



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

JÉSSICA YSABELLY TORRES ALVES

**DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS CINÉTICOS EM
SISTEMA DE LODO ATIVADO EMPREGADO NO PÓS-
TRATAMENTO DE REATORES UASB COM O USO DA
RESPIROMETRIA**

**NATAL-RN
2016**

Jéssica Ysabelly Torres Alves

Determinação de parâmetros cinéticos em sistema de lodo ativado empregado no pós-tratamento de reatores uasb com o uso da respirometria

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: Hélio Rodrigues dos Santos

Natal-RN
2016

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

Alves, Jéssica Ysabelly Torres.

Determinação de parâmetros cinéticos em sistema de lodo ativado empregado no pós-tratamento de reatores UASB com o uso da respirometria. / Jéssica Ysabelly Torres Alves. – 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. Engenharia Civil - TCC. 2. Sistemas de lodo ativado - TCC. 3. Bactérias heterotróficas - TCC. 4. Constantes cinéticas – TCC. I. Santos, Hélio Rodrigues dos. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

Jéssica Ysabelly Torres Alves

Determinação de parâmetros cinéticos em sistema de lodo ativado empregado no pós-tratamento de reatores uasb com o uso da respirometria

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 de novembro de 2016:

Prof. Dr. Hélio Rodrigues dos Santos – Orientador

MsC. Larissa Caroline Saraiva Ferreira – Examinadora interna

Eng^a. Carolina Tavares Paula – Examinadora externa

Natal-RN

2016

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram os meios para o aprendizado.

Aos amigos e companheiros de classe, os quais levarei para o resto da vida.

Ao meu orientador, professor Hélio Rodrigues, pela confiança, correções, dedicação e incentivos.

Aos meus pais e familiares pela dedicação e apoio em todos os momentos.

Ao professor Cícero Onofre por ter disponibilizado os equipamentos utilizados na pesquisa, sendo de fundamental importância no desenvolvimento desta, assim como ao professor Yuri Catunda e ao aluno Jadilson pelas orientações quanto o manuseio dos aparelhos.

À professora Juliana Delgado Tinôco, representando a Companhia de águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), por ter viabilizado as visitas à estação objeto desta pesquisa.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS CINÉTICOS EM SISTEMA DE LODO ATIVADO EMPREGADO NO PÓS-TRATAMENTO DE REATORES UASB COM O USO DA RESPIROMETRIA

Jéssica Ysabelly Torres Alves¹

Orientação: Hélio Rodrigues dos Santos²

RESUMO

Os reatores anaeróbios modernos, com destaque para o UASB, em regiões de clima quente, possibilitam a remoção de grande parte do material orgânico (MO) do esgoto a baixo custo. Contudo, os efluentes desses reatores frequentemente necessitam de pós-tratamento para remoção complementar do MO, o que tem sido obtido com sucesso, p.ex., em sistemas de lodo ativado (LA). Neste caso, contudo, podem ocorrer mudanças na cinética de degradação, em comparação com os sistemas de LA clássicos, uma vez que o MO disponível no efluente do reator anaeróbio é geralmente menos assimilável pelas bactérias heterotróficas que o do esgoto bruto. Assim, o objetivo deste estudo foi determinar os parâmetros cinéticos do lodo heterotrófico proveniente de um sistema de lodo ativado empregado no pós-tratamento de reatores UASB. Uma série de testes foi realizada para a determinação dos parâmetros cinéticos: Taxa de Consumo de Oxigênio Específica (TCO_{esp}), constante de utilização do substrato (K_{ms}) e constante específica máxima de crescimento (μ_m), utilizando a respirometria para estas determinações. Além disso, também foram calculadas as frações de material orgânico consumidas para o catabolismo e anabolismo. Os parâmetros mostraram-se diferentes dos especificados na literatura para a configuração da estação de tratamento de efluentes em estudo, sendo próximos aos valores encontrados para sistemas de lodo ativado não precedidas de unidade anaeróbia.

Palavras-chave: Sistemas de lodo ativado. Bactérias heterotróficas. Constantes cinéticas. Respirometria.

¹ Discente. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

² Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Professor adjunto da UFRN.

DETERMINATION OF KINETIC PARAMETERS IN AN ACTIVATED SLUDGE SYSTEM EMPLOYED IN THE POST-TREATMENT OF UASB REACTORS WITH THE USE OF RESPIROMETRY

Jéssica Ysabelly Torres Alves¹
Orientação: Hélio Rodrigues dos Santos²

ABSTRACT

The modern anaerobic reactors, featuring the UASB reactor, in regions of tropical weather, enable the removal of significant part of sewage organic matter at a low cost. Nevertheless, these reactors' effluents often require a post-treatment for a complementary removal of the organic matter, what has been successfully attained, for instance, in activated sludge systems. In this case, however, there may be changes in the kinetics of degradation, in comparison to other classic activated sludge systems, since the organic matter available in the anaerobic reactor effluent is usually less absorbed by the heterotrophic bacteria than the one from raw sewage. Therefore, this work's goal was to determine the kinetic parameters of the heterotrophic sludge originated from an activated sludge system used in the post-treatment of UASB reactors. A series of tests was performed to determine the kinetic parameters of the bacteria mass: Specific Oxygen Uptake Rate (SOUR), substrate utilization constant (K_{ms}) and the maximum specific growth constant (μ_m), utilizing respirometry to determine them. Moreover, the fractions of organic matter consumed in the catabolism and anabolism were calculated as well. The parameters obtained differ from the ones specified on the literature for the sewage treatment plant configuration on this work, being close to the values found in activated sludge systems not preceded of anaerobic unit.

Key-words: Activated sludge systems. Heterotrophic bacteria. Kinetic constants. Respirometry.

¹ Discente. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

² Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Professor adjunto da UFRN.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de lodo ativado são amplamente utilizados, em nível mundial, para o tratamento de despejos domésticos e industriais, quando se quer obter elevada qualidade no efluente tratado, porém, tal sistema requer um nível de mecanização e operação especializada elevados.

Basicamente, os sistemas de lodo ativado são constituídos por um reator aeróbio (tanque de aeração) seguido de um decantador secundário. No tanque de aeração ocorre a degradação da matéria orgânica por bactéria aeróbias, podendo haver, em determinadas condições e com arranjo conveniente, a remoção da matéria nitrogenada e do fósforo. Nesta unidade, a biomassa microbiana utiliza substratos orgânicos para se desenvolver, permanecendo dispersa no reator. No decantador secundário ocorre a sedimentação dos sólidos, permitindo que o efluente final seja clarificado. Os sólidos que sedimentam no decantador são recirculados para o reator aerado. Quando a concentração de lodo no reator aerado atinge certo valor desejável, parte do lodo deve ser descartado (lodo excedente), na mesma proporção com que é produzido.

A biomassa dos sistemas de lodo ativado é composta de bactérias heterotróficas (responsáveis pela oxidação da matéria orgânica) e bactérias autotróficas (responsáveis pela nitrificação). O metabolismo desses grupos de bactérias é avaliado através de constantes cinéticas, sendo imprescindível o conhecimento do valor numérico destas quando se deseja fazer projetos racionais ou otimizar estações existentes de sistemas de lodo ativado, onde ocorra remoção de material orgânico e nitrogenado (VAN HAANDEL E MARAIS, 1999).

Dentre as técnicas utilizadas para avaliar a cinética das reações e verificar o comportamento metabólico das espécies de microrganismos presentes na biomassa, a respirometria se destaca devido à velocidade na resposta dos dados e à flexibilidade de aplicação na determinação da Taxa de Consumo de Oxigênio (TCO), estabelecendo as taxas das reações.

A configuração UASB seguido de lodos ativados influencia a cinética de degradação da MO devido ao efluente proveniente de sistemas anaeróbios ser menos assimilável comparando-se ao esgoto bruto e, conseqüentemente, havendo alterações nas constantes cinéticas empregadas no dimensionamento e no monitoramento do sistema. Dessa forma, este trabalho tem como principal objetivo avaliar os parâmetros que regem a cinética de utilização da matéria orgânica por biomassa heterotrófica de um sistema de lodo ativado precedido de reator UASB.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistema de lodo ativado

2.1.1 Material orgânico

Para efeito de modelagem, o material orgânico é dividido em uma parcela biodegradável (S_{ba}) – metabolizável pelos microrganismos –, e uma parcela não biodegradável (S_{ua}), a qual não é metabolizável. Essas frações são ainda subdivididas em solúvel (dissolvida) e particulada (material coloidal e em suspensão). O material biodegradável e dissolvido (S_{bsa}) é a fração mais rapidamente assimilável pelos microrganismos, enquanto que a biodegradável particulada (S_{bpa}) passa pelos processos de floculação, adsorção, hidrólise, solubilização e, finalmente quando solúvel, pela metabolização. Já a porção não biodegradável particulada (S_{upa}) é floculada e acumulada no sistema até a sua descarga junto com o lodo de excesso, sendo a dissolvida (S_{usa}) não afetada pelo meio e saindo juntamente com o efluente (VAN HAANDEL E MARAIS, 1999).

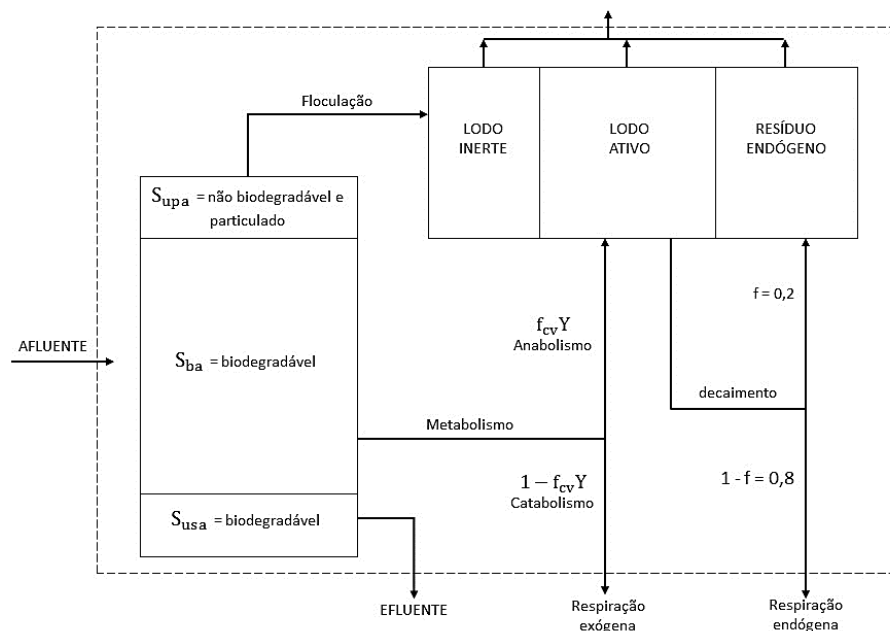
2.1.2 Metabolismo bacteriano

Nos sistemas aeróbios de tratamento de águas residuárias há utilização do oxigênio dissolvido nas reações bioquímicas de degradação da matéria orgânica e da amônia, substâncias oxidáveis que são substratos da massa bacteriana. Estes substratos são metabolizados por diferentes grupos de microrganismos: o material orgânico é utilizado pelas bactérias heterotróficas e a amônia por bactérias autotróficas.

Dentro do processo de metabolismo, em ambas as comunidades microbiológicas, parte do substrato é utilizado na produção de biomassa, processo denominado anabolismo ou assimilação. O restante é oxidado e transformado em produtos estabilizados, processo denominado catabolismo ou desassimilação. Em princípio, os processos de catabolismo e anabolismo resultam em fenômenos mensuráveis. Segundo Metcalf e Eddy (2003), para oxidar 1g de DQO é necessário 1g de oxigênio, dessa forma, através da massa de oxidante consumida é possível determinar a massa de material orgânico catabolizada e, por consequência, utilizada para a produção de massa celular.

Este consumo de oxigênio pode ser determinado experimentalmente através das técnicas respirométricas. Além do consumo de OD no catabolismo, há ainda outra forma de utilização do oxigênio, na qual há a oxidação de material intracelular da massa bacteriana, processo resultante do decaimento do lodo ativo (biomassa sintetizada). De acordo com Van Haandel & Marais (1999), tais processos que originam consumo de oxigênio são denominados de respiração exógena e respiração endógena, respectivamente para o catabolismo e utilização das células bacterianas. Na Figura 1 é representada esquematicamente os processos descritos anteriormente.

Figura 1: Representação esquemática dos processos básicos que ocorrem no sistema de lodo ativado



Fonte: adaptado de Van Haandel e Marais (1999).

Valores experimentais apontam que a produção de massa bacteriana no metabolismo oxidativo (coeficiente de produção celular - Y) está na faixa de 0,35 a 0,52 gSSV/gDQO, sendo 0,45gSSV/gDQO um valor médio frequentemente usado (VAN HAANDEL & MARAIS, 1999). Von Sperling (2012) apresenta, para o caso de lodos ativados como pós-tratamento de efluentes anaeróbios, o coeficiente de produção celular entre 0,2 a 0,4 gSSV/gDQO, sendo 0,3 o valor típico utilizado em projetos. Dessa forma, deve-se destacar que o valor deste coeficiente, especificamente para este caso, deve ser motivo de investigação continuada (VON SPERLING, 2012).

Pode-se estimar a fração anabolizada do material orgânico (f_{ana}) como:

$$f_{\text{ana}} = f_{\text{cv}} Y \quad (2.1)$$

$$f_{\text{ana}} = 1,5 \text{ mgDQO} \cdot \text{mg}^{-1} \text{SSV} \times 0,3 \text{ mgSSV} \cdot \text{mg}^{-1} \text{DQO} = 0,45$$

e conseqüentemente, a fração catabolizada (f_{cat}):

$$f_{\text{cat}} = 1 - f_{\text{cv}} Y \quad (2.2)$$

$$f_{\text{cat}} = 1 - 0,45 = 0,55$$

Ou seja, 45% do material metabolizado originário de sistema anaeróbio é convertido em material celular, enquanto 55% é catabolizado. Já para sistemas de lodos ativados que recebem esgoto bruto as frações para catabolismo e anabolismo são, respectivamente, em torno de 33% e 67% (VAN HAANDEL & CATUNDA, 2013)

2.1.3 Cinética de utilização do material orgânico

A cinética do metabolismo de utilização do material orgânico reflete a velocidade com que os processos de remoção e de síntese ocorrem no sistema. A partir da definição dos parâmetros que modelam tais fenômenos cinéticos, descreve-se a remoção do material orgânico, o crescimento do lodo e o consumo de oxigênio.

A utilização de um monosubstrato de material orgânico pela biomassa é descrita como a cinética de Monod (1948) e é resumida em dois seguimentos:

- 1- A taxa de crescimento de microrganismos é proporcional à taxa de utilização do substrato pelos microrganismos:

$$r_c = \left(\frac{dX}{dt} \right)_c = Y r_u = -Y \left(\frac{dS}{dt} \right)_u \quad (2.3)$$

Onde:

r_c = taxa de crescimento de microrganismos;

X = concentração de microrganismos;

S = concentração do substrato;

Y = coeficiente de produção celular;

u, c são índices que se referem à utilização e ao crescimento respectivamente.

- 2- A taxa de utilização do substrato depende da concentração deste substrato da seguinte maneira:

$$r_u = \frac{K_{ms}S}{(S + K_{ss})} X_a \quad (2.7) \quad (2.4)$$

Onde:

r_u = taxa de utilização do substrato;

K_{ms} = constante de utilização específica máxima do substrato pelo lodo;

K_{ss} = constante de meia saturação;

X_a = concentração de lodo ativo.

O valor numérico da constante de utilização de material orgânico é indicativo da capacidade metabólica do lodo. Um valor de $K_{ms} = 2 \text{ mgDQO/mgX}_a/\text{d}$ é indicativo de um lodo de capacidade baixa, enquanto um valor de $K_{ms} = 10 \text{ mgDQO/mgX}_a/\text{d}$ caracteriza um lodo de muito boa capacidade metabólica (VAN HAANDEL & CATUNDA, 2013).

Outro aspecto que indica a capacidade metabólica do lodo é a relação da TCO exógena máxima e a TCO endógena. Segundo Van Haandel e Catunda (2013), uma relação $\text{TCO}_{\text{exó,más}}/\text{TCO}_{\text{end}}$ maior que 10 indica um lodo de boa qualidade, enquanto uma proporção inferior a 3 indica uma capacidade metabólica baixa.

2.2 Respirometria

A respirometria é uma técnica que consiste na medição do consumo de oxigênio utilizado pelas bactérias durante a degradação dos substratos. Os respirômetros permitem determinar a variação da concentração de oxigênio dissolvido em função do tempo, ou seja, a Taxa de Consumo de Oxigênio (TCO), parâmetro base para determinações das constantes do metabolismo bacteriano, utilizando-se as equações do modelo de Maraus (1976). O valor experimental da TCO pode ser determinado continua e semi-continuamente.

A primeira consiste na leitura da variação da concentração de OD sem a interrupção da aeração e tem aplicação nos estudos de otimização de sistemas contínuos, permitindo cálculo de balanço de massa, avaliação da concentração de OD ótima, controle operacional do sistema em reatores de teste ou in loco, dentre outros aspectos. Por sua vez, o método semi-contínuo é realizado com interrupções planejadas da aeração, sendo importante para se determinar a estequiometria dos processos metabólicos e das constantes das equações que descrevem a cinética do metabolismo dos substratos: material orgânico e amônia (VAN HAANDEL & CATUNDA, 2013).

O princípio do teste da TCO se resume na interrupção de períodos de aeração. Para isso, são estabelecidos limites de oxigênio dissolvido, superior (OD_{sup}) e inferior (OD_{inf}). A aeração é usada até a concentração de OD no reator atingir $OD_{superior}$, momento em que o software automaticamente encerra a introdução de oxigênio pelo aerador acoplado ao respirômetro. Espera-se, então, a queda da concentração de OD até que o limite inferior seja atingido, devido ao consumo pela biomassa, e é determinada a TCO em $mgO_2/L/h$, reiniciando-se o ciclo, sendo o cálculo da TCO é realizado por regressão linear.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Delineamento experimental

Para a determinação das constantes cinéticas, isto é, caracterização do metabolismo de um lodo heterotrófico, coletou-se amostras do licor misto em uma estação de tratamento de esgoto em escala plena e realizou-se testes respirométricos em laboratório. Com o respirômetro, equipamento capaz de automatizar todas as etapas do ensaio, as amostras foram submetidas a ciclos de aeração e não aeração com adições controladas de acetato de sódio, substrato orgânico sintético.

O consumo de oxigênio dissolvido pelas bactérias, induzido pela adição de substrato, foi medido a cada término do período de não aeração, obtendo-se a TCO. Para cada adição efetuada, foi obtido um gráfico através uma série de valores de TCO, chegando ao total consumo do acetato quando estes valores se encontram constantes.

Realizou-se duas coletas de amostras em dias diferentes, as quais foram submetidas, cada uma, à três adições de acetato de sódio, resultando em um gráfico com três pulsos. Com os resultados obtidos pelas seis adições de substrato, foram calculadas as médias para cada parâmetro objeto deste estudo, as considerando como valores comparativos.

3.2 Local de estudo

A pesquisa foi desenvolvida com amostragens de licor misto provenientes da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Dom Nivaldo Monte (conhecida como ETE do Baldo), em Natal. Possui capacidade de tratar 450 L/s, porém atualmente recebe uma vazão de 350 L/s em média.

A estação conta com um sistema de tratamento composto por unidade de tratamento preliminar (UTP), tratamento anaeróbio (reator UASB), seguido de lodo ativado convencional, com remoção de nitrogênio e desinfecção por radiação ultravioleta.

3.3 Testes respirométricos

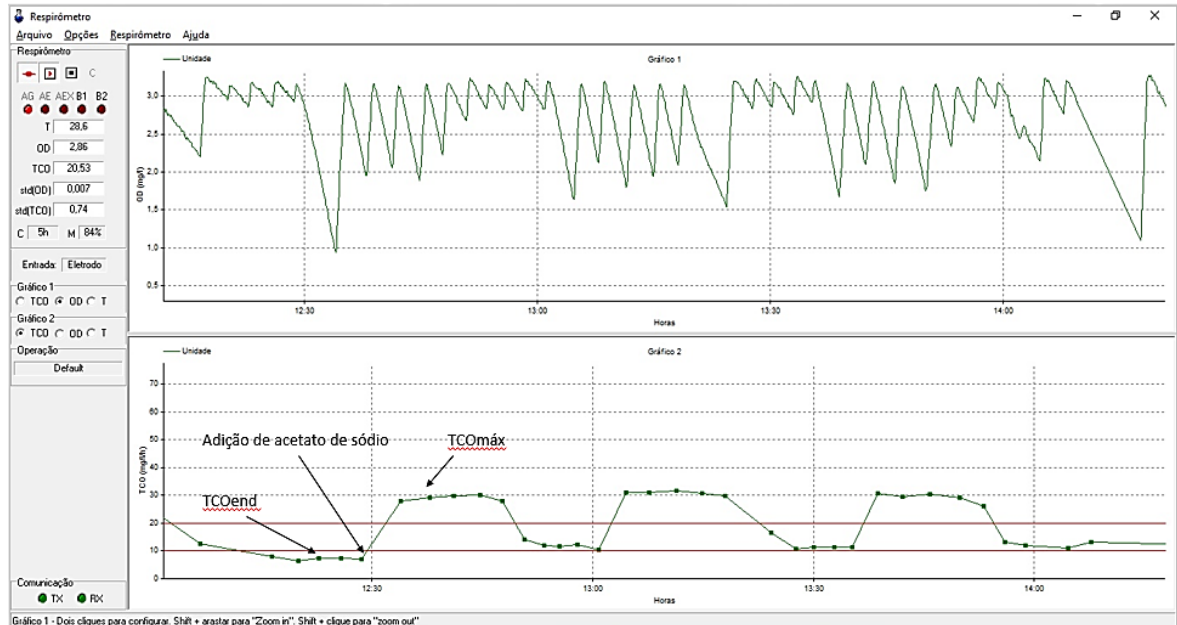
As amostras para as análises laboratoriais e testes respirométricos foram coletadas no tanque de aeração e analisadas no mesmo dia.

A Taxa de Consumo de Oxigênio (TCO) reflete a velocidade de consumo de oxigênio pelos microrganismos. Para a sua determinação utilizou-se o respirômetro Beluga, do tipo aberto e de forma semi-contínua. A aeração era controlada pelo software S4.3C, acionada quando um dos três parâmetros estipulados era atingido: valor mínimo de OD, desvio-padrão da TCO menor que 0,1 ou 5 minutos de fornecimento de oxigênio. A aeração era interrompida quando o limite máximo era alcançado ou passados 5 minutos. Dessa forma, iniciavam-se ciclos de períodos com e sem aeração. Durante os períodos sem aeração o software determinava a TCO a partir da variação da concentração de OD com o tempo.

Na Figura 2 exemplifica-se um dos respirogramas gerados nos testes durante uma batelada de lodo. A tela apresenta duas janelas: na janela superior vê-se o gráfico da concentração de OD e na janela inferior é apresentado o respirograma, ou seja, os valores da TCO em função do tempo. Pode-se observar que inicialmente os valores de TCO variam até permanecerem constantes, caracterizando, neste ponto, o valor da TCO endógena. Percebe-se também que depois da adição do acetato de sódio, a TCO atinge um valor máximo devido à respiração exógena. Após isso, a TCO decai até estabelecer novamente o estado endógeno. Escolheu-se realizar tréplica para cada amostra, com o objetivo de se obter resultados mais confiáveis e característicos.

Os valores instantâneos de temperatura do licor misto, de concentração de OD e de TCO podem ser lidos diretamente na tela e no lado esquerdo do gráfico.

Figura 2: Respirograma para determinação do metabolismo das bactérias heterotróficas.

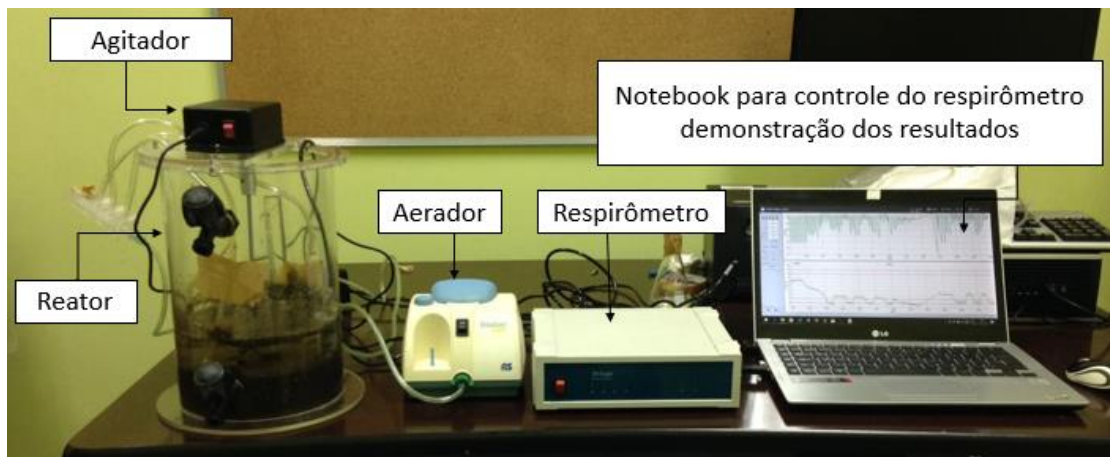


Fonte: Elaboração do autor.

3.4 Equipamentos utilizados na realização dos testes respirométricos

O material utilizado para execução dos testes respirométricos era composto por: respirômetro Beluga com saída para computador, para aerador e entrada para o eletrodo de OD; nebulizador (aerador) com 3 pedras porosas; eletrodo de oxigênio; recipiente de acrílico (reator); agitador de paletas com motor elétrico para manter o lodo em suspensão; notebook, contendo o software S4.3c. (Figura3):

Figura 3: Equipamentos utilizados nos testes respirométricos.



Fonte: Elaboração do autor.

3.5 Procedimento de realização dos testes

Os testes respirométricos foram feitos seguindo a metodologia a seguir:

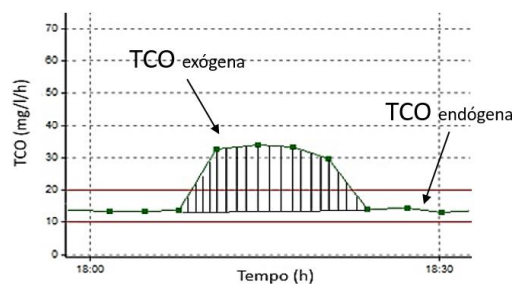
- Ligava-se o respirômetro e esperava-se aproximadamente 10 minutos para a calibração do eletrodo de oxigênio dentro de um recipiente com um pouco de água destilada para que o ar ficasse saturado com água, obtendo-se o valor da concentração de saturação do oxigênio;
- Armazenavam-se 2 litros de licor misto proveniente do tanque de aeração dentro do reator de acrílico;
- Submetia-se a amostra à agitação com o eletrodo de OD submerso. Iniciava-se os ciclos de aeração e não aeração controlada pelo respirômetro, para que todo o material extracelular fosse utilizado, e assim, determinar a TCO mínima, ou seja, a TCO endógena. Nesta fase, os critérios de parada/início da aeração eram somente o intervalo de OD (1,0 a 3,0mg/L) e o tempo máximo de 5 minutos de aeração, predefinida pelo próprio software;
- Nesse momento, adicionava-se o acetato de sódio, de acordo com a faixa previamente fixada de OD e os critérios de desvio-padrão de 0,10 e tempo máximo sem aeração de 5 minutos, parâmetros estabelecidos pelo operador.

3.6 Determinação da estequiometria e cinética do metabolismo

3.6.1 Determinação da proporção entre anabolismo e catabolismo

Para a determinação das frações oxidadas e sintetizadas do material orgânico solúvel, calcula-se a área compreendida entre a TCO endógena e a TCO exógena que representa o consumo de oxigênio para a oxidação do substrato (Figura4). Este valor é equivalente à quantidade de DQO utilizada na respiração exógena.

Figura 4: Perfil respirométrico para uma adição de substrato de 38,3DQOmg/L.



Fonte: Elaboração do autor.

3.6.2 Constantes cinéticas do metabolismo

A partir dos respirogramas gerados determinam-se as constantes cinéticas das bactérias heterotróficas: taxa de utilização específica máxima do substrato (K_{ms}), taxa de crescimento específico máxima (μ_m) e constante de meia saturação (K_{ss}), utilizando o seguinte procedimento:

(1) Concentração de lodo ativo

Segundo o modelo de lodo ativado apresentado por Marais e Ekama (1976), a fração volátil da biomassa é composta por lodo ativo e lodo inativo. A concentração de lodo ativo pode ser calculada utilizando a TCO obtida através de uma batelada de lodo quando não há material a ser metabolizado, ou seja, pela TCO endógena, através da seguinte relação:

$$TCO_{end} = f_{cv}b_h(1 - f)X_a \quad (3.1)$$

ou

$$X_a = TCO_{end}/f_{cv}b_h(1 - f) \quad (3.2)$$

Onde:

X_a = concentração de lodo ativo (mg/L);

TCO_{end} = taxa de consumo de oxigênio devido à respiração endógena;

f_{cv} = proporção entre a concentração de sólidos voláteis (SSV) e a DQO de um lodo = 1,5 mgSSV/mgDQO;

f = fração de lodo ativo que decai para resíduo endógeno = 0,2 (McCarty & Brodersen, 1964);

b_h = constante de decaimento de lodo ativo = $0,24(1,04)^{(t-20)} d^{-1}$ (Van haandel & Marais 1999).

$$TCO_{end,n} = (f_{cv} + 4,56f_n)b_h(1 - f)X_a \quad (3.3)$$

ou

$$X_a = TCO_{end,n}/f_{cv}b_h(1 - f) \quad (3.4)$$

(2) Constante de utilização do substrato

Calcula-se a constante de utilização do substrato com auxílio da Equação 3.6: considerando que no período de TCO máxima a concentração do substrato é elevada, o quociente $S/(K_{ss} + S)$ se aproxima da unidade. Dessa forma, obtém-se:

$$K_{ms} = r_u/X_a \quad (3.5)$$

(3) Coeficiente de produção celular

Sabendo que:

$$f_{\text{cat}} = 1 - f_{\text{ana}} = 1 - Yf_{\text{cv}} \quad (3.6)$$

Então:

$$Y = (1 - f_{\text{cat}})/f_{\text{cv}} \quad (3.7)$$

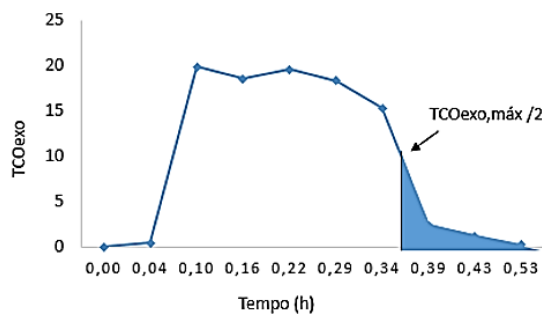
(4) Constante de crescimento máximo

$$\mu_m = YK_{\text{ms}} \quad (3.8)$$

(5) Constante de meia saturação

Constante de meia saturação do substrato é a quantidade de substrato restante quando a TCO é a metade da TCO_{max} (PORTO, 2007). O valor de K_{ss} é determinado pela área correspondente entre a $\text{TCO}_{\text{máx}}/2$ e a TCO_{end} (Figura 5).

Figura 5 - Curva para o cálculo da constante de meia saturação do substrato



Fonte: Elaboração do autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e analisados os dados obtidos durante a fase experimental. Serão discutidos os resultados da determinação da TCO dentro do contexto da atividade metabólica das bactérias heterotróficas.

4.1 Determinação das frações oxidadas e sintetizadas

A partir do método apresentado em 3.6.1, foi possível quantificar as frações catabolizadas e anabolizadas. A integração das curvas da Figura 6 e Figura 7,

respectivamente, resultou em 19,15mgDQO/L e 16,83mgDQO/L para três adições de 38,3mg/L. Dividindo-se a massa de DQO utilizada na respiração exógena pela quantidade de material orgânico adicionado, tem-se a fração oxidada, dessa forma, para a amostra 1 foi obtido $f_{cat} = 19,15/(3 \times 38,3) = 0,17$ e para a amostra 2 obteve-se $f_{cat} = 16,83/(3 \times 38,3) = 0,15$. A

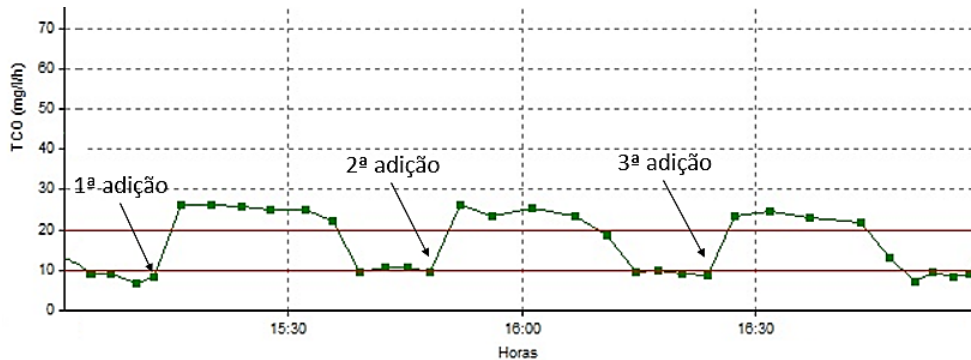
Tabela 1 apresenta a média de f_{cat} e f_{ana} .

Figura 6: Amostra 1-Respirograma gerado por três adições de 38,3mgDQO/L.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 7: Amostra 2-Respirograma gerado por três adições de 38,3mgDQO/L.



Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 1: Frações anabolizada e catabolizada.

f_{cat}	$f_{ana} = 1 - Yf_{cat}$
0,16	0,84

A fração de material oxidado admitiu valores muito abaixo dos encontrados na literatura (0,40 a 0,70), comportando-se de maneira inversa ao esperado, para o sistema de UASB seguido de lodo ativado. Porto (2007) em seus estudos chegou ao valor médio de 0,28 para fração oxidada, considerando adição de acetado de sódio em sistema UASB +LA, valor inferior ao estabelecidos na teoria de lodo ativado desenvolvida por Marais (1976) e seus colaboradores que é de 0,33 para afluente de esgoto não digerido. Essa constatação indica que o fator de síntese celular Y é variável, dependendo da natureza do substrato e do lodo.

4.1.1 Determinação das constantes cinéticas do metabolismo

Através da metodologia especificada em 3.2.1, obteve-se os seguintes valores na Tabela2:

Tabela 2: Constantes e valores estequiométricos calculados.

	Resultados	UASB + LA	LA
Nº de testes (adições)	6	-	-
TCO _{méd,exó} (mgO ₂ /L/h)	17,16	-	-
TCO _{esp} (mgO ₂ /h/gXv)	6,55	5,95 ⁹	15,0-35,0 ⁸
TCO _{exo, máx} /TCO _{end}	1,73	-	-
X _a (mgSSV/L)	629,54	-	-
K _{ms} (mgDQO/mgXa/d)	4,19	-	20,0 ⁵
Y	0,57	0,2-0,4 ⁷	0,35-0,52 ⁶
μ_m (d ⁻¹)	2,36	0,39 ⁴	1,50 – 5,0 ¹
			3,72 ²
			2,40 -7,20 ³
K _{ss} (mgDQO/L)	1,63	0,64 ⁴	1,0-5,0 ¹
			5,0 ⁵

Legenda: TCO_{méd,exó}: taxa média de consumo de oxigênio para respiração exógena; TCO_{esp}: taxa de consumo de oxigênio específica; TCO_{exo, máx}/TCO_{máx}: TCO exógena máxima pela TCO endógena; X_a: concentração de lodo ativo; K_{ms}: constante de utilização do substrato pelo lodo ativo; Y: coeficiente de produção celular; μ_m : constante de crescimento máximo; K_{ss}: constante de meia saturação.

¹ Metcalf e Eddy (1991); ² Lawrence e McCarty (1970); ³ Horan (1990); ⁴ Barros (2014); ⁵ Dold et al. (1980); ⁶ Van Haandel e Marais (1999); ⁷ Von Sperling (2012); ⁸ Marais e Ekama (1976);

⁹ Porto (2007)

O valor de TCO_{exo} normalmente é expresso na forma de TCO_{esp}, quando determinada a proporção da taxa de consumo de oxigênio por grama de lodo ativo (X_a), apresentado na

Tabela2.

O valor de μ_m se aproxima dos valores encontrados na literatura. Metcalf e Eddy (1991) apud Von Sperling (2012) indicam um valor de taxa de crescimento de bactérias variando entre 1,5 e 5,0 para uma temperatura média de 20°C, sem sistema anaeróbio à montante; Lawrence e McCarty (1970) apud Barros (2014) e mencionam 3,7 e Horan (1990) apud Barros (2014) 2,4 a 7,2. Tal parâmetro é um indicador de anormalidade na capacidade metabólica do lodo, ou seja, valores fora desses intervalos indicam a presença de substâncias inibidoras à atividade das bactérias.

De acordo com Metcalf e Eddy (2003) apud Von Sperling (2012), os valores típicos de K_{ss} estão na faixa de 1 – 5 mgDQO/L e Dold et al. (1980) apud van Haandel (2006) 5 mgDQO/L. Dessa forma, a concentração de 38,3mg/L utilizada nos testes não foi um fator limitante para a determinação do metabolismo das bactérias heterotróficas. Os valores baixos da constante de meia saturação (K_{ss} sempre menor que 10mg/L), mostram que o metabolismo do material orgânico solúvel tenderá a ocorrer a toda velocidade, podendo-se esperar, sob condições de operação normais que a remoção de material orgânico solúvel seja completa.

Os valores de Y calculados mostram um valor médio de 0,57, estando acima dos valores dentro da faixa indicada, de 0,45 a 0,50, por Van Haandel & Marais (1999), e 0,2 a 0,4 por Von Sperling (2012).

5. CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa, que teve como objetivo determinar as constantes cinéticas de um sistema de lodo ativado precedido por reator UASB, levaram às seguintes conclusões:

- As frações utilizadas no metabolismo para o catabolismo e para o anabolismo apresentam valores divergentes aos encontrados na literatura, indicando uma maior porcentagem (84%) para a reprodução de células da biomassa. Além disso, de acordo com o valor calculado, o sistema em estudo se comporta de forma aproximada dos sistemas de lodo ativado sem a utilização de reator UASB que possuem produção celular, de acordo com valores praticados, de 67%.
- O valor encontrado para o coeficiente de produção celular (Y) mostrou-se um pouco acima dos valores normalmente utilizado em projetos de sistema de lodo ativado sem reator anaeróbio à montante, indicando que o lodo em estudo apresenta a necessidade de elevar sua concentração de lodo ativo.
- A capacidade metabólica do lodo heterotrófico pode ser medida pela constante K_{ms} com média de 4,19mg de DQO por mg de lodo por dia. Este valor é indicativo da qualidade do lodo, sendo caracterizado como um lodo de baixa a média capacidade metabólica para substrato solúvel e biodegradável.
- O valor encontrado para a relação da TCO exógena máxima e a TCO endógena ($TCO_{exo, máx}/TCO_{end}$) indica um lodo de baixa capacidade metabólica.

6. REFERÊNCIAS

BARROS, A. R. M. **Avaliação dos parâmetros cinéticos de biomassa gerada em sistemas de lodo ativado.** 2014. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

DERKS, Y. M. **Uso da respirometria para avaliar a influência de fatores operacionais e ambientais sobre a cinética de nitrificação.** 2014. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

MANCUSO, Pedro Caetano; SANTOS, Hilton Felício. **Reúso de Água.** 1. ed. São Paulo: Manole, 2012.

METCALF e EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.** McGraw Hill, 4.ed. New York: McGraw-Hill Book, 2003.

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.** 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

PORTO, A. L. **Uso da respirometria para caracterização da atividade metabólica de bactérias heterotróficas.** 2007. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

SANTOS, S.L. **Estudo comparativo dos métodos contínuo e semi-contínuo de determinação da taxa de consumo de oxigênio.** 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

SILVA FILHO, H. A. et al. **Seleção de substratos padrões para ensaios respirométricos aeróbios com biomassa de sistemas de lodo ativado.** Artigo Técnico – Eng. Sanit. Ambient. [online]. 2015, vol.20, n.1, pp.141-150. ISSN 1413-4152.

VAN HAANDEL, A. C. e MARAIS, G. **O comportamento do sistema de lodo ativado: Teoria e aplicações para projetos e operações.** Campina Grande: Epgraf, 1999.

VAN HAANDEL, A. C.; MONROY, O.; CELIS, B.; RUSTRIAN, E. e CERVANTES, F.J. **Principles of process design for industrial wastewater treatment systems.** In: CERVANTES, F.J.; PAVLOSTATHIS, S.G. e VAN HAANDEL, A. C. (editors). **Advanced biological treatment processes for industrial wastewaters.** London: IWA Publishing, 2006.

VAN HAANDEL, A. C. e CATUNDA, Y. C. **O Respirometria aplicada ao sistema de lodo ativado: Teoria e aplicações.** Campina Grande: Epgraf, 2013.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias - Lodos ativados.** Vol.4. 2ª ed. Belo Horizonte (MG), DESA/UFMG, 2002.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias - Princípios básicos do tratamento de esgotos.** Vol. 2. Belo Horizonte (MG), DESA/UFMG, 1996.