



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

FERNANDA JUCÁ DE MEDEIROS ARAÚJO

**INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLDIOS NA
TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO EM REATORES DE LODO
ATIVADO**

NATAL - RN

2016

Fernanda Jucá de Medeiros Araújo

Influência da concentração de sólidos na transferência de oxigênio em reatores de lodo
ativado

Trabalho de Conclusão de Curso na
modalidade Artigo Científico, submetido ao
Departamento de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte como parte dos
requisitos necessários para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Rodrigues dos Santos

Natal - RN

2016

Catalogação da Publicação na Fonte
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Sistema de Bibliotecas Biblioteca Central Zila Mamede / Setor de
Informação e Referência

Araújo, Fernanda Jucá de Medeiros.

Influência da concentração de sólidos na transferência de oxigênio em reatores de lodo ativado. / Fernanda Jucá de Medeiros Araújo - 2016.

16 f. : il.

Artigo científico (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Natal, RN, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Rodrigues dos Santos.

1. Lodo - Tratamento - TCC. 2. Respirometria - TCC. 3. Aeração - TCC. I. Santos, Hélio Rodrigues dos. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.337

Fernanda Jucá de Medeiros Araújo

Influência da concentração de sólidos na transferência de oxigênio em reatores de lodo
ativado

Trabalho de conclusão de curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 18, novembro de 2016:

Prof. Dr. Hélio Rodrigues dos Santos – Orientador

Profa. MSc. Larissa Caroline Saraiva Ferreira – Examinador interno

Enga. Dra. Juliana Delgado Tinôco – Examinador externo

Natal-RN

2016

AGRADECIMENTOS

À Deus, por toda a graça à mim concedida e por me dar forças para nunca desistir diante dos obstáculos enfrentados durante toda a minha caminhada.

Aos meus pais, Carlos Patrício e Fabiana Melo, e meus irmãos Carlos Patrício Júnior e Carla Patrícia por serem meus exemplos de vida e por me ensinarem que tudo é possível quando se tem determinação.

Aos mestres do Departamento de Engenharia Civil da UFRN por compartilharem comigo seus conhecimentos acadêmicos, profissionais e pessoais permitindo não apenas meu crescimento acadêmico mas acima de tudo meu crescimento humano.

Agradeço aos meus amigos, dentro e fora da universidade por estarem comigo a todo momento alegrando sempre a minha caminhada, me apoiando e fortalecendo a cada dificuldade enfrentada.

Ao meu namorado Ray, por toda a sua paciência, carinho, confiança, incentivo e ajuda. Por estar sempre ao meu lado nos momentos bons e ruins.

À toda equipe GCP em nome de Sayonara Medeiros, por alegrarem meus dias no estágio e me ajudarem sempre que fosse necessário tempo para execução desse trabalho.

Ao professor e orientador Hélio Rodrigues, por toda a paciência, dedicação e motivação para realização deste trabalho.

À amiga e professora Juliana Tinôco por toda ajuda prestada e confiança à mim dada para realização desta pesquisa.

Ao professor Cícero Onofre por nos ceder o equipamento imprescindível a execução deste trabalho, bem como ao professor Yuri Catunda e seu aluno Jadilson por toda ajuda técnica prestada para instalação desses.

À Universidade, pelo ambiente agradável, acolhedor e instigante ao aprendizado.

À todos que direta ou indiretamente estiveram ao meu lado contribuindo para a minha formação.

RESUMO

Título: Influência da concentração de sólidos na transferência de oxigênio em reatores de lodo ativado

Autor: Fernanda Jucá de Medeiros Araújo

Orientador: Prof. Dr. Hélio Rodrigues dos Santos

Departamento de Engenharia Civil - UFRN

Natal, Novembro de 2016

Um dos parâmetros mais importantes a ser controlado em sistemas de lodo ativado é a concentração de oxigênio dissolvido (OD). Concentrações de OD muito baixas no tanque de aeração afetam diretamente a eficiência de remoção do substrato, prejudicando as propriedades mecânicas e biológicas do lodo. Por outro lado, concentrações elevadas de OD – como as encontradas em reatores MBBR e MBR – levam a aumentos consideráveis nos gastos com energia elétrica para aeração. Nesta pesquisa foi avaliada a influência da concentração de sólidos na capacidade de transferência de oxigênio do aerador. Para isso, foram realizados testes experimentais em escala laboratorial para determinação da constante de transferência de oxigênio pelo método estacionário na presença de microrganismos, com o uso da respirometria. Um aerador era conectado ao respirômetro que controlava a aeração e submetia as diferentes concentrações de lodo analisadas a ciclos de períodos com e sem aeração, cujos momentos de início e fim eram regrados por limites superiores e inferiores de OD especificados no software. Os resultados mostraram que sistemas contendo elevadas concentrações de lodo, na faixa de 8g/L, o consumo energético para aeração foi de aproximadamente 2,6 vezes maior em comparação ao mesmo sistema operando com lodo em concentração de 2,6g/L.

Palavras-chave: Respirometria, Constante de transferência de oxigênio, Concentração do lodo.

ABSTRACT

Title: Influence of solids concentration on the oxygen transfer in activated sludge reactors

Author: Fernanda Jucá de Medeiros Araújo

Advisor: Prof. Dr. Hélio Rodrigues dos Santos

Department of Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Norte, Brazil

Natal, November 2016

One of the most important aspects to be controlled in operational costs for an activated sludge system is the concentration of dissolved oxygen (DO). Low concentrations of DO in aeration tanks directly affect the efficiency of substrate removal, jeopardizing the sludge's mechanical and biological properties. On the other hand, high concentrations of DO cause considerable increases on the electrical energy costs to the sewage treatment plants. This research studies the influence of the sludge concentration (biomass) on the oxygen transfer capacity of the aerator. In this case, experimental laboratorial tests were performed in order to ascertain the oxygen transfer coefficient using the stationary method in presence of microorganisms, with the use of respirometry. An aerator was connected to the respirometer, which controlled the aeration and submitted different analyzed sludge concentrations to cycles of periods with and without aeration. Those had their starting and ending points controlled by specific software parameters. The results revealed that systems containing high sludge concentrations, of around 8 g/L, showed an electrical cost almost 2.6 times higher, in comparison to the same system using a sludge concentration of 2,6 g/L.

Key words: Respirometry, Oxygen transfer coefficient, Sludge concentration.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o meio ambiente vem exigindo cada vez mais dos sistemas de tratamento de águas residuárias sejam elas domésticas ou industriais, através da implantação de padrões cada vez mais restritivos no que diz respeito às condições e padrões de lançamento de efluentes. Sendo assim, tem-se uma constante busca por sistemas de tratamento eficientes, economicamente viáveis e eficazes no atendimento aos padrões exigidos pelos órgãos ambientais.

Dentro de tal contexto, os sistemas aeróbios merecem destaque atualmente, principalmente quando acoplados a reatores anaeróbios, pois o processo aeróbio apresenta comumente uma resposta rápida e eficiente, além de permitir grande precisão no controle e operação. Dentre os sistemas aeróbios, podemos destacar os filtros biológicos, lagoas de estabilização, tratamento por infiltração no solo e os sistemas de lodo ativado, sendo este último o mais utilizado para o tratamento de despejos domésticos e industriais em situações em que são necessários uma elevada qualidade do efluente e reduzidos requisitos de área (VON SPERLING, 2012). Apesar da elevada eficiência, os sistemas de lodo ativado exigem uma maior precisão e controle da concentração de oxigênio dissolvido no reator aeróbio. Para que se garanta a eficiência do reator e se mantenha uma concentração de OD adequada são necessários sistemas de aeração robustos, responsáveis por um alto custo energético e que causam grandes impactos nos custos de manutenção dessas ETEs.

Mais recentemente, foram desenvolvidas variantes do sistema de lodos ativados que permitem operar o sistema com uma concentração de sólidos bem mais elevada e áreas ainda mais reduzidas que o sistema convencional. Um exemplo dessas variantes são os reatores que fazem uso de um meio suporte, sobre o qual se desenvolve um biofilme de massa bacteriana. Tais meios suportes podem ser de leito fixo (biomassa imobilizada) ou de leito móvel (Moving Biological Bed Reactor – MBBR), suas configurações, por operarem com um biofilme de massa aderida ao leito, proporcionam uma maior concentração de lodo, trazendo como vantagem a redução do volume do sistema (uma vez que a massa de lodo necessária para tratar uma determinada carga orgânica é a mesma, independente do tipo de sistema de lodo ativado) ou ainda, o aumento da carga orgânica a ser estabilizada, para o caso de reatores já existentes. Entretanto, as altas concentrações de sólidos nesses sistemas podem dificultar a transferência de oxigênio, levando a um aumento de energia por unidade de massa de oxigênio transferida.

Uma forma de avaliar a transferência de oxigênio em sistemas de lodo ativado é fazendo-se uso da respirometria, uma ferramenta utilizada em sistemas aeróbios para determinar a taxa de consumo de oxigênio (TCO) e que permite avaliar diversos parâmetros desses sistemas, como por exemplo, a eficiência de aeração, metabolismo e cinética de bactérias autotróficas e heterotróficas, toxicidade de afluentes, etc.

Neste sentido, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a influência da concentração de sólidos (biomassa) na capacidade de oxigenação com o uso da respirometria, para isso foram determinadas, por meio de testes respirométricos, as constantes de transferência de oxigênio (K_{la}) do lodo de um sistema de lodo ativado convencional empregado no pós-tratamento de um reator anaeróbio (UASB), proveniente de uma ETE em escala plena (ETE do Baldo em Natal), sob diferentes concentrações, o que permitirá ainda avaliar o impacto da concentração de lodo nos custos com energia de aeração e estabelecer relações específicas entre a constante de transferência de oxigênio e a concentração do lodo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Lodos Ativados

Os sistemas de lodo ativado vêm sendo amplamente utilizados no tratamento de efluentes domésticos e industriais em virtude da sua elevada qualidade do efluente final e baixos requisitos de área (VON SPERLING, 2012). Esses sistemas são constituídos basicamente por um reator aerado (precedido ou não de decantador primário) um tanque de decantação (decantador secundário) e uma elevatória para a recirculação do lodo.

O princípio do funcionamento do sistema de lodo ativado é que se mantenha uma grande população bacteriana no reator aerado, e se forneça oxigênio em quantidade suficiente para que esta biomassa possa metabolizar o material orgânico presente no afluente (MIRANDA, 2012). Após metabolizada a matéria orgânica, o efluente é enviado ao decantador secundário para que sejam removidos os sólidos (biomassa) por meio da sedimentação, tendo-se portanto o efluente clarificado. Parte dos sólidos sedimentados no decantador secundário é descartada – afim de que se garanta a idade do lodo no sistema - e outra parte é redirecionada para o tanque de aeração, aumentando assim a concentração de biomassa presente no reator, sendo portanto, a recirculação fundamental para a elevada eficiência do sistema de lodo ativado.

2.2. Transferência de Oxigênio em sistemas de lodo ativado

A concentração de Oxigênio Dissolvido (OD) é um parâmetro importante na operação de sistemas de lodo ativado. Uma concentração de OD insuficiente no reator aeróbio pode

afetar as propriedades mecânicas e biológicas do lodo, trazendo assim prejuízo ao sistema. Um valor de concentração de OD abaixo do mínimo pode acarretar em prejuízos ao sistema de três formas: (I) diminuindo a eficiência de remoção dos substratos (material orgânico e material nitrogenado); (II) inibindo o metabolismo das bactérias heterotróficas e autotróficas e (III) prejudicando as características de sedimentação do lodo (MEDEIROS et al., 2005).

Em sistemas aeróbios de tratamento de esgoto o gás oxigênio (O_2) é geralmente transferido do ar atmosférico para o licor misto por dissolução através de interfaces de contato ar-água, geralmente introduzido por aeradores mecânicos ou por sistema de ar difuso. A concentração de oxigênio no licor misto deve ser suficiente para que se mantenha o equilíbrio entre a disponibilidade e o consumo pelos microrganismos durante a estabilização do material orgânico, evitando-se assim a criação de zonas anaeróbias.

A transferência de oxigênio baseia-se na lei de Henry, que afirma que: “quando houver contato entre uma fase líquida e uma fase gasosa, haverá uma tendência de se estabelecer um equilíbrio entre estas fases que se caracteriza pelo fato de que há proporcionalidade entre a pressão parcial de um componente gasoso e a concentração daquele componente dissolvido na fase líquida” (Van Haandel e Catunda, 2013). No caso da aeração em sistemas de lodo ativado, o componente gasoso de interesse é o oxigênio, a fase gasosa é o ar e a fase líquida é o licor misto. A concentração de oxigênio dissolvido de saturação na fase líquida (licor misto) chama-se concentração de saturação (ODs). Conforme a lei de Henry, no líquido há sempre uma tendência de se estabelecer o equilíbrio entre os gases dissolvidos e a fase gasosa. Quando as fases estão em equilíbrio, a concentração dissolvida se iguala à concentração de saturação. Este equilíbrio do gás no líquido depende dos seguintes fatores (SANTOS, 2013):

- Temperatura: quanto maior a temperatura menor o grau de saturação;
- Altitude: quanto maior a altitude menor a concentração de saturação porque a pressão parcial do gás na atmosfera é menor que ao nível do mar;
- Concentração de sólidos: quanto maior a concentração de sólidos dissolvidos, menor a concentração de saturação.

2.3. Métodos para determinação do coeficiente global de transferência de oxigênio (K_{La})

O coeficiente global de transferência de oxigênio (K_{La}) é um parâmetro importante na avaliação da capacidade de transferência de oxigênio em reatores aeróbios, e pode ser usado como referência para avaliar a eficiência do sistema de aeração sobre diferentes condições operacionais e geometria do sistema (MIRANDA, 2012).

Existem vários testes capazes de determinar o K_{la} , dentre eles destacam-se o método da oxidação do sulfito de sódio, aplicado na ausência de microrganismos e comumente utilizado em testes padrões de equipamentos de aeração utilizando água (SANTOS, 2013) e o método estacionário, aplicado em sistemas onde ocorre consumo de oxigênio pelos microrganismo.

O método da oxidação do sulfito é realizado em um reator cheio de água, onde o oxigênio dissolvido é removido através da adição de sulfito de sódio, com os aeradores desligados. Após religados os aeradores, a capacidade de aeração é medida com base na taxa de acréscimo de concentração de OD. Já o método estacionário, é realizado nas condições de operação e considerando o consumo de oxigênio realizado pelos processos de respiração do lodo ativado. Neste método, para a realização do ensaio, interrompe-se a aeração e registra-se a diminuição da concentração de oxigênio pelo consumo da biomassa até que se atinja uma concentração de OD mínima diferente de zero. Nesse momento religa-se a aeração registrando-se o aumento da concentração de oxigênio até o equilíbrio com a fase gasosa. Este último método foi o utilizado na pesquisa tendo a respirometria como ferramenta de controle da aeração e registro dos dados de OD.

2.4. Influência da concentração de sólidos na transferência de oxigênio

A taxa de transferência de oxigênio é proporcional ao déficit de oxigênio dissolvido no licor misto, ou seja, à diferença que existe entre a concentração de saturação e a concentração realmente presente no licor misto, como descrito na equação abaixo (VAN HAANDEL e MARAIS, 1999).

$$CO = K_{la}(OD_s - OD_l) \quad (2.1)$$

Onde:

CO = Taxa de transferência de oxigênio ($\text{KgO}_2/\text{m}^3.\text{h}$ ou $\text{mgO}_2/\text{l}.\text{min}$), ou capacidade de oxigenação;

K_{la} = Constante de transferência de oxigênio (h^{-1} ou min^{-1});

OD_s = Concentração de saturação de oxigênio dissolvido;

OD_l = Concentração real de oxigênio dissolvido no tanque de aeração.

Sendo assim, a capacidade de oxigenação será máxima, quando o a concentração de oxigênio dissolvido for zero:

$$CO_{max} = (dOD_l/dt)_{a, max} = K_{la}.OD_s \quad (2.2)$$

Sendo:

$(dOD_l/dt)_{a, max}$ = Massa de oxigênio transferida por unidade de tempo e por unidade de volume de licor misto ($\text{KgO}_2/\text{m}^3.\text{h}$ ou $\text{mgO}_2/\text{l}.\text{min}$).

Dado isto, nota-se que a capacidade de oxigenação será tão maior, quanto menor for a concentração de OD no licor misto. Portanto, o consumo de energia para aeração é inversamente proporcional à diferença entre o oxigênio de saturação e a concentração de oxigênio na fase líquida no tanque de aeração. Quanto maior for a concentração de OD no licor misto, maior será a energia necessária com aeração para manter tal concentração.

Todavia, nota-se que uma concentração nula de oxigênio dissolvido para um sistema de lodos ativados não é praticável, dados os prejuízos que trariam para o sistema a operação deste com concentrações de OD inferiores à crítica – concentração mínima que deve ser mantida no interior do líquido, para evitar que a presença de oxigênio dentro do lodo seja um fator limitante no consumo. Sendo assim, a concentração mínima de OD será dada pelo valor que não prejudique o desempenho do sistema e nem a qualidade do lodo (MIRANDA, 2012). Portanto teremos:

$$CO_{max} = K_{la} \cdot (OD_s - OD_{cr}) \quad (2.3)$$

Onde:

OD_{cr} = Concentração de oxigênio mínima que deve ser mantida no sistema, ou oxigênio crítico (mgO_2/l).

Segundo Van Haandel e Catunda (2013) a concentração crítica de OD raramente excede o valor de 0,5 a 1mg/l para remoção de material orgânico e 1 a 2mg/l para a nitrificação

2.5. Respirometria

A respirometria é uma técnica que permite a medição da taxa de consumo de oxigênio (TCO) através do consumo de oxigênio realizado pelos microrganismos, durante o catabolismo oxidativo. Para tanto, faz uso de equipamentos chamados respirômetros, que podem ser abertos (contínuos e semicontínuos) ou fechados (manométricos, volumétricos ou combinados). Para a realização desta pesquisa utilizou-se um respirômetro do tipo aberto e semicontínuo.

O método semicontínuo consiste em aerar uma batelada de lodo ativado até que se atinja uma concentração de oxigênio dissolvido máxima estabelecida (OD_{Max} ou OD_{sup}), quando, então, interrompe-se a aeração e registra-se a diminuição de OD num intervalo de tempo. A aeração é reiniciada quando a concentração de OD atinge um valor mínimo também estabelecido no equipamento (OD_{min} , ou OD_{inf}), recomençando-se o ciclo (DERKS, 2007). A TCO é calculada a cada final de período sem aeração, utilizando os dados obtidos da diminuição da concentração de OD por regressão linear de acordo com a equação:

$$TCO = \frac{dOD}{dt} = \frac{OD_{sup} - OD_{inf}}{\Delta t} \quad (2.4)$$

Onde:

TCO = taxa de consumo de oxigênio ($\text{mgO}_2/\text{l/h}$);

OD_{sup} = referência superior de OD estabelecida no respirômetro (mgO_2/l);

OD_{inf} = referência inferior de OD estabelecida no respirômetro (mgO_2/l);

Δt = variação do tempo.

3. METODOLOGIA

3.1. Delineamento experimental

Para, avaliar a influência da concentração de sólidos na transferência de oxigênio em um reator de lodo ativado foram realizados testes respirométricos com o licor misto de um sistema de lodo ativado empregado no pós-tratamento de reatores UASB, proveniente de uma ETE em escala plena: Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) Dom Nivaldo Monte (ETE “do Baldo”), situada em Natal/RN. Nesses testes, o licor misto foi previamente concentrado através de processos de filtração e sedimentação até uma concentração da ordem das geralmente empregadas em sistemas MBBR (“moving bed biofilm reactor”) ou MBR (biorreator de membrana), próxima a 8g/L e submetido a ensaios respirométricos, que possibilitavam o cálculo da constante de transferência de oxigênio. A seguir, faziam-se sucessivas diluições do lodo, repetindo-se o teste respirométrico para cada diluição testada.

O respirômetro utilizado foi o BelugaS4.3C, que é um respirômetro automatizado, acoplado a um computador com um software específico para controle dos dispositivos e obtenção de dados e é constituído basicamente por um reator, aerador, agitador e um eletrodo de oxigênio dissolvido. Ele permite determinar a TCO semi continuamente pelo método clássico, que consiste em períodos de aeração e não aeração, baseado nos limites superiores e inferiores estabelecidos de OD. Os parâmetros adquiridos pelo software são concentração de OD e temperatura. A taxa de consumo de oxigênio (TCO) é calculada a partir dos valores de concentração de OD adquiridas pelo respirômetro. Para cada concentração testada, foram realizadas análises de Sólidos Suspensos Totais (SST) e Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) para caracterização do lodo.

A ETE do Baldo é operada pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN). O tratamento na ETE se dá através da combinação de reatores UASB seguidos sistema de Lodos ativados com vistas à remoção de matéria orgânica (cerca de 90%) e parte da matéria nitrogenada (cerca de 50%). A vazão média tratada atualmente na ETE é de 325 L/s , a DQO média de 427 mg/L . O tanque de aeração opera com uma concentração

média de Oxigênio dissolvido de 2,93 mgO₂/L (Fonte: CAERN). Em relação às concentrações de sólidos, foram encontradas nos dias de ensaio uma concentração média de sólidos suspensos totais (SST) de 3297mg/L e de sólidos suspensos voláteis (SSV) de 2723mg/L.

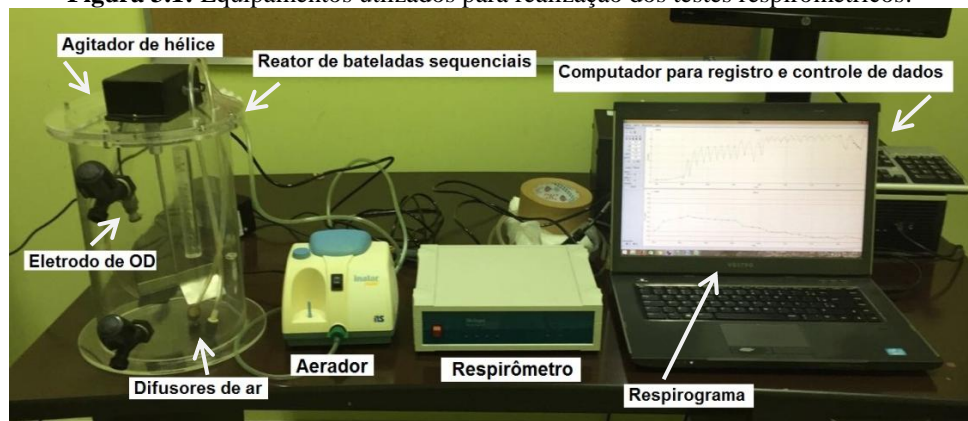
O ensaio foi realizado em dois dias: o lodo foi coletado do reator aerado na estação e concentrado em laboratório através de processos de sedimentação e filtração, retirando-se sempre uma amostra de 2litros de lodo concentrado para ser analisado no respirômetro. Os procedimentos respirométricos foram feitos em um único dia, enquanto as análises de sólidos foram realizadas no dia seguinte, com as amostras de lodo conservadas em geladeira por no máximo 24h.

3.2. Aparato experimental

Os equipamentos utilizados no ensaio estão listados abaixo e mostrados na Figura 3.1:

- Um reator de acrílico com capacidade máxima de 5L;
- Computador contendo o software RespS4.3C que permitia o controle do respirômetro e registro dos dados.;
- Respirômetro Beluga com saída para o computador, para o aerador e uma entrada para o eletrodo de OD;
- Eletrodo de OD;
- Aerador tipo nebulizador conectado ao respirômetro com vazão de 8l/min e conectado a um difusor que insuflava bolhas de ar no fundo do reator através de três saídas de ar acopladas a pedras porosas colocadas no fundo do reator, de forma a permitir uma melhor distribuição do ar;
- Agitador de hélice rotacional, cuja agitação permanecia ligada durante todo o ensaio e com intensidade suficiente apenas para impedir a sedimentação do lodo e manter a sua homogeneização durante todo o procedimento;

Figura 3.1: Equipamentos utilizados para realização dos testes respirométricos.



3.3. Testes respirométricos

3.3.1. Determinação da TCO

Para calcular a constante de transferência de oxigênio e a capacidade de oxigenação foram realizados testes respirométricos de forma aberta e em bateladas sequenciais. Um aerador era conectado ao respirômetro e este controlava a aeração através do software BelugaS4.3C. O aerador era ativado pelo respirômetro quando o eletrodo registrava uma concentração de OD mínima estabelecida e desligava quando chegava a uma concentração máxima também estabelecida no programa, registrando-se assim a taxa de consumo de oxigênio (TCO) em $\text{mgO}_2/\text{L}/\text{h}$ conforme o decaimento da concentração de OD no tempo, até que se chegasse à concentração mínima. Dessa forma, a TCO era determinada semicontinuamente para ciclos de períodos com e sem aeração.

A taxa de consumo de oxigênio é calculada através da variação da concentração de OD em função do tempo, quando não se aplica aeração. Nestas condições se observa uma diminuição linear de OD com o tempo e a TCO ($\text{mgO}_2/\text{L}/\text{h}$) é determinada como (MIRANDA, 2012):

$$TCO = (dOD/dt) = (OD_{max} - OD_{min})/\Delta t \quad (3.1)$$

Onde:

OD_{max} = Concentração de oxigênio dissolvido de referencia máxima (mgO_2/l);

OD_{min} = Concentração de oxigênio dissolvido de referencia mínima (mgO_2/l);

Δt = Variação do tempo (h).

3.4. Determinação da constante de transferência de oxigênio (K_{la}) e da capacidade de oxigenação (CO):

O valor da constante de transferência de oxigênio (K_{la}) depende do aerador utilizado e é influenciada por fatores como geometria, tamanho das bolhas insufladas, profundidade de imersão e mecanismos de aeração.

Na aeração em questão, tem-se a difusão do oxigênio do ar no licor misto e considera-se que a concentração volumétrica de oxigênio seja constante ao longo da coluna de aeração, supondo-se portanto uma mistura perfeita na fase líquida, como se é feito na maioria dos trabalhos onde se deseja modelar a transferência de oxigênio em reatores.

Considerando o que foi dito acima, caso não haja consumo de oxigênio no meio líquido (se fosse água limpa, por exemplo) a taxa de variação da concentração de OD pode ser expressa por uma reação de primeira ordem dada por:

$$d\left(\frac{OD}{dt}\right) = K_{la}(OD_s - OD_{cr}) \quad (3.2)$$

Entretanto, em sistemas de lodo ativado ocorre o consumo de oxigênio pela biomassa e, portanto a concentração de OD no licor misto com o tempo é afetada por dois mecanismos, a aeração e o consumo:

$$dODl/dt = (dODl/dt)_a + (dODl/dt)_c = K_{la}(OD_s - ODl) - TCO \quad (3.3)$$

Sendo:

$dODl/dt$ = Taxa de variação da concentração de oxigênio no licor misto (mgO₂/l/l)

O respirômetro calcula a TCO automaticamente para cada período sem aeração. Este dado pode ser usado para encontrar a constante de transferência (K_{la}) e a concentração de oxigênio de saturação (OD_s) no período de aeração referente a cada TCO calculada pelo equipamento. Sabendo que no período de aeração a concentração de OD aumenta conforme a equação 3.3 e supondo-se o valor constante de TCO no intervalo de integração, a solução da equação diferencial é dada por (Van Haandel e Catunda, 2013):

$$ODl = (OD_s - TCO/K_{la}) * (1 - \exp(-K_{la}.t)) + OD_o * \exp(-K_{la}.t) \quad (3.4)$$

Onde:

OD_l = Concentração de O₂ no licor misto em um tempo qualquer (mgO₂/L);

OD_s = Concentração de saturação (mgO₂/L);

OD_o = Concentração inicial de O₂, (mgO₂/L);

T = Tempo (min ou h);

K_{la} = Constante de transferência de oxigênio (min⁻¹ ou h⁻¹);

Encontrados o K_{la} e o OD_s através da equação 3.4, a capacidade de oxigenação pode ser determinada conforme descrito no item 2.4 com o uso da equação 2.3.

3.5. Procedimento dos ensaios

Após coletado e concentrado conforme descrito no item 3.1, seguia-se o seguinte procedimento para a realização dos ensaios:

- Colocavam-se 2L do lodo concentrado no reator e ligava-se o equipamento;
- Esperava-se de 10 a 15 min para calibração do eletrodo em ar saturado com água;
- Estabelecia-se o limite superior de OD em uma concentração inalcançável de 8mg/l de forma que o equipamento fornecesse aeração durante 5min (tempo máximo permitido pelo respirômetro);
- Estabelecia-se o limite inferior de OD em 1,0mg/l e o desvio padrão da TCO ($Sd_{(TCO)}$) em 0,1;
- Isto feito, deixava-se o lodo concentrado submetido a uma agitação constante emergia-se o eletrodo de OD para dar início aos ciclos com e sem aeração. Os ciclos seguiam-

- se conforme os parâmetros adotados: iniciavam-se ciclos de períodos com aeração (sempre de 5min) e sem aeração. A TCO era marcada a cada final de ciclo, sempre no final do período sem aeração. Um novo ciclo se iniciava sempre quando um dos critérios citados no item anterior acontecia (quando o $OD_{mín}$ chegasse em 1,0mg/l ou $Sd_{(TCO)}$ chegasse em 0,1, o critério que acontecesse primeiro);
- Determinava-se repetidamente o valor da TCO e as variações de concentração de OD em função do tempo. Os dados de OD eram traçados a partir das leituras feitas pelo eletrodo nos períodos de aeração (quando se atingia o valor máximo) e sem aeração (quando se atingia o valor mínimo). O software calculava os valores de TCO por regressão linear através dos dados de decaimento de OD nos períodos sem aeração. Os ciclos seguiam-se até que fosse estabelecida a respiração endógena, caracterizada por uma TCO constante mostrada na tela. Os valores de OD, TCO, temperatura e desvio padrão eram armazenados no computador;
 - Com os dados armazenados, plotavam-se em gráficos os pontos experimentais de OD em função do tempo para cada período de aeração que precedia cada ponto de TCO plotado no gráfico. Bem como também eram criadas curvas teóricas de OD_1 em função do tempo com o auxílio da equação 3.4 para o mesmo período, e conhecendo-se o valor de OD_0 como sendo o valor de OD armazenado na planilha para $t=0$. Para tanto, arbitrava-se inicialmente valores de K_{la} e OD_s quaisquer, e utilizava-se a função solver do Excel para que se encontrassem através de iterações, valores de K_{la} e OD_s que fornecessem uma melhor correlação entre a curva teórica e os pontos experimentais. Os valores de K_{la} e OD_s eram adotados como verdadeiros para aquela concentração de lodo que estava sendo testada;
 - Depois de estabelecida a respiração endógena mostrada no respirômetro, dava-se início as diluições, para tanto se retirava uma alíquota de 250 ml (1/4 do volume) do reator e adicionava-se 250ml de água destilada, garantindo-se assim uma concentração menor de lodo. Parte da amostra retirada do reator era usada para fazer as análises físico-químicas de concentração de sólidos e o restante era descartado;
 - Seguiam-se os ciclos com aeração e sem aeração para determinação da TCO, bem como os procedimentos para a determinação de OD_s e K_{la} para a concentração reduzida;
 - O teste seguia para sucessivas diluições sempre com retiradas de 250 ml e de lodo adiões de o mesmo volume de água destilada, e determinações dos valores de K_{la} e

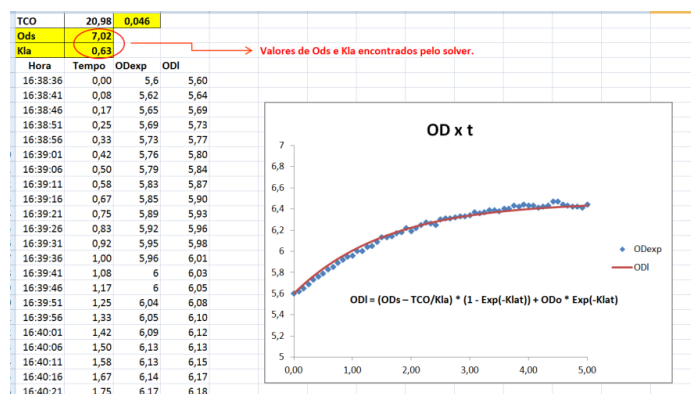
ODs para as diferentes concentrações. Foram realizadas cinco diluições, obtendo-se, portanto seis concentrações diferentes de lodo.

3.5.1. Determinação da constante de transferência e ODs:

Os valores da constante de transferência de oxigênio foram determinados para cada ponto de TCO mostrado no gráfico referente a cada concentração de sólidos. Foram plotados em gráficos os pontos experimentais de OD no tempo para cada período de aeração. Plotou-se uma curva teórica de OD_1 no gráfico, adotando-se o valor de OD_0 como sendo o valor armazenado pelo equipamento para $t=0$ no início de cada aeração, e arbitrando-se inicialmente valores quaisquer de K_{la} e ODs. Com o auxílio da função Solver do Excel, calcularam-se valores de K_{la} e OD_s que fornecessem a melhor correlação entre os pontos experimentais e a curva de OD teórico.

A Figura 3.2 abaixo, mostra um exemplo do ajuste entre a curva teórica de OD_1 e os pontos experimentais para um OD_s e K_{la} encontrados pelo solver. Os dados obtidos pelo respirômetro foram os dados de OD experimental (OD_{exp}), a hora em que cada ponto foi obtido e a TCO para cada ciclo. Como se pode perceber pela figura, o equipamento fornecia uma leitura de OD a cada 5 segundos, já os da TCO eram obtidos a cada final de ciclo sem aeração, conforme os critérios de parada explicados anteriormente.

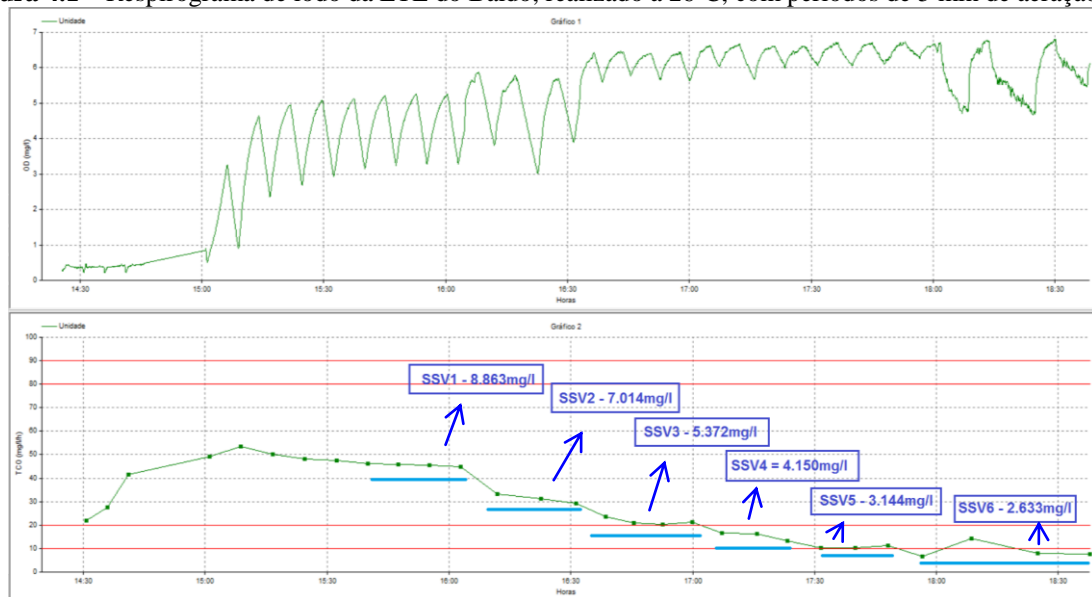
Figura 3.2 - Gráfico para obtenção de K_{la} e ODs.



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4.1 apresenta o respirograma obtido na realização do ensaio para as determinações do K_{la} , realizado como descrito no item 3.5. Nela estão apresentados os gráficos de OD em função do tempo, expresso em mg/L (gráfico superior) onde podem-se observar vários ciclos de períodos com e sem aeração. Já no gráfico inferior, vemos a TCO em função do tempo expressa em mg/L/h para as diferentes concentrações de lodo.

Figura 4.1 – Respirograma de lodo da ETE do Baldo, realizado a 26°C, com períodos de 5 min de aeração.



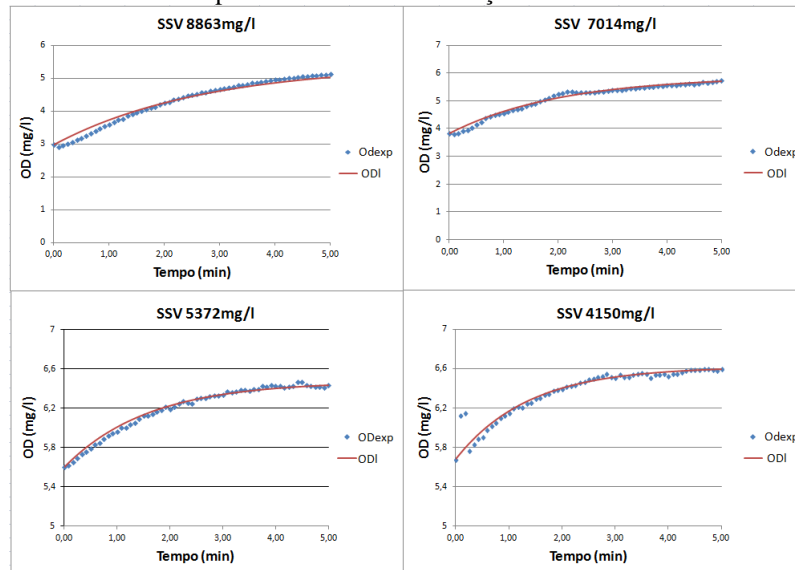
Conforme se apresenta na figura, pode-se notar no gráfico que quanto menor a concentração de sólidos no licor misto, menor é a TCO mostrada no gráfico e mais próximo se apresenta o OD do limite superior estabelecido em 8mg/l. Pode-se perceber também que após estabelecida a respiração endógena, o reinício da aeração dava-se antes do limite inferior de OD ser atingido, pois o software entendia que o número de medições de OD era suficiente para calcular uma reta com $S_d = 0,1$.

Para o primeiro ensaio, foram considerados quatro pontos para o cálculo de K_{la} , pois foi quando a TCO apresentou-se constante, caracterizando-se a endogenia do lodo. Para as demais concentrações, foram considerados de três a quatro pontos para o cálculo da constante de cada concentração, como indicado na figura. De posse dos valores de TCO, foram calculados os valores de K_{la} e ODs com base na equação 3.4 para as seis concentrações de lodo mostradas na figura. Os valores de oxigênio experimentais foram ajustados aos valores teóricos em função do tempo de aeração.

Na figura 4.2 são apresentados alguns exemplos dos ajustes feitos com a equação 3.4 para diferentes concentrações, mostrando-se que há uma correlação bem próxima entre o OD teórico e o experimental, embora se observe uma tendência do valor experimental ser um pouco mais baixo que o teórico no início da curva. Este efeito pode ser normalmente associado ao efeito de relaxação do eletrodo: no início, a variação da concentração do oxigênio é tão rápida que a inércia do eletrodo não permitia acompanhar tal variação, fazendo com que o valor medido não representasse exatamente o valor verdadeiro, nesse caso, a curva teórica representa a melhor estimativa do valor real. Já no final, à medida que a concentração

de OD aumentava, a taxa de aeração diminuía e os valores teóricos se aproximavam mais dos experimentais.

Figura 4.2 – Ajuste entre as curvas experimentais e teóricas de OD encontradas nas simulações de K_{la} e ODs para diferentes concentrações de sólidos.



A tabela 4.1 apresenta os valores médios calculados de K_{la} para o respirograma apresentado na figura 4.1. Os valores encontrados de K_{la} para cada concentração apresentaram-se praticamente constantes, mostrando que os ajustes feitos às curvas pela equação 3.4 foram satisfatórios e resultaram em valores de K_{la} bastante precisos. Através da tabela, é possível observar que à medida que a concentração de lodo diminui, os valores da constante de transferência de oxigênio aumentam. Isso se deve ao fato de que, quanto maior a concentração de sólidos no lodo maior a sua viscosidade, dificultando a transferência de oxigênio e consequentemente diminuindo a taxa de aeração. Este comportamento também foi observado por MIRANDA (2012).

Tabela 4.1 - Valores de K_{la} e OD_s

SSV (mg/l)	TCO (mg/l/h)	OD _{sat} (mg/l)	K_{la} (min ⁻¹)	Sd(TCO)
8863	45,53	7,51	0,38	0,10
7014	31,15	6,96	0,50	0,10
5372	21,52	7,01	0,60	0,10
4150	15,34	6,92	0,73	0,10
3144	10,64	6,73	1,16	0,10
2633	9,23	6,58	2,98	0,15

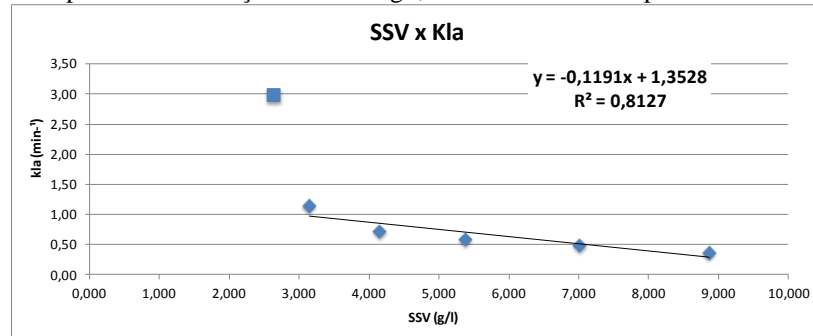
Observando-se a tabela 4.1, percebe-se que há uma relação entre a constante de transferência e a concentração do licor misto: a taxa de OD transferido aumenta consideravelmente à medida que a concentração de lodo diminui. A partir disso, foi possível estabelecer uma relação entre a concentração de lodo e o K_{la} que permite a determinação do coeficiente de transferência de oxigênio para diferentes concentrações de lodo, como mostra a figura 4.3:

$$Kla = 1,35 - 0,12Xt \quad (4.1)$$

Onde:

Xt = Concentração de SSV presente no licor misto (gSSV/L)

Figura 4.3 - Relação entre K_{la} e concentração de sólidos. Para que se encontrasse uma relação mais precisa, o ponto de K_{la} para a concentração de 2633mg/l, foi considerado um ponto fora da curva (outlier).



A equação 4.1 permite determinar o K_{la} para diferentes concentrações de lodo, entretanto a realização de testes com diferentes concentrações ainda se apresenta como uma boa alternativa para corrigir os valores da constante de transferência.

Os dados apresentados na tabela 4.1 ainda foram utilizados para avaliar a relação da concentração de lodo com a capacidade de oxigenação através da equação 2.3 e considerando-se $OD_{crítico}$ igual a 1mg/l conforme recomenda-se na literatura (VAN HAANDEL E CATUNDA, 2013), embora não se descarte uma possibilidade de aumento deste valor, conforme haja aumento da concentração de lodo e da TCO. A tabela 4.2 apresenta a capacidade de oxigenação (CO) determinada para os valores médios de TCO, K_{la} e OD_s mostrados anteriormente para cada concentração de lodo testada no ensaio. Pode-se perceber através dos dados apresentados que a concentração de lodo tem influência bastante significativa na capacidade de aeração, apresentando uma diminuição considerável conforme se aumenta a concentração de sólidos no licor misto.

Tabela 4.2 - Capacidade de oxigenação.

SSV (mg/l)	TCO (mg/l/h)	K_{la} (min ⁻¹)	ODs (mg/l)	ODcr (mg/l)	CO (mgO ₂ /l.min)
8863	45,53	0,38	7,51	1,00	2,45
7014	31,15	0,50	6,96	1,00	2,97
5372	21,52	0,60	7,01	1,00	3,60
4150	15,34	0,73	6,92	1,00	4,33
3144	10,64	1,16	6,73	1,00	6,63
2633	9,23	2,98	6,58	1,00	16,64

A tabela mostra que a capacidade de aeração do lodo com uma concentração de 8863mg/l representa apenas uma fração de $2,45/6,63 = 0,37$ da capacidade do mesmo aerador com uma concentração de 3144 mg/l. Tendo-se em vista que a capacidade de oxigenação do aerador é proporcional à constante de transferência de oxigênio, observou-se que o consumo de energia com aeração para transferência de oxigênio num sistema com concentração de lodo da ordem de 8 gSSV/L é aproximadamente 2,6 vezes maior que para um sistema com o

mesmo aerador e com uma concentração próxima de 2,6 gSSV/L. Se estas análises forem consideradas para reatores em escala real, deve-se considerar o impacto do aumento dos custos de operação na hora de decidir se realmente é viável instalar um sistema que opere com concentrações de lodo elevadas. O aumento dos custos de operação devido aos gastos energéticos deverá ser compensado com uma redução dos custos de investimento na construção de reatores com volumes menores (ou o aumento da capacidade de tratamento para reatores já existentes). Considerando que a energia gasta com aeração representa um dos maiores custos em estações de lodo ativado, é importante que se analise cuidadosamente a viabilidade econômica de se aplicar sistemas com alta concentração de lodo, pois quanto maior a concentração de lodo maior será o gasto para transferir oxigênio necessário aos processos de tratamento.

Esse efeito da concentração de sólidos na taxa de aeração se torna mais considerável somente quando a concentração de lodo for maior que 8 g/l, o que raramente será o caso para o licor misto de lodo ativado convencional, que normalmente tem 2 a 5 g/L de sólidos suspensos. Concentrações mais elevadas ocorrem principalmente em sistemas onde a retenção de lodo é aumentada por membranas (MBR) ou pela introdução de leitos suportes no licor misto, no qual o lodo se adere (MBBR).

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos através da investigação experimental com o intuito de determinar a influência da concentração de lodo sobre a capacidade de aeração do aerador levaram às seguintes conclusões:

- O respirômetro automatizado, como o modelo testado é uma importante ferramenta na determinação da constante de transferência de oxigênio e da capacidade de oxigenação do aerador.
- A elevação na concentração de sólidos diminui a transferência de OD para o licor misto.
- Para concentrações de lodo na faixa de 8 g/L, o consumo energético é aproximadamente 2,6 vezes maior em comparação com concentração de 2,6 g/L de sólidos. Assim, o custo de operação de sistemas com alta concentração de lodo como, por exemplo, os reatores aerados de leito móvel (MBBR), pode tornar-se elevado devido especialmente ao alto requisito de energia de aeração, mostrando-se a necessidade de um estudo cuidadoso de viabilidade econômica para esses sistemas.

6. REFERÊNCIAS

DERKS, Y. M. **Uso da respirometria para avaliar a influência de fatores operacionais e ambientais sobre a cinética de nitrificação.** 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina: UFCG, Campina Grande, PB. 2007.

MEDEIROS, U. T. P.; VAN HAANDEL, A. C.; CATUNDA, P.F.C. **Influência da concentração de oxigênio dissolvido sobre o desempenho de sistemas de lodo ativado.** In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005, Campo Grande/MS.

MIRANDA, A. C. **Influência da concentração de lodo sobre a capacidade de oxigenação do aerador e a influência da concentração do sal sobre a capacidade metabólica do lodo.** 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande: UFCG, Campina Grande, PB. 2012.

SANTOS, S. L. **Estudo comparativo dos métodos contínuo e semicontínuo de determinação da TCO.** 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande: UFCG, Campina Grande, PB. 2013.

VAN HAANDEL, A. C.; et al. **Análise da influência de fatores intervenientes na transferência de oxigênio dissolvido em sistemas de lodo ativado.** 7p. In: *Ciência&Engenharia*, v. 23, n. 2, p.49 – 55. 2014.

VAN HAANDEL, A. C.; CATUNDA, S. Y. C. **Respirometria aplicada ao sistema de lodo ativado: teoria e aplicações.** Campina Grande – PB, 2013.

VAN HAANDEL, A. C.; MARAIS, G. v. R. **O comportamento do sistema de lodo ativado: teoria e aplicações para projetos e operações.** Campina Grande: epgraf, 1999.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias.** Vol. 4. Lodos Ativados. 3ª ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2012.