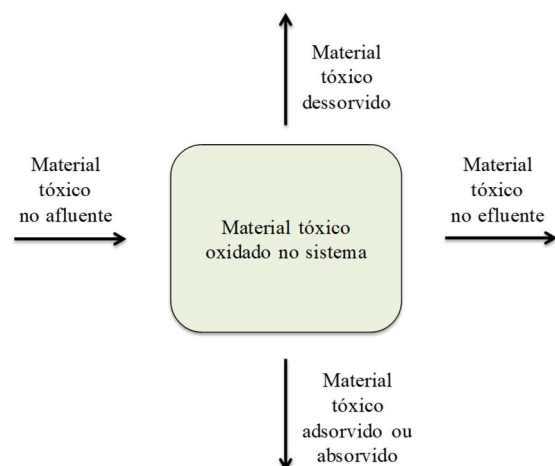
O primeiro é a transformação – onde ocorre a oxidação biológica da substância tóxica com formação de novos produtos.

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.

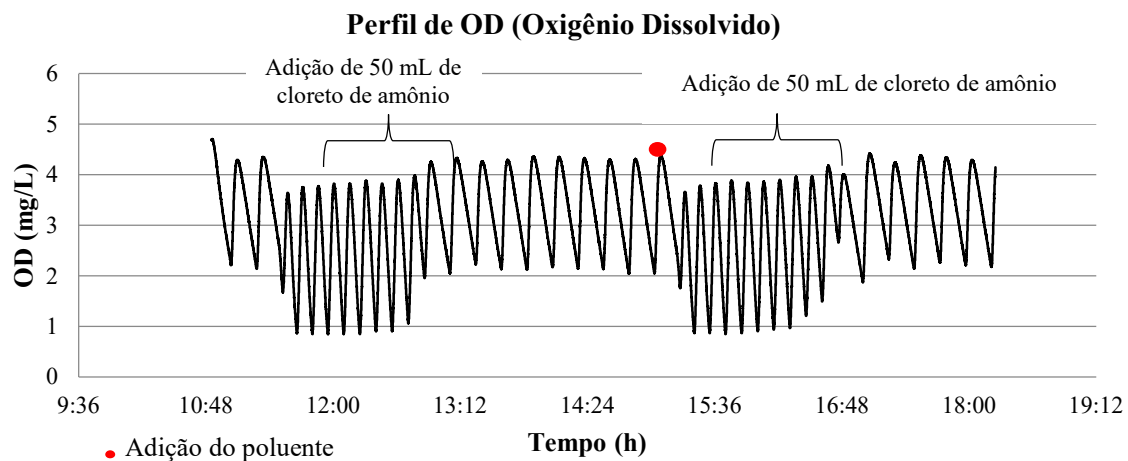


Fonte: FERNANDES et al. 2015.

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.



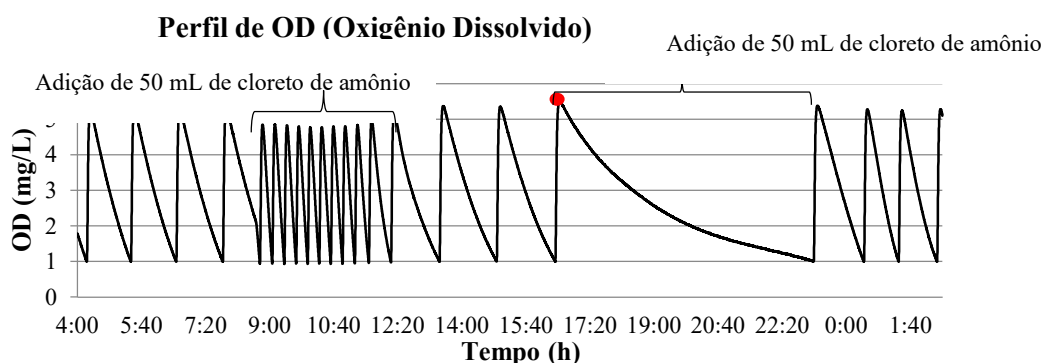
Fonte: Autoria própria, 2025.

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-adicação 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).

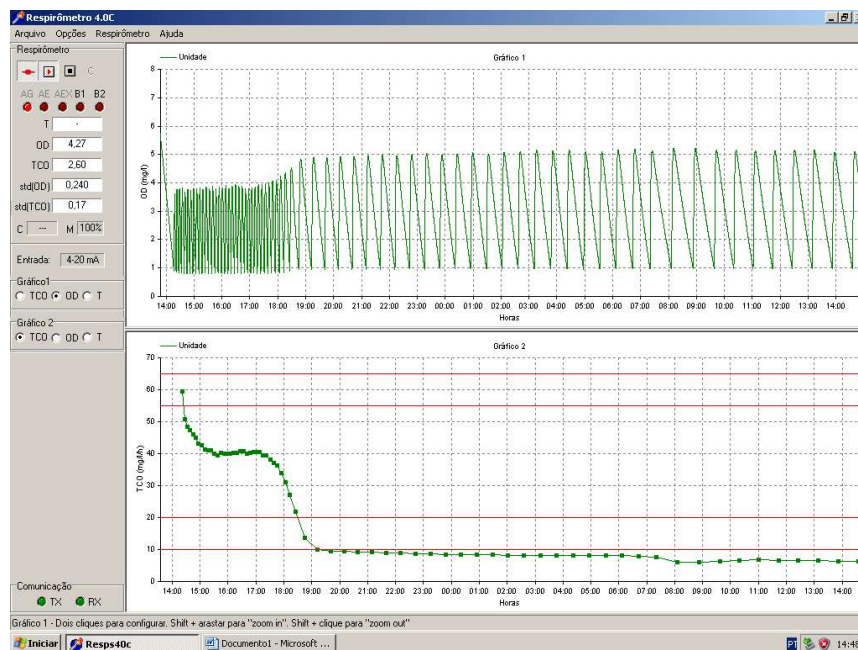
Se nenhum dos mecanismos ocorrerem, o material será lançado no efluente tratado final. Em se tratando de sulfeto espera-se que ocorra a oxidação para sulfato nos reatores biológicos estritamente aeróbios.

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 respirometro para geração dos respectivos respirogramas.



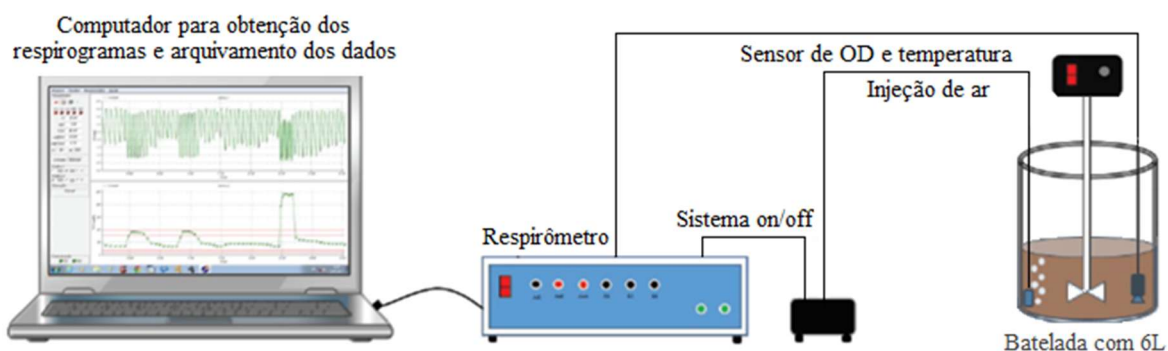
O respirômetro é composto de um computador e unidades periféricas com destaque para o reator biológico, sonda de oxigênio dissolvido do tipo ótico dotado de sensor de temperatura, agitador, aerador e aquecedor. Neste experimento foi utilizado o respirômetro Beluga®.

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.

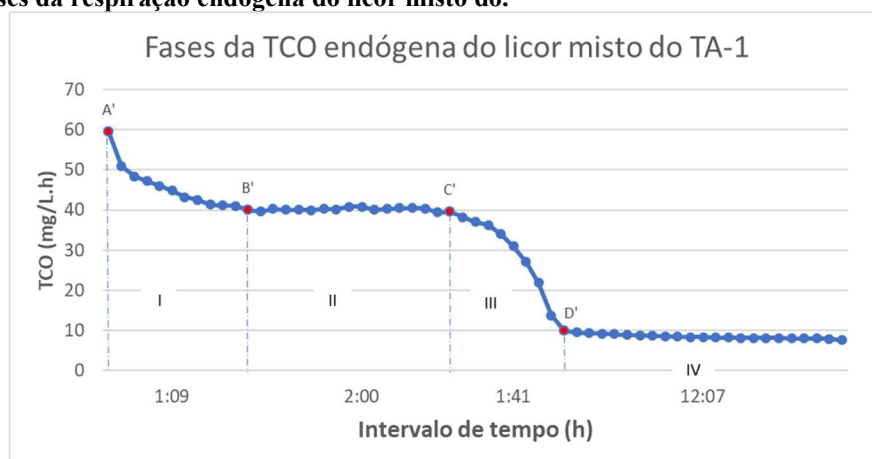
Figura 8 – Esquemático do equipamento utilizado.



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.



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.

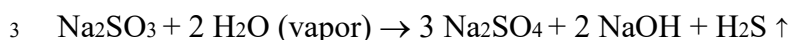
Área (III)/TCO exógena – Nas condições aeróbias, a TCO cai de 38,28 mg/L.h (ponto C') para 9,90 mg/L.h (ponto D') em um período de 1:41h. Esta área representa o final da oxidação dos compostos lentamente biodegradáveis.

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

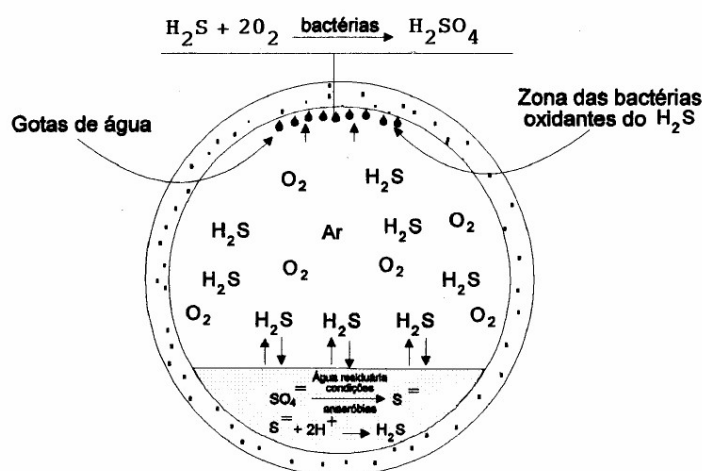
SULFETO

Nesta avaliação de tratabilidade, a principal forma de remoção das espécies químicas do ciclo do enxofre é por via biológica características do sistema de tratamento de efluentes da ETE da Cetrel por lodos ativados estritamente aeróbio. A reação apresentada a seguir representa de forma simplificada do comportamento do H₂S no interior dos reatores aeróbios durante os ensaios.



A Figura 10 traz uma ilustração fotográfica do que ocorre no interior das linhas/tubulações quando da presença do sulfeto. Sendo nesta avaliação de tratabilidade uma das principais preocupações quanto a integridade dos ativos face aos possíveis ataques químicos as estruturas metálicas e de concreto.

Figura 10: formas do enxofre quando da ação de bactérias específicas.

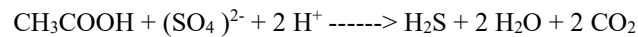


Fonte: Adaptado, 2025.

No interior das linhas/tubulações, em trechos de baixa declividade onde ocorre depósito de matéria orgânica em situação de anaerobiose, as bactérias redutoras de sulfato transformam-no em sulfeto e sob condições ácidas finalmente em gás sulfídrico (H₂S). O H₂S predomina em meio ácido, constituindo-se em 80% em pH = 7. Ocorrendo a elevação do pH, pois em pH > 10 praticamente todo enxofre se encontra na forma S²⁻. No trecho aeróbio do tubo e em contato com a umidade da parede interna, ocorre a reação de formação de ácido sulfúrico que ataca o metal e estruturas de concreto.

Além do problema da corrosão dos ativos, o gás sulfídrico pode trazer problema de odor, além de exercer efeito tóxico sobre as pessoas e o meio ambiente. Por este motivo, a licença do PIC, estabelece e impõe como limite máximo para as descargas das águas residuárias na rede da Cetrel 10 mg/L para sulfeto.

Nas zonas consideradas anaeróbias o aceptor de elétrons passa a ser o sulfato (SO₄)²⁻. A reação abaixo resume como o aceptor de elétrons atua no interior das unidades operacionais da ETE da cetrel.



No caso dos reatores da ETE da cetrel onde existe uma variedade de aceptores de elétrons disponíveis no licor misto, as bactérias utilizam a espécie química mais disponível e que produz maior energia, neste caso, o oxigênio dissolvido, em seguida o nitrato, fosfato, sulfatos e por último o dióxido de carbono.

CLORETO DE AMÔNIA

- Fórmula molecular: NH_4Cl
- 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 e heterotróficas. Para os microorganismos autotróficos foi utilizado o substrato padrão de cloreto de amônia.

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

Vazão ETE (m³/h)				3500
Vazão cliente (m³/h)				350
Diluição				$C1 \cdot V1 = C2 \cdot V2$
Fator de Diluição				10,0
Experimento	Concentração Padrão testada (mg/L)	Volume (mL)	Concentração Sulfeto na ETE (mg/L)	Concentração no Cliente (mg/L)
1	127,00	100	2,117	21,17
2	168,00	100	2,800	28,00
3	707,00	100	11,783	117,83
4	1400,00	101	23,333	233,33

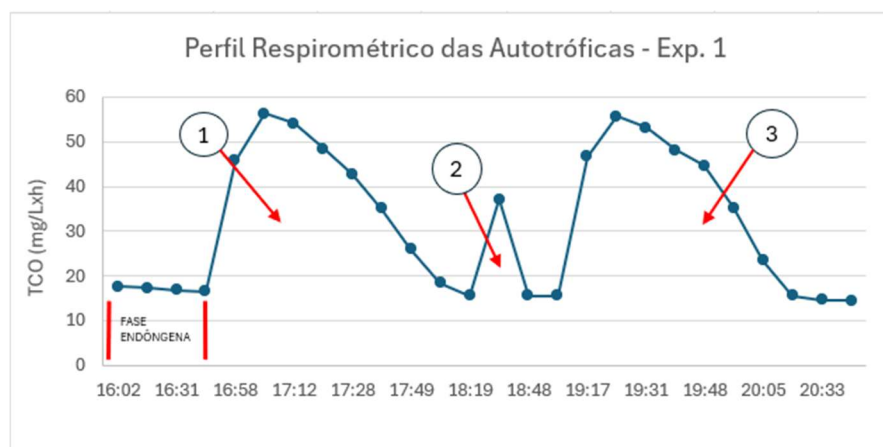
Experimento 1 – 127 mg/L

No experimento 1, foi adicionado um volume de 100 mL de uma solução contendo 127 mg/L de sulfeto, o que corresponde na entrada da ETE a 2,1 mg/L.

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

A Figura 11 abaixo traz o respirograma referente ao experimento 1 com o sulfeto.

Figura 11: perfil respirométrico do sulfeto.



Inicialmente o licor misto proveniente do reator em escala real foi submetido a aeração e agitação sem adição de substrato padrão (alimento) de modo a alcançar a respiração endógena.

A primeira área 1 é referente à oxidação de 50 mL de Cloreto de Amônia. O metabolismo das bactérias autotróficas atingiu uma TCO máxima de aproximadamente 56,36 mg/L.h, até atingir novamente a respiração endógena.

A segunda área 2 representa o metabolismo das bactérias heterotróficas na presença de sulfeto concentração máxima de 127 mg/L atingindo uma TCO máxima de aproximadamente 37,1 mg/L.h.

A terceira área 3 representa a oxidação de 50 mL de cloreto de amônia pelos microorganismos autotróficos.

A quantidade de sulfeto adicionada de 127 mg/L não promoveu variação na taxa de consumo de oxigênio indicando que não ocorreu toxicidade nos organismos autotróficos.

No experimento 1, o efluente tratado final após a adição do sulfeto e do cloreto de amônia apresentou resultado de sulfato entre 650 mg/L e 684 mg/L. A DQO apresentou concentração de 390 mg/L e nitrogênio amoniacal concentração menor que 0,05 mg/L. A condutividade foi de 8980 $\mu\text{S/cm}$, temperatura de 36°C e pH de 8,5.

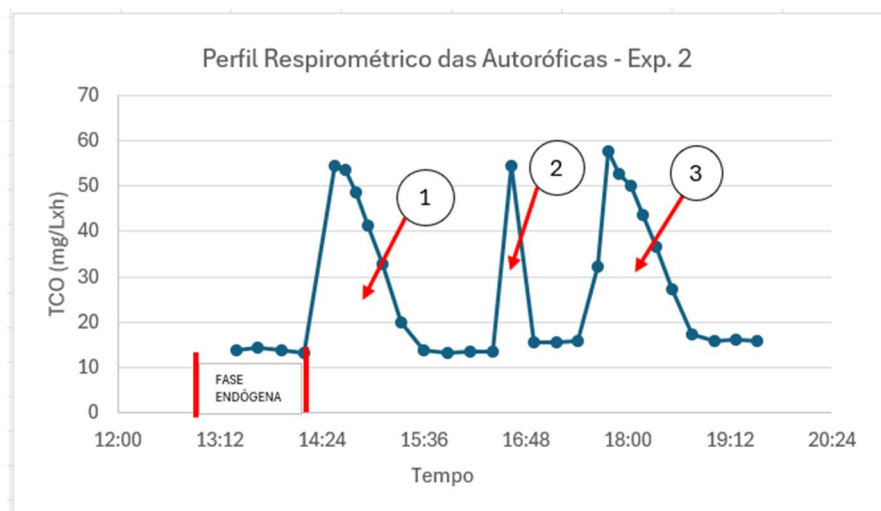
Experimento 2 – 168 mg/L

No experimento 2, foi adicionado um volume de 100 mL de uma solução contendo 168 mg/L de sulfeto, o que corresponde na entrada da ETE a 2,8 mg/L.

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

A Figura 12 abaixo traz o respirograma referente ao experimento 2 com o sulfeto.

Figura 12: perfil respirométrico do sulfeto.



Inicialmente o licor misto proveniente do reator em escala real foi submetido a aeração e agitação sem adição de substrato padrão (alimento) de modo a alcançar a respiração endógena.

A primeira área 1 é referente à oxidação de 50 mL de Cloreto de Amônia. O metabolismo das bactérias autotróficas atingiu uma TCO máxima de aproximadamente 54,35 mg/L.h, até atingir novamente a respiração endógena.

A segunda área 2 representa o metabolismo das bactérias heterotróficas na presença de sulfeto concentração máxima de 168 mg/L atingindo uma TCO máxima de aproximadamente 54,45 mg/L.h.

A terceira área 3 representa a oxidação de 50 mL de cloreto de amônia pelos microorganismos autotróficos.

A quantidade de sulfeto adicionada de 168 mg/L não promoveu variação na taxa de consumo de oxigênio indicando que não ocorreu toxicidade nos organismos autotróficos.

No experimento 2, o efluente tratado final após a adição do sulfeto e do cloreto de amônia apresentou resultado de sulfato entre 651 mg/L e 775 mg/L. A DQO apresentou concentração de 242 mg/L e nitrogênio amoniacal concentração menor que 0,06 mg/L. A condutividade foi de 7820 $\mu\text{S/cm}$, temperatura de 36°C e pH de 8,0.

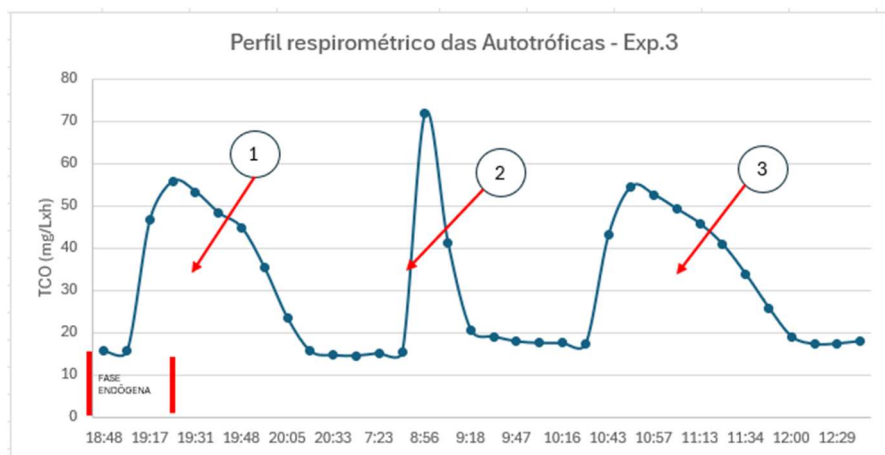
Experimento 3 – 707 mg/L

No experimento 3, foi adicionado um volume de 100 mL de uma solução contendo 707 mg/L de sulfeto, o que corresponde na entrada da ETE a 11,8 mg/L.

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

A Figura 13 abaixo traz o respirograma referente ao experimento 3 com o sulfeto.

Figura 13: perfil respirométrico do sulfeto.



Inicialmente o licor misto proveniente do reator em escala real foi submetido a aeração e agitação sem adição de substrato padrão (alimento) de modo a alcançar a respiração endógena.

A primeira área 1 é referente à oxidação de 50 mL de Cloreto de Amônia. O metabolismo das bactérias autotróficas atingiu uma TCO máxima de aproximadamente 55,73 mg/L.h, até atingir novamente a respiração endógena.

A segunda área 2 representa o metabolismo das bactérias heterotróficas na presença de sulfeto concentração máxima de 707 mg/L atingindo uma TCO máxima de aproximadamente 71,71 mg/L.h.

A terceira área 3 representa a oxidação de 50 mL de cloreto de amônia pelos microorganismos autotróficos.

A quantidade de sulfeto adicionada de 707 mg/L não promoveu variação na taxa de consumo de oxigênio indicando que não ocorreu toxicidade nos organismos autotróficos.

No experimento 3, o efluente tratado final após a adição do sulfeto e do cloreto de amônia apresentou resultado de sulfato entre 706 mg/L e 718 mg/L. A DQO apresentou concentração de 277 mg/L e nitrogênio amoniacal concentração menor que 0,05 mg/L. A condutividade foi de 8950 $\mu\text{S/cm}$, temperatura de 36°C e pH de 8,4.

Experimento 4 – 1400 mg/L

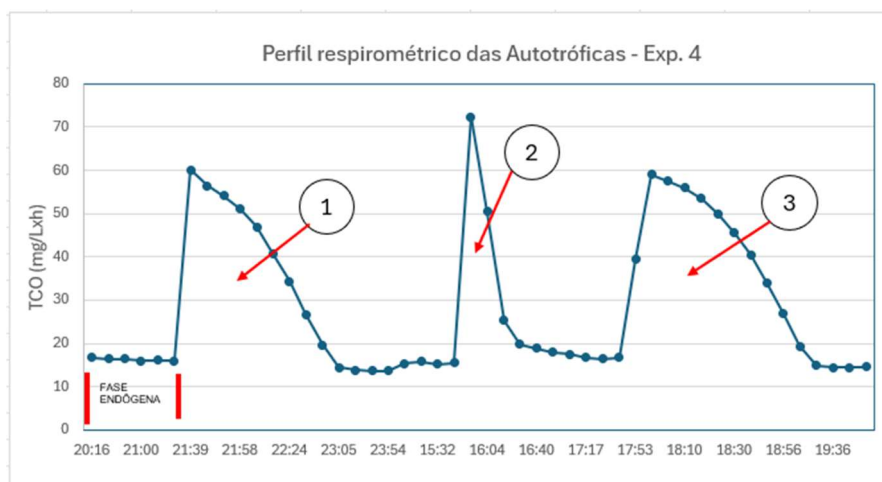
No experimento 4, foi adicionado um volume de 100 mL de uma solução contendo 1400 mg/L de sulfeto, o que corresponde na entrada da ETE a 23,3 mg/L.

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



A Figura 14 abaixo traz o respirograma referente ao experimento 4 com o sulfeto.

Figura 14: perfil respirométrico do sulfeto.



Inicialmente o licor misto proveniente do reator em escala real foi submetido a aeração e agitação sem adição de substrato padrão (alimento) de modo a alcançar a respiração endógena.

A primeira área 1 é referente à oxidação de 50 mL de Cloreto de Amônia. O metabolismo das bactérias autotróficas atingiu uma TCO máxima de aproximadamente 60,09 mg/L.h, até atingir novamente a respiração endógena.

A segunda área 2 representa o metabolismo das bactérias heterotróficas na presença de sulfeto concentração máxima de 1400 mg/L atingindo uma TCO máxima de aproximadamente 72,36 mg/L.h.

A terceira área 3 representa a oxidação de 50 mL de cloreto de amônia pelos microorganismos autotróficos.

A quantidade de sulfeto adicionada de 1400 mg/L não promoveu variação na taxa de consumo de oxigênio indicando que não ocorreu toxicidade nos organismos autotróficos.

No experimento 4, o efluente tratado final após a adição do sulfeto e do cloreto de amônia apresentou resultado de sulfato entre 672 mg/L e 727 mg/L. A DQO apresentou concentração de 320 mg/L.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A adição do sulfeto no interior dos reatores biológicos nos experimentos 1 e 2 analisados, o sulfeto foi convertido para sulfato em menos de 0,5 horas apresentando concentração final inferior a 0,2 mg/L não apresentando risco aos organismos autotróficos.

No experimento 3, o sulfeto foi convertido para sulfato em menos de 0,5 horas apresentando concentração final entre 0,41 e 0,46 mg/L não apresentando risco aos organismos autotróficos. O sulfeto expresso em H₂S foi de 0,013 mg/L bem abaixo do preconizado na legislação, neste caso, 0,48 mg/L.

Durante os ensaios com sulfeto foi possível quantificar a instabilidade das soluções preparadas com perdas de aproximadamente 30 %.

Atenção especial deve ser dada aos possíveis ataques do sulfeto expresso em H₂S as estruturas metálicas e de concreto.

Análise microscópica do licor misto no experimento 3, foi evidenciado presença de bactérias filamentosas e, quando deixado em repouso em intervalo de tempo inferior a 4 (quatro) horas ocorreu flotação do lodo para a superfície livre do líquido.

CONCLUSÕES

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

Por se tratar de composto inorgânico, foi possível concluir que o principal mecanismo de redução da concentração de sulfeto no sistema de lodos ativados da ETE da Cetrel ocorre por oxidação a sulfato no lodo do licor misto dos reatores biológicos.

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

Com base nos resultados apresentados, foi possível afirmar a partir dos resultados dos perfis respirométricos que o sulfeto avaliado nas concentrações de 127 mg/L, 168 mg/L, 707 mg/L e 1400 mg/L, no interior dos reatores biológicos não demonstraram serem capazes de promover processos de inibição no metabolismo para os microorganismos autotróficos e heterotróficos.

Quanto a integridade dos equipamentos, entende-se que há grande probabilidade de ocorrer impactos nas estruturas metálicas e de concreto, quando da chegada de efluentes contendo sulfeto para tratamento na 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 and Autotrophs*. Sciencing, 2017. Disponível em: <<https://sciencing.com/difference-between-heterotrophs-autotrophs-8274633.html>>. Acesso em: 10/06/2018.
3. ANDREOTTOLA, G.; OLIVEIRA, E. L.; FOLADORI, P.; DALLAGO, L.; PETERLINI, R.; CADONNA, M. Método respirométrico para o monitoramento de processos biológicos. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 10, Jan/Mar 2005.
4. FERNANDES, J. G. S.; HAANDEL, A. V.; CAVALCANTI, P. F. F.; COURA, L. R. Utilização da Respirometria no Controle Operacional de Sistemas Aeróbios de Tratamento de Águas Residuárias - A Experiência da Cetrel. Engenharia Sanitária e Ambiental, 6, out/dez 2001.
5. 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 aeróbio por lodos ativados – Uso da respirometria no tratamento de efluentes industriais. In: XXVIII CONGRESSO INTERAMERICANO, 2015. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental AESABESP - Associação dos Engenheiros da Sabesp.
6. HAANDEL, A. V.; MARAIS, G. O. Comportamento do Sistema de lodo Ativado. Campina Grande: Editora Eletronica, v. 1, 1999.
7. 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.
8. SANTOS, T. G. Utilização da respirometria para avaliar o grau de toxicidade de poluentes prioritários em sistemas biológicos de tratamento de águas residuárias. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2007.
9. 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/Março 2015.