



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

SILVÂNIA LUCAS DOS SANTOS

**ESTUDO COMPARATIVO DOS MÉTODOS CONTÍNUO E SEMICONTÍNUO DE
DETERMINAÇÃO DA TAXA DE CONSUMO DE OXIGÊNIO**

**CAMPINA GRANDE - PB
FEVEREIRO DE 2013**

SILVÂNIA LUCAS DOS SANTOS

**ESTUDO COMPARATIVO DOS MÉTODOS CONTÍNUO E SEMICONTÍNUO DE
DETERMINAÇÃO DA TAXA DE CONSUMO DE OXIGÊNIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre.

ÁREA: ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

SUBÁREA: ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANITÁRIA

ORIENTADOR: PROF. ADRIANUS CORNELIUS VAN HAANDEL

CAMPINA GRANDE - PB

FEVEREIRO 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S237e Santos, Silvânia Lucas dos.
Estudo comparativo dos métodos contínuo e semicontínuo de determinação da taxa de consumo de oxigênio / Silvânia Lucas dos Santos. -- 2013.
111 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

"Orientação: Prof. Dr. Adrianus Cornelius Van Haandel".
Referências.

1. Respirometria. 2. Taxa de Consumo de Oxigênio.
3. Constante de Transferência de Oxigênio. I. Haandel, Adrianus Cornelius Van. II. Título.

CDU 628.356(043)

SILVÂNIA LUCAS DOS SANTOS

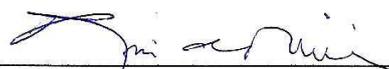
**ESTUDO COMPARATIVO DOS MÉTODOS CONTÍNUO E SEMICONTÍNUO DE
DETERMINAÇÃO DA TAXA DE CONSUMO DE OXIGÊNIO**

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 20 / 02 / 2013

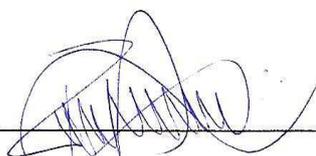
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Adrianus C. Van Haandel
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Orientador



Prof. Dr. Rui de Oliveira
Universidade Estadual da Paraíba - UEPB
Examinador Externo



Prof. Dr. Francisco Vieira Paiva
Universidade de Fortaleza - UNIFOR
Examinador Externo

CAMPINA GRANDE - PB

FEVEREIRO 2013

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me revestiu de força e aperfeiçoou o meu caminho ao longo de mais uma jornada.

Aos meus pais e irmãos, pelo incentivo, pelo amor e por toda a compreensão em todos os momentos.

Ao professor Adrianus C. Van Haandel pela dedicação, paciência e sua indispensável orientação.

Ao professor Rui de Oliveira pelo apoio imprescindível dado à realização desta pesquisa, além da sua participação no fechamento deste trabalho.

A João Paulo de Oliveira Simões, por todo o seu companheirismo.

Ao grupo da EXTRABES e do PROSAB, em especial a Nélia Luna e a Vanessa Gomes Miná pela amizade, conselhos e a troca de conhecimentos.

Aos colegas do mestrado, pela amizade e por todas as experiências compartilhadas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela disponibilização de bolsa de mestrado.

Enfim, agradeço a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A respirometria é utilizada em sistemas aeróbios de tratamento de águas residuárias para determinar a Taxa de Consumo de Oxigênio (TCO) pela massa de lodo bacteriano. Em princípio há dois métodos experimentais que se aplicam à determinação da TCO: o método semicontínuo muito atrativo pela sua praticidade e facilidade na execução dos testes, porém não é um método que possa de fato ser aplicado em sistemas operando em escala real, e o método contínuo, ainda em fase experimental, mas muito atrativo porque pode fornecer uma medida contínua da TCO. Dessa forma, visando contribuir para a aplicação mais efetiva da respirometria em sistemas de lodo ativado, foi realizado um estudo comparativo entre os dois métodos de determinação da TCO que teve como principal objetivo estabelecer o limite da aplicabilidade do método contínuo da TCO sob condições de repentinas variações da TCO com o tempo. Também foram avaliados os fatores que interferem na constante de transferência de oxigênio: concentração de lodo, surfactantes e temperatura, uma vez que esta se constitui como parâmetro fundamental para a aplicabilidade do método contínuo. O método semicontínuo consiste na definição de referências da concentração de oxigênio superior ($OD_{máx}$) e inferior (OD_{min}). Atingido o valor de $OD_{máx}$ a aeração é interrompida e observada a diminuição da concentração de oxigênio devida ao consumo pelos microrganismos que é medida em função do tempo. Quando a referência inferior é alcançada o valor da TCO é calculado e inicia-se um novo ciclo. A TCO é a razão entre a diminuição da concentração de OD e o tempo necessário para ocorrer esta diminuição. O método contínuo se baseia na aplicação de aeração continuamente no reator e na observação da concentração do Oxigênio Dissolvido (OD) em função do tempo. Pela aplicação de uma equação simples é possível estimar os dados da TCO a partir do perfil do OD com o tempo, se a constante de transferência de oxigênio (K_{la}) for conhecida. Os resultados experimentais obtidos mostram boa precisão e acurácia para os dados obtidos pelos dois métodos. A análise estatística (ANOVA) aplicada a um nível de significância de 5% não mostrou diferença significativa entre os métodos testados, sendo então viável a sua aplicação. Diante desses resultados torna-se claro que a escolha do método a ser utilizado fica a critério do usuário. O método semicontínuo é mais facilmente aplicável e dá respostas mais rápidas, é uma boa alternativa para o desenvolvimento de ensaios laboratoriais e em pequena escala, mas não se aplica de maneira rotineira em sistemas em escala real. Se a finalidade é monitoração e operação de estações de tratamento de esgoto em escala real o método contínuo deve ser aplicado. De maneira geral as variáveis testadas para avaliar a influência da concentração de lodo, não mostraram condições que inviabilizassem a aplicabilidade do método contínuo, no entanto vale ressaltar que este é um estudo voltado para as condições da água residuária de Campina Grande podendo apresentar características diferenciadas em outros locais.

Palavras-chave: Respirometria; Taxa de consumo de oxigênio; Constante de transferência de oxigênio.

ABSTRACT

Respirometry is used in aerobic waste water treatment systems to determine the Oxygen Uptake Rate (OUR) by the bacterial sludges mass. In principle there are two experimental methods available that can be applied to determine the OUR: The semi continuous and the continuous method. The semi continuous method is attractive because of its practicality and its simplicity, but it cannot be applied routinely in full scale systems. The continuous method is not yet established but in principle it can furnish a continuous measurement of OUR in full scale systems. In an attempt to contribute to a more effective application of respirometry in full scale activated sludges systems, a comparative study was carried out with the two methods to determine the OUR. The study has as its main objective to establish the limit of applicability of the continuous method when conditions were imposed of sudden and large variations of the OUR with time. Also experiments were carried out to determine the influence of several factors on the oxygen transfer constant: sludges concentration, surfactants and temperature. Knowledge of the value of the oxygen transfer constant is necessary to apply the continuous method for determination of OUR. The semi continuous method consists of defining of upper and lower set points of dissolved oxygen in the mixed liquor ($OD_{\text{máx}}$ and $OD_{\text{mín}}$) respectively. When the $OD_{\text{máx}}$ value is reached the aeration of the system is interrupted and the consequential decrease of the OD concentration as a consequence of the consumption by the microorganisms is observed as a function of time. When the lower set point is reached the OUR value is calculated and a new cycle is initiated. OUR is the ratio between the OD decrease and the time required for this decrease to take place. When the continuous method is used the aeration is constant and the OUR is calculated from variations of the DO concentration with time. For the calculation it is necessary that the oxygen transfer constant of the aeration system is known. The obtained experimental results show good precision and accuracy of the data obtained with both methods, since a statistical analysis with (ANOVA) applied at a significance level of 5% did not reveal significant differences in the obtained results with the two methods. Thus both methods may be applied in practice. With the obtained result it is clear that the choice of which method is to be used in a particular situation depends on the user of the respirometer. The semi continuous method is easier to apply and gives results more readily. It is a good alternative for small scale laboratory or pilot plant tests, but it cannot be applied routinely in full scale systems. If monitoring of systems operating at full scale is the aim, the continuous method must be preferred.

Keywords: Respirometry; Oxygen uptake rate; Oxygen transfer constant.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II REVISÃO DE LITERATURA.....	19
Figura 2.1 Representação da variação da concentração de OD de um floco em função da distância do centro para a periferia.....	24
Figura 2.2 Representação esquemática do respirômetro aberto utilizado nesta investigação experimental.....	27
Figura 2.3 Tela principal do respirômetro <i>Beluga</i> com indicação de seus principais componentes.....	28
Figura 2.4 Fatores que podem afetar a concentração de oxigênio dissolvido no sistema de lodo ativado.....	29
Figura 2.5 Diferentes alternativas de determinação da TCO na prática.....	35
Figura 2.6 Fluxograma básico do sistema de lodo ativado com a demonstração das variáveis envolvidas no balanço de massa.....	38
Figura 2.7 Frações do material orgânico e processos de utilização.....	40
CAPÍTULO III MATERIAL E MÉTODOS.....	47
Figura 3.1 Representação esquemática e fotografia dos reatores utilizados para a produção de lodo.....	48
Figura 3.2 Exemplo do procedimento de cálculo para obtenção de valores de K_{la} e OD_s	53
Figura 3.3 Equipamentos utilizados para a realização dos testes respirométricos.....	55
Figura 3.4 Respirograma de um teste semicontínuo com adição de acetato de sódio ao licor misto.....	57
Figura 3.5 Respirograma gerado com a aplicação do método contínuo e com adição brusca do substrato.....	58
Figura 3.6 Esquema de realização do teste respirométrico (imagem superior) e fotografia da execução de um teste semicontínuo com adição moderada	

	de substrato (imagem inferior).....	59
Figura 3.7	Respirograma gerado pelo software do respirômetro com concentração de OD e TCO em função do tempo para diferentes concentrações de lodo.....	63
Figura 3.8	Respirograma obtido aplicando o método semicontínuo com adição de acetato de sódio concentração 120 mgDQO/L e solução surfactante com concentração de 0,01mg/L.....	65
Figura 3.9	Respirograma de um teste semicontínuo com variação da temperatura (17 e 35°C) em função do tempo.....	66
CAPÍTULO IV APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....		67
Figura 4.1	Gráficos da TCO máxima contínua com variação dos intervalos de tempo para 0,5; 1; 3 e 6 minutos.....	69
Figura 4.2	Respirograma de um teste de determinação semicontínua e contínua da TCO aplicando o substrato em regime de bateladas.....	71
Figura 4.3	Gráficos da TCO contínua calculados com base na teoria.....	72
Figura 4.4	Comparação entre os dados de TCO determinados pelo método contínuo (à esquerda) e semicontínuo (à direita) com adição brusca do substrato..	74
Figura 4.5	Respirograma obtido durante um teste de determinação semicontínua da TCO com períodos intercalados para alimentação e não alimentação.....	75
Figura 4.6	Respirograma obtido durante um teste de determinação contínua da TCO com períodos intercalados para alimentação e não alimentação.....	76
Figura 4.7	Gráficos da TCO contínua calculados com base na teoria.....	77
Figura 4.8	Comparação entre os dados de TCO determinados pelos métodos contínuo (à esquerda) e semicontínuo (à direita) com adição moderada do substrato.....	79
Figura 4.9	Respirograma obtido pelo método semicontínuo para a determinação de K_{la} em função da concentração de lodo.....	82
Figura 4.10	Procedimento para a determinação de K_{la} e OD_s aplicando o solver para	

o ajuste de curvas.....	83
Figura 4.11 Relação entre a constante de transferência de oxigênio e a concentração de lodo.....	85
Figura 4.12 Curva do logaritmo natural de K_{la} em função da temperatura.....	91

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO IV APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	67
Tabela 4.1 Dados da TCO máxima de um teste contínuo para os intervalos $\Delta OD_l/\Delta t$: 0,5; 1 ; 3; e 6 minutos.....	70
Tabela 4.2 TCO máxima obtida pelo método semicontínuo com adição brusca do substrato.....	73
Tabela 4.3 TCO máxima obtida pelo método contínuo com adição brusca do substrato.....	73
Tabela 4.4 TCO máxima obtida pelo método semicontínuo com adição moderada do substrato.....	78
Tabela 4.5 TCO máxima obtida pelo método contínuo com adição moderada do substrato.....	78
Tabela 4.6 Valores da estatística F e os correspondentes valores críticos (F_{cr}) aplicados aos métodos semicontínuo e contínuo para as etapas I e II.....	80
Tabela 4.7 Valores brutos e a média da TCO para diferentes concentrações de lodo.	83
Tabela 4.8 Valores brutos e a média do K_{la} para diferentes concentrações de lodo....	84
Tabela 4.9 Valores experimentais da TCO e valores calculados de K_{la} , OD_s e capacidade de oxigenação (CO) em função da concentração de lodo.....	86
Tabela 4.10 Concentração de oxigênio de saturação para diferentes concentrações de surfactantes.....	88
Tabela 4.11 Constante de transferência de oxigênio para diferentes concentrações de surfactantes.....	89
Tabela 4.12 Valores de K_{la} , OD_s e capacidade de oxigenação em função da temperatura.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

APHA	<i>American Public Health Association</i>
CAGEPA	Companhia de Água e Esgoto do Estado da Paraíba
CO	Capacidade de Oxigenação
CO _{máx}	Capacidade de Oxigenação Máxima
CV	Coeficiente de Variação
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DP	Desvio Padrão
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EXTRABES	Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
F	Fração de lodo orgânico decaído como resíduo endógeno
f _{cv}	Produção de massa bacteriana (gSSV.gDQO)
IWAQ	<i>International Association on Water Quality</i>
K _{abs}	Constante de absorção de oxigênio atmosférico
K _{la}	Constante de transferência de oxigênio
Ln	Logaritmo Natural
Max	Valor máximo
Min	Valor mínimo
MS _{ta}	Fluxo de DQO afluente (mgDQO.d)
MS _{te}	Fração de DQO presente no efluente (mgDQO.d)
MS _o	Fração de DQO afluente oxidada no sistema (mgDQO.d)
MS _{xv}	Fração de DQO afluente descarregada no lodo de excesso (mgDQO.d)
OD	Oxigênio Dissolvido (mgO ₂ .L ⁻¹)
OD _a	Concentração de oxigênio no afluente (mgO ₂ .L ⁻¹)
OD _{Cr}	Concentração crítica de oxigênio (mgO ₂ .L ⁻¹)
OD _e	Concentração de oxigênio no efluente (mgO ₂ .L ⁻¹)
OD _{eq}	Concentração de oxigênio de equilíbrio (saturação = consumo)

OD_{inf}	Concentração de oxigênio inferior
OD_1	Concentração de oxigênio dissolvido no licor misto ($mgO_2.L^{-1}$)
OD_{Max}	Valor de oxigênio dissolvido de referência superior ($mgO_2.L^{-1}$)
OD_{min}	Valor de oxigênio dissolvido de referência inferior ($mgO_2.L^{-1}$)
OD_s	Concentração de saturação de oxigênio ($mgO_2.L^{-1}$)
OD_{sup}	Concentração de oxigênio superior ($mgO_2.L^{-1}$)
OD_0	Concentração inicial de oxigênio ($mgO_2.L^{-1}$)
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
Q	Vazão de lodo de excesso ($L.d^{-1}$)
Q_a	Vazão afluente ($L.d^{-1}$)
Q_e	Vazão efluente ($L.d^{-1}$)
R_a	Taxa de variação devido à aeração
R_{ab}	Taxa de variação devido à absorção de oxigênio
RBS	Reator em Bateladas Sequenciais
R_c	Taxa variação de consumo de oxigênio
R_h	Tempo de detenção hidráulica (h)
R_h	Taxa de variação devido ao efeito hidráulico
r_{OD}	Taxa de variação de oxigênio na fase líquida
S	Taxa de recirculação de lodo de retorno
S_{ba}	DQO biodegradável do afluente ($mg.L^{-1}$)
S_{bpa}	DQO biodegradável e particulada do afluente ($mg.L^{-1}$)
S_{bsa}	DQO biodegradável e solúvel do afluente ($mg.L^{-1}$)
SLA	Sistema de Lodo Ativado
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
SST	Sólidos Suspensos Totais
S_{ta}	DQO total afluente ($mg.L^{-1}$)
S_{te}	DQO total efluente ($mg.L^{-1}$)
S_{ua}	DQO não biodegradável do afluente ($mg.L^{-1}$)
S_{upa}	DQO não biodegradável e particulada do afluente ($mg.L^{-1}$)

S_{usa}	DQO não biodegradável e solúvel do afluente (mg.L^{-1})
T	Tempo (h)
T	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
TCO	Taxa de Consumo de Oxigênio ($\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}.\text{h}^{-1}$)
TCO_{end}	Taxa de consumo de oxigênio devido à respiração endógena ($\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}.\text{h}^{-1}$)
$\text{TCO}_{\text{exó}}$	Taxa de consumo de oxigênio devido à respiração exógena ($\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}.\text{h}^{-1}$)
$\text{TCO}_{\text{máx}}$	Taxa de consumo de oxigênio máxima ($\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}.\text{h}^{-1}$)
UEPB	Universidade Estadual da Paraíba
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
V_r	Volume do reator (L^{-1})
Y	Coefficiente de crescimento do lodo
Θ	Coefficiente de influência da temperatura – Arrhenius
Δt	Variação do tempo (h^{-1})
ΔOD	Variação da concentração de oxigênio dissolvido ($\text{mgO}_2.\text{L}^{-1}$)

SUMÁRIO

CAPÍTULO I INTRODUÇÃO.....	16
CAPÍTULO II REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1 Introdução.....	19
2.2 Metabolismo bacteriano.....	19
2.3 Fatores que influenciam a TCO experimental.....	22
2.3.1 Fornecimento do substrato.....	23
2.3.2 Concentração crítica do oxigênio dissolvido.....	23
2.3.3 Efeito da relaxação.....	24
2.4 Tipos de respirômetros.....	25
2.4.1 Respirômetros fechados.....	25
2.4.1.1 Frascos padrões de DBO.....	25
2.4.1.2 Aparelho Warburg.....	26
2.4.2 Respirômetros abertos.....	26
2.5 Fatores que afetam a variação de oxigênio nos sistemas de lodo ativado.....	29
2.5.1 Efeito hidráulico.....	29
2.5.2 Absorção de oxigênio atmosférico.....	30
2.5.3 Taxa de aeração.....	31
2.6 Método semicontínuo.....	32
2.7 Método contínuo.....	35
2.8 Aplicações da taxa de consumo de oxigênio.....	36
2.8.1 Balanço de massa do material orgânico no sistema de lodo ativado.....	37
2.8.2 Estudos da cinética do sistema de lodo ativado.....	39
2.8.3 Composição do material orgânico em águas residuárias.....	39
2.8.4 Determinação da toxicidade de efluentes industriais.....	40
2.9 Aeração em sistemas de tratamento aeróbio.....	41
2.9.1 Transferência de oxigênio em sistemas de lodo ativado.....	41
2.9.2 Métodos para avaliação da constante de transferência de oxigênio.....	42
2.9.2.1 Determinação da capacidade de oxigenação usando água.....	42

2.9.2.2 Determinação da capacidade de oxigenação usando licor misto e condições reais de operação.....	43
2.10 Fatores que influenciam o coeficiente de transferência de oxigênio.....	44
2.10.1 Influência da concentração de sólidos na transferência de oxigênio.....	44
2.10.2 Surfactantes.....	45
2.10.3 Temperatura.....	45
CAPÍTULO III MATERIAL E MÉTODOS.....	47
3.1 Introdução.....	47
3.2 Material.....	47
3.2.1 Descrição do sistema de lodo ativado.....	47
3.2.2 Operação do sistema de lodo ativado.....	48
3.3 Métodos.....	49
3.3.1 Métodos de determinação da TCO.....	50
3.3.1.1 Determinação pelo método semicontínuo.....	50
3.3.1.2 Determinação pelo método contínuo.....	50
3.3.2 Determinação da constante de transferência de oxigênio.....	52
3.3.3 Determinação da TCO aplicando o método semicontínuo.....	54
3.3.4 Equipamentos utilizados nos testes respirométricos.....	54
3.3.5 Testes respirométricos com adição brusca do substrato.....	55
3.3.5.1 Procedimento de determinação da TCO aplicando o método semicontínuo.....	55
3.3.5.2 Procedimento de determinação da TCO aplicando o método contínuo.....	57
3.3.6 Testes respirométricos com adição moderada do substrato.....	59
3.3.6.1 Procedimento de determinação da TCO aplicando o método semicontínuo.....	59
3.3.6.2 Procedimento de determinação da TCO aplicando o método contínuo.....	60
3.3.7 Testes respirométricos para determinação dos fatores que influenciam o K_{la}	60
3.3.7.1 Concentração de lodo.....	61

3.3.7.2 Surfactantes.....	64
3.3.7.3 Temperatura.....	65
CAPÍTULO IV APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	67
4.1 Introdução.....	67
4.2 Seleção do intervalo de tempo para a determinação da TCO contínua.....	67
4.3 Comparação da TCO para os testes com adição brusca do substrato.....	70
4.4 Comparação da TCO para os testes com adição moderada do substrato.....	75
4.5 Análise de variância (ANOVA).....	79
4.6 Influência da concentração de lodo.....	81
4.7 Influência dos surfactantes.....	87
4.8 Influência da temperatura.....	90
CAPÍTULO V CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	93
5.1 Conclusões.....	93
5.2 Recomendações.....	94
CAPÍTULO VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
APÊNDICE – A.....	100
Respirogramas gerados pelos métodos semicontínuo e contínuo com adição brusca do substrato.....	100
APÊNDICE - B.....	105
Respirogramas gerados pelos métodos semicontínuo e contínuo com adição moderada do substrato.....	105
APÊNDICE – C.....	111
Teste para avaliação da influência dos surfactantes sobre K_{la}	111

INTRODUÇÃO

Em sistemas de tratamento biológico de esgotos o material orgânico presente nas águas residuárias é removido a fim de se reduzir as substâncias que demandam consumo de oxigênio. Em sistemas de lodo ativado as bactérias heterotróficas e autotróficas são as principais responsáveis pela degradação do material orgânico e da amônia. O processo de degradação aeróbio da matéria orgânica pode ser investigado através da medição da Taxa de Consumo de Oxigênio (TCO) pelos microrganismos.

A respirometria é utilizada em sistemas de tratamento de águas residuárias para determinar a TCO pela massa de lodo bacteriano (SPANJERS, 1996; VANROLLEGHEM, 2002; YOUNG, 2000). O respirômetro é um instrumento que pode ser utilizado em sistemas de tratamento de águas residuárias aeróbias, mais especificamente nos sistemas de lodo ativado e suas variantes. Neste trabalho foi utilizado um respirômetro que, juntamente com um software especificamente desenvolvido, permite a determinação automatizada da TCO que o lodo tem para manter a respiração endógena e para metabolizar os substratos que se encontram no afluente, que são basicamente material orgânico e amônia. A função do software é armazenar em planilhas, na memória do computador, tanto a concentração de Oxigênio Dissolvido (OD) como a TCO em função do tempo.

Em princípio há dois métodos experimentais aplicáveis à determinação da TCO em sistemas de tratamento aeróbios: o método contínuo e o método semicontínuo. Segundo Ferreira (2002) o método contínuo apresenta algumas vantagens como aplicação em escala real e fácil automação, mas de modo geral o método semicontínuo ainda é o mais utilizado para o desenvolvimento de estudos em sistemas de lodo ativado. Em escala de laboratório, tradicionalmente, é aplicado o método semicontínuo para determinar valores da TCO. Nesse método o respirômetro faz com que a concentração de OD oscile entre um valor máximo e um valor mínimo, ambos pré-estabelecidos. Quando a concentração de OD está abaixo do máximo a aeração está ligada e a concentração aumentará até OD chegar ao ponto de OD máximo. Nesse momento a aeração é desligada e OD diminui até o valor mínimo, enquanto o reator continua sendo agitado mecanicamente. A diminuição do oxigênio é devida ao consumo pela massa de microrganismos. A TCO pode então ser determinada como a razão da variação de OD e o período necessário para reduzir a concentração de OD máximo até o OD

mínimo. A agitação mecânica do conteúdo no reator durante o período sem aeração é fundamental para evitar a sedimentação dos sólidos e manter uma concentração uniforme do lodo e dos substratos no reator.

Em condições operacionais normais nos sistemas de lodo ativado, o tempo para reduzir a concentração de OD do máximo para o mínimo é de poucos minutos. Portanto, este método é conveniente para reatores pequenos onde há pequenos motores de aeração ligando e desligando, mas não em sistemas grandes onde motores grandes não podem ser ligados e desligados repetidamente com poucos minutos de intervalo. Outra razão que impossibilita a aplicação do método semicontínuo em sistemas grandes é que o aerador também serve como agitador que mantém o conteúdo do reator com composição uniforme. Ao se desligar a aeração imediatamente inicia-se a sedimentação que deixa a concentração de lodo desuniforme e não há mais a distribuição homogênea dos substratos que entram no reator junto com o afluente. Por isso foi desenvolvido um método alternativo que é o método contínuo.

O método contínuo se baseia na aplicação de aeração continuamente no reator e na observação da concentração do OD em função do tempo. Pela aplicação de uma equação simples é possível calcular os dados da TCO a partir do perfil de OD obtido com o tempo, se a capacidade de oxigenação (CO) do sistema de tratamento for conhecida. Comparado com o método contínuo, a vantagem do método semicontínuo é que o resultado da TCO independe da CO, e dos fatores que influenciam esta capacidade, especificamente o Coeficiente de Transferência de Oxigênio (K_{la}).

A aeração em sistemas de tratamento de águas residuárias, a exemplo dos sistemas de lodo ativado, é aplicada para transferir o oxigênio atmosférico para o licor misto. Nestas circunstâncias é que se verifica a importância da efetiva transferência de oxigênio para o meio líquido, já que a manutenção da concentração ótima é fator determinante para atingir a eficiência desejada. Todavia, nem sempre é possível manter a concentração de oxigênio ideal, pois fatores ambientais e operacionais podem interferir de forma negativa nesse processo.

Esta dissertação de mestrado trata de um estudo comparativo, que teve como objetivo principal estabelecer o limite da aplicabilidade do método contínuo da taxa de consumo de oxigênio sob condições de repentinas variações da TCO com o tempo. Os objetivos específicos são os seguintes:

- Comparar a precisão e acurácia da TCO em sistemas com variações repentinas do material orgânico usando o método contínuo e semicontínuo;

- Comparar a frequência máxima de obtenção de valores da TCO usando os dois métodos experimentais; e
- Avaliar a influência dos fatores: concentração de lodo, surfactantes e temperatura sobre a constante de transferência de oxigênio.

Este trabalho apresenta-se dividido em 6 capítulos. O Capítulo 2 trata de uma revisão de literatura na qual são apresentados conceitos teóricos e citações sobre a aplicação da respirometria e da TCO. Também compõem esse capítulo, uma descrição do metabolismo bacteriano, dos métodos contínuo e semicontínuo para determinação da TCO em sistemas de lodo ativado, bem como os fatores que interferem no K_{la} .

No Capítulo 3, material e métodos, descreve-se a operação da unidade de lodo ativado utilizada para produção de lodo aeróbio, sendo também descrito o respirômetro, sua operação e a descrição da execução dos testes respirométricos necessários ao desenvolvimento da pesquisa.

A análise e discussão dos resultados estão apresentadas no Capítulo 4. Os resultados foram organizados em figuras e tabelas, com o objetivo de facilitar a comparação entre os dados.

No Capítulo 5 expõem-se as conclusões dos resultados obtidos nesse estudo, e as recomendações. A lista de referências bibliográficas encontra-se no Capítulo 6. Alguns respirogramas e seus resultados pontuais são mostrados no apêndice no final desta dissertação.

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Introdução

No tratamento de efluentes domésticos e industriais em sistemas de lodo ativado, bactérias aeróbias são utilizadas para degradar o material orgânico e o material nitrogenado, compostos que se constituem como principais poluidores ambientais. Em sua essência o sistema de lodo ativado compõe-se de um reator e um decantador. No reator cresce a massa bacteriana à qual é adicionada a água residuária a ser tratada, juntamente com o oxigênio necessário ao metabolismo bacteriano. No decantador há a sedimentação dos flocos biológicos, e a formação de duas fases: a fase líquida, o efluente tratado, e a fase com sólidos sendo o lodo sedimentado recirculado para o reator.

2.2 Metabolismo Bacteriano

No trabalho clássico de Marais e Ekama, desenvolvido em 1976 na Universidade da Cidade do Cabo na África do Sul, foram introduzidas pela primeira vez expressões ligando explicitamente a TCO ao metabolismo das bactérias em sistemas de tratamento aeróbio. Nesse trabalho também ficou estabelecido que a Demanda Química de Oxigênio (DQO) devia ser o parâmetro preferencial em vez da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) para quantificar a concentração de material orgânico em águas residuárias. Marais e Ekama (1976) mostraram que o consumo de oxigênio se deve a três mecanismos distintos: respiração exógena, respiração endógena e o consumo de oxigênio para nitrificação, e desenvolveram expressões explícitas, permitindo o cálculo da TCO em sistemas operando em condições estacionárias. Dold, Ekama e Marais (1980) desenvolveram expressões que ligam a TCO à taxa de utilização de material orgânico pelas bactérias heterotróficas e de amônia pelas autotróficas em sistemas operando sob condições dinâmicas.

- **Respiração Exógena**

No sistema de lodo ativado o material orgânico é removido devido à ação metabólica

das bactérias aeróbias. O metabolismo ou utilização do material orgânico pelas bactérias heterotróficas nos sistemas de lodo ativado tem duas etapas: o anabolismo onde há a conversão do material orgânico em nova massa bacteriana e o catabolismo, onde o consumo de oxigênio para a oxidação da matéria orgânica e geração de energia necessária ao anabolismo. Como resultado destes processos anabólico e catabólico ocorre o crescimento de lodo e o consumo de oxigênio, respectivamente. Marais e Ekama (1976) em seu trabalho estabeleceram experimentalmente que no metabolismo, em torno de 2/3 do material orgânico biodegradável do afluente são anabolizados enquanto 1/3 é catabolizado, independentemente da natureza do material orgânico.

A atividade catabólica desenvolvida nos sistemas de lodo ativado se evidencia pelo consumo de oxigênio necessário para a oxidação do material orgânico. Estequiometricamente 1 grama de OD consumido equivale a 1 grama de DQO oxidada (METCALF e EDDY, 2003). A síntese de material celular pode ser determinada através dos sólidos em suspensão. Van Haandel e Marais (1999), através de determinações experimentais, encontraram que a produção da massa bacteriana no metabolismo oxidativo apresenta-se numa faixa de 0,35g a 0,52 gSSV com valor médio (adotado) de 0,45 gSSV. Esse valor constitui a proporção entre a massa microbiana sintetizada e a massa de DQO metabolizada, denominado de coeficiente de síntese celular ou coeficiente de crescimento de lodo representado com o símbolo Y. Para tanto se faz necessário estabelecer qual a DQO de uma unidade de massa de microrganismos (f_{cv}). Marais e Ekama (1976) obtiveram um valor médio de 1,48 mgDQO/mgSSV⁻¹.

Com os valores do fator de crescimento $Y = 0,45$ gSSV e do parâmetro $f_{cv} = 1,48$ é possível calcular as frações de material orgânico anabolizado (equação 2.1) e catabolizado (equação 2.2).

$$(f_{cv} \times Y) \tag{2.1}$$

$$(1 - f_{cv} \times Y) \tag{2.2}$$

Numericamente, calcula-se que $1,48 \times 0,45 = 0,67$ e $1 - 1,48 \times 0,45 = 0,33$. Pode ser concluído que no metabolismo de material orgânico, em sistemas operando sob condições aeróbias, 0,67 ou 2/3 são sintetizados, enquanto uma fração de 0,33 ou 1/3 é oxidada.

- **Respiração Endógena**

O consumo de oxigênio associado ao decaimento das bactérias chama-se respiração

endógena, distinguindo-se do consumo de oxigênio devido à oxidação do substrato (material extracelular) que se denomina respiração exógena. Segundo Van Haandel e Marais (1999) no decaimento de lodo ativo a bactéria deixa de existir como ser vivo, mas nem toda a massa decaída é oxidada, há um resíduo de material orgânico não biodegradável chamado de resíduo endógeno (f) que se acumula no sistema de tratamento como sólido não biodegradável até ser descarregado no lodo de excesso. O valor da fração de lodo ativo decaído que não é oxidado foi determinado experimentalmente por diversos pesquisadores, sendo adotado $f = 0,2$ conforme encontrado por Marais e Ekama (1976).

- **Nitrificação**

A nitrificação é a oxidação biológica da amônia, tendo como produto final o nitrato. A reação requer a mediação de bactérias específicas e se realiza em dois passos sequenciais. No primeiro passo a amônia é oxidada para nitrito (nitritação) através da ação bioquímica de bactérias como as do gênero *Nitrosomonas*. O segundo passo, a oxidação de nitrito para nitrato (nitratação) é mediada por bactérias como as do gênero *Nitrobacter*. Ambos os gêneros *Nitrosomonas* e *Nitrobacter* somente desenvolvem atividade bioquímica na presença de oxigênio dissolvido, isto é, são aeróbios obrigatórios (VAN HAANDEL e MARAIS, 1999). Os dois passos podem ser descritos como nas equações 2.3 e 2.4:



A transformação de amônia para nitrato é uma reação de oxi-redução, onde se observa que o número de oxidação do nitrogênio aumenta de (-3) para (+5) ocorrendo, portanto, a transferência de 8 elétrons por átomo de nitrogênio, enquanto o oxigênio é reduzido e seu número de oxidação passa de (0) para (-2). Como são necessários 4 átomos de oxigênio, o consumo de oxigênio é $(4 \times 16)/14 = 4,57 \text{ mgO}_2/\text{mgN}$ (VAN HAANDEL e MARAIS, 1999).

Para descrever os processos metabólicos que se desenvolvem no sistema de lodo ativado para remoção de material orgânico, têm-se, em princípio, três variáveis (VAN HAANDEL E MARAIS 1999):

- A concentração de material orgânico no licor misto;
- A concentração da massa bacteriana expressa como massa de sólidos voláteis; e

- O consumo de oxigênio decorrente da respiração das bactérias.

Na prática, as duas primeiras variáveis não são bons parâmetros para indicar o comportamento de um sistema de lodo ativado. A concentração do material orgânico no licor misto pode não ser determinada com precisão, pois, na separação dos flocos de lodo necessários para esta determinação, frequentemente parte do material orgânico particulado também será separada e conseqüentemente não será detectada. Dessa maneira, a concentração de material orgânico na fase líquida não é indicativa de sua disponibilidade para as bactérias. Por outro lado, as variações da concentração de sólidos voláteis são lentas e pequenas não dando, portanto, informações acuradas sobre os processos metabólicos. No entanto, o consumo de oxigênio pode ser medido com rapidez e precisão dando as melhores informações sobre a velocidade dos processos metabólicos. Segundo Hagman e Jansen (2007) a determinação do consumo de oxigênio é o teste mais adequado para se obter informações sobre os processos que se desenvolvem em sistemas de lodo ativado.

A caracterização do comportamento dos sistemas de lodo ativado, através do consumo de oxigênio, é utilizada para a avaliação do metabolismo quando o sistema se desenvolve normalmente, mas também é uma ferramenta indispensável quando há fatores adversos que fazem com que o consumo se desvie da normalidade, porque a alteração na atividade metabólica é detectada imediatamente e seus impactos refletem diretamente na TCO.

2.3 Fatores que Influenciam a TCO Experimental

Embora o princípio dos testes de determinação da TCO seja muito simples, na prática podem surgir vários problemas que levam à necessidade de se corrigir as determinações experimentais da TCO para evitar que a interpretação dos resultados leve a uma conclusão errônea. Além da atividade metabólica do lodo e a concentração dos substratos, há vários outros fatores que influenciam na variação da concentração de OD e que devem ser levados em consideração. Estes fatores serão discutidos a seguir.

2.3.1 Fornecimento do Substrato

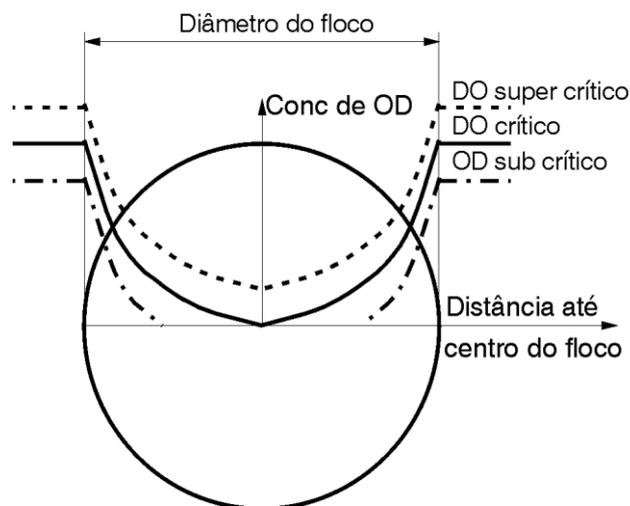
A maneira de alimentar um ou mais substratos à massa bacteriana, afeta de forma significativa o valor da TCO resultante. Distinguem-se basicamente duas situações: (I) a TCO é determinada em um reator biológico de um sistema de lodo ativado, enquanto este sistema é

alimentado normalmente com o afluente; ou (II) a TCO é determinada em função do tempo de uma batelada de lodo que recebe instantaneamente uma determinada quantidade de um substrato específico (regime de bateladas). A primeira alternativa tem ampla aplicação em estudos de otimização de sistemas contínuos permitindo cálculos de balanço de massa, determinação da eficiência de transferência de oxigênio pelos aeradores e a avaliação da concentração ótima de OD, além do controle operacional de sistemas de lodo ativado com auxílio da TCO. A determinação da TCO em bateladas é importante para se determinar o valor da estequiometria dos processos metabólicos e das constantes das equações que descrevem a cinética do metabolismo dos substratos: material orgânico e amônia (VAN HAANDEL e CATUNDA, 2012).

2.3.2 Concentração Crítica do Oxigênio Dissolvido

O consumo de oxigênio ocorre principalmente dentro dos flocos de lodo onde se concentra a massa bacteriana, portanto há uma tendência da concentração de OD diminuir da periferia do floco (onde se supõe o mesmo valor que no seio do líquido) para o centro do floco. A Figura 2.1 ilustra esquematicamente a variação da concentração de OD (supõe-se um floco esférico). Dependendo da concentração de OD no seio do líquido, o ambiente no floco pode ser totalmente aeróbio, ou então na parte central do floco pode não haver OD (ambiente anóxico ou anaeróbio). Naturalmente, não haverá consumo de oxigênio na zona anóxica ou anaeróbia, de modo que o valor aparente da TCO diminui. A concentração mínima no interior do líquido que pode evitar que a presença de oxigênio dentro do lodo se torne um fator limitante no consumo se chama concentração crítica. O seu valor numérico depende de vários fatores entre os quais o valor da TCO e a intensidade de agitação (afeta o tamanho dos flocos) são os mais importantes (VAN HAANDEL e MARAIS, 1999).

Figura 2.1 - Representação da variação da concentração de OD num floco em função da distância do centro para a periferia.



Fonte: Van Haandel e Marais (1999).

Naturalmente é necessário que se determine a TCO usando-se concentrações acima do valor crítico. Na prática a concentração crítica raramente excede a faixa de $0,5$ a 1 mg/L^{-1} para remoção de material orgânico e de 1 a 2 mg/L^{-1} para nitrificação, em sistemas de lodo ativado convencional (VAN HAANDEL e CATUNDA, 2012). A determinação da concentração crítica tem uma grande importância prática porque, em princípio, é a concentração ótima no tanque de aeração. Para valores da concentração de OD inferiores ao valor crítico a disponibilidade de oxigênio se torna um fator limitante na capacidade de tratamento do sistema e para valores superiores há um consumo desnecessário de energia, uma vez que o consumo de energia aumenta na medida em que aumenta a concentração de OD.

2.3.3 Efeito da Relaxação

Quando o eletrodo de um medidor de oxigênio é transferido repentinamente de um lugar com uma determinada concentração de OD (por exemplo, água saturada) para um ambiente com uma concentração de OD diferente (por exemplo, água sem oxigênio dissolvido) o medidor de OD precisa de um tempo para se adaptar à nova situação. O período para mudar a leitura no medidor do valor inicial para o valor final chama-se o tempo de relaxação. Tempos de relaxação relativamente longos de medidores de oxigênio podem representar um problema na determinação da TCO (VAN HAANDEL e MARAIS, 1999).

2.4 Tipos de Respirômetros

Os respirômetros variam desde equipamentos simples operados manualmente (por exemplo, frascos padrões de DBO), até equipamentos sofisticados completamente automatizados que utilizam em seu funcionamento sensores de OD. Os respirômetros mais antigos que determinam o consumo de oxigênio são chamados de respirômetros fechados porque não permitem a interação do material em análise com o ambiente externo (ROS, 1993). Exemplos de respirômetros fechados são o frasco padrão de DBO e o aparelho Warburg.

2.4.1 Respirômetros Fechados

Os respirômetros fechados podem ser manométricos, baseados na diferença de pressão em um sistema com volume constante, enquanto o oxigênio é consumido, ou volumétricos, que se caracterizam por manter pressão constante e a variação na concentração de oxigênio dissolvido é medida diretamente com um sensor de oxigênio (ROS *et al.*, 1988; VANROLLEGHEM *et al.*, 1999). Estes respirômetros caracterizam-se por manter o ambiente de reação isolado do ambiente atmosférico, sendo o ambiente de reação controlado e a concentração de OD determinada constantemente pelo tempo necessário. Estes equipamentos apresentam grandes limitações, pois a impossibilidade de reoxigenação do meio não permite identificar fatores relevantes como o estabelecimento da TCO endógena e o início da TCO exógena, apesar destas limitações esse tipo de instrumento é muito utilizado na engenharia sanitária para a determinação da DBO.

2.4.1.1 Frascos Padrões de DBO

O teste da DBO é o respirômetro mais utilizado para medir o consumo de oxigênio. Este teste respirométrico consiste na incubação de uma amostra saturada de oxigênio dissolvido sob condições padrões (5 dias de incubação a 20°C, sem contato com o oxigênio atmosférico). A concentração de OD é determinada antes e depois do período de incubação. A diferença entre a concentração de OD inicial e final dá o consumo de oxigênio exercido nos 5 dias, sendo o resultado expresso normalmente em massa de O₂ consumido por litro - mgO₂/L (APHA, 2005). Embora este teste seja amplamente utilizado para estabelecer a concentração de material biodegradável presente, sua utilização para controle de sistemas de tratamento é

muito limitada, devido ao longo período requerido para a execução do teste.

2.4.1.2 Aparelho Warburg

Em 1912, Warburg publicou seu primeiro trabalho relativo à medida da velocidade de respiração de células e tecidos, utilizando um equipamento proposto, em 1902, por Barcroft e Haldane. Esse equipamento, cuja descrição bastante minuciosa pode ser encontrada em livros de bioquímica, é conhecido pelo nome de respirômetro de Warburg ou, segundo alguns autores, aparelho de Barcroft-Warburg (BORZANI e PIPLOVIC, 2000).

No aparelho Warburg a amostra é colocada em um ambiente fechado e mantida sob pressão constante, mediante a geração de oxigênio por eletrólise, à medida que o gás está sendo usado para a oxidação do material orgânico pelas bactérias. A quantidade de carga elétrica necessária para produzir o oxigênio (medida em Coulombs) é equivalente ao consumo do mesmo.

Os respirômetros fechados têm grandes desvantagens na sua aplicação: os testes são lentos e só podem ser realizados utilizando bateladas de licor misto, não sendo, pois viável sua utilização para determinação do consumo de oxigênio enquanto o afluente entra no sistema.

Na prática muitas vezes precisa-se medir continuamente o consumo de oxigênio; para tanto se devem utilizar os respirômetros abertos.

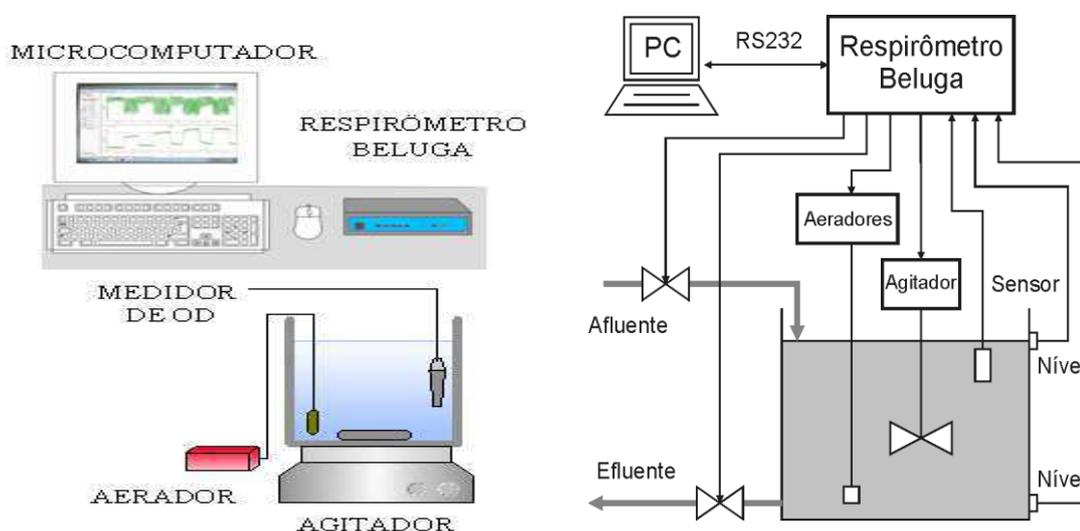
2.4.2 Respirômetros Abertos

Os respirômetros abertos caracterizam-se pelo contato entre o meio de reação e o ambiente atmosférico, possibilitando assim a reoxigenação e a medição do consumo de oxigênio diretamente no reator biológico. A Figura 2.2 mostra um esquema do respirômetro aberto utilizado nesta pesquisa. Este possibilita a determinação contínua ou semicontínua da TCO no licor misto.

Um estudo comparativo entre os respirômetros abertos feito por Ferreira (2002) mostra que a velocidade na obtenção dos dados, a reprodutibilidade dos testes respirométricos e o uso do computador, são fatores que contribuem para um avanço no uso dos respirômetros do tipo aberto. O resultado dessa análise foi que entre os tipos de respirômetros abertos o respirômetro contínuo apresenta algumas vantagens (pode ser utilizado em escala real e possui fácil automação), mas de uma maneira geral o método semicontínuo ainda é

apresentado como o mais preciso e mais utilizado para o desenvolvimento de estudos em sistemas de lodo ativado (FERREIRA, 2002).

Figura 2.2 – Representação esquemática do respirômetro aberto utilizado nesta investigação experimental.



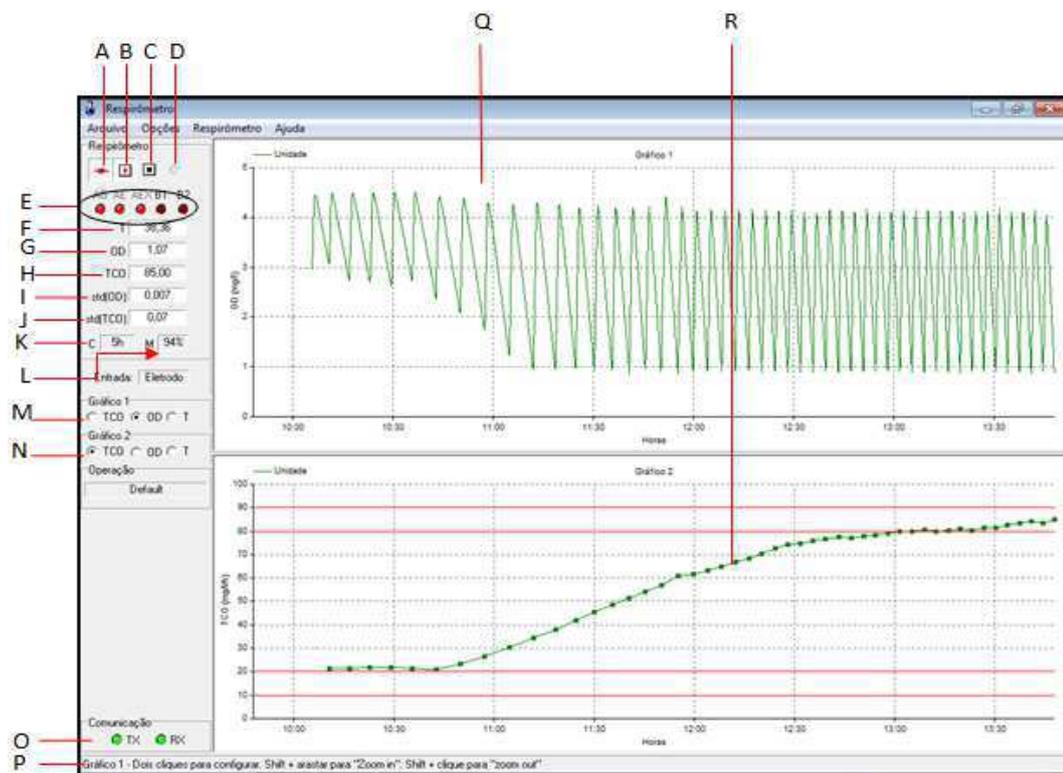
Fonte: Elaboração da autora.

Para esta investigação experimental, foi utilizado o respirômetro *Beluga* modelo S32C versão software S4.0C. Para a determinação da TCO o respirômetro *Beluga* faz a medição direta da concentração de oxigênio dissolvido e também da temperatura quando o eletrodo de OD utilizado é do tipo YSI5718 ou equivalente. O respirômetro era controlado por um software específico que gerava automaticamente uma imagem no monitor do computador e planilhas dos valores de OD, TCO e temperatura. A Figura 2.3 mostra um exemplo da imagem que o software gerava na tela. São dois diagramas que representam a concentração de OD (diagrama superior) e a TCO (diagrama inferior) do sistema em função do tempo. Esta imagem na tela é denominada de respirograma. No respirograma é possível identificar uma série de variáveis que possibilitam a avaliação dos dados em tempo real, quando se está monitorando o sistema de lodo ativado. A seguir é feita uma descrição do respirograma, a função dos principais objetos presentes nesta tela é indicada por letras que são posteriormente mostradas na Figura 2.3. A compreensão destas funções indicadas no respirograma irá proporcionar uma melhor assimilação dos testes respirométricos apresentados nos demais capítulos desta dissertação.

- **Descrição das variáveis presentes em um respirograma**

A. conectar/desconectar o instrumento; B. Inicia o método de cálculo da TCO, gráficos e armazenamento dos dados em arquivo; C. Para o procedimento de cálculo da TCO, a atualização dos gráficos e o armazenamento dos dados em arquivo; D. Permite a aferição do eletrodo de OD (YSI) do *Beluga*; E. Indicadores do estado ligado (vermelho claro) ou desligado (vermelho escuro) dos dispositivos conectados ao *Beluga*; F. G. H. Indicação dos valores medidos de Temperatura (F) OD (G) e valor calculado da TCO (H); I. J. Desvio padrão da medição da concentração de OD em mg/L e da TCO em mg/L/h; K. Indicador do número de horas desde a última calibração; L. Indicador do estado da membrana do eletrodo de OD; M. N. Indicações e opções de escolha da grandeza a ser mostrada em cada janela gráfica (1 ou 2); O. Indicadores do estado de comunicação do programa com o *Beluga*: RX – informação recebida, TX – informação enviada; P. Instruções; Q. R. O respirômetro 4.0C possui duas janelas gráficas que podem mostrar independentemente valores de temperatura, OD e/ou TCO.

Figura 2.3 – Tela principal do respirômetro *Beluga* com indicação de seus principais componentes.



Fonte: Manual de utilização do respirômetro *Beluga*.

2.5 Fatores que Afetam a Variação de Oxigênio nos Sistemas de Lodo Ativado

A taxa de variação da concentração de OD com o tempo em sistemas de lodo ativado é afetada por quatro fatores: (1) aeração; (2) consumo; (3) absorção atmosférica; e (4) efeito hidráulico, como mostra a Figura 2.4 e de acordo com a equação 2.5:

$$r_{OD} = dOD_l/dt = r_a + r_c + r_{ab} + r_h = (dOD_l/dt)_a + (dOD_l/dt)_c + (dOD_l/dt)_{ab} + (dOD_l/dt)_h \quad (2.5)$$

Sendo:

$r_{OD} = dOD_l/dt$ = taxa de variação de OD na fase líquida;

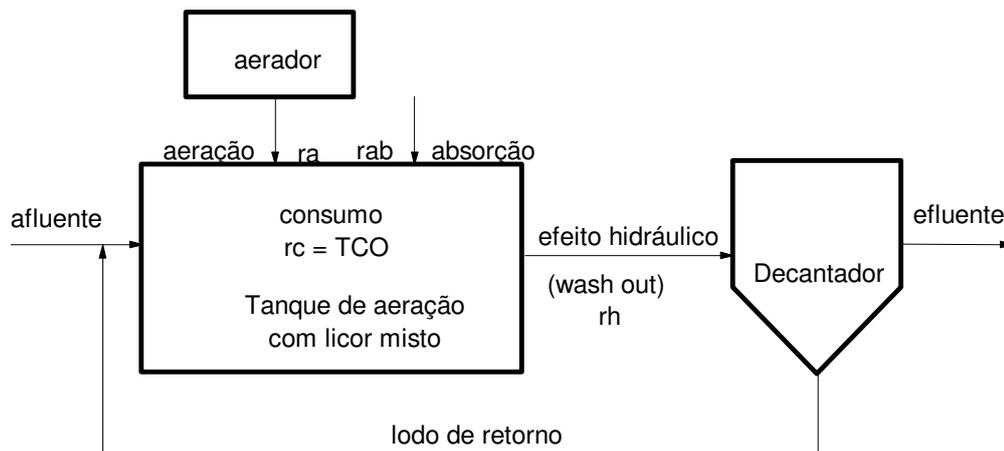
$r_a = (dOD_l/dt)_a$ = taxa de variação devido a aeração;

$r_c = (dOD_l/dt)_c$ = taxa de consumo de OD = TCO;

$r_{ab} = (dOD_l/dt)_{ab}$ = taxa de variação devida à absorção de oxigênio;

$r_h = (dOD_l/dt)_h$ = taxa de variação devida ao efeito hidráulico.

Figura 2.4 – Fatores que podem afetar a concentração de OD no sistema de lodo ativado.



Fonte: Van Haandel e Marais (1999).

2.5.1 Efeito Hidráulico

A taxa de variação de OD devido ao efeito hidráulico se deve à desigualdade que existe entre o fluxo de oxigênio que entra no reator junto com o afluente e o que sai junto com o efluente, resultando, assim na equação 2.6.

$$r_h = (Q_a \times OD_{la}) - (Q_e \times OD_{le}) \quad (2.6)$$

Normalmente o volume na fase líquida se mantém constante e as vazões do afluente e do efluente são iguais, como mostra a equação 2.7.

$$r_h = (OD_e - OD_a) \times Q_a / V_r = (OD_e - OD_a) / R_h \quad (2.7)$$

Sendo:

OD_a = Concentração de OD no afluente (mg/L^{-1});

OD_e = Concentração de OD no efluente (mg/L^{-1});

OD_{la} / OD_{le} = Concentração de OD no licor misto afluente e efluente (mg/L^{-1});

Q_a = Vazão afluente (L/d^{-1});

Q_e = Vazão efluente (L/d^{-1});

V_r = Volume do reator (L);

R_h = Tempo de detenção hidráulica (h).

Geralmente o efeito hidráulico é muito pequeno, em relação à TCO, para o metabolismo. Todavia quando a TCO é baixa (por exemplo, em lagoas aeradas) a correção para eliminar o efeito hidráulico pode se tornar importante e, neste caso, deve ser feita.

2.5.2 Absorção de Oxigênio Atmosférico

A taxa de absorção de oxigênio atmosférico pelo licor misto no reator deve-se ao fato da concentração de OD no licor misto (OD_1) ser sempre menor que a concentração de saturação (OD_s); é essa diferença que faz com que a concentração de OD não esteja em equilíbrio com o oxigênio na atmosfera. A absorção pode ser descrita como um processo de primeira ordem, tendo-se como variável o déficit de oxigênio.

O valor da constante de absorção pode ser determinada experimentalmente substituindo o licor misto por uma batelada de água desoxigenada, sem aeração, sem consumo de OD e sem vazão de entrada; desta maneira $r_a = r_c = r_h = 0$. Nestas condições a absorção pode ser determinada como descrito nas equações 2.8 e/ou 2.9. A equação 2.9 mostra que é possível determinar a constante de absorção como a declividade da reta que se obtém ao se plotar o logaritmo natural (ln) de ($OD_s - OD_1$) em função do tempo de absorção.

$$r_{abs} = (dOD/dt) = K_{abs} (OD_s - OD_1) \quad (2.8)$$

$$\ln [(OD_s - OD_o)/(OD_s - OD_1)] = K_{abs} \times t \quad (2.9)$$

Sendo:

K_{abs} = Constante de absorção (h^{-1});

OD_o = Concentração inicial de oxigênio (mg/L^{-1});

OD_s = Concentração de saturação de oxigênio (mg/L^{-1});

t = Tempo de absorção (h).

2.5.3 Taxa de Aeração

O valor da taxa de aeração em condições normais de funcionamento no sistema de tratamento pode ser estimado aplicando-se a lei de Fick para os aeradores. Esta lei afirma que a taxa de aeração é proporcional ao déficit de oxigênio, a diferença entre a concentração de saturação e a concentração de OD, na fase líquida em contato com o aerador é que nos permite expressar esta taxa (r_a) como descrito na equação 2.10 (VAN HAANDEL e MARAIAS, 1999).

$$r_a = (dOD/dt)_a = K_{la} (OD_s - OD_1) \quad (2.10)$$

Sendo:

K_{la} = Constante de transferência de oxigênio (h^{-1}).

Nos sistemas de lodo ativado as taxas devidas à absorção de oxigênio atmosférico e ao efeito hidráulico são muito pequenas quando comparadas com a taxa de aeração ou de consumo, de modo que a equação 2.5 agora pode ser reescrita como na equação 2.11:

$$r_{OD} = dOD_1/dt \approx r_a + r_c = (dOD_1/dt)_a + (dOD_1/dt)_c \quad (2.11)$$

Ao se desprezar o efeito hidráulico e a absorção de oxigênio atmosférico, a variação da concentração de OD_1 no sistema de lodo ativado depende da TCO e da taxa de aeração. Nestas condições, para determinar a TCO em função da variação de OD_1 , é necessário: a) eliminar a contribuição da aeração (r_a) ou b) determinar o valor de r_a e calcular a TCO como a diferença entre a taxa de variação da concentração de OD e da taxa de aeração. No primeiro caso, aplica-se o método semicontínuo, no segundo o método contínuo. Ambas as alternativas

são utilizadas na prática de determinação da TCO em sistemas de tratamento biológico.

O método contínuo embora apresente vantagens que superem o método semicontínuo, como sua aplicabilidade em sistemas em escala real, ainda é pouco utilizado, pois a obtenção da TCO por este método depende do K_{la} , este por sua vez pode ser influenciado por uma série de fatores ambientais e inerentes ao próprio lodo que podem, desta forma, comprometer a obtenção final dos dados.

2.6 Método Semicontínuo

O método semicontínuo ou método clássico de determinação da TCO tem sido utilizado em diversos trabalhos desenvolvidos na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), alguns desses trabalhos são: influência da interrupção de oxigenação sobre a atividade do lodo ativo (COSTA, 2002); avaliação da atividade das bactérias heterotróficas (RODRIGUES, 2005); e autotróficas nitrificantes (FERREIRA, 2002); composição da matéria orgânica em águas residuárias (SILVA, 2003); avaliação da influência de fatores operacionais e ambientais sobre a cinética de nitrificação (DERKS, 2007); e influência da concentração de lodo sobre a capacidade de oxigenação do aerador e influência da concentração do sal sobre a capacidade metabólica do lodo (MIRANDA, 2012). Todos esses estudos foram realizados com base na respirometria, utilizando o respirômetro *Beluga* modelo S32C desenvolvido no Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG (CATUNDA *et al.*, 1996).

O princípio de determinação da TCO pelo método semicontínuo é muito simples e se baseia na interrupção de períodos de aeração (VAN HAANDEL e MARAIS, 1999). São estabelecidas duas referências para a concentração de oxigênio dissolvido: OD_{sup} e OD_{inf} . Quando a aeração é aplicada há o aumento da concentração de OD até que a referência superior seja alcançada; atingida essa concentração o software automaticamente encerra a transferência de oxigênio sendo observada a diminuição da concentração de OD até que o limite inferior seja atingido (devido ao consumo pelas bactérias), e é reiniciada a aeração. Durante o período em que não há aeração o cálculo da TCO é realizado por regressão linear como mostra a equação 2.12.

$$TCO = (OD_{sup} - OD_{inf})/\Delta t \quad (2.12)$$

Sendo:

OD_{sup} = Valor de Oxigênio dissolvido de referência superior (mg/L^{-1});

OD_{inf} = Valor de oxigênio dissolvido de referência inferior (mg/L^{-1});

Δt = Intervalo de tempo entre OD_{sup} e OD_{inf} ;

TCO = Taxa de Consumo de Oxigênio ($mg/L^{-1}/h^{-1}$).

Na equação 2.12 presume-se tacitamente que:

- A variação da concentração de oxigênio do OD_{sup} para o OD_{inf} seja aproximadamente linear com o tempo, ou seja, a TCO não muda significativamente durante o intervalo de tempo (Δt);
- A massa de oxigênio dissolvido entrando junto com o afluente ou saindo junto com o efluente é insignificante quando comparado com a massa de oxigênio consumido, isto é, o efeito hidráulico é insignificante; e
- A massa de oxigênio absorvida da atmosfera na superfície do sistema é ínfima.

Estas suposições normalmente se justificam na prática.

A concentração de OD_{sup} deve ser escolhida de maneira que, ao ser iniciada a aeração, o seu valor possa ser alcançado em um curto período de tempo. Em compensação a concentração de OD_{inf} deve ser escolhida tal que em nenhum momento a disponibilidade de oxigênio seja um fator limitante para a taxa de respiração, ou seja, OD_{inf} tem de ser maior que a concentração crítica (OD_{Cr}).

Um aspecto importante que deve ser considerado ao se estabelecer os valores de referência de OD superior e inferior é a diferença que será mantida entre os dois. Em princípio é interessante que a diferença seja pequena, porque assim aumenta-se a frequência de pontos de medição da TCO. No entanto, devido às oscilações naturais da TCO e do ruído no sistema eletrônico, provocado pelo efeito da relaxação, a diferença não deve ser muito pequena para evitar que pequenos erros nas determinações de OD_{sup} e OD_{inf} se transformem em um grande erro na diferença $OD_{sup} - OD_{inf}$ e conseqüentemente na determinação da TCO. Conforme descrito por Van Haandel e Marais (1999) uma diferença de $2 mg/L^{-1}$ dá bons resultados para um sistema de lodo ativado que opera sob condições normais, TCO variando entre 20 e 60 $mg/L^{-1}/h^{-1}$.

Todavia há um problema prático para aplicar o método semicontínuo em sistemas de tratamento de grande porte, por não se poder ligar e desligar os motores dos aeradores com

muita frequência sob pena de danificá-los rapidamente. Além do mais, se fosse desligada a aeração também não haveria mais a mistura do licor misto e então a medição de OD não seria possível. Desse modo o método não se aplica para uso corriqueiro em reatores grandes de lodo ativado. Uma alternativa para se usar o método semicontínuo é retirar amostras de lodo de um reator em escala real para realizar o teste da TCO em um recipiente pequeno com mistura, por exemplo, um béquer (Figura 2.5 b). Às vezes se realiza o teste da TCO sem a adição de afluente como descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005), mas este procedimento leva a uma estimativa errônea da TCO. Isto se deve ao fato que uma fração do material orgânico (o material rapidamente biodegradável) e a amônia serão depletados rapidamente na amostra de licor misto retirado, de modo que no teste não se detectará a TCO correspondente a estas contribuições. Dependendo da composição da água residuária, o erro da TCO pode ser de 20 a 50 por cento.

Portanto é necessário que se adicione afluente ao lodo, enquanto se realiza o teste da TCO com as amostras em laboratório. A taxa de adição do afluente deve ser tal que o tempo de permanência hidráulica do afluente no recipiente da amostra se iguale ao tempo de permanência do afluente no tanque de aeração do sistema cuja TCO se deseja saber (VAN HAANDEL e CATUNDA, 2012).

Quando se deseja fazer testes frequentemente para estimar a TCO no tanque de aeração de um sistema de lodo ativado, pode não ser prático usar os testes acima descritos. Neste caso uma opção para a realização dos testes da TCO semicontinua é operar um sistema de lodo ativado em escala de laboratório, sob condições de carga hidráulica e carga orgânica iguais às que prevalecem no sistema em escala real (Figura 2.5 c). Neste caso quando o volume e as vazões do afluente e do lodo de retorno são respectivamente V_r , Q_r , Q_a para um volume v_r em escala de laboratório (equações 2.13 e 2.14) os valores de vazão afluente e vazão do lodo de retorno q_a e q_r são dados pelas equações 2.13a e 2.14a. A Figura 2.5 mostra esquematicamente as três opções básicas para a realização do teste da TCO.

$$R_h = V_r/Q_a = v_r/q_r \quad (2.13)$$

$$S = Q_r/Q_a = q_r/q_a \quad (2.14)$$

$$q_a = v_r/(v_r/q_a) = v_r/R_h \quad (2.13a)$$

$$q_r = q_a(Q_r/Q_a) = S \times q_a \quad (2.14a)$$

Sendo:

R_h = tempo de permanência do líquido no reator;

S = Taxa de recirculação de lodo de retorno;

V_r = Volume do reator (L);

Q_a = Vazão afluyente (L/d^{-1});

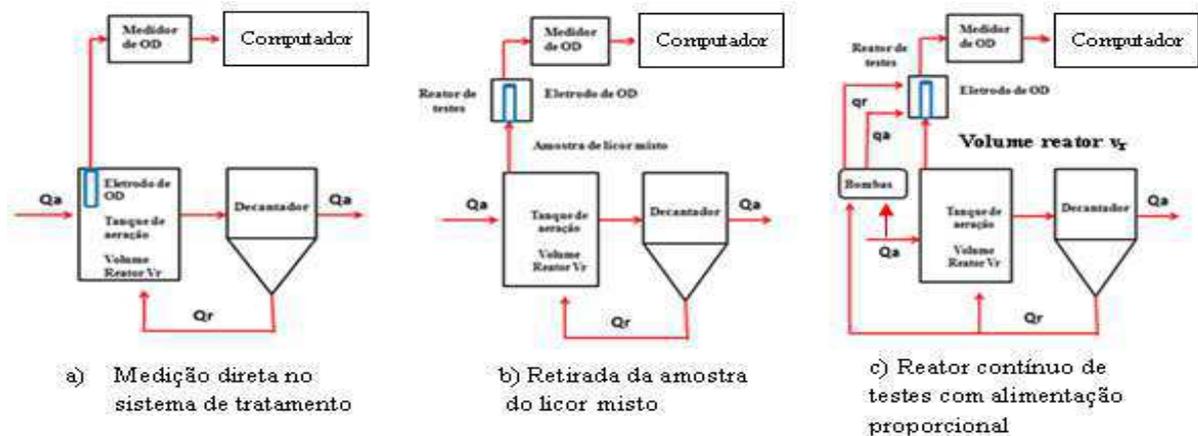
Q_r = Vazão de lodo de retorno (L/d^{-1});

v_r = Volume do reator em escala de laboratório (L);

q_a = Vazão afluyente para reator em escala de laboratório (L/d^{-1});

q_r = Vazão de lodo de retorno para reator em escala de laboratório (L/d^{-1}).

Figura 2.5 – Diferentes alternativas de determinação da TCO na prática.



Fonte: Adaptado de Van Haandel e Catunda (2012).

2.7 Método Contínuo

Embora o método de determinação semicontínuo da TCO seja muito atrativo pela sua praticidade e facilidade na execução, este não é um método que possa ser de fato aplicado em sistemas operando em escala real por apresentar uma série de desvantagens como mostra o Quadro 2.1. A principal razão que impossibilita a aplicação do método semicontínuo em sistemas grandes é o fato do aerador também servir como agitador que mantém o conteúdo do reator com composição uniforme. Ao se desligar a aeração imediatamente inicia-se a sedimentação que deixa a concentração de lodo heterogênea e não há mais a distribuição homogênea dos substratos que entram no reator junto com o afluyente. Por isso foi desenvolvido o método contínuo. Embora seja um método muito atrativo do ponto de vista técnico e operacional, o número de trabalhos dedicados a este tema ainda é muito reduzido. O

método contínuo de determinação da TCO pode fornecer uma medida contínua da TCO, além da vantagem de não haver necessidade de interrupção da aeração, de modo que o método pode ser aplicado diretamente em reatores em escala real. No entanto na prática há alguns problemas na aplicação do método contínuo ainda não evidenciados que serão discutidos e testados ao longo do desenvolvimento deste estudo experimental.

Este trabalho de dissertação procura fazer um estudo mais refinado deste método buscando estabelecer o seu grau de aplicabilidade e mostrar até que ponto os dados produzidos por esta metodologia são precisos, possibilitando assim sua posterior aplicação prática.

Quadro 2.1 – Vantagens e desvantagens dos métodos semicontínuo e contínuo de determinação da TCO.

MÉTODO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Semicontínuo	1 - A determinação da TCO independe da constante de transferência – K_{la} .	1 - Não pode ser aplicado em reatores em escala real; 2 - Resposta descontínua do valor da TCO; 3-Desgaste acelerado dos equipamentos de aeração devido ao liga/desliga frequente dos aeradores.
Contínuo	1 - Resposta contínua da TCO; 2 - Pode ser utilizado em sistemas em escala real.	1 - Necessária a obtenção do K_{la} que, na prática, pode variar com o tempo; 2 - Sem o uso de computadores pode haver grandes erros na determinação da TCO.

Fonte: Adaptado de Van Haandel e Catunda (2012).

2.8 Aplicações da Taxa de Consumo de Oxigênio

Nos processos de tratamento aeróbio, a remoção do substrato, o crescimento da biomassa e o decaimento do lodo ativo estão diretamente relacionados ao consumo de oxigênio. Esta interação exerce sobre o consumo de oxigênio um papel fundamental na avaliação dos processos de lodo ativado (ALLSOP *et al.*, 1990; OLIVEIRA, 2012; TUR *et al.*, 1989).

A TCO fornece um parâmetro quantitativo da taxa de oxidação dos substratos (material orgânico, amônia e o próprio lodo ativo). Portanto, tem importantes aplicações na

operação e controle dos sistemas de lodo ativado. Segundo Van Haandel e Marais (1999) as aplicações mais importantes são:

2.8.1 Balanço de Material Orgânico no Sistema de Lodo Ativado

A Figura 2.6 mostra a representação de um sistema de lodo ativado e os respectivos parâmetros que estabelecem o balanço de massa. Quando o sistema de lodo ativado funciona sob condições estacionárias, o fluxo de material orgânico não varia com o tempo, não havendo, portanto, acúmulo de material orgânico afluente. Neste caso, há basicamente três possibilidades para o material orgânico do afluente (VAN HAANDEL e MARAIS, 1999): (I) Parte do material orgânico afluente pode não ser removida durante o tratamento e sai junto com o efluente (MS_{te}); (II) Há uma fração que é transformada em lodo orgânico e é descarregada como lodo de excesso (MS_{xv}); e (III) Uma fração do material orgânico é oxidada e transformada em material inorgânico (MS_o).

A massa de material orgânico no afluente e no efluente pode ser determinada como produto da vazão pela concentração de DQO como mostram as equações 2.15 e 2.16:

$$MS_{ta} = Q_a \times S_{ta} \quad (2.15)$$

$$MS_{te} = Q_e \times S_{te} \quad (2.16)$$

Sendo:

MS_{ta} = Massa de DQO aplicada diariamente (kgDQO/d^{-1});

MS_{te} = Massa de DQO diária no efluente (kgDQO/d^{-1});

Q_a = Vazão afluente (L/d^{-1});

Q_e = Vazão efluente (L/d^{-1});

S_{ta} = DQO afluente (mgDQO/L^{-1});

S_{te} = DQO efluente (mgDQO/L^{-1}).

O material orgânico descarregado no lodo de excesso pode ser determinado através da massa de sólidos suspensos voláteis e da DQO, através da constante de proporcionalidade $f_{cv} = 1,48 \text{ mgDQO/gSSV}$ (já discutida na Seção 2.2). Sendo descrita da seguinte maneira:

$$MS_{xv} = f_{cv} \times q \times X_v \quad (2.17)$$

Sendo:

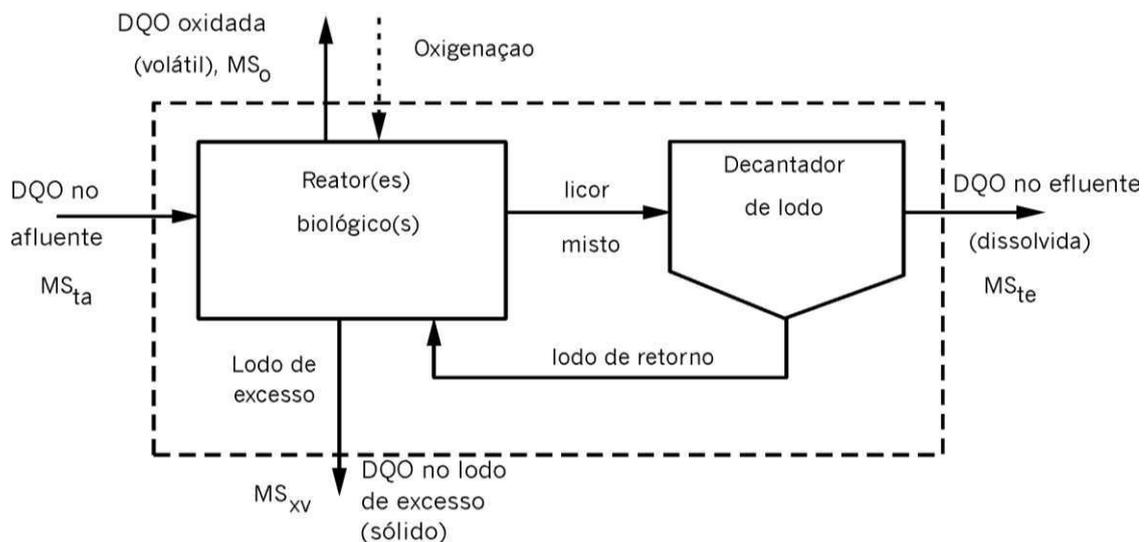
MS_{xv} = Massa de DQO diária no lodo de excesso (kgDQO/d⁻¹);

q = Vazão de lodo de excesso (L/d⁻¹);

X_v = Concentração de lodo orgânico no lodo de excesso (mgSSV/L⁻¹);

f_{cv} = Razão SSV/DQO (mgSSV/mgDQO).

Figura 2.6 – Fluxograma básico do sistema de lodo ativado com a demonstração das variáveis envolvidas no balanço de massa.



Fonte: Van Haandel e Marais (1999).

O fluxo de material orgânico oxidado pode ser expresso como a massa de oxigênio dissolvido consumido no licor misto que, por sua vez, pode ser calculado como o volume do reator pelo produto da TCO (equação 2.18).

$$MS_o = TCO \times V_r \quad (2.18)$$

Sendo:

MS_o = Massa de DQO diária oxidada (kgDQO/d⁻¹).

No cálculo do balanço de massa é verificado se a soma dos fluxos no efluente, na descarga de lodo e na oxidação se iguala ao fluxo de material orgânico no afluente.

2.8.2 Estudos da Cinética do Sistema de Lodo Ativado

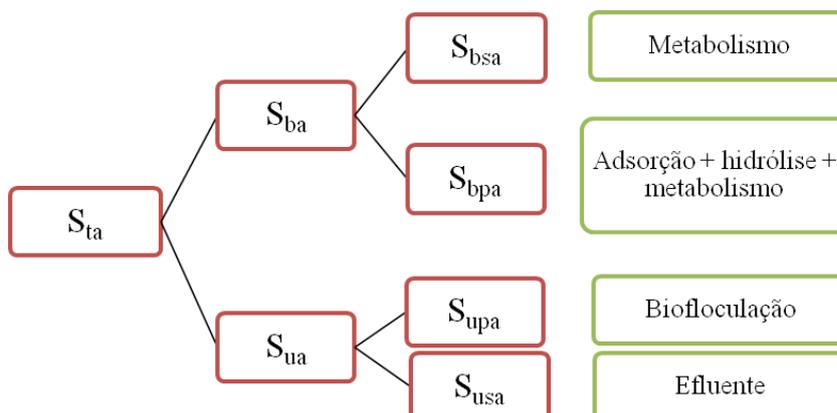
Entre os parâmetros mensuráveis ligados à utilização do material orgânico em sistemas de lodo ativado, a TCO é o mais sensível. O uso da TCO para modelagem e operação de sistemas de lodo ativado que operam em condições dinâmicas tem sido aplicado por diversos pesquisadores (DOLD *et al.*, 1980; SPANJERS *et al.*, 1998; VANROLLEGHEM *et al.*, 1992; VAN HAANDEL e VAN DER LUBBE, 2012), e tem se desenvolvido como principal instrumento para o estudo da cinética do sistema de lodo ativado. A TCO também tem uma posição de destaque no modelo da *International Association on Water Quality* (IAWQ) sobre o sistema de lodo ativado (HENZE *et al.*, 1986 e HENZE *et al.*, 1995).

2.8.3 Composição do Material Orgânico em Águas Residuárias

A variação na composição dos esgotos depende dos usos aos quais são destinadas as águas de abastecimento e de acordo com os hábitos, as condições socioeconômicas, o nível cultural da população, o clima, a infiltração de águas pluviais, o lançamento de efluentes industriais ou domésticos nas redes coletoras, entre outros (JORDÃO e PESSÔA, 2011). Mesmo tendo uma grande variação os esgotos, em geral, apresentam uma fração sólida, composta basicamente por material orgânico. A velocidade de utilização desses compostos orgânicos nos sistemas de tratamento pelos diversos microrganismos depende muito da natureza do material presente no esgoto.

Para fins de modelamento, o material orgânico afluyente (S_{ta}) é dividido em duas frações: o material orgânico biodegradável (S_{ba}) compõe a fração que é metabolizável pelos microrganismos e a não biodegradável (S_{ua}) não afetada pela ação bioquímica dos microrganismos presentes no lodo ativado. O material biodegradável (S_{ba}) e não biodegradável (S_{ua}), são subdivididos em frações sendo estas: solúvel (S_{bsa} e S_{usa}) e particulada (S_{bpa} e S_{upa}). Esta subdivisão leva em consideração o diâmetro do material orgânico (VAN HAANDEL e VAN DER LUBBE, 2012).

Figura 2.7 – Frações do material orgânico e processos de utilização.



Fonte: Adaptado de Van Haandel e Van der Lubbe (2012).

Como a taxa de consumo de oxigênio depende diretamente da taxa de utilização do material orgânico, a TCO pode ser utilizada com esta finalidade. Wentzel *et al.* (1999) aplicando o conceito de bateladas de esgoto desenvolveram um método que permite a estimativa das frações rapidamente e lentamente biodegradáveis em águas residuárias. A compreensão da distinção dessas frações é muito importante porque repercute sobre a remoção de determinados compostos nos processos de tratamento.

2.8.4 Determinação da Toxicidade de Efluentes Industriais

Nos sistemas de tratamento biológico de efluentes industriais normalmente há problemas com a presença de compostos químicos tóxicos no sistema, pois estes afetam diretamente o metabolismo das bactérias. A presença desses compostos pode exercer efeitos adversos à capacidade metabólica dos microrganismos, agindo de forma temporária ou permanente. Quando o efeito é temporário, é restaurada a taxa normal da TCO quando a presença do composto for eliminada do reator, ou seja, há apenas um efeito inibidor sobre os microrganismos. Se o efeito permanecer depois de eliminada a presença do composto é caracterizada a toxicidade.

Segundo Santos (2007) a toxicidade da água residuária de uma estação de tratamento está diretamente relacionada à qualidade do afluente. Em casos onde ocorre um alto grau de toxicidade, conseqüentemente, haverá um menor desempenho na atividade bacteriana, afetando a TCO e levando a uma diminuição na qualidade do efluente.

2.9 Aeração em Sistemas de Tratamento Aeróbios

Segundo Van Haandel e Van der Lubbe (2012) a aeração em sistema de lodo ativado é aplicada com duas finalidades: I) Efetuar a transferência de oxigênio atmosférico para o licor misto, onde é consumido para a oxidação da matéria orgânica e eventualmente de amônia; e II) Provocar agitação mecânica do licor misto que gera turbulência tão intensa que é capaz de manter o lodo em suspensão, em sistemas dimensionados adequadamente.

O oxigênio é transferido para o meio líquido por dissolução do oxigênio atmosférico e/ou introduzido artificialmente por processos de aeração mecânica. Durante a estabilização da matéria orgânica a concentração de oxigênio no meio líquido deve ser suficiente para manter o equilíbrio entre a disponibilidade e o consumo, caso contrário pode haver geração de zonas anaeróbias (VON SPERLING, 2005).

Segundo Van Haandel *et al.* (1997), existe uma estratificação na concentração de OD nos tanques de aeração. Para manter uma concentração mínima de OD de 1 mg/L em um reator é necessário manter uma concentração mais elevada na zona próxima aos aeradores, onde ocorre a transferência.

2.9.1 Transferência de Oxigênio em Sistemas de Lodo Ativado

O sistema de aeração tem por objetivo o fornecimento de oxigênio para a manutenção das atividades respiratórias de certo conjunto de células. Assim, o que se visa é transferir o oxigênio da fase gasosa para o líquido e fazer com que este oxigênio dissolvido chegue às células suspensas, penetre nessas células e, finalmente, seja consumido na reação.

Normalmente a introdução de aeração nesses sistemas é feito por meios artificiais. Duas maneiras comumente usadas para a transferência de OD artificialmente são: aeração por ar difuso e aeração mecânica. A aeração por ar difuso consiste na introdução de ar ou oxigênio no meio líquido, já a aeração mecânica causa grande agitação, expondo o líquido na forma de gotículas ao ar, ocasionando a entrada do ar atmosférico no meio líquido.

Segundo Van Haandel e Marais (1999) a transferência de oxigênio baseia-se na lei de Henry. Esta lei afirma que quando houver contato entre uma fase líquida e uma fase gasosa, há uma tendência de se estabelecer um equilíbrio entre essas fases que se caracteriza pela existência de uma proporcionalidade entre a pressão parcial de um componente gasoso e a concentração daquele componente dissolvido na fase líquida. A concentração de oxigênio dissolvido de saturação na fase líquida chama-se de concentração de saturação (OD_s). No caso

de aeração no sistema 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.

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:

- 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.

2.9.2 Método para Avaliação da Constante de Transferência de Oxigênio

Um dos principais parâmetros necessários ao dimensionamento de uma unidade de tratamento de águas residuárias é o coeficiente global de transferência de oxigênio entre o ar e a água, chamado K_{la} (CORRÊA, 2006). O K_{la} é um importante parâmetro usado para medir a transferência de oxigênio em reatores aeróbios, sendo também utilizado como parâmetro de referência para avaliar a eficiência do processo de aeração sob diferentes condições operacionais e de geometria do sistema.

Os métodos para a determinação de K_{la} em biorreatores são vários, mas destacam-se como sendo os mais aplicados: o método da oxidação do sulfito de sódio, aplicado na ausência de microrganismos, comumente utilizado em testes padrões de equipamentos de aeração utilizando água; e o método estacionário, aplicado em sistemas que há consumo de oxigênio pelos microrganismos. Este último é o método empregado nesta pesquisa.

2.9.2.1 Determinação da Capacidade de Oxigenação Usando Água

A determinação da Capacidade de Oxigenação (CO) pelo método de oxidação do sulfito é realizada enchendo-se com água um reator no qual o aerador está situado, remove-se o oxigênio dissolvido por meio da oxidação do sulfito de sódio usando-se o cloreto de cobalto como catalisador. O cálculo do K_{la} é feito correlacionando a variação da concentração de oxigênio durante a aeração ao tempo de aeração como mostrado pela forma integrada da equação 2.19 (VAN HAANDEL e VAN DER LUBBE, 2012).

$$dOD_I/dt = K_{la} (OD_s - OD_I) \quad (2.19)$$

Sendo:

dOD_I/dt = Taxa de variação de oxigênio no líquido (OD_I);

OD_I = Concentração de OD no líquido (mg/L^{-1}).

2.9.2.2 Determinação da Capacidade de Oxigenação Usando Licor Misto e Condições Reais de Operação

De acordo com Van Haandel e Van der Lubbe (2012) num sistema de lodo ativado o método para determinação da CO, descrito anteriormente, não se aplica porque neste há consumo de oxigênio pelos microrganismos. Nesta situação durante a operação sob condições estacionárias é estabelecida no reator biológico uma determinada concentração de O_2 de tal modo, que a taxa de aeração se iguala à TCO. Assim o valor de K_{la} pode ser determinado como expresso nas equações 2.20 ou 2.21.

$$(dOD_I/dt)_a = 0 = K_{la} (OD_s - OD_I) - TCO \quad (2.20)$$

$$K_{la} = TCO / (OD_s - OD_I) \quad (2.21)$$

Sendo:

$(dOD_I/dt)_a$ = Taxa de aeração.

Na prática a aplicabilidade dessas equações é muito limitada porque para calcular o valor de K_{la} é necessário que a concentração de OD_I permaneça constante, o que, na prática, dificilmente irá ocorrer.

Assim uma alternativa para se determinar experimentalmente o valor de K_{la} é operar o tanque de aeração sem que haja introdução de afluente, enquanto as determinações da TCO são realizadas. Nesse caso, o licor misto no tanque funciona como uma batelada de lodo e nestas condições é perfeitamente válida a retirada de uma amostra para fazer a TCO fora do tanque e deste modo o resultado obtido refletirá fielmente a TCO no tanque de aeração. Tendo-se os valores de TCO e OD_I em diferentes momentos e conhecendo o valor da concentração de saturação (OD_s), determina-se os valores da constante K_{la} .

2.10 Fatores que Influenciam o Coeficiente de Transferência de Oxigênio

Vários são os fatores que podem afetar o valor de K_{la} e da CO : o sistema de aeração, os tipos de aeradores, a geometria do reator biológico, a temperatura, a pressão atmosférica, a absorção de oxigênio atmosférico, além das impurezas presentes na fase líquida (VAN HAANDEL e VAN DER LUBBE, 2012).

2.10.1 Influência da Concentração de Sólidos na Transferência de Oxigênio

Sob condições operacionais e cargas constantes a massa de lodo em sistemas de lodo ativado, bem como a necessidade de oxigênio diário são constantes (VAN HAANDEL e VAN DER LUBBE, 2012). No entanto, a eficiência de aeração expressa como a massa de oxigênio transferido por unidade de energia elétrica necessária para permitir a aeração, não é constante e tende a variar com a concentração de OD.

A 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 2.19 (VAN HAANDEL e MARAIS, 1999). Nestas circunstâncias a transferência de oxigênio será máxima ($CO_{máx}$) quando a concentração de oxigênio dissolvido for zero:

$$CO_{máx} = (dODI / dt)_{a,máx} = K_{la} \times OD_s \quad (2.22)$$

Sendo:

$(dODI/dt)_{a, máx}$ = massa de oxigênio máxima transferida por unidade de tempo e por unidade de volume do licor misto ($kgO_2/m^3/h^{-1}$).

O consumo de energia para aeração é inversamente proporcional à diferença que existe entre a concentração de saturação e a concentração de OD na fase líquida do licor misto, sendo assim, quanto maior a concentração de OD no licor misto, maior será o consumo de energia para manter essa concentração.

A concentração de OD é um importante parâmetro para a operação do sistema de lodo ativado. Caso não seja transferido uma quantidade de oxigênio suficiente as propriedades biológicas e mecânicas do lodo podem ser afetadas. O valor da concentração de OD abaixo do mínimo pode acarretar prejuízo ao sistema de três maneiras: (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).

2.10.2 Surfactantes

Os surfactantes são substâncias que alteram as propriedades dos líquidos, mesmo quando presentes em pequenas quantidades. São compostos por duas frações: porções hidrofílicas (polar) e hidrofóbicas (apolar) que lhe conferem o fenômeno da atividade superficial (RIOJA, 2009). Essas propriedades fazem com que haja uma redução na energia livre da superfície diminuindo assim a tensão superficial e aumentando a viscosidade da superfície, facilitando a difusão dos agentes tensoativos na superfície da massa líquida. Uma consequência da diminuição da tensão superficial está relacionada à dificuldade da transferência de gás para o líquido. O efeito dos surfactantes nas estações de tratamento de água residuárias está diretamente relacionado com a transferência de oxigênio (MASUTANI e STENSTROM, 1984).

Os surfactantes são compostos que se encontram presentes tanto em águas residuárias domésticas como industriais, principalmente na indústria têxtil. Os surfactantes na indústria têxtil entram na formulação de vários produtos auxiliares, tais como carreadores, retardantes, antiespumantes, umectantes, dispersantes, detergentes e amaciantes (STEINHART, 2000).

2.10.3 Temperatura

A temperatura é um fator de grande influência sobre o crescimento bacteriano, pois está associado à velocidade das reações metabólicas dos microrganismos. Essa influência se deve ao fato de tais reações serem catalizadas por enzimas específicas, cuja produção aumenta ou diminui de acordo com a temperatura (BITTON, 2005; PELCZAR *et al.*, 1997).

A taxa de qualquer reação química aumenta com a elevação da temperatura, desde que esta elevação da temperatura não produza alterações nos reagentes ou no catalizador. As reações biológicas também apresentam a mesma tendência de acréscimo à medida que a temperatura aumenta (VON SPERLING, 1996).

A influência da temperatura sobre o valor de K_{1a} é descrita pela equação de Arrhenius (VAN HAANDEL e MARAIS, 1999).

$$K_{Ia, t} = K_{Ia20} \times \Theta^{(t-20)} \quad (2.23)$$

Sendo:

$K_{Ia, t}$ = Constante de transferência a $T^\circ \text{ C}$;

K_{Ia20} = Constante de transferência a 20° C ;

Θ = Fator da influência da temperatura.

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Introdução

Neste capítulo serão descritos os procedimentos, os materiais e os métodos utilizados para o desenvolvimento da investigação experimental do estudo comparativo da taxa de consumo de oxigênio aplicando-se os métodos de determinação semicontínuo e contínuo. A respirometria foi à técnica empregada para a realização dos experimentos visando atender aos objetivos propostos.

O monitoramento dos sistemas e o desenvolvimento da pesquisa foram realizados na Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários (EXTRABES), localizada no bairro do Tambor em Campina Grande, numa área pertencente à Universidade Federal de Campina Grande e à Universidade Estadual da Paraíba (UFCG/UEPB), onde se encontra instalado o laboratório do grupo de pesquisa do Programa de Saneamento Básico (PROSAB).

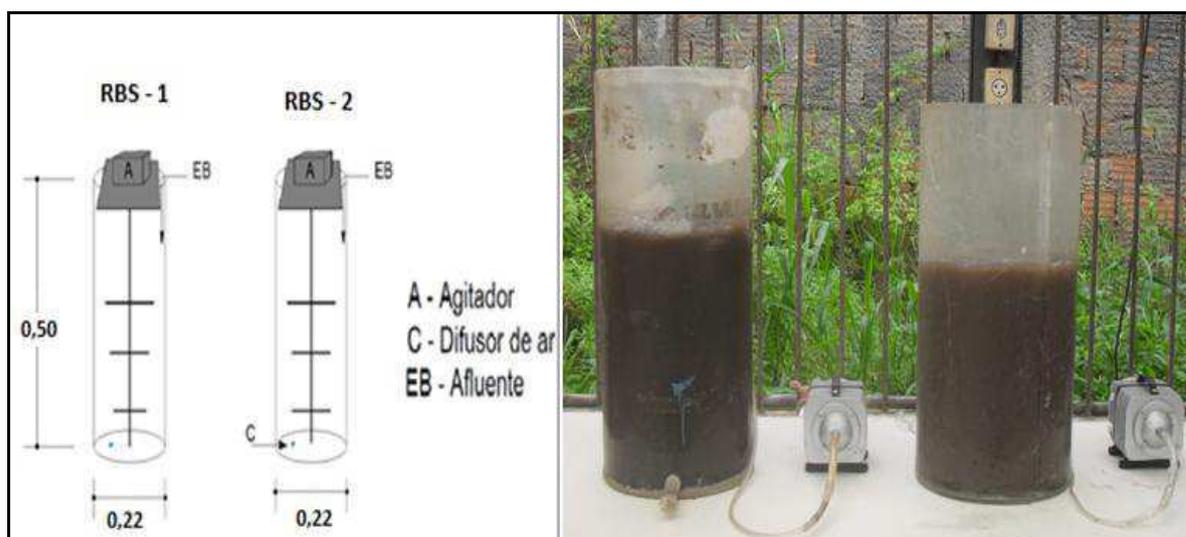
3.2 Material

3.2.1 Descrição do Sistema de Lodo Ativado

Os reatores de forma cilíndrica e volume útil de 14 litros foram construídos em acrílico com 22 cm de diâmetro e 50 cm de altura, sendo duas unidades com as mesmas configurações. Esse sistema foi projetado com a finalidade de produzir lodo aeróbio a partir de esgoto sanitário. O esgoto afluyente proveniente da rede coletora de esgotos da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), era bombeado do Interceptor Leste (Interceptor da Depuradora) do sistema de esgotamento sanitário da cidade de Campina Grande, passando pelo campo experimental do laboratório. No bombeamento foi utilizado um conjunto moto-bomba do poço de visita para um tanque de armazenamento com capacidade de 2 m³. A partir deste o esgoto era encaminhado para o reator. O reator foi programado para operar em Regime de Bateladas Sequenciais (RBS) com alimentação diária.

No sistema de lodo ativado RBS, instalou-se um agitador mecânico de eixo vertical com palhetas que eram acionadas por um motor trifásico 1/3 HP de baixa rotação (45 rpm). Essa agitação assegurava a suspensão do lodo e o contato deste com toda a massa líquida. Um aerador/compressor insuflava bolhas de ar através de pedras porosas presas no fundo do reator garantindo o suprimento de oxigênio aos microrganismos. A Figura 3.1 mostra a representação esquemática dos reatores utilizados para produção de lodo (à esquerda) e uma fotografia dos sistemas em funcionamento (à direita).

Figura 3.1– Representação esquemática e fotografia dos reatores utilizados para a produção de lodo.



Fonte: Elaboração da autora.

3.2.2 Operação do Sistema de Lodo Ativado

A monitoração do sistema teve como objetivo a produção de lodo suficiente para realizar os testes respirométricos necessários ao desenvolvimento da pesquisa.

Os sistemas operavam com uma idade de lodo de 5 dias que se mostrou insuficiente para a nitrificação de modo que prevaleceu o grupo de bactérias heterotróficas. Como o volume do reator era 14 L, a produção do lodo de excesso (licor misto) foi de 2,8 L/d. O lodo de excesso era utilizado para a realização dos testes respirométricos. A alimentação do sistema era realizada com uma vazão de 10 litros de esgoto bruto por dia e, com o intuito de manter uma massa de lodo adequada no sistema, foi necessária a adição de um substrato composto por proteínas e carboidratos, resultando na massa de DQO aplicada diariamente de

37 gDQO/d⁻¹. O descarte do lodo de excesso, a descarga do sobrenadante e o tempo de aeração foram controlados manualmente.

3.3 Métodos

Para atender aos objetivos propostos nesta dissertação a fase experimental para a comparação dos métodos foi dividida em duas etapas:

Etapa 1: Nesta etapa foram realizados testes com a variação da carga orgânica instantânea aplicando-se o regime de bateladas sequenciais para a adição do substrato durante a execução dos ensaios respirométricos. Normalmente, a adição da carga orgânica em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) se dá em pequenas quantidades ao longo do dia. A adição em bateladas leva a grandes e repentinas variações da TCO no sistema de tratamento. Foi utilizada esta metodologia de adição da carga orgânica repentina com o objetivo de observar o comportamento da TCO em uma situação extrema e atípica, possibilitando, desta forma, a capacidade de se detectar com precisão variações abruptas da TCO por ambos os métodos.

Etapa 2: Nesta etapa a variação da carga aplicada foi mantida no regime on-off (ligado-desligado) com variação da fração do tempo para alimentação e não alimentação. Buscou-se a simulação de uma situação real, já que partiu-se do princípio que os sistemas operando em escala real recebem cargas orgânicas variadas (altas e baixas) em diferentes horários do dia. Faz-se necessário a validação dos métodos de determinação da TCO nesta condição para verificar a capacidade de detecção dos métodos em situações mais frequentemente encontradas.

A fase experimental foi iniciada em novembro de 2011 estendendo-se até o mês de julho de 2012 totalizando um período de 8 meses. Durante esse período vários testes respirométricos foram realizados em paralelo com a monitoração dos reatores.

Foi necessário operar o sistema de geração de lodo durante um período de 30 dias para que a sedimentabilidade e a concentração de sólidos fossem satisfatórias para a execução dos testes. Nesse período foram realizados 24 testes para a etapa I e 10 testes contínuos e 10 semicontínuos para a etapa II (ensaios realizados em dias alternados), além de testes específicos para avaliar a influência da concentração de lodo, dos surfactantes e da temperatura sobre K_{la} .

3.3.1 Métodos de Determinação da TCO

3.3.1.1 Determinação pelo Método Semicontínuo

A TCO obtida pelo método semicontínuo foi determinada conforme Catunda *et al.* (1996). Nesta, um aerador era ligado ao respirômetro que controlava a aeração através do software Resp S4.0C que acompanha o equipamento. O respirômetro ativava o aerador quando atingia uma concentração de OD inferior pré-estabelecida, desativando-o quando o mesmo atingia uma concentração superior também pré-estabelecida, dando início a ciclos de períodos com aeração e sem aeração.

Durante os períodos sem aeração o software calcula os valores da TCO como a razão da diminuição da concentração de OD com o tempo, por regressão linear, como descrito no Capítulo 2, Seção 2.6, equação 2.12.

3.3.1.2 Determinação pelo Método Contínuo

No método contínuo a aeração não é interrompida e no reator aerado observa-se continuamente a variação da concentração de OD em função do tempo. A partir da variação da concentração de OD com o tempo, calcula-se a taxa de variação e em seguida pode-se determinar a TCO.

No método contínuo aplica-se aeração continuamente, mas a taxa de transferência de oxigênio não é constante porque a concentração de oxigênio dissolvido no líquido varia. Quando se tem um equipamento que registra o valor da concentração de OD_l em função do tempo, existe a possibilidade de se calcular o valor da TCO, também em função do tempo, ao se aplicar a equação diferencial 3.1 para pequenos intervalos de tempo (Δt) durante os quais há variações nas concentração de OD. Neste caso desconsidera-se o efeito hidráulico e a absorção de oxigênio da atmosfera e têm-se:

$$(dOD_l/dt) = (dOD_l/dt)_a + (dOD_l/dt)_c = K_{la}(OD_s - OD_l) - TCO \quad (3.1)$$

Sendo:

OD_l = Concentração de Oxigênio no licor misto (mg/L⁻¹).

O uso da equação 3.1 esbarra em alguns problemas: (1) é necessário dispor de um

respirômetro automatizado para adquirir os valores de OD_1 em função do tempo para poder calcular a variação $\Delta OD/\Delta t$; (2) os intervalos de leitura não podem ser muito pequenos para evitar interferência de oscilações na leitura de OD e ruído do sistema eletrônico (o efeito da relaxação); (3) o valor de K_{la} deve ser conhecido; e (4) o K_{la} deve permanecer constante durante todo o período de observação, o que na prática pode nem sempre se verificar. Por outro lado, o método contínuo dispensa a necessidade de se interromper a aeração do sistema de tratamento ou de haver uma agitação do licor misto independente da ação dos aeradores. Estes aspectos aumentam sua aplicabilidade em reatores grandes.

No caso da TCO permanecer constante ou variar lentamente, pode-se calcular a concentração de OD_1 em função do tempo como mostra a equação 3.2.

$$OD_1 = (OD_s - TCO/K_{la}) \times (1 - \exp(-K_{la}t)) + OD_o \exp(-K_{la}t) \quad (3.2)$$

O valor de OD_1 tende a um valor constante, concentração de oxigênio de equilíbrio (OD_{eq}), pois quando “t” aumenta, os termos exponenciais da equação 3.2 se tornam pequenos e a concentração de OD_1 tende para um valor constante. Portanto, no caso de aplicação do método contínuo, havendo aeração contínua, a variação da concentração de OD na fase líquida é expressa como descrito na equação 3.1. Dispondo do registro dos valores da concentração de OD_1 em função do tempo, pode-se reescrever a equação 3.1 como:

$$TCO = K_{la}(OD_s - OD_1) - \Delta OD/\Delta t \quad (3.3)$$

Sendo:

$\Delta OD/\Delta t$ = Variação da concentração de oxigênio durante um intervalo de tempo qualquer.

Para a aplicação do método contínuo é necessário obter o valor de K_{la} para as condições reais de operação do sistema de tratamento, o que acaba tornando-se um problema para a aplicação do método. No entanto, pode-se usar a equação 3.2 se o sistema permanecer com a TCO constante. Há a necessidade de se conhecer o valor da concentração de OD_s , mas neste caso torna-se mais fácil de obter, podendo ser feita usando o próprio efluente do sistema ($TCO = 0$) sem grandes interferências já que é um parâmetro mais estável.

Nesta equação há a necessidade de manter o valor de OD_1 sempre superior ao OD_{cr} (aproximadamente 1 mg/L para remoção de material carbonáceo). Por outro lado há um valor máximo para que a diferença $OD_s - OD_1$ não se torne muito pequena. Para a diferença $OD_s -$

OD_1 pequena o erro relativo se torna grande mesmo para erros pequenos nos valores de OD_1 e OD_s . Adotando-se um valor de OD_1 de 1 mg/L menor que OD_s tem-se: $OD_{\min} = 1 < OD_1 < OD_{\max} = OD_s - 1$, portanto:

$$TCO_{\max}/TCO_{\min} = K_{la} (OD_s - OD_{\min}) / [K_{la} (OD_s - OD_{\max})] = OD_s - 1 \quad (3.4)$$

Assim o valor máximo da TCO não deve superar 7 vezes o valor mínimo da TCO. Dependendo da aplicação do respirômetro, a faixa de medição da TCO pode ser satisfatória ou não. Na maioria dos sistemas de tratamento em escala real com fluxo contínuo da água residuária, a variação da TCO será sempre menor que um fator 7, de modo que o método nesses sistemas, em princípio, torna-se adequado para esta aplicação. Em sistemas de bateladas sequenciais a variação da TCO pode ser bem maior que um fator 7, mas nestes casos a TCO pode ser determinada em amostra retirada do reator grande, de modo que não há necessidade de se aplicar o método contínuo.

Salienta-se que, para a aplicação do método contínuo, alguns fatores devem ser levados em consideração, caso contrário as determinações serão comprometidas: (1) deve-se fazer uso de computadores para registros precisos dos dados; (2) o valor de K_{la} tem que ser conhecido e se manter constante; e (3) para a aplicação da equação 3.1 deve-se manter uma diferença de aproximadamente 1 mg/L entre os valores de OD_s e OD_1 , respeitando-se ainda que OD_1 deve ser maior que a concentração crítica.

3.3.2 Determinação da Constante de Transferência de Oxigênio

A qualidade do sistema de aeração é indicada pela constante de transferência de oxigênio, quanto maior a constante maior será a taxa de transferência de oxigênio.

A determinação do valor da constante K_{la} sob as condições operacionais existentes no tanque de aeração de um sistema de lodo ativado se dá através da determinação da TCO pelos microrganismos presentes no licor misto do tanque de aeração. Pode-se estimar a taxa de aeração, sabendo-se que se aplica a lei de Fick para os aeradores (descrito na Seção 2.5.3). Nos períodos de aeração há, ao mesmo tempo, transferência de OD para a fase líquida e também consumo de OD pela massa bacteriana. Portanto, desconsiderando o efeito hidráulico e a absorção de oxigênio atmosférico tem-se:

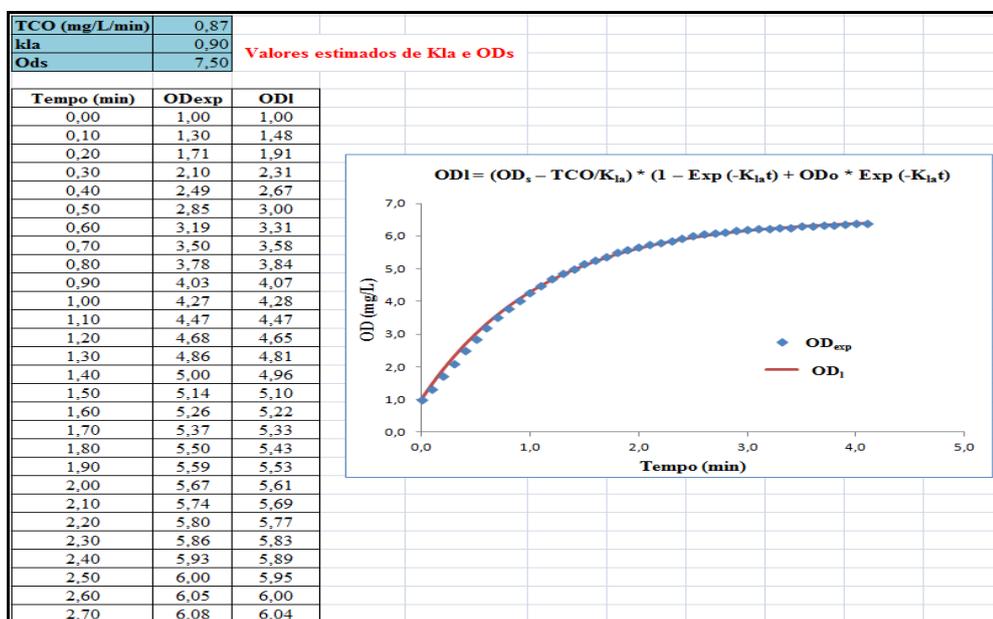
$$K_{la} = (\Delta OD / \Delta t + TCO) / (OD_s - OD_1) \quad (3.5)$$

Pela equação 3.5, para se determinar a constante de transferência é necessário que se determine os valores da TCO e da taxa de variação da concentração de OD, além das concentrações de OD_s e OD_l. A TCO é medida como a taxa de diminuição da concentração de OD devida à respiração bacteriana quando o licor misto não é aerado utilizando a equação 2.12 (método semicontínuo). Enquanto os valores de K_{la} e OD_s podem ser calculados como mostra o exemplo da Figura 3.2, onde uma curva com os valores de OD experimentais são correlacionados com os valores teóricos, a partir da inserção de dados de K_{la} e OD_s na equação 3.2.

Os valores de K_{la} utilizados nesta pesquisa foram determinados de acordo com a equação 3.2 considerando os seguintes aspectos:

- Usando a equação 3.2 geram-se curvas de OD em função do tempo; atribuindo-se diferentes valores para as constantes K_{la} e OD_s que, em princípio, são desconhecidos;
- Ao comparar as curvas teóricas com os valores experimentais de OD em função do tempo, selecionam-se aqueles valores que dão a melhor correlação entre a curva teórica e os valores experimentais (alternativamente usa-se o “solver” do programa Excel para simular a melhor correlação entre as curvas teórica e experimental de OD_l), obtendo-se assim os dados de OD_s e K_{la}; e
- De posse dos valores de K_{la} por este procedimento, usa-se a equação 3.3 para calcular a TCO pelo método contínuo.

Figura 3.2 – Exemplo do procedimento de cálculo para obtenção de valores de K_{la} e OD_s



Fonte: Elaboração da autora.

3.3.3 Determinação da TCO pelo Método Contínuo

Para o cálculo da TCO pelo método contínuo aplica-se a equação 3.3. Para o uso desta equação, além dos valores de K_{1a} e OD_s (obtidos como descrito na Seção 3.3.2), é de fundamental importância que se defina um intervalo de tempo (Δt) para a seleção dos dados de OD. Como já mencionado o software vai armazenando em planilhas na memória do computador dados de OD a cada 6s. Ao final do metabolismo de uma batelada ou de uma série de bateladas com adição do substrato era disponibilizado um arquivo com inúmeros dados de OD que precisavam ser tratados antes da aplicação direta na equação. Portanto, fez-se necessário estabelecer intervalos de tempo (Δt) que pudessem ser utilizados para os cálculos da TCO pelo método contínuo, levando em consideração os seguintes aspectos:

- Com intervalos de tempo muito curtos a diferença entre a concentração de OD no início e no final deste intervalo de tempo será pequeno com relação ao erro da determinação de OD nos dois momentos. Se isto for o caso, então os valores terão grande instabilidade; e
- Por outro lado, no caso de selecionar intervalos longos para Δt pode ser que não se detecte uma mudança rápida da TCO.

Assim um período considerado satisfatório seria aquele tempo mínimo necessário para gerar uma estimativa confiável da variação $\Delta OD/\Delta t$ sob as condições operacionais prevalecentes.

Das planilhas de OD geradas e armazenadas a cada 6s no decorrer dos testes foram selecionados dados de OD com os intervalos de tempo, Δt : 0,5; 1; 3 e 6 minutos para definir qual dos intervalos garantem melhores resultados e assim aplicá-los para a determinação da TCO contínua.

3.3.4 Equipamentos Utilizados nos Testes Respirométricos

O material utilizado nos testes respirométricos era: a) CPU (Central Processing Unit) contendo o software Resp S4.0C e seus periféricos (monitor, mouse, teclado); b) respirômetro *Beluga* com saída para a CPU, para o aerador e uma entrada para o eletrodo de OD; c) eletrodo de oxigênio (Modelo YSI 5718); d) recipiente com capacidade para 2 e 4 litros; e e) agitador magnético com haste magnética, para manter o lodo em suspensão. Na Figura 3.3 é mostrada uma foto dos equipamentos utilizados nos testes.

Os reatores utilizados nos testes respirométricos descritos a seguir foram um béquer com capacidade total de 2 litros e um reator construído em acrílico com 18 cm de diâmetro e 30 cm de altura com volume útil de 5L. O aerador utilizado foi do tipo compressor, que insuflava bolhas de ar por meio de pedras porosas presas no fundo do reator, o aparelho tinha uma vazão máxima de 50 L/min e uma potência de 35 W.

Figura 3.3 - Equipamentos utilizados para a realização dos testes respirométricos.



Fonte: Elaboração da autora.

3.3.5 Testes Respirométricos com Adição Brusca do Substrato

Nesta fase os testes foram realizados no mesmo dia e com a mesma amostra de licor misto, proveniente do descarte de lodo dos reatores; diariamente era coletado um litro de amostra para a realização dos ensaios laboratoriais. A TCO pelos métodos semicontínuo e contínuo foram determinados conforme descrito na Seção 3.3.1, utilizando o respirômetro *Beluga* versão 3.2C e software Resp S4.0C. Uma sequência de bateladas de um substrato solúvel (acetato de sódio) era adicionada e a TCO era determinada em função do tempo.

3.3.5.1 Procedimento de Determinação da TCO Aplicando o Método Semicontínuo

A aplicação dos testes respirométricos tinha por objetivo a obtenção de dados de TCO por ambos os métodos para posteriormente compará-los. Foi utilizado em todos os testes o substrato acetato de sódio ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), composto solúvel biodegradável de fácil assimilação pelas bactérias heterotróficas (prevalentes no sistema).

Os valores de referência da concentração de oxigênio dissolvido máximo e mínimo ($OD_{máx} - OD_{mín}$) especificados no software foram de 3,0 e 1,0 mgO_2/L , respectivamente.

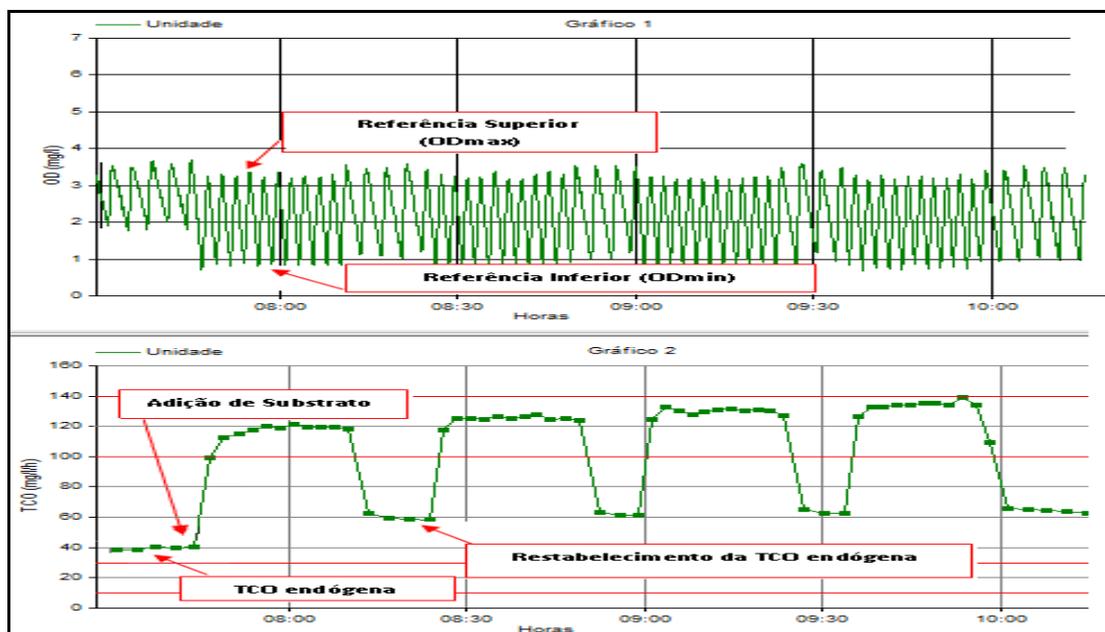
A metodologia a seguir descreve a sequência de execução dos ensaios respirométricos:

- Ligava-se o respirômetro e esperava-se 15 minutos, para então calibrar o eletrodo de oxigênio com o valor de saturação de acordo com a temperatura e a altitude local;
- Uma amostra de um litro de licor misto era submetida à agitação e com a inserção do eletrodo de oxigênio iniciava-se os ciclos de aeração e não aeração controlados pelo respirômetro para que todo o material extracelular presente no licor misto fosse consumido, mantendo uma TCO mínima (TCO_{end}) e constante, caracterizando a fase de respiração endógena;
- Estabelecida a respiração endógena, adicionava-se uma concentração do substrato acetato de sódio equivalente a 120 $mgDQO/L$. Imediatamente após a adição do substrato observava-se o aumento da taxa de consumo de oxigênio ($TCO_{máx}$) e a diminuição da concentração de OD devido à respiração exógena. Com a concentração adicionada de 120 $mgDQO/L$, a TCO aumentava para um valor constante indicando uma taxa constante e máxima de utilização do substrato;
- Após a utilização do substrato a TCO decaía para um valor correspondente à respiração endógena. Após o estabelecimento desta TCO constante e mínima, aplicava-se outra batelada de substrato, induzindo um novo aumento da TCO; e
- Em planilhas eletrônicas do Excel eram armazenados automaticamente os dados de OD a cada 6s e os dados da TCO, calculados a cada 4 minutos pelo respirômetro, podendo este tempo ser reduzido caso a referência inferior fosse alcançada antes de completar 4 minutos, ou se o desvio padrão da reta pelos pontos de OD na fase sem aeração fosse menor que o valor pré-estabelecido de 0,1 $mg/L/h$.

A Figura 3.4 mostra um respirograma obtido durante a realização de um teste pelo método semicontínuo de determinação da TCO. A tela principal apresenta dois gráficos. O primeiro (janela superior), mostra o gráfico da concentração de OD, traçado a partir dos dados de OD medidos no período em que há aeração (atingida a concentração superior máxima) e sem aeração (quando atingida a concentração de OD mínima). O segundo gráfico (janela

inferior) apresenta os valores da TCO calculados pelo software do respirômetro *Beluga* para o método semicontínuo.

Figura 3.4 – Respirograma de um teste semicontínuo com adição de acetato de sódio ao licor misto.



3.3.5.2 Procedimento de Determinação da TCO aplicando o Método Contínuo

Para a realização dos testes pelo método contínuo foram utilizados os mesmos equipamentos e o substrato descritos na seção anterior. Porém, sem a necessidade de especificações de valores de referência superior e inferior de OD. A Figura 3.5 mostra um exemplo de um teste realizado pelo método contínuo de determinação da TCO.

A metodologia a seguir descreve a sequência de execução dos ensaios com aeração contínua:

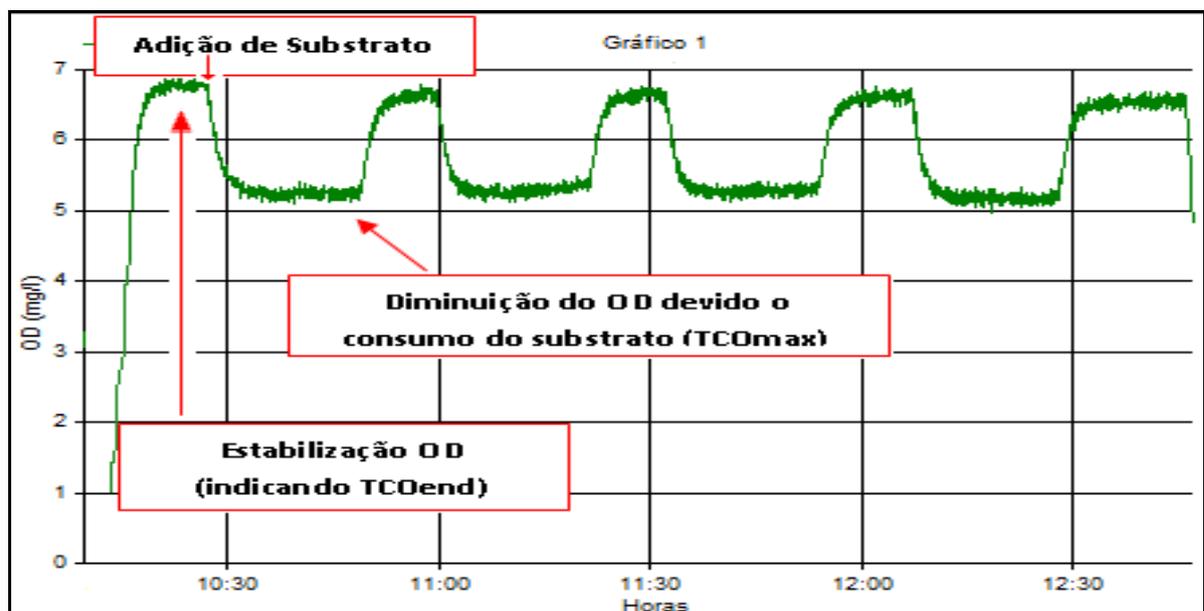
Concluído o teste para obtenção de dados da TCO de forma semicontínua, dava-se sequência ao teste pelo método contínuo, utilizando a mesma amostra de licor misto como se segue:

- O equipamento de aeração era desconectado do respirômetro, já que não havia mais a necessidade do controle do OD máximo e mínimo de forma automatizada, indo,

portanto, de acordo com a capacidade metabólica dos microrganismos, sendo o aerador agora ligado diretamente na fonte de energia;

- Iniciava-se a aeração na amostra de forma contínua até o estabelecimento de um OD máximo e constante;
- Estabelecido este OD máximo, adicionava-se uma concentração do substrato acetato de sódio equivalente a 120 mgDQO/L. Observava-se a queda imediata da concentração de OD devido ao consumo do substrato pelos microrganismos. Após esta adição a concentração de OD se mantinha estável em uma concentração mínima até que o substrato adicionado fosse consumido;
- No fim do metabolismo do material orgânico adicionado a concentração de OD aumentava, estabilizando-se novamente ao seu valor inicial, indicando o fim do consumo do substrato. Aplicava-se então outra batelada de substrato, induzindo um novo ciclo de variação da concentração de OD; e
- Em planilhas eletrônicas do Excel eram armazenados automaticamente os dados de OD a cada 6s; os dados da TCO não eram registrados, sendo necessária a aplicação da equação 3.3 para a obtenção dos mesmos.

Figura 3.5 - Respirograma gerado com a aplicação do método contínuo e com adição brusca do substrato.



3.3.6 Testes Respirométricos com Adição Moderada do Substrato

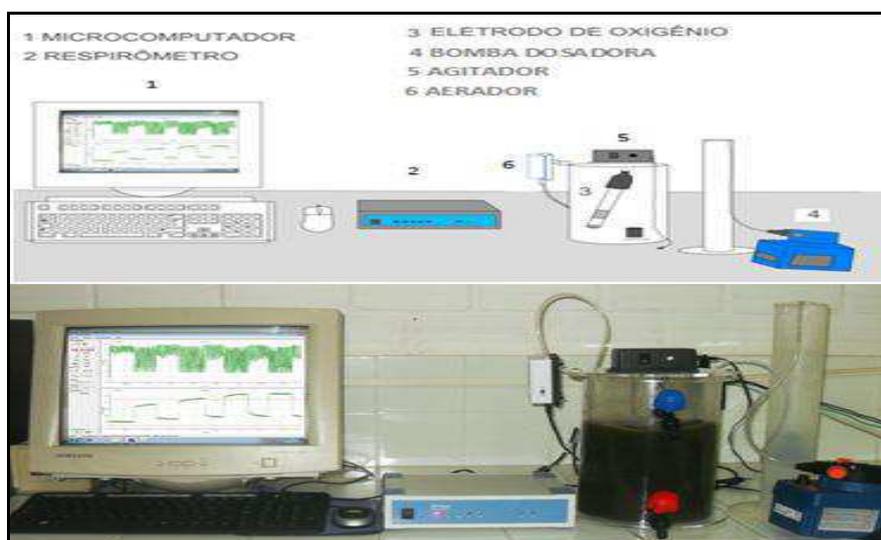
Para a realização dos testes respirométricos nesta etapa, coletava-se um volume de 4 litros de licor misto proveniente do descarte de lodo diário dos reatores. Como o período para a realização dos testes, nesta etapa, era maior (uma hora de alimentação e outra de não alimentação) não foi possível a realização dos testes contínuo e semicontínuo no mesmo dia, sendo os mesmos realizados em dias alternados.

Foi estabelecido que, em um pequeno reator e com águas residuárias que não mudem consideravelmente na composição os dois métodos produzem resultados praticamente idênticos, de modo que ambos podem ser comparados, mesmo que os testes sejam feitos em dias alternados.

3.3.6.1 Procedimento de Determinação da TCO Aplicando o Método Semicontínuo

Para a alimentação do substrato nesta etapa foi utilizada uma bomba dosadora da série PKX com vazão mínima de 0,45 L/h e máxima 8 L/h (valores referentes aos testes de vazões feitos no laboratório); esta adicionava ao reator com o licor misto pequenas quantidades do substrato acetato de sódio pelo período estabelecido (uma hora). A Figura 3.6 mostra o esquema dos equipamentos utilizados nestes testes (imagem superior) e uma fotografia da execução do experimento (imagem inferior).

Figura 3.6 – Esquema de realização do teste respirométrico e fotografia da execução de um teste semicontínuo com adição moderada de substrato.



Fonte: Elaboração da autora.

Seguindo a metodologia descrita nos itens 1 e 2 da Seção 3.3.5.1 o procedimento utilizado foi:

- Após estabelecer a fase de respiração endógena, que levava em média uma hora, uma bomba dosadora introduzia no reator pequenas vazões do substrato acetato de sódio com concentração conhecida, gradualmente durante o período de uma hora;
- Imediatamente após a adição do substrato observava-se o aumento da taxa de consumo de oxigênio ($TCO_{máx}$) e a diminuição da concentração de OD devido à respiração exógena. Com a adição do substrato a TCO aumentava para um valor constante indicando uma taxa constante e máxima de utilização do substrato;
- Após a utilização do substrato, por aproximadamente uma hora, a bomba dosadora era desconectada do reator. Aguardava-se o decaimento da TCO para um valor correspondente à respiração endógena. Após o estabelecimento desta TCO constante e mínima (que durava aproximadamente uma hora) aplicava-se outra batelada de substrato, induzindo um novo aumento da TCO. Assim alternavam-se ciclos de alimentação e não alimentação; e
- Em planilhas eletrônicas do Excel eram armazenados automaticamente os dados de OD a cada 6s e os dados da TCO calculados a cada 4 minutos pelo respirômetro, podendo este tempo ser reduzido caso a referência inferior fosse alcançada antes de completar 4 minutos.

3.3.6.2 Procedimento de Determinação da TCO Aplicando o Método Contínuo

Esse experimento seguiu o mesmo princípio de realização do teste descrito na seção 3.3.5.2, porém com os equipamentos e o intervalo de tempo de alimentação, descritos na Seção anterior (3.3.6.1).

3.3.7 Testes Respirométricos Para a Determinação dos Fatores que Influenciam o K_{la}

Como já mencionado a determinação da TCO de forma contínua necessita da utilização do K_{la} que pode nem sempre se manter constante em sistemas de lodo ativado. Sabe-se que K_{la} pode ser influenciado por uma série de fatores, entre os quais se destacam os ambientais e aqueles inerentes à composição do esgoto afluente ao sistema de tratamento.

Com base na importância da avaliação destes fatores foram aplicados testes específicos que permitiram avaliar os efeitos da concentração de lodo, dos surfactantes e da temperatura sobre K_{la} .

Todos os testes respirométricos, descritos a seguir, foram determinados aplicando-se o método semicontínuo, uma vez que a aplicação da equação 3.2 para determinação de K_{la} e OD_s necessita da utilização de valores da TCO. Em caso de aplicação do método contínuo em escala real pode-se submeter amostras de lodo a ensaios laboratoriais pelo método semicontínuo, para uma caracterização do perfil do K_{la} para o sistema, e assim adotar o valor para as condições prevaletentes para aquela água residuária, estipulando períodos trimestrais, semestrais ou anuais (vai depender das características do afluente) para nova avaliação do perfil de K_{la} .

3.3.7.1 Concentração de Lodo

Na Seção 3.3.2 foi descrita a metodologia aplicada para a determinação do K_{la} e de OD_s . Com base nestes procedimentos foi executada uma série de testes respirométricos que permitiram avaliar a influência da concentração de lodo sobre K_{la} , e, conseqüentemente, avaliar seus impactos sobre a capacidade de oxigenação (CO).

O lodo utilizado para estes testes era proveniente do mesmo reator aeróbio (RBS) onde era coletado para os demais testes respirométricos. Inicialmente coletava-se 4L de licor misto proveniente do lodo de descarte do RBS e colocava-se para sedimentar em cones de Imhoff durante 45 minutos (como determina APHA, 2005). Passados os 45 minutos, o sobrenadante era descartado e transferia-se para o béquer um litro de lodo concentrado para a realização dos testes. As concentrações de OD de referência máxima e mínima estabelecidas para este teste foram 8 e 1 mgO_2/L , respectivamente.

A metodologia a seguir descreve o procedimento de execução dos ensaios respirométricos:

- Ligava-se o respirômetro e esperava-se 15 minutos, para então calibrar o eletrodo de oxigênio com o valor de saturação de acordo com a temperatura e a altitude local;
- O lodo concentrado era submetido à agitação em seguida, o eletrodo de OD, conectado ao respirômetro, era introduzido no lodo dando início aos ciclos de períodos com e sem aeração;

- Estabelecida a respiração endógena a referência superior de OD era elevada para 8 mg/L, mesmo sabendo que este valor não seria atingido. Nestas condições a aeração demorava um período máximo permitido pelo software do respirômetro, estabelecido em 5 minutos;
- Repetiam-se os ciclos de aeração e não aeração com a mesma concentração de lodo para que fossem armazenados 3 valores da TCO e de OD, antes da diluição da amostra. Os valores da TCO e de OD eram armazenados no computador em planilhas do Excel, que o software criava automaticamente;
- Em seguida, o teste era repetido para uma concentração de lodo menor. Alíquotas de 250 ml (25% da amostra) eram retiradas da amostra inicial e substituídas por efluente do sistema gerador, diminuindo assim a concentração de lodo;
- Parte das alíquotas de 250 ml retiradas durante o teste era usada para determinar a concentração de sólidos totais presentes no respectivo momento do teste;
- Os ciclos de aeração e não aeração eram repetidos para as diferentes concentrações de lodo. A cada redução da concentração, novos valores de K_{1a} e OD_s eram determinados, e correlacionados à sua respectiva concentração de sólidos totais;
- Com os dados armazenados eram simuladas curvas teóricas de OD_t em função do tempo para diferentes valores de K_{1a} e OD_s com o auxílio da equação 3.2, na qual se sabia o valor de OD_0 pelo valor armazenado na planilha para $t = 0$; e
- Os valores que davam a melhor correlação entre a curva teórica e os valores experimentais de OD_t em função do tempo, eram adotados para os cálculos posteriores.

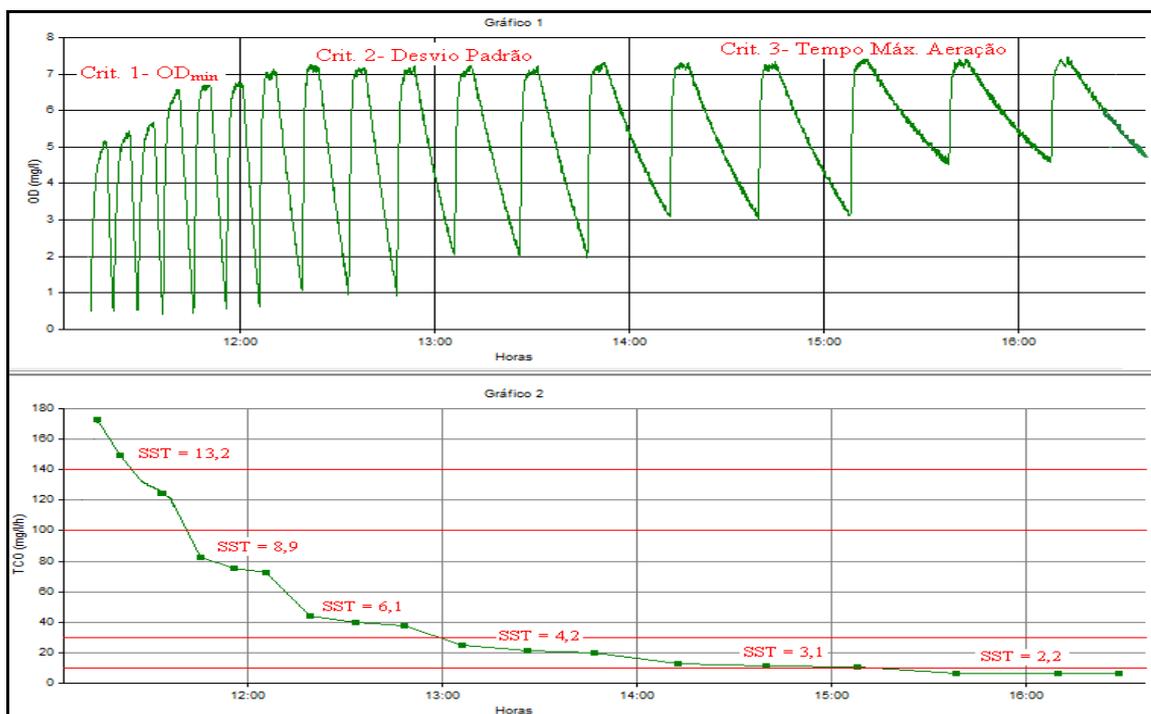
A Figura 3.7 mostra o exemplo de um respirograma obtido em um teste como descrito anteriormente. O respirograma apresenta dois gráficos. No gráfico superior vê-se a concentração do OD em função do tempo. Traçado a partir dos dados do OD obtidos durante os períodos com aeração (quando atingia concentração máxima de OD) e sem aeração, quando a concentração do OD era reduzida. No gráfico inferior, observa-se a TCO em função do tempo, expressa em $mg/L^{-1}/h^{-1}$, calculada pelo software.

Os momentos da interrupção e do recomeço da aeração na Figura 3.7 foram determinados por três critérios independentes controlados pelo software: (1) a aeração era interrompida, quando a concentração de OD chegava ao valor de referência máxima ou (2) quando o tempo de aeração excedia um determinado valor que se podia especificar no

software. Como nos testes a concentração de referência de OD tinha o valor inatingível de 8 mgO₂/L, a interrupção era determinada pelo valor de duração máxima da aeração, especificado em 5 minutos. Esta providência era tomada porque assim se criava uma curva grande de OD_l em função do tempo, o que permitia a determinação com precisão de K_{la} e OD_s. Quanto ao recomeço da aeração, iniciava-se quando: (1) o valor de OD chegava ao valor da referência mínima; (2) o desvio padrão da melhor reta através dos pontos de medição de OD é menor que um valor de referência, que se insere na tela do software (neste caso estabelecido em 0,01 mg/L/h); ou (3) o tempo sem aeração excedia o tempo máximo de referência estabelecido em 10 minutos.

No respirograma mostrado na Figura 3.7 para cada concentração de lodo foram obtidos três valores de TCO registrados pelo software e, posteriormente, a obtenção de três dados para K_{la} e OD_s. Pode-se observar no gráfico de OD em função do tempo que nas primeiras 6 repetições do teste o critério 1 determinava o critério de reaeração (OD_l, OD_{inf}). Nas próximas 6 repetições o critério 2 (desvio padrão < 0,01 mg/L/h) determinava o fim do período sem aeração e nos últimos 6 valia o critério que o período sem aeração não fosse mais que 10 minutos.

Figura 3.7 - Respirograma gerado pelo software do respirômetro com concentração de OD e TCO em função do tempo para diferentes concentrações de lodo.



3.3.7.2 Surfactantes

A constante de transferência de oxigênio (K_{la}) é uma variável imprescindível quando se pretende obter a TCO pelo método contínuo. A presença de impurezas na água residuária, sejam elas dissolvidas ou não, (notadamente de surfactantes como sabões, que são um dos mais fortes agentes tensoativos) dificulta a transferência do oxigênio e diminui o valor da constante de transferência (VAN HAANDEL e VAN DER LUBBE, 2012).

Os testes descritos nesta seção tiveram como objetivo verificar até que ponto o K_{la} mantém-se constante no sistema de aeração devido às diversas mudanças na composição do afluente. Foi utilizado um sabão líquido, composto que se apresenta com frequência em esgotos domésticos e sua adição ao longo dos testes se deu em baixas concentrações para não inibir a atividade bacteriana ou causar interferência na medição do OD, devido à formação de bolhas. A observação da possível variação nos valores da TCO foi possível porque no início dos testes, normalmente nas três primeiras bateladas, era adicionado à amostra apenas o substrato acetato de sódio (utilizado como grupo controle); nas demais repetições do teste adicionava-se tanto o acetato quanto a solução surfactante, para que sua influência fosse avaliada. Os valores de referência máximo e mínimo da concentração de oxigênio dissolvido especificados no software para estes testes foram de 3,0 e 1,0 mgO₂/L, respectivamente.

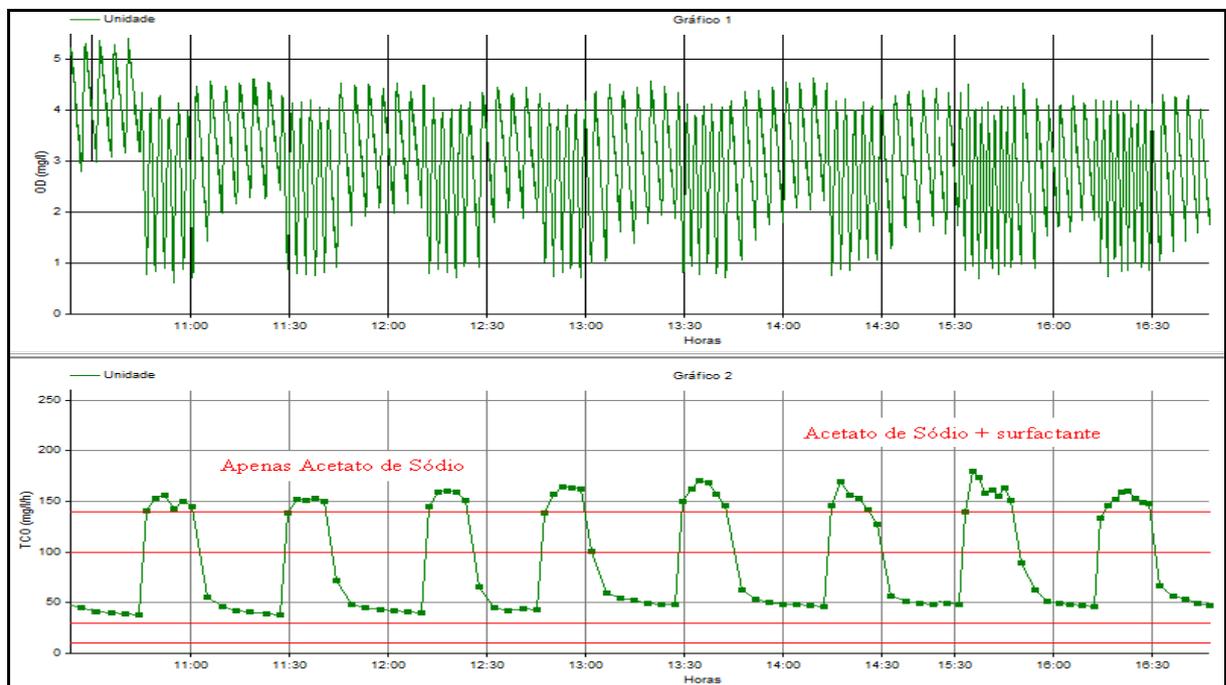
Seguindo a metodologia descrita nos itens 1 e 2 da Seção 3.3.5.1, o procedimento utilizado nos testes respirométricos foi:

- Quando estabelecida a respiração endógena adicionava-se 120 mgDQO/L do substrato acetato de sódio. Após a adição do substrato a TCO aumentava para um valor constante indicando uma taxa constante e máxima de utilização do substrato;
- Depois da utilização do substrato a TCO decaía para um valor correspondente à respiração endógena. Após o estabelecimento desta TCO constante e mínima, aplicava-se outra batelada de substrato, induzindo um novo aumento da TCO;
- Após o restabelecimento da TCO endógena adicionava-se novamente 120 mgDQO/L e 0,01 mg/L de uma solução surfactante, resultando em concentrações acumulativas tanto do substrato como da solução surfactante, sendo que o substrato era consumido e a solução não;

- Concluídos os testes eram calculados os valores de K_{la} usando a equação 3.2 como descrita na Seção 3.3.1, para o período em que era adicionado apenas o substrato e para os períodos onde eram utilizados substrato e solução surfactante; e
- Os valores de K_{la} foram então comparados para verificar se, de fato, a presença deste composto causa alguma interferência no K_{la} .

O teste descrito acima também foi realizado para concentrações de 0,02 e 0,03 mg/L da solução surfactante (sabão). A Figura 3.8 mostra um exemplo de um respirograma semicontínuo, onde foram aplicadas bateladas com acetato de sódio e outras com acetato mais solução surfactante (concentração 0,01 mg/L). Exemplos de respirogramas dos testes com as demais concentrações estão disponíveis nos anexos.

Figura 3.8 - Respirograma obtido aplicando o método semicontínuo com adição de acetato de sódio concentração 120 mgDQO/L e solução surfactante com concentração de 0,01mg/L.



3.3.7.3 Temperatura

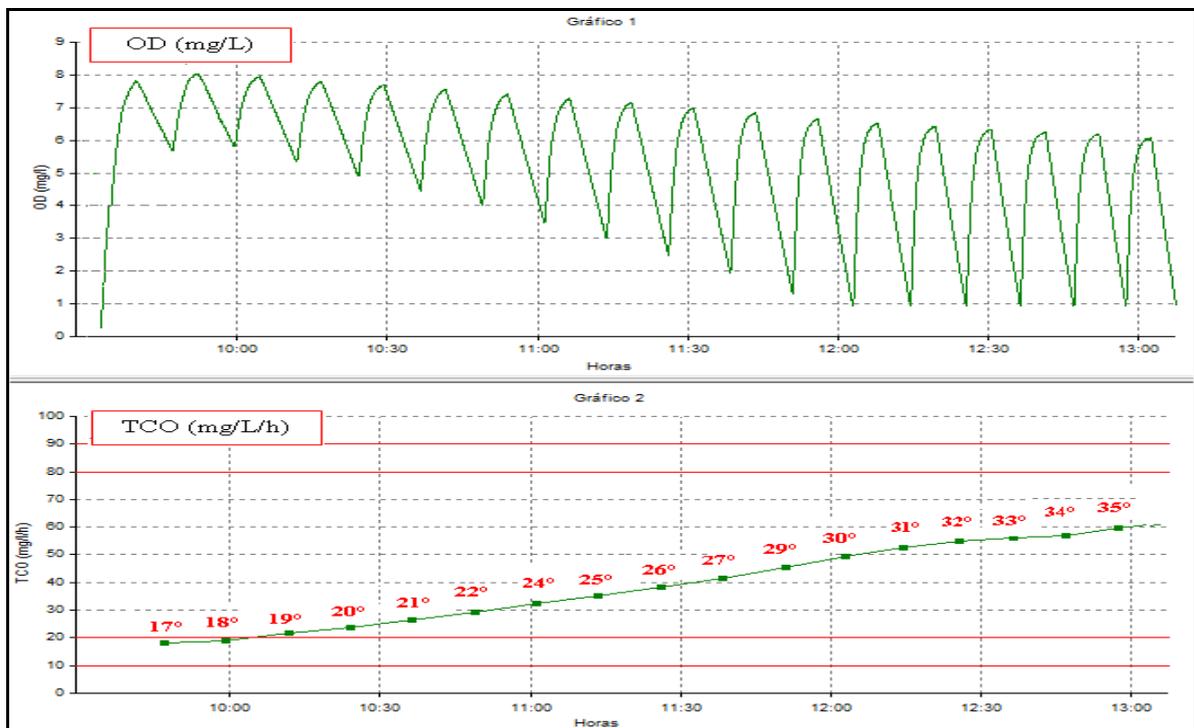
Para a realização dos testes respirométricos para verificar a influência da temperatura os valores de referência da concentração de oxigênio dissolvido máximo e mínimo ($OD_{máx}$ - $OD_{mín}$) foram de 8,5 e 1,0 mgO₂/L, respectivamente. Partia-se de 17°C e a temperatura era elevada até atingir 35°C, sendo o controle feito via termocontrolador. Para cada temperatura

foram determinados, através da respirometria, os valores da TCO total, sendo assim possível a determinação de K_{la} . A Figura 3.9 mostra um respirograma gerado durante a execução de um teste com diferentes temperaturas.

O procedimento utilizado durante os ensaios respirométricos pode ser descrito como se segue:

- Uma amostra de um litro de licor misto era transferida para um béquer e colocada dentro da geladeira até o estabelecimento da temperatura desejada (17°C);
- Com a temperatura do licor misto em 17°C, esse era então submetido à agitação e aeração controladas pelo respirômetro;
- Progressivamente se elevava a temperatura até que atingisse os 35 °C. Foi registrado pelo software do respirômetro o valor de TCO até que se atingisse a temperatura máxima de 35°C;
- Os valores da TCO, do OD e da temperatura foram armazenados em planilhas do Excel durante todo o teste; e
- Os valores de TCO obtidos em cada temperatura do teste foram utilizados para calcular os valores de K_{la} usando a equação 3.2.

Figura 3.9 - Respirograma de um teste semicontínuo com variação da faixa de temperatura em função do tempo.



APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados e analisados os dados obtidos durante a fase experimental. Serão discutidos os resultados de determinação da TCO pelos métodos semicontínuo e contínuo, sob dois aspectos: (I) com adição do substrato em regime de bateladas; e (II) com adição moderada do substrato intercalando períodos de alimentação e não alimentação. Também serão avaliados os fatores que interferem na constante de transferência de oxigênio: concentração do lodo, surfactantes e temperatura.

Os dados obtidos durante a execução dos testes respirométricos foram submetidos à análise estatística descritiva com a média como parâmetro da tendência central, sendo os parâmetros de dispersão os valores máximos e mínimos, o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV). Para efeito de comparação entre os dados obtidos por ambos os métodos (contínuo e semicontínuo) e com o intuito de avaliar o grau de significância estatística entre os mesmos foi aplicada a análises de variância (ANOVA) de fator único.

4.2 Seleção do Intervalo de Tempo para a Determinação da TCO Contínua

A definição do intervalo de tempo de utilização dos dados de OD é de extrema relevância para a obtenção de dados precisos e confiáveis quando se utiliza o método contínuo. Portanto foram realizados para todos os testes contínuos cálculos da TCO para diferentes intervalos de tempo, com o intuito de conhecer em que intervalo de tempo os dados da TCO se mantêm mais estáveis.

Deve-se notar que, a rigor, a expressão “determinação contínua da TCO” pode não ser mais considerada válida, o intervalo de tempo entre duas leituras sucessivas da concentração de OD é que irá definir a frequência dos cálculos da TCO e quanto “contínuo” é sua determinação.

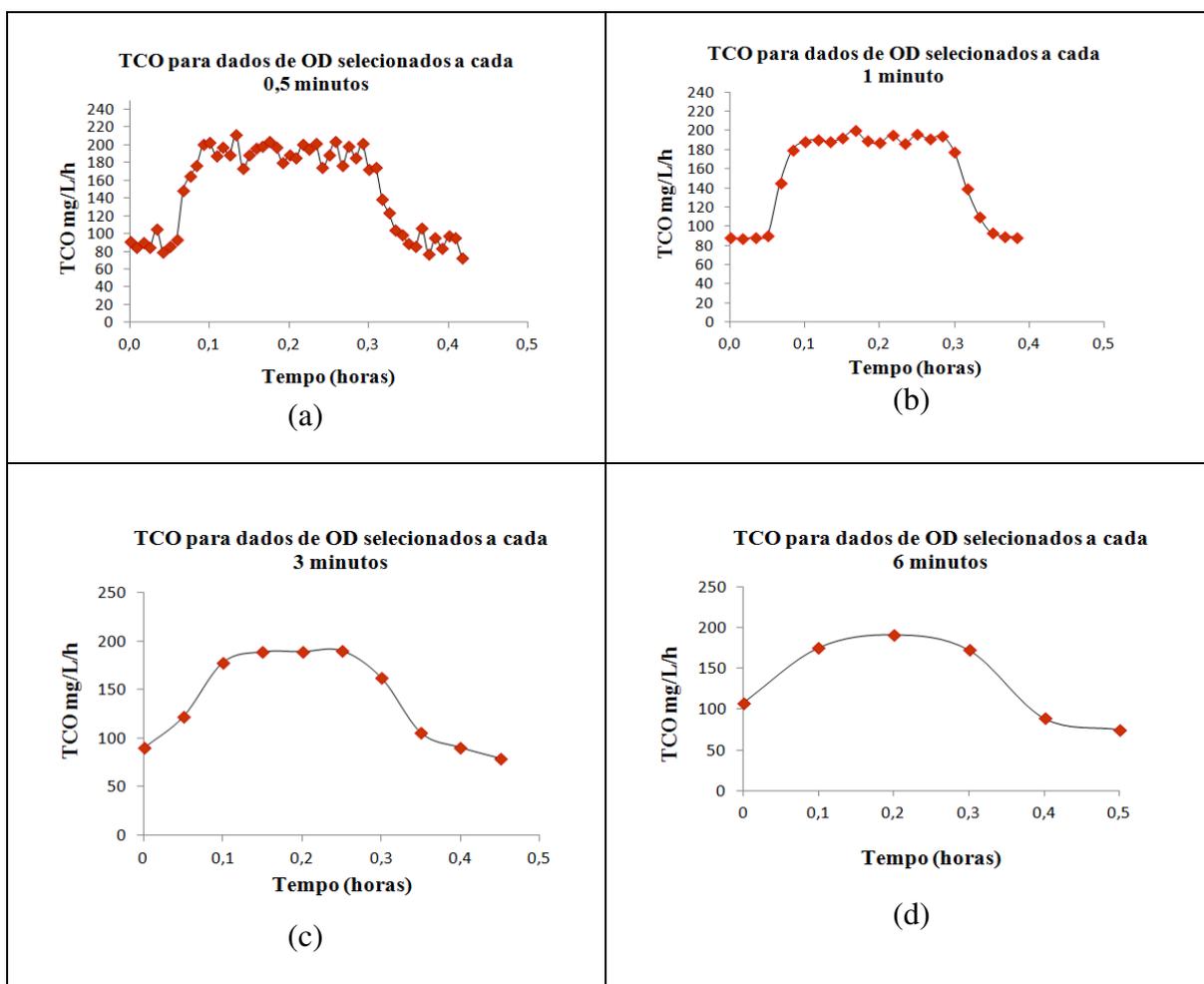
Para a determinação da TCO contínua foi aplicada a equação 3.3 descrita no Capítulo 3, Seção 3.3.1.2. Na aplicação desta equação é necessário dispor além dos valores de K_{la} e OD_s , de um intervalo de tempo (Δt) para seleção dos dados de OD, isto é, deve-se determinar

quanto é a variação do valor de OD durante um período Δt . Neste contexto é importante saber que a leitura eletrônica de um medidor de oxigênio não dá um valor constante, mesmo quando a concentração de OD não muda com o tempo.

Para identificar o intervalo de tempo ideal foram adotados e testados, para todos os ensaios realizados pelo método contínuo, quatro intervalos de tempo, Δt : 0,5; 1; 3 e 6 minutos. Na Figura 4.1 são apresentados gráficos resultantes de um teste respirométrico contínuo, onde os valores de OD foram selecionados de acordo com o tempo adotado; para cada intervalo de tempo os valores de TCO máxima foram calculados.

Analisando a Figura 4.1 (a) observa-se que com 0,5 minutos há muitos pontos da TCO, mas o intervalo de tempo curto resulta numa variação pequena da concentração de OD entre o início e o fim do tempo de 0,5 minutos. O erro na determinação da concentração de OD ocasiona uma imprecisão no quociente $\Delta OD_1/\Delta t$ e, portanto, nos valores da TCO calculados. Na Figura 4.1(b) observam-se os valores calculados da TCO para um intervalo de tempo de 1 minuto. A variação de OD_1 é maior e o erro em ΔOD_1 menor, resultando numa diminuição no erro do quociente $\Delta OD_1/\Delta t$ e na instabilidade do valor calculado da TCO. Quando se usa intervalos de tempo (Δt) maiores que 1 minuto, não há mais instabilidade no valor da TCO, mas como há menos pontos de TCO calculados por unidade de tempo, a curva fica mais suave, embora ainda represente com precisão o valor real da TCO, notadamente nos momentos de rápido aumento ou diminuição da mesma. Assim, para as condições escolhidas, o melhor intervalo para construir a curva da TCO em função do tempo é $\Delta t = 1$ minuto; este é mais adequado que o intervalo de 0,5 minutos. As Figuras 4.1(c) e 4.1 (d) mostram o valor da TCO em função do tempo para intervalos de tempo de 3 e 6 minutos, respectivamente. Observa-se que a curva da TCO perde os contornos que têm com um intervalo de 1 minuto (Figura 4.1b) e se conclui que com estes intervalos grandes a curva da TCO calculada não representa mais a curva verdadeira com a mesma exatidão que na Figura 4.1(b). Conclui-se que, para as condições vigentes no teste, o intervalo de 1 minuto é ótimo porque com este não se observa mais instabilidade nos valores calculados e a curva obtida representa com precisão a curva verdadeira (obtida pelo método semicontínuo) que se desenvolveu após a adição do substrato.

Figura 4.1 – Gráficos da TCO máxima contínua com variação dos intervalos de tempo, Δt : 0,5; 1; 3 e 6 minutos.



Na Tabela 4.1 são apresentados os valores de TCO máxima calculados para os diferentes intervalos de tempo (0,5; 1; 3 e 6 minutos), correspondentes aos dados da Figura 4.1. Para cada intervalo de tempo é apresentado o número de pontos de TCO obtidos a cada vez que se adicionava o substrato (bateladas), os valores médios, máximos, mínimos, o DP e o CV. Os valores médios da $TCO_{m\acute{a}x}$ para os tempos de 0,5; 1; 3 e 6 minutos foram: 182,5 mg/L; 170,1 mg/L; 171,86 mg/L; e 179,5 mg/L respectivamente. Os valores mínimos obtidos variaram entre 104 mg/L para o intervalo de 1 minuto e 172,3 mg/L para o intervalo de tempo de 6 minutos, enquanto que os valores máximos se mantiveram entre 190,2 mg/L e 211,1 mg/L.

Analisando os dados apresentados na Tabela 4.1 reafirma-se como sendo o melhor intervalo de tempo para as condições em que foram desenvolvidos os testes $\Delta t = 1$ minuto, pois nele os valores obtidos são mais precisos. O coeficiente de variação se apresentou

inferior a 7%. Embora o tempo de 6 minutos apresente resultados aparentemente bons, inclusive com DP e CV menores que os obtidos para o tempo de 1 minuto, eles são desconsiderados devido ao baixo número de pontos de TCO obtidos, uma vez que se busca a frequência máxima de determinação de pontos da TCO, para se aproximar ao máximo de uma determinação contínua o que não pode ser alcançado com o tempo de 3 e 6 minutos, nestas circunstâncias há uma imprecisão nos valores da TCO e uma possibilidade de não detecção de variações abruptas.

Tabela 4.1 – Dados da TCO máxima de um teste contínuo para os intervalos $\Delta OD_i/\Delta t$: 0,5; 1 ; 3; e 6 minutos.

Tempo (minutos)	0,5	1	3	6
Nº de Pontos	56	24	10	6
Média	182,5	170,1	171,86	179,5
Máximo	211,1	200,0	190,2	191,2
Mínimo	104,0	139,4	122,2	172,3
DP	24	13	24,2	10,2
CV (%)	13	7	14	5

Conclui-se que para as condições em que foram realizados os testes o tempo de 1 minuto é considerado ideal pela precisão nos resultados, possibilitando a detecção de possíveis alterações bruscas da TCO pela sua elevada frequência de obtenção da TCO. Os dados de TCO mostrados neste trabalho para o método contínuo serão sempre referentes ao intervalo de tempo de 1 minuto nas diferentes etapas em que foram executados os testes.

4.3 Comparação da TCO para os Testes com Adição Brusca do Substrato

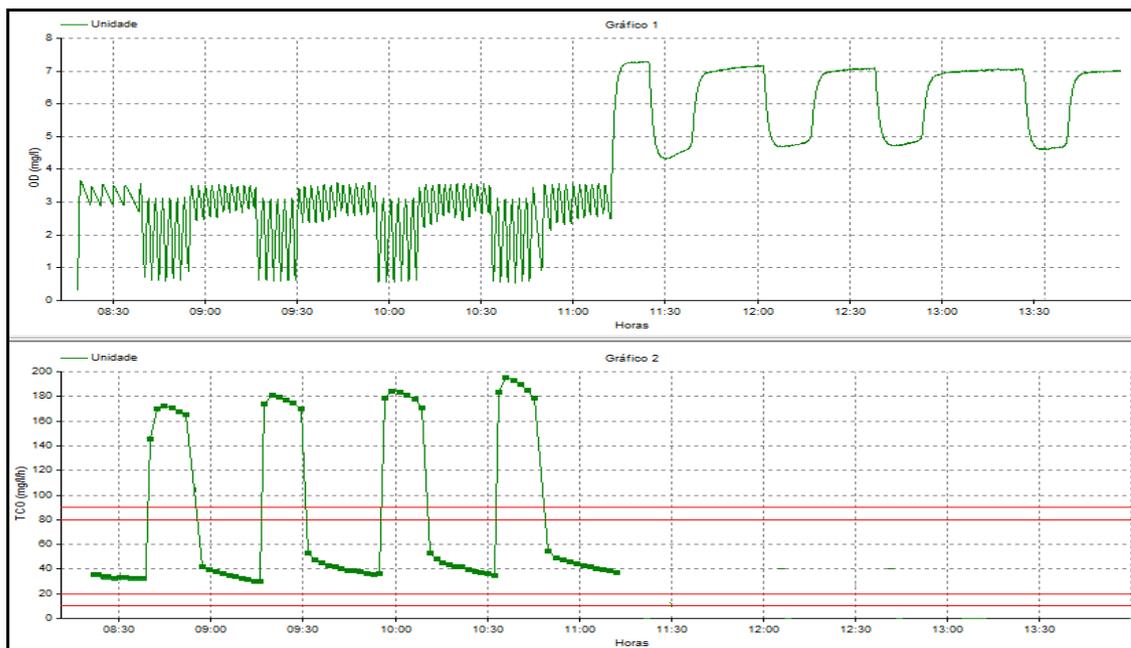
Para estabelecer o limite da aplicabilidade dos métodos contínuo e semicontínuo de determinação da TCO, foi realizada uma série de testes respirométricos, a fim de se obter dados de TCO por ambos os métodos e compará-los posteriormente. Cabe ressaltar que, em princípio, a referência comparativa é o método semicontínuo, uma vez que este método é bastante estabelecido e utilizado em diversos estudos desenvolvidos para os sistemas de lodo ativado.

Nesta seção será apresentado um ensaio de determinação da TCO tendo sido aplicados os métodos semicontínuo e contínuo. Este respirograma será utilizado como exemplo, para a

discussão e comparação dos dados obtidos por ambos os métodos. Os demais dados serão apresentados em tabelas com seus respectivos respirogramas são apresentados no apêndice.

A Figura 4.2 mostra um respirograma típico obtido na determinação da TCO quando se adiciona o substrato em regime de bateladas, aplicando-se o método semicontínuo (à esquerda) e contínuo (à direita). Na parte superior (gráfico 1) observam-se vários perfis dos ciclos de aeração em função do tempo. Nota-se que, à esquerda da imagem, a variação de OD segue os limites pré-estabelecidos em 1 e 3 mgO₂/L, enquanto que, à direita, a aeração mantém-se constante. Na parte inferior (gráfico 2) observam-se os valores da TCO registrados pelo software apenas do lado esquerdo da imagem referente à determinação pelo método semicontínuo, uma vez que a obtenção dos mesmos pelo método contínuo se faz por meio da utilização das equações apresentadas no Capítulo 3. Neste respirograma apresenta-se um experimento contendo 4 ciclos de determinações da TCO semicontínua e 4 contínuas, realizados com a mesma amostra de lodo.

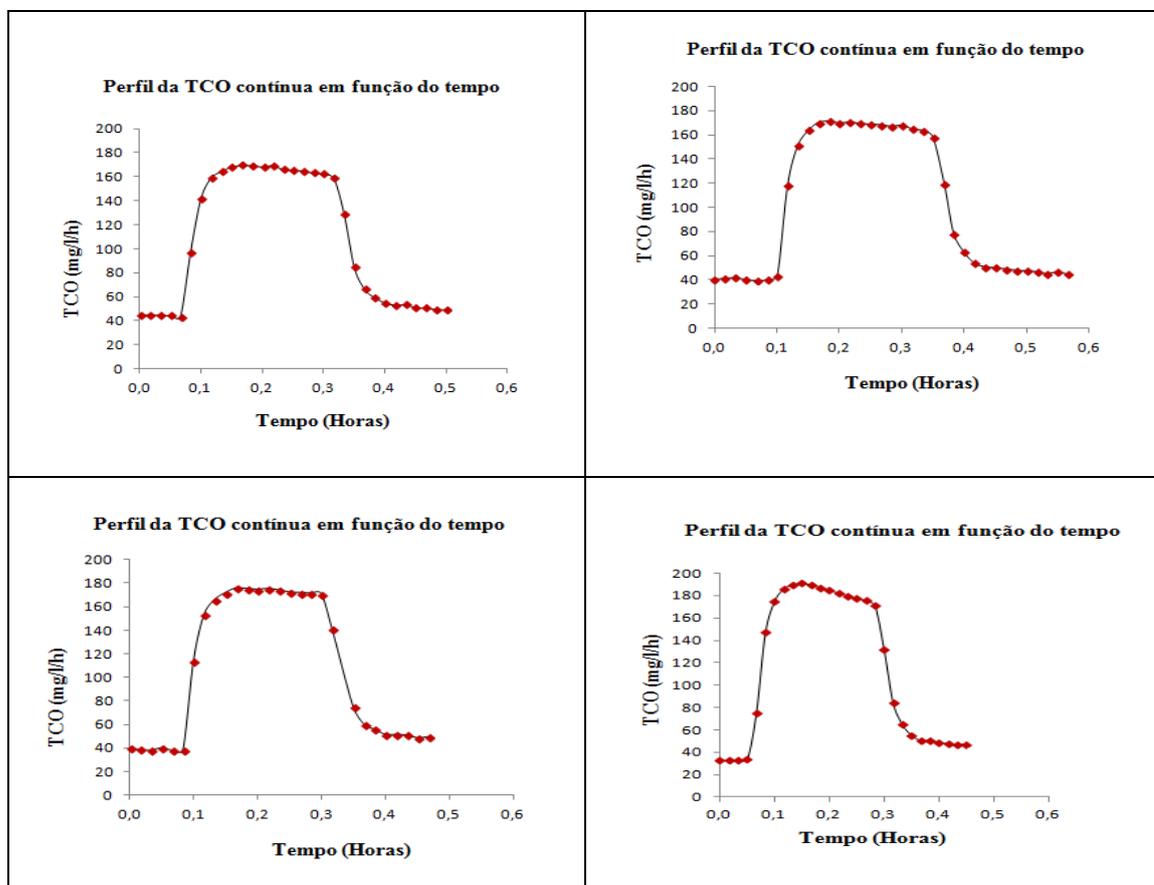
Figura 4.2 – Respirograma de um teste de determinação semicontínua e contínua da TCO aplicando o substrato em regime de bateladas.



Na Figura 4.3 são apresentados os gráficos da TCO em função do tempo. A TCO foi calculada com a equação 3.3 (método contínuo). Para a obtenção dos valores teóricos da TCO foram utilizadas as seguintes variáveis: K_{la} de $0,89 \text{ min}^{-1}$, OD_s de $7,9 \text{ mg/L}$, e intervalo de tempo $\Delta OD_l/\Delta t$ de 1 minuto. Os valores de K_{la} e OD_s foram obtidos conforme descrito no

Capítulo 3, Seção 3.3.2. Os valores médios da TCO para cada um destes gráficos são apresentados na Tabela 4.3.

Figura 4.3 – Gráficos da TCO contínua calculados com base na teoria.



Comparando com os dados da TCO registrados pelo software do respirômetro para o método semicontínuo (respirograma da Figura 4.2) com os dados calculados com base na teoria, apresentados na Figura 4.3, observa-se que o perfil da TCO nas duas situações é o mesmo, no entanto a frequência de marcação dos pontos pelo método contínuo é superior (1 ponto por minuto). Para o metabolismo de 120 mgDQO/L (acetato de sódio) que, neste teste, levou em média 15 minutos (considerando a TCO máxima), tem-se 15 pontos marcados para o método contínuo enquanto no semicontínuo tem-se apenas 6. A maior frequência de marcação de dados da TCO pelo método contínuo aumenta a possibilidade de detecção de variações repentinas por este método.

Nas Tabelas 4.2 e 4.3 podem-se observar os valores médios, máximos e mínimos obtidos nas determinações da TCO semicontínua e contínua, respectivamente. Para fins de comparação todos os testes realizados para as etapas I e II foram avaliadas desta forma, ou seja, observando sempre o comportamento dos valores da TCO exógena máxima. Os dados

apresentados nas tabelas encontram-se distribuídos em quatro séries referentes a bateladas (cada adição do substrato), sendo mostrado, para cada um, o número de dados de TCO registrado pelo software (semicontínuo) e calculados (contínuo) com seus respectivos dados estatísticos.

Na Tabela 4.2 as concentrações médias da TCO variaram entre 165 mg/L e 187 mg/L, tendo os valores mínimos variado entre 145,1 mg/L e 178,9 mg/L e máximos entre 172,4 mg/L e 195,2 mg/L. O CV para estes dados apresentou-se inferior a 6%.

Tabela 4.2 – TCO máxima obtida pelo método semicontínuo com adição brusca do substrato.

Nº de Pontos	Média TCO _{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	DP	CV (%)
6	165	172,4	145,1	10,0	6,0
6	176	180,9	169,7	4,1	2,3
6	179	184,4	170,8	4,8	2,6
6	187	195,2	178,9	6,1	3,2

Na Tabela 4.3 as concentrações médias da TCO variaram entre 160 mg/L e 176,3 mg/L, tendo os valores mínimos variando entre 113,5 mg/L e 131,8 mg/L e máximos entre 169,5 mg/L e 190,8 mg/L. Os dados mostram que não houve grandes variações entre as médias e o CV foi inferior a 8,5%.

Tabela 4.3 - TCO máxima obtida pelo método contínuo com adição brusca do substrato.

Nº de Pontos	Média TCO _{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	DP	CV (%)
15	160	171,1	118,3	13,2	8,2
15	161	169,5	129,1	11,3	7
14	164,8	175,7	113,5	10,2	6,1
15	176,3	190,8	131,8	16,8	9

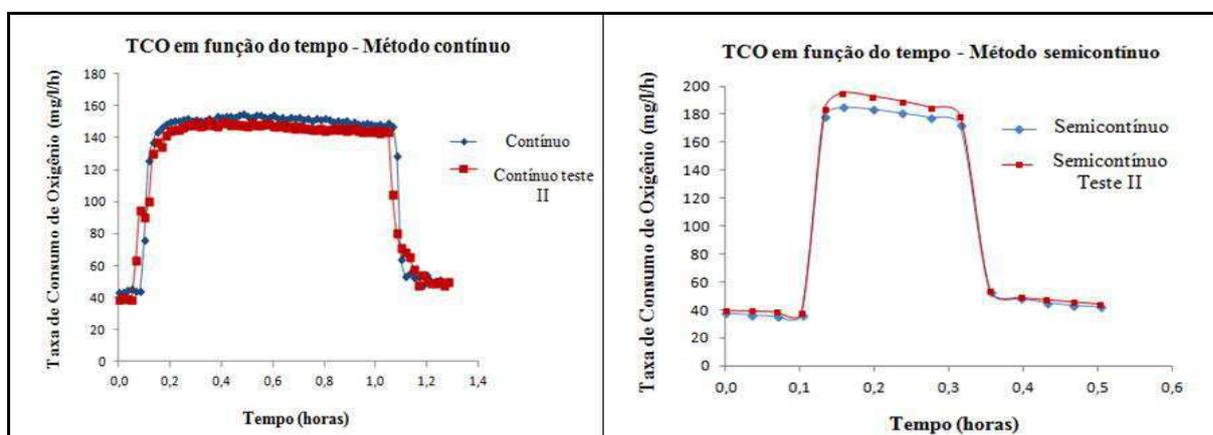
Em termos percentuais a variação entre as médias dos dados da TCO obtida por ambos os métodos foi inferior a 10% que é considerada uma baixa variação, uma vez que depende do trabalho de microrganismos, ou seja, a massa de lodo ativo passa por contínuas modificações, há sempre a possibilidade de haver crescimento ou decaimento da massa de lodo, o que pode

causar pequenas e aceitáveis flutuações nos dados da TCO. O próprio equipamento utilizado e a operação deste podem proporcionar fontes de pequenas variações entre os resultados. Observando os valores médios obtidos em cada método e levando em consideração as possíveis fontes inevitáveis de erros inerentes à própria massa microbiana e os erros operacionais, considera-se verdadeira a concepção de que tanto o método contínuo quanto o semicontínuo nos fornecem dados de TCO que podem ser comparados e tidos como equivalentes. Esta afirmação se justifica ao se analisar a Figura 4.4.

A Figura 4.4 (a) apresenta a comparação entre duas séries de dados de TCO obtidas pelo método contínuo, realizado com a mesma amostra de licor misto no mesmo dia, porém de bateladas (repetições) distintas. A Figura 4.4 (b) também apresenta uma comparação, porém feita entre os dados de TCO obtidos pelo método semicontínuo. Percebe-se que dentro de um conjunto de dados obtidos para o mesmo método os perfis da TCO se reproduzem com muita semelhança, mas não chegam a ser iguais, pelos motivos citados anteriormente. Com base nesta premissa é que se sustenta a hipótese de que é válido admitir a variação encontrada nos dados da TCO para os métodos quando comparados separadamente.

Conforme observado nos gráficos expostos na Figura 4.4 tem-se a nítida impressão que os resultados dos métodos analisados dificilmente chegarão a dar valores exatos. No entanto, busca-se avaliar por meio destes experimentos a acurácia e a precisão dos métodos, isto é, até que ponto o perfil da TCO se assemelha quando comparado um método ao outro.

Figura 4.4 – Comparação entre os dados de TCO determinados pelo método contínuo (à esquerda) e semicontínuo (à direita) com adição brusca do substrato.



Cabe destacar que embora se tenha observado uma variação entre as médias, essa variação não apresentou, em nenhum momento, condições que pudessem interferir negativamente no comportamento do perfil do consumo oxigênio; o metabolismo esteve

sempre compatível para o substrato que foi adicionado, nos testes realizados pelos dois métodos. Conclui-se que os métodos analisados apresentam boas características quanto à precisão e acurácia da TCO para situações onde o sistema recebeu repentinas e elevadas variações da carga orgânica aplicada.

4.4 Comparação da TCO para os Testes com Adição Moderada do Substrato

A Figura 4.5 mostra um respirograma obtido na determinação da TCO quando se adiciona o substrato moderadamente, alternando períodos de 1 hora para alimentação e 1 hora para não alimentação, aplicando-se o método semicontínuo. Na parte superior (gráfico 1) observam-se vários perfis dos ciclos de aeração do respirômetro, sendo apresentadas as concentrações de OD em função do tempo. Na parte inferior (gráfico 2) observa-se a TCO, também em função do tempo. O respirograma da Figura 4.5 apresenta um experimento contendo 4 ciclos de alimentação e 4 de não alimentação. O respirograma apresentado na Figura 4.6, foi realizado para as mesmas condições de alimentação do substrato descrito para o respirograma da Figura 4.5. Contudo neste aplica-se o método contínuo; portanto é apresentada apenas a variação de OD em função do tempo. Estes dois experimentos foram realizados em dias alternados.

Figura 4.5 - Respirograma obtido durante um teste de determinação semicontínua da TCO com períodos intercalados para alimentação e não alimentação.

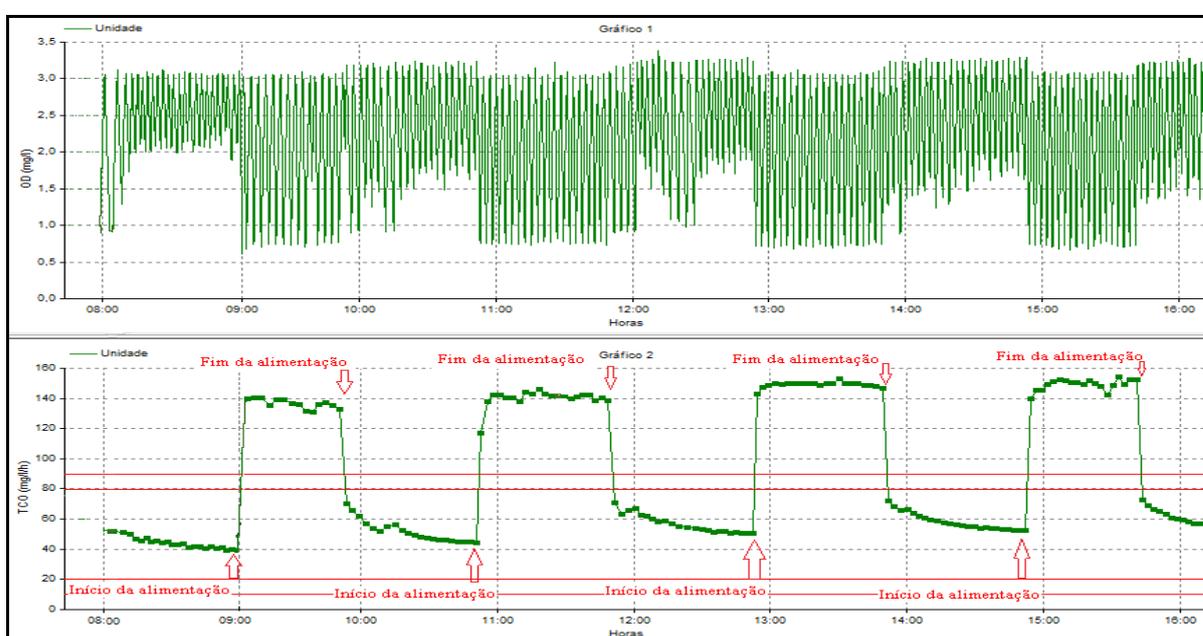
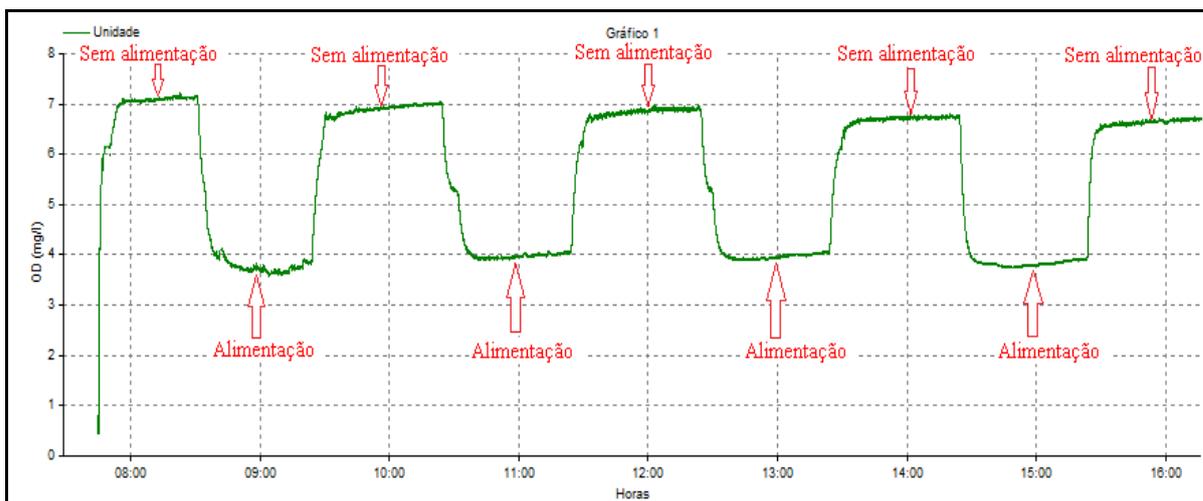


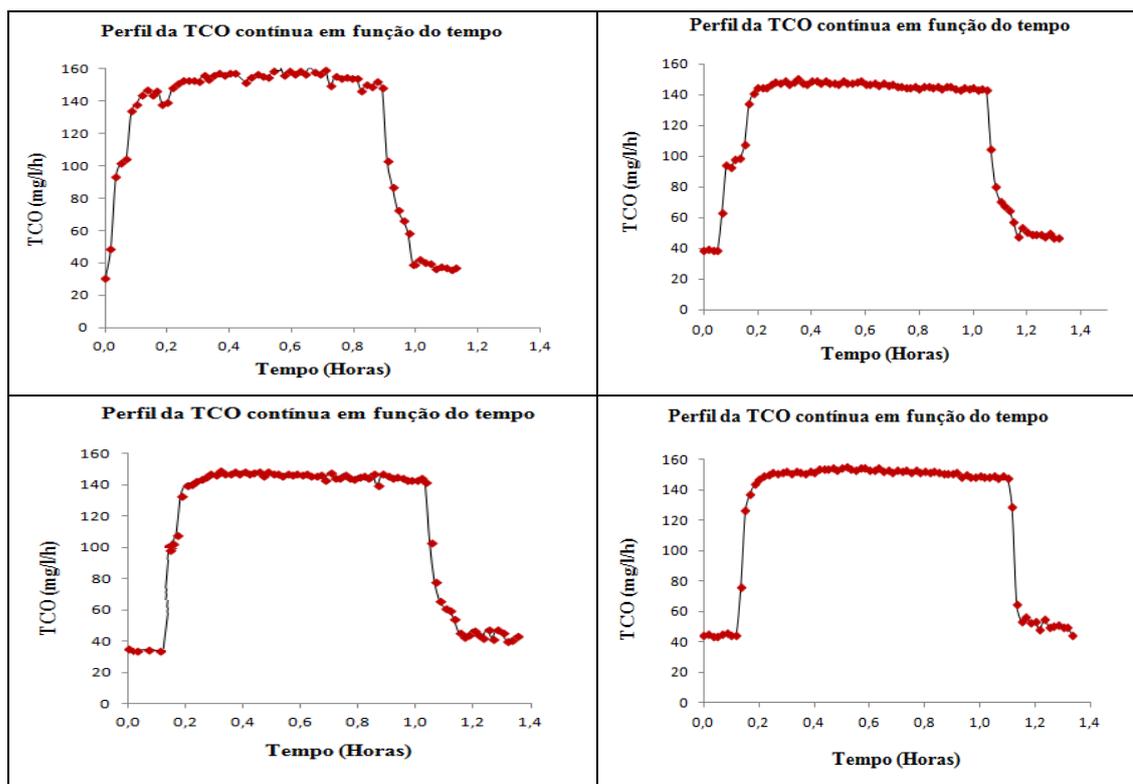
Figura 4.6 - Respirograma obtido durante um teste de determinação contínua da TCO com períodos intercalados para alimentação e não alimentação.



Na Figura 4.7 são apresentados os gráficos da TCO em função do tempo calculadas com a equação 3.3 (TCO contínua). Para a obtenção dos valores teóricos da TCO foram utilizadas as seguintes variáveis: K_{la} de $0,61 \text{ min}^{-1}$, OD_s de $7,97 \text{ mg/L}$ e intervalo de tempo $\Delta OD_l/\Delta t$ de 1 minuto. Os valores de K_{la} e OD_s foram obtidos conforme descrito no Capítulo 3 Seção 3.3.2. Os valores médios da TCO para cada um destes gráficos são apresentados na Tabela 4.5.

As considerações feitas a respeito da frequência de marcação de pontos da TCO para a etapa de adição brusca do substrato também foram pertinentes a esta forma de alimentação. Considerando o tempo médio de uma hora gasto para o metabolismo da concentração do material orgânico adicionado; observa-se que são registrados para o método semicontínuo uma média de 18 dados de TCO (TCO exógena máxima), enquanto no método contínuo tem-se uma média de 54 dados da TCO. Para o mesmo intervalo de tempo de execução do teste os valores de TCO obtidas para o método contínuo é o triplo dos número de dados obtidos pelo método semicontínuo, a frequência máxima de dados registrados pelo método contínuo é bem mais intensa. Estes dados estão apresentados nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Figura 4.7 – Gráficos da TCO contínua calculados com base na teoria.



Ao analisar as Figuras 4.5 e 4.7 tem-se a impressão que os valores da TCO semicontínua são aparentemente iguais aos da TCO do método contínuo, sendo os contornos dos gráficos referentes ao consumo do substrato são muito similares. É notória a capacidade com que o método contínuo reproduz o perfil da TCO semicontínua.

Quando se aplica o método contínuo para a determinação da TCO, dependendo do intervalo de tempo aplicado para $\Delta OD_1/\Delta t$, tem-se a possibilidade de observar o comportamento da TCO antes que seja atingida a taxa de utilização máxima, característica não observada para o método semicontínuo, independentemente da forma de alimentação do substrato.

Nas Tabelas 4.4 e 4.5 são expostos os valores médios, máximos e mínimos obtidos nas determinações da TCO semicontínua e contínua, respectivamente.

Na Tabela 4.4 as concentrações médias da TCO variaram entre 136,6 mg/L e 149,2 mg/L, tendo os valores mínimos variado entre 117,2 mg/L e 139,8 mg/L e máximos entre 140,3 mg/L e 154,6 mg/L. Os dados experimentais obtidos para o método semicontínuo nesta etapa, foram bastante precisos, o CV mostrou-se inferior a 4,5% mostrando que houve uma baixa dispersão dos dados em torno da média.

Tabela 4.4 - TCO máxima obtida pelo método semicontínuo com adição moderada do substrato.

Nº de Pontos	Média TCO _{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	DP	CV (%)
14	136,6	140,3	117,7	5,7	4,2
20	139,6	146,0	117,2	5,8	4,1
20	149,0	152,8	143,2	1,85	1,2
18	149,2	154,6	139,8	3,73	2,5

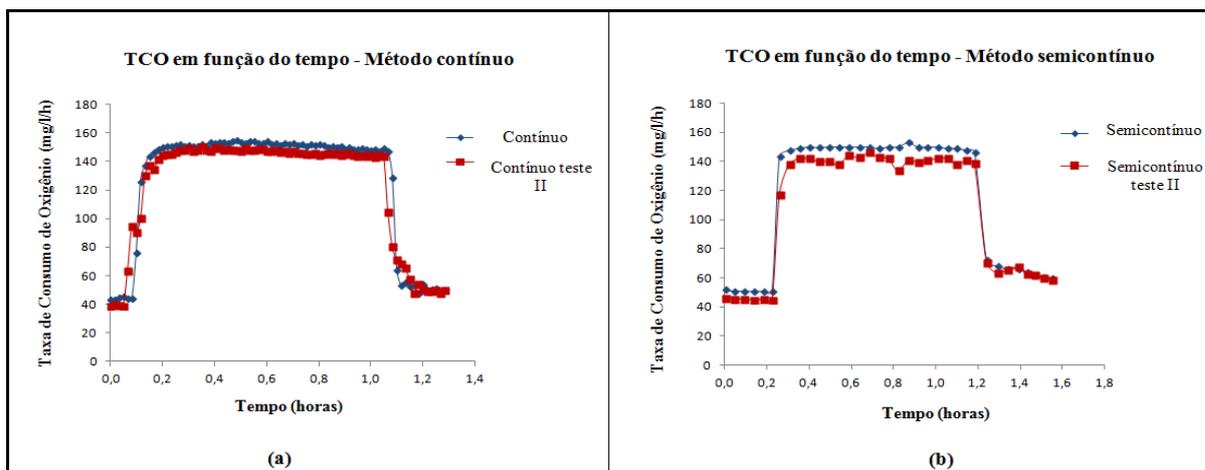
Na Tabela 4.5 (método contínuo) as concentrações médias da TCO variaram entre 143,3 mg/L e 150,5 mg/L, tendo os valores mínimos variado entre 104,6 mg/L e 126,4 mg/L e os máximos entre 149,2 mg/L e 162,8 mg/L e CV inferior a 4,5%.

Tabela 4.5 - TCO máxima obtidos pelo método contínuo com adição moderada do substrato.

Nº de Pontos	Média TCO _{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	DP	CV (%)
50	149,7	162,8	104,6	6,2	4,1
55	143,3	149,2	108	5,9	4,1
54	145,3	150,3	104,5	5,78	3,9
58	150,5	155	126,4	4,35	2,9

Assim, como na etapa de adição brusca do substrato (seção 4.3), também foi feita uma sobreposição de gráficos com dados de TCO obtidos para um mesmo método, mais especificamente com o mesmo experimento, aplicando a mesma metodologia da seção anterior como pode ser visto na Figura 4.8 (a) e (b). Observa-se que quando comparados entre si os métodos contínuo e semicontínuo para esta forma de alimentação também reproduzem os dados de TCO com muita semelhança. Destaca-se ainda que este método de alimentação proporcionou maior acurácia nos resultados, tanto para as médias obtidas entre os métodos, como quando comparado com os resultados obtidos para a etapa I.

Figura 4.8 - Comparação entre os dados de TCO determinados pelos métodos contínuo (à esquerda) e semicontínuo (à direita) com adição moderada do substrato.



Comparando o coeficiente de variação obtido na etapa com adição brusca (CV 10%) do substrato com os testes com adição moderada (CV 5%), percebe-se uma maior variação nos dados da TCO obtidos para a etapa I, essa variação pode ser atribuída à maneira como o substrato chega ao sistema. Adições de cargas elevadas e inesperadas podem causar uma alteração no metabolismo, afetando sobremaneira a TCO. No entanto, essas observações não comprometem a aplicação dos métodos em sistemas operando em escala real, uma vez que estes recebem cargas abruptas de material orgânico apenas em casos extremos, a forma de alimentação prevalecente é a testada na etapa II.

Por isso fez-se necessária a comparação dos testes nas duas circunstâncias, porque mais importante do que ter um método aplicável à situação cotidiana é estabelecer que, em condições atípicas, estes mesmos métodos também são aplicáveis.

4.5 Análise de Variância (ANOVA)

Para efeito de comparação estatística, recorreu-se a análise de variância (ANOVA), aplicada aos resultados obtidos pelos métodos semicontínuo e contínuo utilizando as ferramentas disponíveis no Microsoft Excel. A Tabela 4.6 apresenta o resumo dos resultados da análise de variância para as duas situações em que foram testados os métodos de determinação da TCO, a etapa I (adição brusca do substrato) e etapa II (adição moderada do substrato). Os valores da TCO utilizados para estes testes estatísticos foram aquelas cujas médias se encontram dispostas nas Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5, além dos demais dados apresentados nos anexos.

Tabela 4.6 – Valores da estatística F e os correspondentes valores críticos (F_{cr}) aplicados aos métodos semicontínuo e contínuo para as etapas I e II.

Etapas de adição do substrato	F	F crítico	Diferença Significativa
Etapa I	0,03	3,97	Não
Etapa II	0,67	4,11	Não

A análise de variância (ANOVA) a um nível de significância de 0,05 (α) mostrou para as duas situações experimentais que $F < F$ crítico, ou seja, não houve diferença significativa entre os dois métodos nas diferentes etapas a que foram submetidos. Este resultado mostra que embora haja certa diferença entre as médias dos métodos semicontínuo e contínuo, a diferença entre elas não foi significativa estatisticamente.

De acordo com os resultados que vêm sendo apresentados chega-se à conclusão de que os métodos semicontínuo e contínuo, mesmo em uma condição extrema e atípica, ou seja, com adição brusca do material orgânico não apresentam diferenças significativas entre si. Demonstrando que os mesmos levam a resultados precisos e acurados, o que confere confiabilidade para a aplicação dos dois métodos.

Os métodos de determinação da TCO estudados não apresentaram variações que pudessem comprometer ou influenciar de forma significativa sua aplicação em sistemas de tratamento aeróbio, tanto em condições extremas e atípicas (etapa I), como para as condições prevalentes nos sistemas de tratamento simulados na etapa II. No entanto, a escolha do método a ser utilizado fica a critério do usuário. O método semicontínuo possui fácil execução e obtenção prática e rápida dos dados da TCO, porém não pode ser aplicado em sistemas operando em escala real devido à série de fatores mostrados nos capítulos anteriores. Se o interesse for operação e monitoração de ETEs, deve-se optar pela aplicação do método contínuo.

A aplicabilidade prática do método contínuo foi aqui comprovada, tornando-se um importante instrumento a ser implantado na operação das ETEs e tornando a aplicação da respirometria uma alternativa cada vez mais viável, do ponto de vista da engenharia sanitária, quando são operados sistemas de tratamento.

4.6 Influência da Concentração de Lodo

Para estabelecer a influência da concentração de lodo sobre a constante de aeração, foram realizados ensaios respirométricos específicos que possibilitaram determinar K_{la} para diferentes concentrações de lodo e avaliar sua influência sobre a capacidade de oxigenação. Como mostra o respirograma da Figura 4.9, na parte superior, indicado como gráfico 1, observam-se vários ciclos do perfil de OD. Na parte inferior do respirograma, indicado como gráfico 2, observam-se os valores da TCO em função do tempo para as diferentes concentrações de lodo.

O respirograma da Figura 4.9 apresenta 6 experimentos com diferentes concentrações de lodo. Neste ensaio foi aplicado o método de determinação semicontínuo, intercalando períodos de aeração seguidos por períodos sem aeração, adotando-se com limites superior e inferior de OD 8 e 1 mgO₂/L, respectivamente. Observa-se que, à medida que a concentração de lodo no reator diminui a TCO também diminui. Em contrapartida, a concentração de oxigênio aumenta, chegando próximo à saturação.

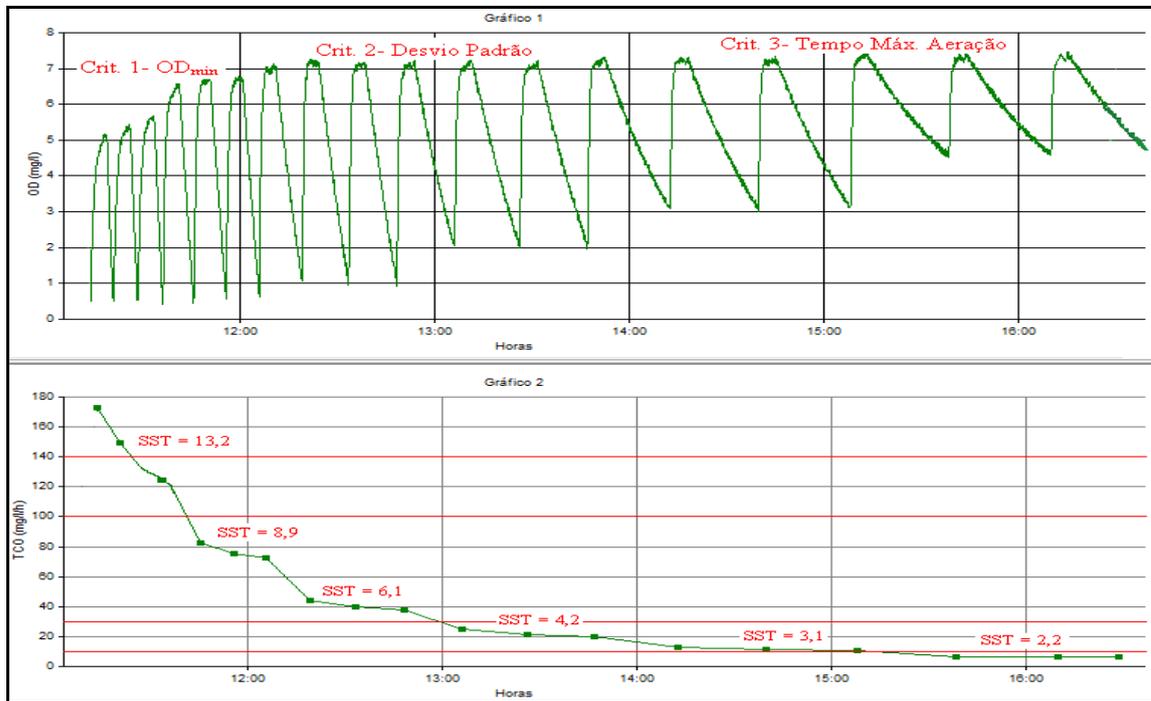
Foram estabelecidos três critérios para o registro dos dados da TCO pelo software. Na primeira fase de execução do teste (primeiros 3 pontos), o lodo tinha uma concentração de 13,2 gSST/L; nestas condições o oxigênio alcançava a referência mínima pré-estabelecida de 1 mg/L, no entanto a referência superior estabelecida em 8 mg/L não era alcançada porque este valor era maior que a concentração de saturação do líquido, para que as curvas de K_{la} fossem calculadas com mais precisão (critério 1 vide Figura 4.9). Assim o respirômetro permitia a aeração pelo tempo máximo especificado (5 minutos) enquanto a duração do período sem aeração era suficiente para a concentração de OD baixar para 1 mg/L.

As demais repetições do teste eram realizadas com uma menor concentração de lodo, resultantes do descarte de 25% (250 ml) da amostra e sua substituição por efluente. Nota-se que à medida que as diluições iam sendo feitas a concentração de OD aumentava gradativamente. A referência inferior pré-estabelecida não era mais alcançada, porque antes de chegar em 1 mgO₂/L as medições de OD registradas pelo software (a cada 6 segundos) já eram suficientes para que o mesmo calculasse uma reta com o desvio padrão estabelecido em 0,01 mg/L/h. Quando o desvio padrão chegava ao limite especificado o respirômetro reiniciava a aeração mesmo que a referência inferior não tivesse sido alcançada (critério 2 vide Figura 4.9).

Quanto mais diluída a amostra, maior era a distância para que pudesse alcançar a referência mínima, como pode ser observado nas últimas 3 repetições do teste, todavia esse

fator não inviabilizava a marcação do ponto da TCO porque no software pode se especificar o tempo máximo para o período sem aeração; neste caso específico estabelecido em 10 minutos.

Figura 4.9 – Respirograma obtido pelo método semicontínuo para a determinação de K_{la} em função da concentração de lodo.



Para todas as etapas dos ensaios foram obtidos 3 pontos experimentais de TCO, resultando na obtenção de 3 dados de K_{la} . As Tabelas 4.7 e 4.8 mostram os valores de TCO (Tabela 4.7) registrados pelo software do respirômetro e os valores calculados de K_{la} (Tabela 4.8), para cada repetição do teste nas diferentes concentrações de lodo avaliadas. Nestas tabelas além dos valores brutos (registrados pelo software), são apresentados as médias, o desvio padrão e o coeficiente de variação, tanto para TCO quanto para o K_{la} .

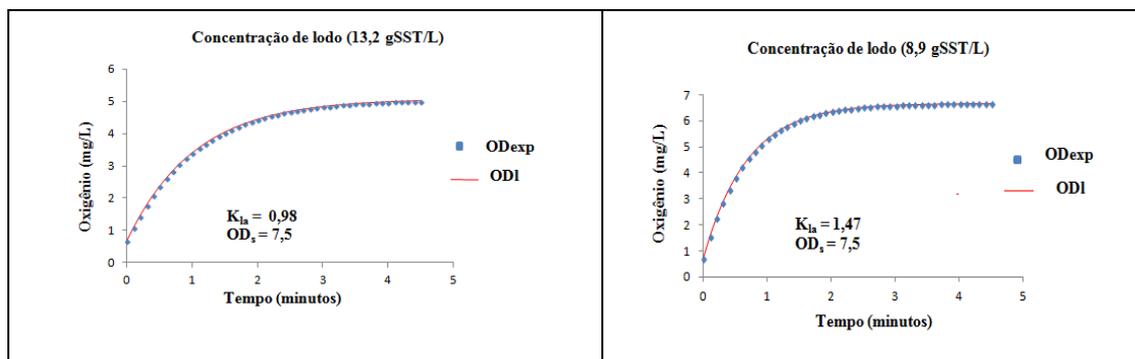
Observando os valores médios da TCO na Tabela 4.7 percebe-se que a cada diluição da concentração de lodo o valor da TCO cai para aproximadamente metade do valor anterior. Essa redução no valor da TCO acontece devido à diminuição da concentração de lodo no reator, quando se aplicava a diluição ao término de cada etapa, resultando numa decréscimo de aproximadamente um terço da concentração de lodo inicial.

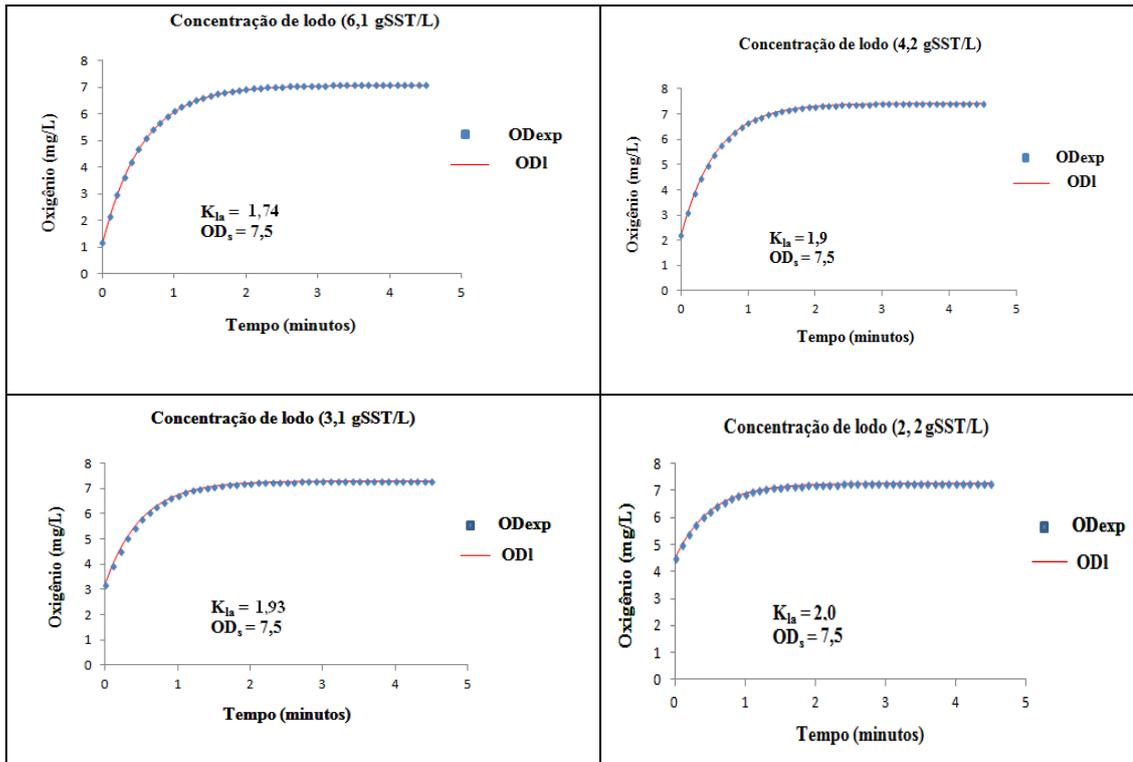
Tabela 4.7 – Valores brutos e a média da TCO obtidos para diferentes concentrações de lodo.

Concentração Lodo (g/L)	TCO (mgO ₂ /L/h)			Média	DP	CV (%)
	Teste 1	Teste 2	Teste 3			
13,2	172,8	149,5	129,9	150,73	21,48	14,24
8,9	82,2	75,05	72,45	76,57	5,05	6,59
6,1	44,3	40,1	37,95	40,78	3,23	7,91
4,2	25,14	21,2	20,0	22,11	2,69	12,16
3,1	12,5	11,5	10,86	11,62	0,83	7,11
2,2	7,2	7,5	7,3	7,33	0,15	2,08

Tendo-se o valor da TCO, pode-se calcular os valores de K_{la} e OD_s com o auxílio da equação 3.2, simulando os valores de OD_t em função do tempo e comparando-os com os valores experimentais. No exemplo da Figura 4.10 são apresentadas simulações feitas com a aplicação da equação 3.2 para diferentes concentrações de lodo. Os valores experimentais de OD_t (medidos a cada 6s) foram ajustados aos valores teóricos, em função do tempo de aeração. Analisando a Figura 4.10 percebe-se que há uma correlação quase perfeita entre OD_t teórico e experimental. Entretanto, é comum observar nas simulações uma tendência do valor experimental ser mais baixo que o valor teórico no início da curva, desvio este normalmente associado ao efeito da relaxação.

Os ajustes de curvas feitos com a equação 3.2 foram bastante satisfatórios na determinação do K_{la} , a correlação entre os valores teóricos e experimentais resultaram em valores de K_{la} bastante precisos (como pode ser visto na Tabela 4.8), a constante de transferência manteve-se de fato praticamente constante para todos os testes em que foi utilizada.

Figura 4.10 – Procedimento para a determinação de K_{la} e OD_s aplicando o solver para o ajuste de curvas.



Na Tabela 4.8 são apresentados os valores calculados de K_{La} para o teste apresentado no respirograma da Figura 4.9. Com esses valores é possível observar que à medida que aumenta a concentração de sólidos, os valores de K_{La} tendem a diminuir. Isso ocorre devido ao aumento da viscosidade do líquido que dificulta a transferência de oxigênio, causando uma diminuição na taxa de aeração e, conseqüentemente, na concentração de OD transferida. Para as concentrações de lodo acima de 8,9 gSST/L o efeito da concentração de lodo sobre a constante de transferência mostrou-se ainda mais evidente.

Tabela 4.8 – Valores brutos e a média do K_{La} para diferentes concentrações de lodo.

Concentração Lodo (g/L)	K_{La} (min^{-1})			Média	DP	CV (%)
	Teste 1	Teste 2	Teste 3			
13,2	1	0,96	0,98	0,98	0,01	1,18
8,9	1,48	1,47	1,46	1,47	0,01	0,68
6,1	2,0	1,66	1,74	1,8	0,17	9,87
4,2	1,8	1,9	1,87	1,87	0,05	2,76
3,1	1,93	1,9	2,0	1,95	0,07	3,76
2,2	2	2,0	1,98	2,0	0,01	0,57

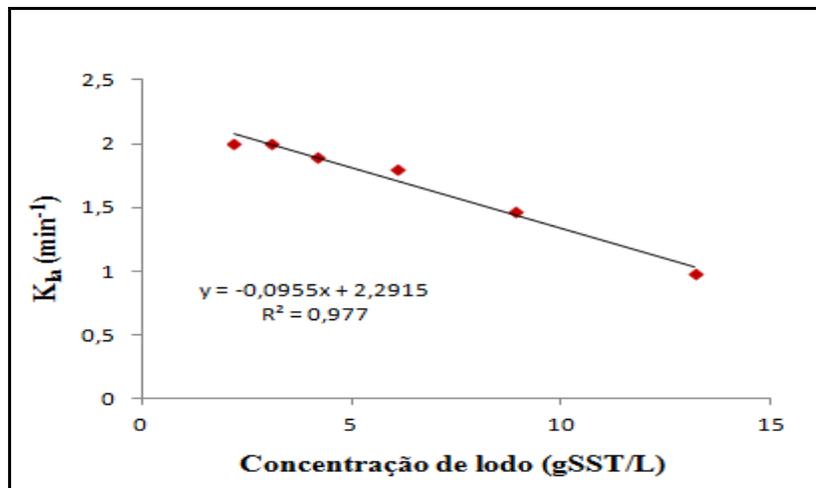
Observando os dados de K_{la} apresentados na Tabela 4.8 percebe-se que há uma relação explícita entre o K_{la} e a concentração de lodo, a taxa de OD transferido para o líquido diminui consideravelmente na medida em que a concentração de lodo aumenta. A partir da relação estabelecida entre o K_{la} e a concentração de lodo foi possível estabelecer uma relação que possibilita a determinação de K_{la} para diferentes concentrações de lodo como mostra a equação 4.1. Sendo a Figura 4.11 uma representação desta equação.

$$K_{la} = 2,3 - 0,10 \times X_t \quad (4.1)$$

Sendo:

X_t = Concentração de lodo presente no licor misto (gSST/L).

Figura 4.11 - Relação entre a constante de transferência e a concentração de lodo.



A aplicação da equação 4.1 possibilita a determinação de valores de K_{la} para diferentes concentrações de lodo. De toda maneira, os testes com diferentes concentrações de lodo ainda apresentam-se como uma boa alternativa para corrigir os valores de K_{la} para o efeito da concentração.

Os dados apresentados na Tabela 4.9 foram utilizados para estabelecer a relação que a concentração de lodo tem com a capacidade de aeração. Na tabela são expostos os valores médios da TCO em função da concentração de lodo (coluna 2). Nas colunas 3 e 4 estão os valores médios resultantes da melhor correlação entre os perfis teóricos e experimentais de K_{la} e OD_s , respectivamente. Uma vez identificados os valores de K_{la} , OD_s e OD_c (coluna 5) como função da concentração de lodo, os valores correspondentes da capacidade de aeração foram

calculados (coluna 6) aplicando a equação 4.2. A equação 4.2 estabelece que a capacidade de aeração é a razão entre a constante de transferência e a diferença entre a concentração de oxigênio de saturação e a concentração crítica. Está muito claro que a concentração de lodo teve um efeito muito significativo sobre a diminuição na capacidade de aeração, diminuições significativas dessa capacidade de aeração apresentam-se ainda mais intensas para concentrações de lodo superiores a 10 gSST/L.

$$CO_m = K_{la} \cdot (OD_s - OD_{cr}) \quad (4.2)$$

Sendo:

OD_{cr} = Capacidade crítica de oxigênio (mg/L);

CO_m = Capacidade de aeração para qualquer concentração de lodo (mg/L/min⁻¹).

Quanto à concentração de OD_s calculada para os ensaios realizados, observa-se que não houve diferença entre os valores obtidos para as diferentes concentrações. O valor de OD_{cr} utilizado para todas as concentrações de lodo foi de 1 mg/L; essa adoção foi feita com base na literatura (VAN HAANDEL e CATUNDA, 2012). No entanto não se descarta a possibilidade de haver um aumento do OD_{cr} na medida em que a concentração de lodo e, conseqüentemente, a TCO aumentam, o que demandará um maior consumo de energia para aeração.

Tabela 4.9 – Valores experimentais da TCO e valores calculados de K_{la} , OD_s e capacidade de oxigenação (CO) em função da concentração de lodo.

1	2	3	4	5	6
Conc. Lodo (g/L)	TCO (mg/L/h)	K_{la} (min ⁻¹)	OD_s	OD_c	CO
13,2	150,7	0,98	7,5	1,0	6,30
8,9	76,8	1,47	7,5	1,0	9,55
6,1	40,8	1,8	7,5	1,0	11,7
4,2	22,1	1,87	7,5	1,0	12,35
3,1	11,6	1,95	7,5	1,0	13,0
2,2	7,3	2,0	7,5	1,0	13,0

Os dados da Tabela 4.9 indicam que a capacidade de aeração do sistema, com uma concentração de 13,2 gSST/L é uma fração $6,3/13 = 0,48$ da capacidade do mesmo aerador quando a concentração do lodo é 2,2 gSST/L. O consumo de energia para a transferência de oxigênio num sistema com 13,2 gSST/L será 2,3 vezes maior que para um sistema, com o mesmo aerador, mas com uma concentração de 2,2 gSST/L. Se estes dados forem levados em consideração para reatores em escala real, o impacto do aumento dos custos operacionais deve ser considerado na hora de decidir se realmente é viável instalar um sistema que opere com concentrações de lodo elevadas: a redução dos custos de investimento, devido ao menor volume do reator deverá ser compensada com um aumento nos custos operacionais devido ao aumento dos gastos energéticos, mais os custos dos equipamentos. Como normalmente a energia para aeração é um dos mais relevantes fatores de custo do sistema de tratamento aeróbio, deve-se analisar criteriosamente a viabilidade econômica de se aplicar sistemas com alta concentração de lodo.

A concentração de sólidos é extremamente importante porque afeta ao mesmo tempo as propriedades biológicas do lodo, uma vez que o seu aumento interfere marcadamente no K_{la} , bem como nos custos operacionais, quanto maior a concentração de lodo mais dispendioso será o gasto para transferir oxigênio necessário aos processos de tratamento.

Vale salientar que embora a concentração de lodo tenha uma influência marcante sobre a constante de transferência e conseqüentemente na CO, ela não se torna um fator limitante para a aplicabilidade do método contínuo em sistemas de lodo ativado convencional. Para estes sistemas os resultados encontrados (Tabela 4.9) podem ser considerados positivos, pois considerando a concentração de SST presente neste tipo de sistema (de 2 e 6 g/L), grandes variações de sólidos não acontecerão. Em termos gerais, a concentração de 10 g/L é muito alta para a operação de um sistema de lodo ativado convencional.

4.7 Influência dos Surfactantes

Para determinar a influência dos surfactantes sobre K_{la} , foram realizados testes respirométricos específicos aplicando-se o método semicontínuo. Nestes ensaios era adicionada a amostra em análise, o substrato acetato de sódio, em algumas bateladas (normalmente 3), enquanto nas demais era adicionado, além do acetato, a solução surfactante nas seguintes concentrações: 0,01 mg/L, 0,02 mg/L e 0,03 mg/L. As bateladas onde eram adicionadas apenas o acetato de sódio permitiram a identificação do perfil da TCO antes do início da adição da solução surfactante (como pode ser observado na Seção 3.3.7.2 do

Capítulo 3). Através do perfil da TCO, já observada anteriormente, agora é possível identificar a influência da solução surfactante adicionada sobre o K_{la} . O surfactante acrescentado em cada batelada exerce efeito cumulativo ao longo das repetições, enquanto o substrato não.

Na Tabela 4.10 apresentam-se a média, o DP e o CV para os dados de OD_s . Os dados presentes nessa tabela estão divididos em duas etapas: na primeira coluna da tabela (Acetato 120 mgDQO/L) são apresentados os dados obtidos para o “grupo controle”, ou seja, quando se adicionava apenas o acetato de sódio; na segunda coluna (Acetato + surfactantes) são mostrados os dados obtidos para a condição adição de surfactante + acetato de sódio.

Analisando os dados da Tabela 4.10 observa-se que os valores de OD_s não foram influenciados pela ação do surfactante. As variações das médias para a primeira situação foi inferior a 0,76% e para a segunda 1,5%; a concentração de saturação não é afetada pelo efeito do surfactante.

Tabela 4.10 – Concentração de oxigênio de saturação para diferentes concentrações de surfactantes.

Acetato (120 mgDQO/L)			Acetato + surfactantes			
Média OD_s	DP	CV (%)	Concentração do surfactante (mg/L)	Média OD_s	DP	CV (%)
7,83	0,06	0,76	0,01	7,83	0,12	1,5
7,83	0,06	0,75	0,02	7,84	0,06	0,76
7,9	0,06	0,76	0,03	ND	ND	ND

ND – valor não determinado

Na Tabela 4.11 apresenta-se a média, o DP e o CV para os dados de K_{la} calculados com o uso da equação 3.2. A tabela divide-se basicamente em duas séries de dados: na primeira expõem-se os resultados obtidos para as bateladas que receberam a adição apenas do substrato acetato de sódio, enquanto que na segunda coluna apresentam-se os mesmos parâmetros para as bateladas que receberam a adição do acetato de sódio e do surfactante.

Para a análise dos valores de K_{la} apresentados na Tabela 4.11 percebe-se que há uma estabilidade nos valores de K_{la} obtidos, para ambas as etapas. Quando se adicionou o substrato e a solução surfactante a média de K_{la} manteve-se entre $0,96 \text{ min}^{-1}$ e $0,93 \text{ min}^{-1}$ para as concentrações de 0,01 mg/L e 0,02 mg/L, respectivamente, enquanto nas amostras onde

utilizou-se apenas o acetato a média obtida foi de $0,95 \text{ min}^{-1}$; a variação do K_{la} é de 2% aproximadamente, ou seja, a diferença é tão baixa que torna-se não significativa. Pelos respirogramas mostrados para estes experimentos (Capítulo 3 e anexos) observa-se que, além de não alterar significativamente os valores de K_{la} , também não foi detectada influência sobre o metabolismo.

Tabela 4.11 - Concentração da constante de transferência para diferentes concentrações de surfactantes.

Acetato (120 mgDQO/L)			Acetato + surfactantes			
Média K_{la}	DP	CV (%)	Concentração do surfactante (mg/L)	Média K_{la}	DP	CV (%)
0,97	0,03	3,0	0,01	0,96	0,03	3,1
0,94	0,028	2,9	0,02	0,93	0,04	4,3
0,95	0,025	2,6	0,03	ND	ND	ND

ND – valores não determinados

Os surfactantes são substâncias constituídas por moléculas orgânicas com a propriedade de formar espuma no corpo receptor ou na estação de tratamento em que o esgoto é lançado, portanto tendem a se agregar à interface ar-água, e nas unidades de aeração aderem à superfície das bolhas de ar, formando uma espuma muito estável e difícil de ser quebrada (CHAGAS, 2000). É exatamente essa formação de espuma que dificulta a leitura do oxigênio dissolvido, pois as mesmas aderem à membrana do eletrodo causando instabilidade e erros nas leituras, sendo esta característica típica da amostra com surfactantes que inviabilizou leituras precisas dos valores da TCO, impossibilitando o cálculo de K_{la} e OD_s quando as concentrações apresentaram-se iguais ou superiores a $0,03 \text{ mg/L}$.

Um estudo desenvolvido por Masutani e Stenstrom (1984) mostra que ainda não existe um consenso geral sobre o efeito dos surfactantes na transferência de oxigênio nas águas residuárias; alguns pesquisadores indicam uma diminuição no K_{la} , outros observam um aumento, enquanto alguns não veem diferença nenhuma. Essa discrepância nos resultados pode ser devida à utilização de diferentes equipamentos de aeração, mas provavelmente está relacionado à tensão superficial dinâmica e à hidrodinâmica da bolha, já que há formação de espuma.

Dos três fatores testados para avaliar a influência sobre o K_{la} esse é, sem dúvida, o que

se mostrou menos influência, provavelmente devido aos problemas provocados pela presença das bolhas que interferiram na execução dos testes e na determinação dos dados da TCO, principalmente para a concentração de 0,03 mg/L de solução surfactante.

4.8 Influência da Temperatura

Para determinar a influência da temperatura sobre K_{la} a temperatura de uma amostra de lodo foi variada e a TCO foi determinada em função da temperatura usando o método semicontínuo. As temperaturas estudadas variaram de 17°C a 35°C. De posse das curvas de OD em função do tempo durante os períodos de aeração calcularam-se os valores de K_{la} , OD_s e, posteriormente, a CO para diferentes temperaturas. Na Tabela 4.12 são apresentados os dados experimentais deste teste. Observa-se que os valores de K_{la} e da CO aumentam enquanto os valores de OD_s diminuem.

Tabela 4.12 - Valores de K_{la} , ODs e capacidade de oxigenação em função da temperatura.

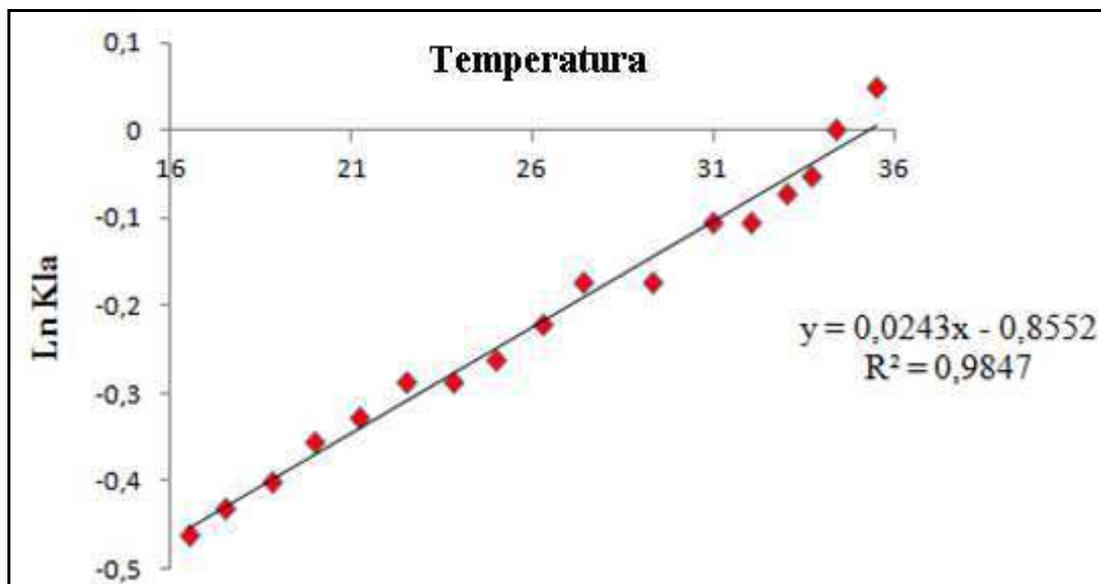
Temperatura (°C)	K_{la} (min ⁻¹)	OD_s (mg/L)	CO (mg/L/min)	Temperatura (°C)	K_{la} (min ⁻¹)	OD_s (mg/L)	CO (mg/L/min)
17	0,63	8,5	5,4	27	0,84	7,7	6,5
18	0,65	8,5	5,5	29	0,84	7,7	6,5
19	0,67	8,4	5,6	30	0,9	7,6	6,8
20	0,7	8,3	5,8	31	0,9	7,5	6,8
21	0,72	8,1	5,8	32	0,93	7,4	6,9
22	0,75	8	6,0	33	0,95	7,3	7,0
24	0,75	7,9	6,0	34	1,0	7,2	7,2
25	0,77	7,8	6,1	35	1,04	7,0	7,4
26	0,8	7,8	6,2	-	-	-	-

A influência da temperatura sobre o valor de K_{la} é descrita com a equação de Arrhenius já apresentada no Capítulo 2, Seção 2.10.3. Com os valores apresentados na Tabela 4.12 e a equação de Arrhenius foi possível determinar o valor experimental para Θ como mostra a Figura 4.12. Através da declividade da reta é possível determinar o valor de Θ . Para os valores obtidos neste experimento obteve-se o $\ln(\Theta) = 0,0243$ e $\Theta = 1,025$ com coeficiente de correlação de $R^2 = 0,98$ como mostra a Figura 4.12.

Uma vez estabelecido que a equação de Arrhenius (equação 2.23, Capítulo 2) é adequada para descrever a influência da temperatura sobre o valor de K_{la} , pode-se analisar a influência do valor numérico do coeficiente Θ sobre a constante de aeração. Na medida em que o coeficiente da temperatura aumenta, cresce a influência da temperatura sobre o valor de K_{la} .

Embora Θ seja tratado como uma constante ele pode variar substancialmente, mesmo dentro de uma faixa reduzida de temperatura (SAWYER *et al.*, 2003). O valor de Θ tem sido determinado por vários pesquisadores no decorrer dos anos, tendo assumido valores distintos entre 1,020 a 1,028, para sistemas com difusão de ar (ECKENFELDER e FORD, 1968), e 1,012 para aeração mecânica (LANDBERG, GRANLICH e KIPPLE, 1969).

Figura 4.12 - Curva do logaritmo natural de K_{la} em função da temperatura.



Conforme o valor encontrado para Θ pode-se afirmar que para cada elevação de 1°C na temperatura, ocorre um aumento de aproximadamente 2,5% no valor de K_{la} . A explicação para essa significativa influência da temperatura no valor da capacidade de oxigenação, deve-se ao fato da temperatura afetar a velocidade das moléculas de oxigênio na água e no ar acima da superfície livre. Em consequência, uma elevação de temperatura deve corresponder a um aumento na taxa de difusão molecular do soluto gasoso no filme líquido superficial, aumentando assim o valor da constante de transferência de oxigênio K_{la} e, por sua vez, o valor da CO (BARBOSA, 1989).

Segundo Van Haandel e Van der Lubbe (2012) a variação da concentração de OD teoricamente pode ser descrita como:

$$OD_{s,t}/OD_{s,20} = 51,6 / (31,6+T) \quad (4.3)$$

Sendo:

$OD_{s,20}$ = Concentração de saturação a 20 °C = 9,1 mg/L⁻¹;

$OD_{s,t}$ = Concentração de saturação a uma temperatura T;

T = temperatura (°C).

Assim com um valor de $OD_{s,20} = 9,1$ mg/L os valores a 17 e 35°C em água limpa seriam: $OD_{s,17} = (51,6/48,6) \times 9,1 = 9,5$ mg/L e $OD_{s,35} = (51,6/66,6) \times 9,1 = 7,1$ mg/L.

Aplicando a equação 4.3 foi possível determinar para o teste desenvolvido que a concentração de OD_s teve uma redução de aproximadamente 28% da menor para a maior temperatura.

Contudo é importante salientar que a influência da temperatura só vai ser significativa sobre K_{la} para águas residuárias que variam constantemente a temperatura para valores extremos. No caso da água residuária de Campina Grande foi observado por meio dos gráficos de temperatura registrados pelo software do respirômetro durante todo o período de desenvolvimento da pesquisa, que a variação da temperatura foi $26^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$; nessa faixa de variação não se observou interferência significativa sobre o valor de K_{la} .

Foi verificado que esta variável também não foi fator limitante para a aplicação do método contínuo, nas condições em que foram desenvolvidos os testes.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Foi verificado que os métodos semicontínuo e contínuo são aplicáveis em duas situações: quando o sistema recebe variações abruptas da carga orgânica aplicada e para as condições cotidianas de variações moderadas ao longo do dia. Os testes feitos para a adição da carga orgânica moderada ainda apresentou resultados mais estáveis que para a adição brusca, porém comprovou-se que ambos os métodos são precisos na determinação da TCO, para as duas situações extremas a que foram submetidos.

Estatisticamente, comprovou-se que não há diferença significativa entre os dados gerados pelos diferentes métodos (contínuo e semicontínuo). Portanto, mostra-se que ambos os métodos são precisos e acurados na determinação da TCO, sendo viável a aplicação dos dois métodos. Diante desses resultados torna-se claro que a escolha do método a ser utilizado fica a critério do usuário. O método semicontínuo é mais facilmente aplicável e dá respostas mais rápidas, é uma boa alternativa para o desenvolvimento de ensaios laboratoriais e em pequena escala, mas não se aplica de maneira rotineira em sistemas em escala real. Se a finalidade é monitoração e operação de estações de tratamento de esgoto deve-se aplicar o método contínuo.

Os resultados ainda revelaram que a obtenção de dados da TCO pelo método contínuo é mais frequente, por isso a detecção de possíveis alterações no comportamento da TCO são identificadas mais rapidamente por este método.

O valor da constante de transferência do aerador é fator de extrema relevância para a aplicação do método contínuo da TCO. É possível obter os dados de K_{la} fazendo uso do método semicontínuo.

Com concentrações de lodo acima de 10 g/L a eficiência de aeração do licor misto fica comprometida, por apresentar alta viscosidade, dificultando deste modo a transferência de oxigênio. No entanto, para concentrações de lodo entre 2 e 6 g/L percebe-se uma estabilidade considerável nos valores de K_{la} , de modo que sua influência para sistemas de lodo ativado convencional podem ser desconsideradas. Através dos resultados gerados estabeleceu-se uma relação entre o valor da constante de transferência e a concentração de lodo que pode ser

usado para determinar o valor de K_{la} para qualquer concentração de lodo. A concentração de lodo também mostrou exercer grande influência sobre consumo de energia.

Os surfactantes não apresentaram interferência sobre a constante de transferência. A dificuldade na realização dos procedimentos experimentais para a determinação do OD quando a amostra tem surfactantes pode acarretar incertezas para os resultados, a aderência das bolhas a membrana do eletrodo causam erros significativos nas leituras de OD, assim dependendo da posição do eletrodo na amostra pode produzir resultados distantes da realidade.

A temperatura apresenta influência sobre o K_{la} , uma vez que se observou que pra cada 1°C de elevação na temperatura aumentava-se aproximadamente 2,5% no valor do K_{la} para o sistema de aeração aplicado (bolhas pequenas). A relação encontrada entre o valor de K_{la} e a temperatura permitiu que se estabelecesse o valor da constante para qualquer temperatura.

Dos fatores que influenciam K_{la} sem dúvidas a concentração de lodo é uma das variáveis que tem maior influência para o sistema de tratamento, pois afeta tanto as propriedades biológicas quanto operacionais do sistema. Em termos gerais as variáveis testadas para avaliar a influência da concentração de lodo, não mostraram condições pertinentes que inviabilizassem em nenhum momento a aplicabilidade do método contínuo, no entanto vale ressaltar que este é um estudo voltado para as condições da água residuária de Campina Grande, Paraíba, podendo apresentar características diferenciadas em outros locais.

5.2 Recomendações

A constante de transferência de oxigênio é um elemento chave para a aplicação do método contínuo. Essa constante sofre influências frequentes dependendo da variação do afluente, partindo deste princípio sugere-se que se faça uma caracterização mais abrangente do K_{la} , para estabelecer se há flutuações do valor desta constante nas diferentes horas do dia, em diferentes dias da semana e em diferentes estações do ano (diluição do esgoto com água pluvial). Para ter validade em todo Brasil seria interessante que esta pesquisa pudesse ser executada em diferentes regiões, com águas residuárias, sistemas de aeração e condições operacionais distintas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA, AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21th ed. Washington, D.C. 2005.

ALLSOP, P.J.; MOO-YOUNG, M.; SULLIVAN, G.R. The dynamics and control of substrate inhibition in activated sludge. **Critical Reviews in Environmental Control – CRC**, v. 20, p.115-167, 1990.

BARBOSA JÚNIOR, A. R. **Desenvolvimento de metodologia para a determinação do coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais da água com o emprego de traçador gasoso**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos: EESC/USP. São Carlos, SP. 1989.

BITTON, G. **Wastewater microbiology**. 3. ed. New York: Wiley-Liss Publishing, 2005. p.746.

BORZANI, W.; PIPLOVIC, R. Dois experimentos relativamente simples para observar alguns fatos ligados à respiração de microrganismos. **Revista de Graduação da Engenharia Química**, v. 3, n. 5, p. 9-14, 2000.

CATUNDA, S. Y. C.; DEEP, G. S.; VAN HAANDEL, A. C.; FREIRE, R. C. S. **Método de medição contínua da taxa de respiração em sistemas de lodo ativado**. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 1996, São Paulo. Anais. São Paulo, 1996. p. 269-274.

CHAGAS, W. F. **Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienização para fins agrícolas, das ETÉs da ilha do governador e da penha no estado do Rio de Janeiro**. 89p. Dissertação (mestrado). Fundação Osvaldo Cruz, escola nacional de saúde publica. 2000.

CORRÊA, L. C. **Controle do processo de transferência de oxigênio em corpos hídricos**. 97p. Dissertação (mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de engenharia de São Carlos: EESC/USP, São Carlos, SP. 2006.

COSTA, A. G. **Respirometria aplicada ao sistema de lodo ativado: influência de interrupções da oxigenação sobre a viabilidade e atividade do lodo ativo**. 84p. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande: UFCG, Campina Grande, PB. 2002.

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.

DOLD, P. L.; EKAMA, G. A.; MARAIS, G. v. R. **A General model for the activated sludge process**, Progress in Water Technology, 12, p. 47-77, 1980.

ECKENFELDER, W.W., Ford, D. L. **Engineering aspects of surface aeration Design**, 22nd PIWC, 279-291, 1968.

FERREIRA, A. F. **Uso da respirometria na avaliação da influência do pH na capacidade ativa das bactérias nitrificantes**. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande: UFCG, Campina Grande, PB. 2002.

HAGMAN, M., JANSEN, J.L.C. Oxygen uptake rate measurements for application at wastewater treatment plants. **VANTTEN**, University Lund; v. 63, p. 131-138, 2007.

HENZE, M.; GUJER, W.; MINO, T.; MATSUO, T.; WENTZEL, M. C.; MARAIS, G. v. R. **Activated Sludge Model N° 2**. IAWQ: Scientific and Technical Report N° 3, London, Reino Unido. 1995.

HENZE, M.; GRADY Jr., C. P. L.; GUJER, W.; MARAIS, G. v. R.; MATSUO, T. **Activated sludge model N° 1**. IAWPRC: Scientific and Technical Report N° 1, London, Reino Unido. 1986.

JORDAO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos sanitários**. 6. ed. Belo Horizonte: Segrac editora, 2011. p. 906.

LANDBERG G.G, GRAULICH B.P e KIPPLE W.H. **“Experimental problems associated with the tasting of surface aeration equipment”**. WATER RESEARCH, 3, 6, 445-455, 1969.

MARAIS, G. v. R.; EKAMA, G. A. **The activated sludge process Part I: steady state Behaviour**. Water SA, v. 2, n. 4, p. 164-200, October. 1976.

MASUTANI, G.; STENSTROM, M. K. **A review of tension measuring techniques, surfactants, and their implications for oxygen transfer in wastewater treatment plants.** In: WATER RESOURCES PROGRAM, 1984. University of California, Los Angeles, p. 62.

METCALF e EDDY. Inc. **Wastewater engineering: treatment and reuse.** 4. ed. McGraw Hill, 2003. p.1819.

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.

OLIVEIRA, C. S.S. **Respirometric techniques applied to aerobic microbial processes.** 196 p. Tese (doutorado em Engenharia Química e Biológica). Universidade do Minho: Escola de Engenharia, Braga, Portugal. 2012.

PELCZAR Jr., M. J. et al. **Microbiologia: conceitos e aplicações.** 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1997.

RIOJA, J. C. C. **Uso do resíduo siderúrgico na adsorção e peroxidação catalítica de surfactante aniônico.** 91 p. Dissertação (mestrado em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais: Escola de Engenharia da UFMG, Minas Gerais – BH. 2009.

ROS, M. **Respirometry of activated sludge.** Technomic publishing company, Inc. Lancaster, 1993. p. 149.

ROS, M., DULAR, M. E FARKAS, P. 1988. Measurement of respiration of activated sludge. **Water Reserch**, 1988. p.1405-1411.

RODRIGUES, A. Q. **Caracterização do lodo heterotrófico de sistemas de lodo ativado gerado a partir de esgoto bruto e digerido.** 62p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande: UFCG, Campina Grande, PB. 2005.

SANTOS, T. G. **Utilização da respirometria para avaliar o grau de toxicidade de poluentes prioritários em sistemas biológicos de tratamento de águas residuárias**. 83p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande: UFCG, Campina Grande, PB. 2007.

SILVA, E. B. F. **Aplicação da respirometria na determinação da composição da matéria orgânica em águas residuárias**. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande: UFCG, Campina Grande, PB. 2003.

SPANJERS, H.; VANROLLEGHEM, P.; OLSSOM, G.; DOLD, P. Respirometry in Control of the activated sludge Process. **Water Science and Technology**, v. 34, n. 3-4. p. 117-126, 1996.

SPANJERS, H. VANROLLEGHEM, P.A., OLSSON, G.; DOLD, P. Respirometry in control of the activated sludge process: Principles. **Scientific and Technical Report: IAWQ**. London- UK; p. 48, n. 7, January 1998.

STEINHART, M. R. V. (2000). Auxiliares Têxteis do Ponto de Vista dos Tensoativos. In: **Química Têxtil**, p. 76 – 80, dezembro 2000.

SAWYER, C. N.; McCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. **Chemistry for environmental engineering and science**. 5 th. Edition Mc Graw-Hill Book Company, 2003.

TUR, M.; TSENG, L.; CHOU, M. S.; FANG, H.; HSIA, J. **Application of oxygen uptake rate in managing an activated sludge process for treating refinery wastewater**. In: INDUSTRIAL WASTE CONFERENCE, 44th, 1989, Purdue University – USA, may 8 – 10.

VAN HAANDEL, A.C; CATUNDA P. F. C.; NEIVA, M. R. **Um método experimental para a determinação da eficiência de aeradores superficiais em sistemas de lodo ativado**. In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Foz de Iguaçu. 1997.

VAN HAANDEL, A. C.; MARAIS, G. v. R. **O comportamento do sistema de lodo ativado: teoria e aplicações para projetos e operações**. Campina Grande: egraf, 1999. p.472.

VAN HAANDEL, A. C.; VAN DER LUBBE, J. **Handbook biological waste water treatment: design and optimization of activated sludge systems**. 2. ed. Londres – UK: IWA Publishing of Alliance House, 2012. p. 816.

VAN HAANDEL, A. C.; CATUNDA, S. Y. C. **Respirometria aplicada ao sistema de lodo ativado: teoria e aplicações.** Campina Grande – PB. p. 110. No prelo 2012.

VANROLLEGHEM, P. A.; SPANJERS, H.; PETERSEN, B.; GINESTET, P.; TAKACS, I. Estimating (combinations of) Activated Sludge Model N^o.1 parameters and components by respirometry. **Water Science and Technology**, v. 39, n.1, p. 195–215, 1992.

VANROLLEGHEM, P.; DRIES, D.; VERSTRATE, W. RODTOX: **Biosensor for rapid determination of the biochemical oxygen demand and the on-line monitoring of the toxicity of wastewaters.** In: PROCEEDINGS FIFTH EUROPEAN CONGRESS ON BIOTECHNOLOGY. Copenhagen, Denmark, July 8-13 1999, v. 1, p. 161-164.

VANROLLEGHEM, P. A. Principles of Respirometry in Activated Sludge Wastewater Treatment. **Department of Applied Mathematics Biometrics and Process Control – BIOMATH**; Belgium, p.19, October 2002.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** Vol. 2. **Princípios básicos do tratamento de esgotos.** 2. ed. Belo Horizonte: DESA – UFMG, 1996. p. 211.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** Vol. 1. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3. ed. Belo Horizonte: DESA – UFMG, 2005. p. 452.

WENTZEL, M. C.; MBEVE, A.; LAKAY, M. T.; EKAMA, G. A. Batch test for characterization of the carbonaceous materials in municipal wastewaters. **Water S.A.** v. 25, n. 3, 1999.

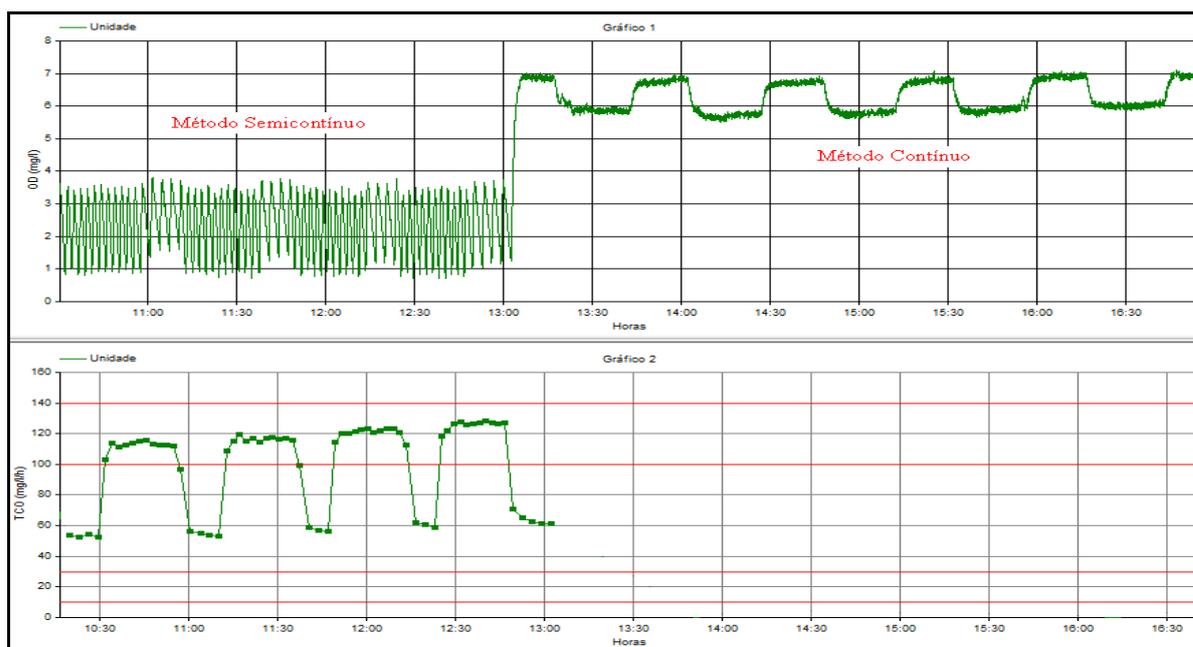
YOUNG, J. C. **Using oxygen uptake rate to fingerprint activated sludge processes.** In: III INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED ENVIRONMENTAL MONITORING SPONSORED BY THE KWANGJU INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2000, Korea, October/november 31-2.

APÊNDICE A

Respirogramas gerados quando aplicado os métodos semicontínuo e contínuo de determinação da TCO com adição brusca do substrato (etapa I).

As Figuras 1, 2, 3 e 4 mostram respirogramas onde se aplicou os métodos semicontínuo e contínuo de determinação da TCO.

Figura 1 - Respirograma típico obtido nos testes realizados na etapa (1) aplicando os métodos semicontínuo e contínuo de determinação da TCO.



Nas Tabelas de 1 a 8 podem-se observar os valores médios, máximos e mínimos obtidos nas determinações da TCO semicontínua (Tabelas 1, 3, 5 e 7) e contínua (Tabelas 2, 4, 6 e 8). Os dados encontram-se distribuídos em quatro séries referentes a bateladas (cada adição do substrato), sendo mostrado para cada um o número de dados de TCO registrado pelo software (método semicontínuo) e calculados (método contínuo) com seus respectivos dados estatísticos. Os valores da TCO foram obtidos conforme descrito no Capítulo 3, Seção 3.3.1.2. Estes valores compõem parte do conjunto de dados utilizados para a aplicação da análise estatística ANOVA.

Tabela 1 - Valores médios, máximos, mínimos, DP e CV da Taxa de Consumo de Oxigênio obtidos pelo método Semicontínuo.

Nº de Pontos	Média TCO _{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	Desvio Padrão	CV (%)
10	112	115,7	103,4	3,23	2,8
10	115,8	119,7	108,5	2,83	2,4
11	120,3	123,2	112,4	3,46	2,8
9	126,5	128,1	122,3	1,63	1,3

Tabela 2 - Valores médios, máximos, mínimos, DP e CV da taxa de consumo de oxigênio obtidos pelo método contínuo.

Nº de Pontos	Média TCO _{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	Desvio Padrão	CV (%)
24	110,1	119,8	101,1	5,8	5,3
24	121,2	132,5	107,9	6,2	5,1
24	123,6	134,4	97,2	8,3	6,7
24	130,8	142,8	118,8	6	4,5

Figura 2 - Respirograma típico obtido nos testes realizados na etapa (I) aplicando os métodos semicontínuo e contínuo de determinação da TCO.

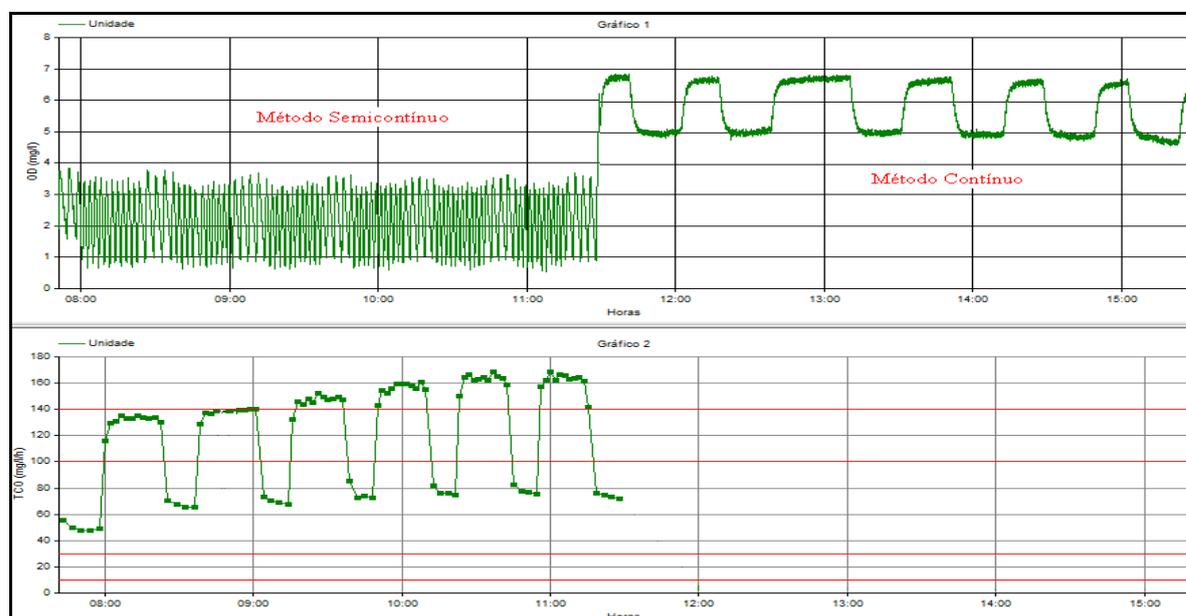


Tabela 3 - Valores médios, máximos, mínimos, DP e CV da taxa de consumo de oxigênio obtidos pelo método semicontínuo.

N° de Pontos	Média TCO _{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	Desvio Padrão	CV (%)
11	131,3	135,2	115,6	5,5	4,1
10	136,4	140	128,7	4,9	3,5
10	146,3	152,5	132,6	5,1	3,5
10	155,8	160,5	142,8	5,0	3,2
10	162	168	150,3	4,9	2,9
10	161,5	168,8	141,8	7,2	4,4

Tabela 4 - Valores médios, máximos, mínimos, DP e CV da taxa de consumo de oxigênio obtidos pelo método contínuo.

N° de Pontos	Média TCO _{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	Desvio Padrão	CV (%)
20	133	146	109,5	7,8	5,8
20	134	145,3	105,7	10,7	7,9
19	138	145	105	5,1	3,7
20	141,5	148,2	103,2	12	8,5
17	144	151,3	108,6	10,4	7,2
20	149,8	161,1	108	10,5	7

Figura 3 - Respirograma típico obtido nos testes realizados na etapa (I) aplicando os métodos semicontínuo e contínuo de determinação da TCO.

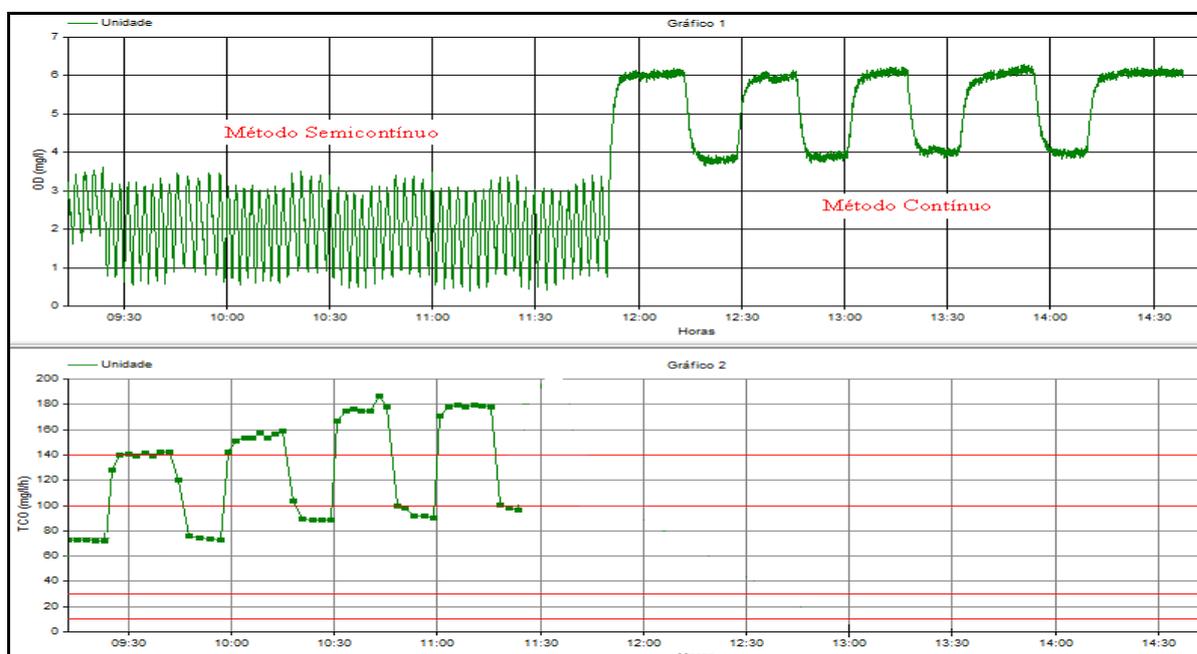


Tabela 5 - Valores médios, máximos, mínimos, DP e CV da taxa de consumo de oxigênio obtidos pelo método semicontínuo.

Nº de Pontos	Média TCO _{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	Desvio Padrão	CV (%)
8	137	142,5	120,3	7,6	5,5
8	147,7	158,5	103,2	5,0	3,4
6	157,8	186	166	5,8	3,8
7	177	179,6	170	3,0	1,6

Tabela 6 - Valores médios, máximos, mínimos, DP e CV da taxa de consumo de oxigênio obtidos pelo método contínuo.

Nº de Pontos	Média TCO _{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	Desvio Padrão	CV (%)
15	160,7	189,4	115,3	18,9	11,7
16	161	193,3	121,2	17,2	10,6
17	161,5	220	123	17,3	10,7
16	166	198,5	120	17,7	10,6

Figura 4 – Respirograma típico obtido nos testes realizados na etapa (I) aplicando os métodos semicontínuo e contínuo de determinação da TCO.

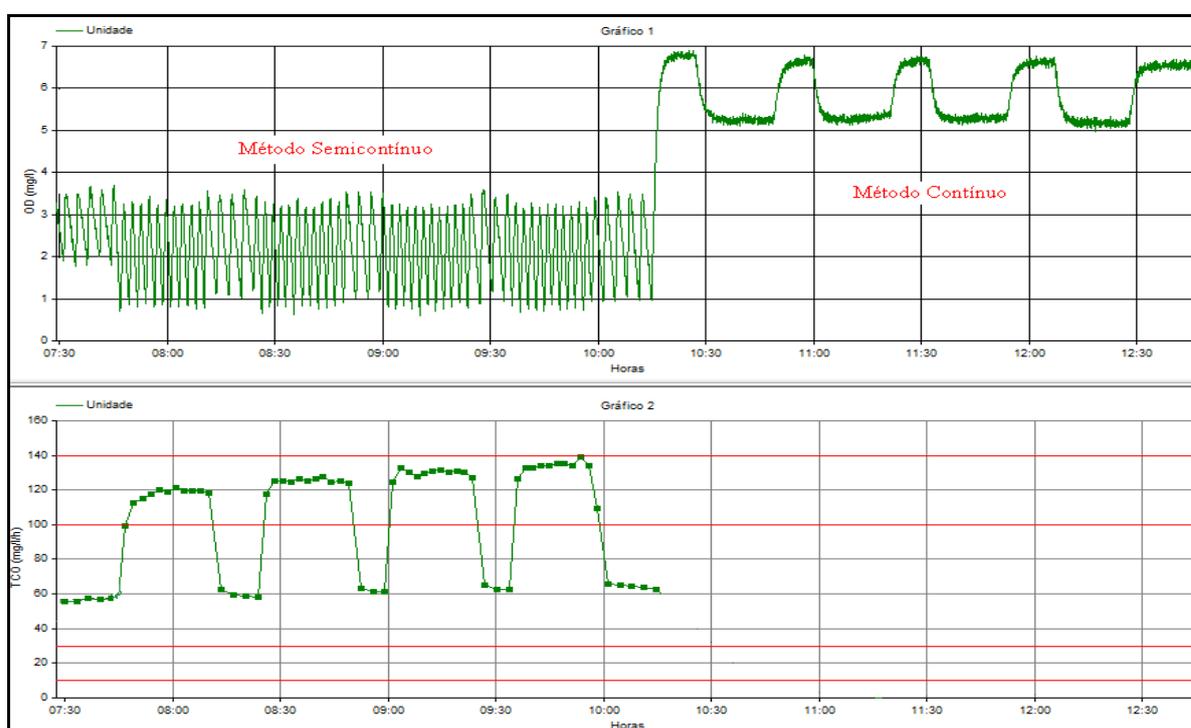


Tabela 7 - Valores médios, máximos, mínimos, DP e CV da taxa de consumo de oxigênio obtidos pelo método semicontínuo.

Nº de Pontos	Média TCO_{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	Desvio Padrão	CV (%)
10	118,3	121,2	99,3	2,7	2,2
10	124,8	127,7	117,9	2,5	2,0
10	129,7	132,6	124,5	2,4	1,9
10	133,9	139,1	126,6	3,1	2,3

Tabela 8 - Valores médios, máximos, mínimos, DP e CV da taxa de consumo de oxigênio obtidos pelo método contínuo.

Nº de Pontos	Média TCO_{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	Desvio Padrão	CV (%)
21	127,7	144,5	106	5,7	4,5
21	128,7	143,7	107,3	4,44	3,4
21	130,4	147,6	117,1	6,9	5,3
21	133	147,6	104,3	6,6	5

APÊNDICE B

Respirogramas gerados na aplicação dos métodos semicontínuo e contínuo de determinação da TCO com adição moderada do substrato (intercalando períodos para alimentação e não alimentação – etapa II).

As Figuras 1, 3 e 5 mostram respirogramas onde se aplicou o método semicontínuo de determinação da TCO. A janela superior da tela apresenta os perfis de OD em função do tempo e o gráfico da janela inferior mostra os perfis da TCO registrada pelo software. As Figuras 2, 4 e 6 mostram respirogramas onde se aplicou o método contínuo de determinação da TCO, nestes os gráficos apresentam apenas os perfis de OD em função do tempo.

Figura 1 - Respirograma típico obtido nos testes realizados na etapa (II) aplicando o método semicontínuo de determinação da TCO.

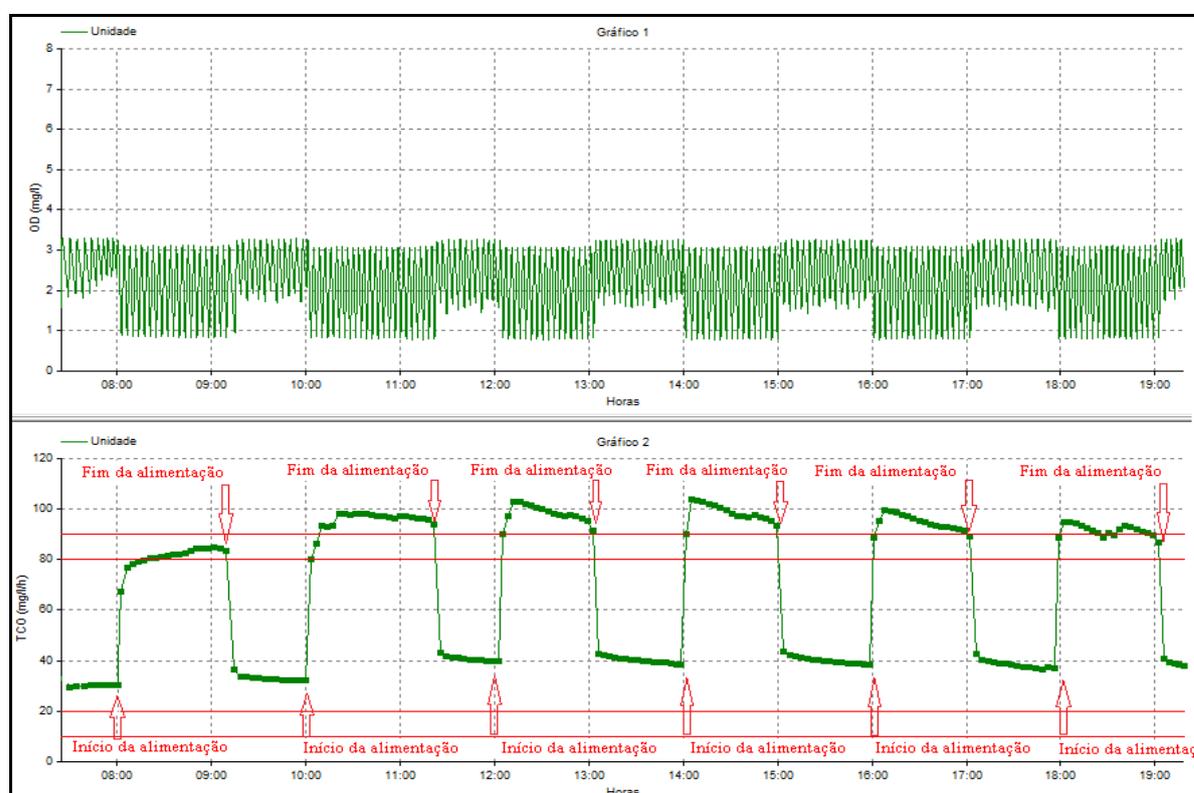
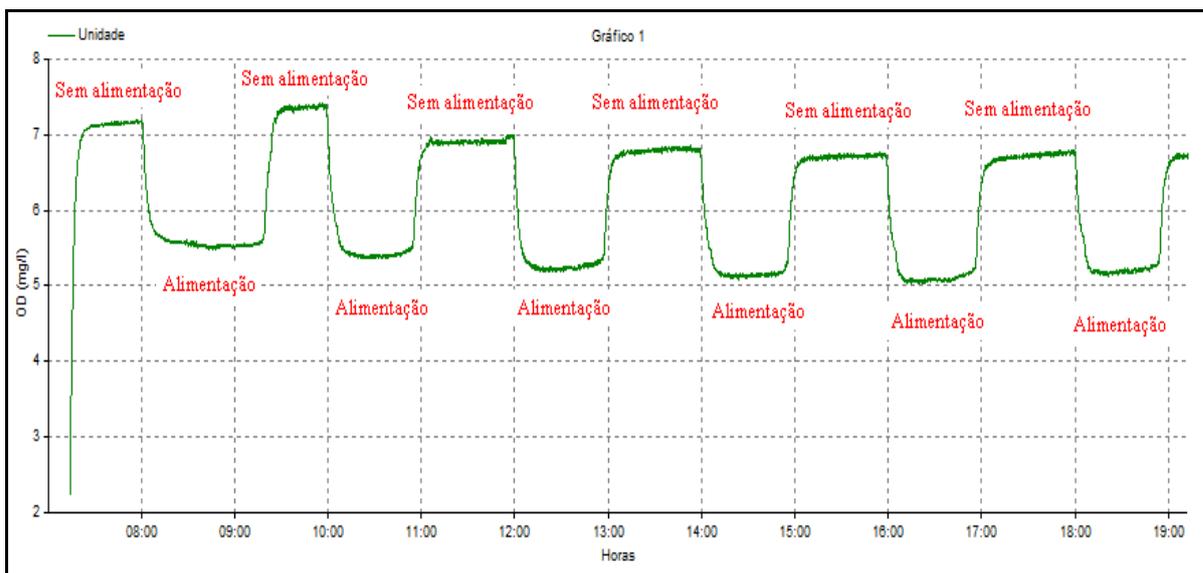


Figura 2 - Respirograma típico obtido nos testes realizados na etapa (II) aplicando o método contínuo de determinação da TCO.



Nas Tabelas de 1 a 6 podem-se observar os valores médios, máximos e mínimos obtidos nas determinações da TCO semicontínua (Tabelas 1, 3 e 5) e contínua (Tabelas 2, 4, e 6). Os dados encontram-se distribuídos em quatro séries referentes a bateladas (cada adição do substrato), sendo mostrado para cada um o número de dados de TCO registrado pelo software (método semicontínuo) e calculados (método contínuo) com seus respectivos dados estatísticos. Os valores da TCO foram obtidos conforme descrito no Capítulo 3, Seção 3.3.1. Estes dados compõem parte do conjunto de dados utilizados para a aplicação da análise estatística ANOVA.

Tabela 1 - Valores médios, máximos, mínimos, DP e CV da taxa de consumo de oxigênio obtidos pelo método semicontínuo (Figura 1).

Nº de Pontos	Média TCO _{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	Desvio Padrão	CV (%)
18	82,8	84,7	80,6	1,67	2,0
22	95,3	98,2	80	2,7	2,8
16	98,1	103,1	90	3,6	3,7
16	98,4	103,6	90,34	3,65	3,6
17	94,4	99,5	88,6	3,15	3,3
18	91,5	95	87	2,18	2,4

Tabela 2 - Valores médios, máximos, mínimos, DP e CV da taxa de consumo de oxigênio obtidos pelo método contínuo (Figura 2).

Nº de Pontos	Média TCO _{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	Desvio Padrão	CV (%)
60	75,6	78,12	76,9	1,5	2,0
49	86,1	89,5	76,90	2,5	2,9
51	90,1	91,8	79,7	2,2	2,5
48	92,1	94,7	80,5	2,7	3,0
57	89,3	92,6	81,5	2,3	2,5
47	80,9	83,3	78,4	1,2	1,4

Figura 3 - Respirograma típico obtido nos testes realizados na etapa (II) aplicando o método semicontínuo de determinação da TCO.

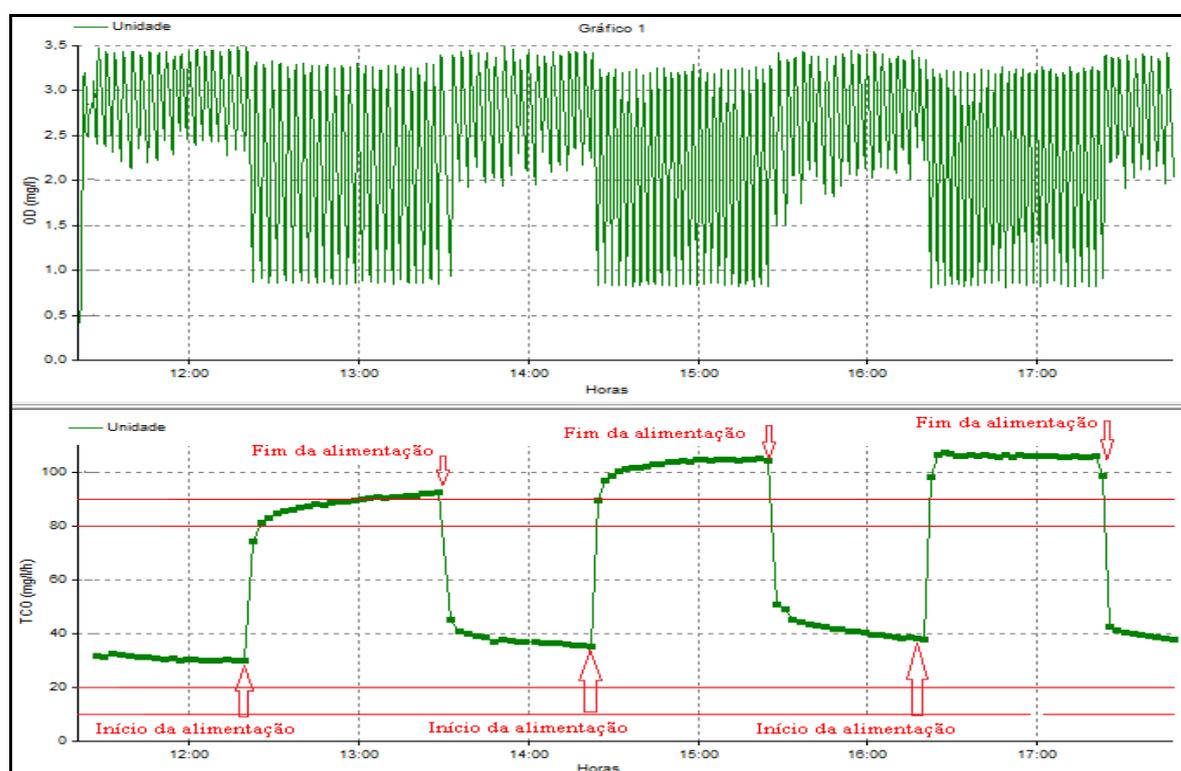


Figura 4 - Respirograma típico obtido nos testes realizados na etapa (II) aplicando o método contínuo de determinação da TCO.

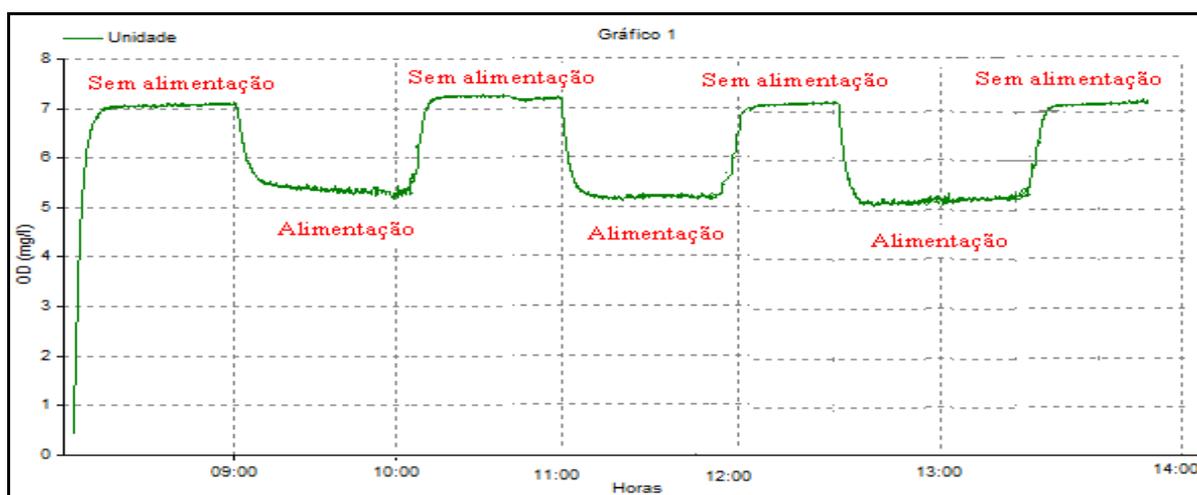


Tabela 3 - Valores médios, máximos, mínimos, DP e CV da taxa de consumo de oxigênio obtidos pelo método semicontínuo (Figura 3).

Nº de Pontos	Média TCO _{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	Desvio Padrão	CV (%)
23	88,8	92,8	81,3	2,96	3,3
24	102,7	105,4	89,4	3,47	3,3
25	105,6	107,5	98,4	2,15	2,0

Tabela 4 - Valores médios, máximos, mínimos, DP e CV da taxa de consumo de oxigênio obtidos pelo método contínuo (Figura 4).

Nº de Pontos	Média TCO _{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	Desvio Padrão	CV (%)
43	84,4	86,8	80,1	1,6	1,8
37	109,7	117,4	93,7	5,3	4,8
69	102,3	115,9	92,30	6	5,8

Figura 5 - Respirograma típico obtido nos testes realizados na etapa (II) aplicando o método semicontínuo de determinação da TCO.

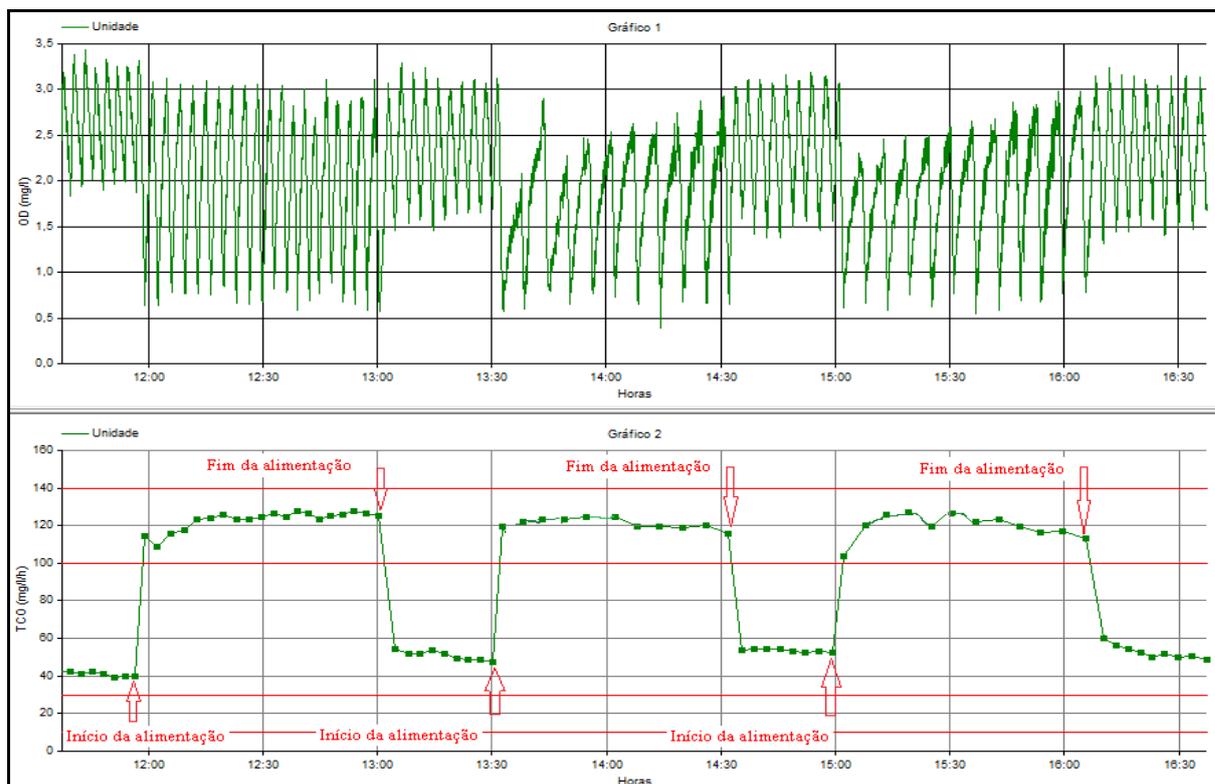


Figura 6 - Respirograma típico obtido nos testes realizados na etapa (II) aplicando o método contínuo de determinação da TCO.

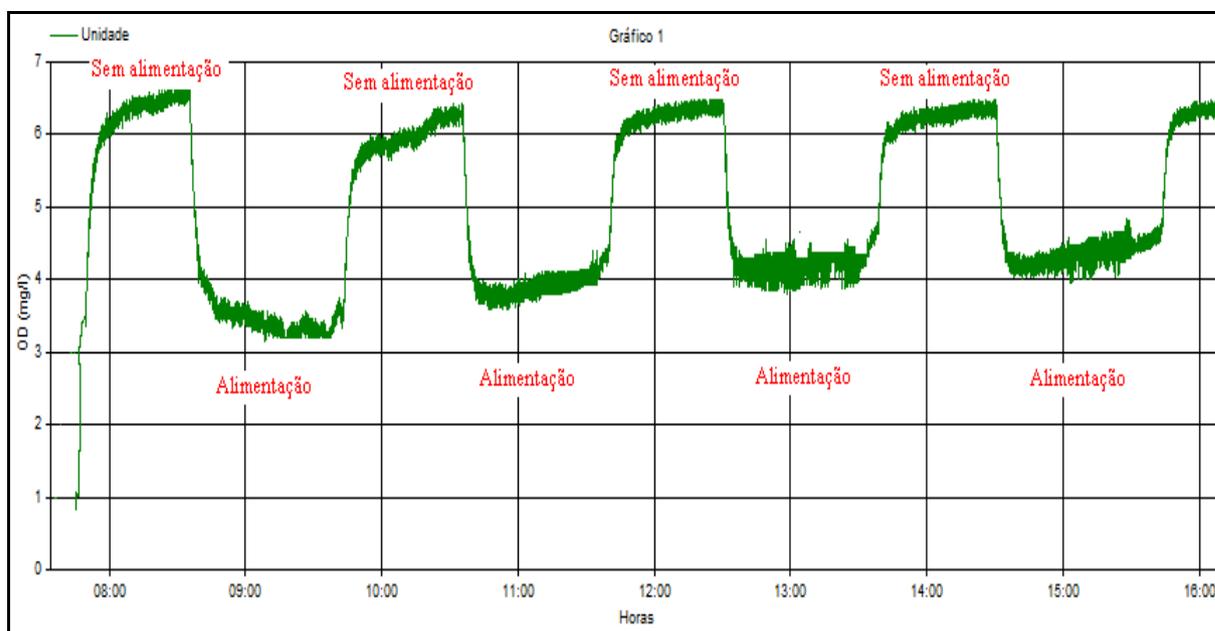


Tabela 5 - Valores médios, máximos, mínimos, DP e CV da taxa de consumo de oxigênio obtidos pelo método semicontínuo (Figura 5).

N° de Pontos	Média TCO_{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	Desvio Padrão	CV (%)
19	123,0	127,9	108,7	4,98	4,0
11	120	124,3	92,5	9,8	8,3
12	120,3	131,9	103,7	7,6	6,4

Tabela 6 - Valores médios, máximos, mínimos, DP e CV da taxa de consumo de oxigênio obtidos pelo método contínuo (Figura 6).

N° de Pontos	Média TCO_{máx}	Máximo (mg/L/h)	Mínimo (mg/L/h)	Desvio Padrão	CV (%)
63	111,4	144,4	99	15,6	14
62	115,4	136,6	99	11,2	9,4
68	122,6	155,8	99,1	11	9

APÊNDICE C

Respirogramas obtidos nos testes semicontínuo para avaliação da interferência dos surfactantes sobre K_{Ia} . Estes respirogramas compõem os dados mostrados no capítulo IV Seção 4.7, onde já se encontram dispostos nas Tabelas 4.10 e 4.11.

Figura 1 – Respirograma obtido aplicando o método semicontínuo com adição de acetato de sódio e 0,02 mg/L de uma solução surfactante.

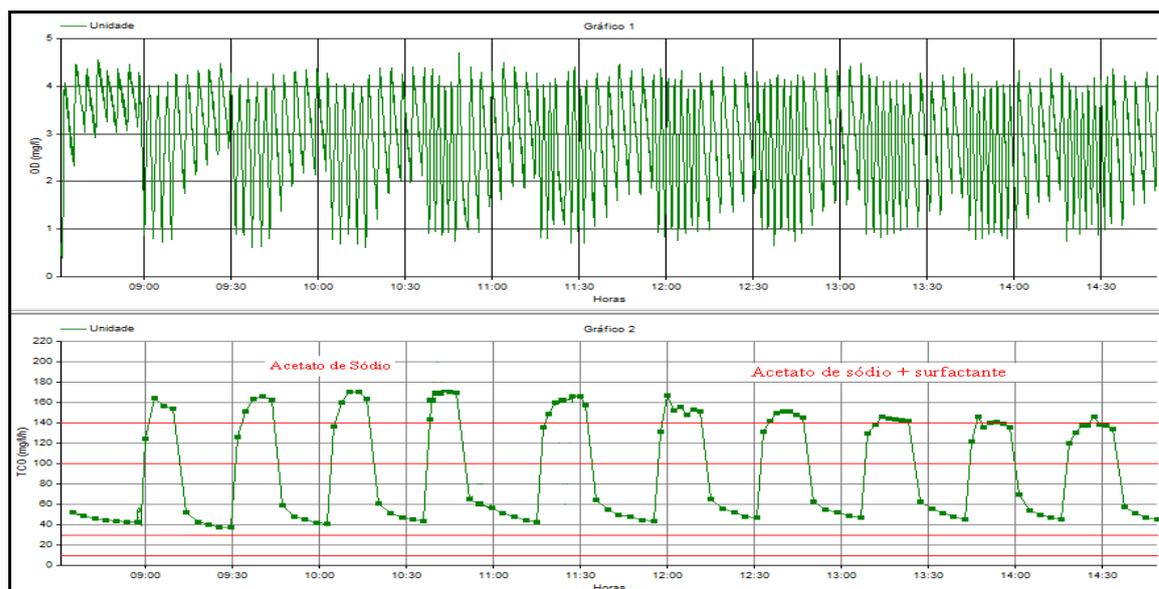


Figura 2 – Respirograma obtido aplicando o método semicontínuo com adição de acetato de sódio e 0,03 mg/L de uma solução surfactante.

