

# Respirometria de Bartha como ferramenta na avaliação da decomposição anaeróbia de efluentes de abatedouros

*Bartha's respirometry as tool for evaluating abattoir wastewater anaerobic decomposition*



• **Data de entrada:**  
12/11/2018



• **Data de aprovação:**  
28/02/2019

Paulo Eduardo dos Santos Soldera<sup>1</sup> | Thomas Spiewak Figueiredo<sup>2</sup> | Renato Falcão Dantas<sup>2</sup> | Enelton Fagnani<sup>2\*</sup>

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.054>

## ORCID ID

Soldera PES  <https://orcid.org/0000-0002-1152-5692>  
Figueiredo TS  <https://orcid.org/0000-0002-6474-0599>

Dantas RF  <https://orcid.org/0000-0001-6208-8763>  
Fagnani E  <https://orcid.org/0000-0002-2409-5070>

## Resumo

O efluente produzido em abatedouros apresenta elevadas cargas orgânicas e concentração de nutrientes, sendo predominantemente tratado por sistemas de lagoas anaeróbias e facultativas em série (sistema australiano). Verificam-se altas taxas de remoção de demanda bioquímica de oxigênio (em torno de 70%), com baixa geração de lodo e potencial reaproveitamento de subprodutos para produção energética; porém os critérios de projeto baseiam-se normalmente em parâmetros advindos de estudos com efluentes domésticos, cuja tratabilidade é inferior: o resultado é um frequente superdimensionamento das instalações. O presente trabalho propõe uma ferramenta matemática que simula a eficiência de remoção de carga orgânica em função de temperatura e geração de CO<sub>2</sub>, utilizando-se respirometria de Bartha adaptada, visando à otimização de projetos construtivos de sistemas australianos.

**Palavras-chave:** Abatedouro de bovinos. Avaliação cinética. Modelamento matemático.

## Abstract

*Wastewater from slaughterhouses has high organic load and nutrient concentration. The treatment is often made through anaerobic-facultative pond system, which presents high removal rates for biochemical oxygen demand (about 70%), low sludge generation and potential use of by-products for energy production. However, design criteria are based on studies for domestic wastewater, which presents lower treatability in comparison with abattoir wastewater: as a result, overestimated ponds are normally obtained. This paper proposes a mathematical tool to simulate the organic load removal as a function of both temperature variation and CO<sub>2</sub> generation through adapted Bartha's respirometry. The aim is to optimize pond system designs for high organic load wastewater treatment.*

**Keywords:** Bovine abattoir. Kinetic evaluation. Mathematical model

<sup>1</sup> Gerenciamento Ambiental Ltda. - Campinas - São Paulo - Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Campinas - Limeira - São Paulo - Brasil.

\* **Autor correspondente:** enelton@ft.unicamp.br.

## 1 INTRODUÇÃO

Abatedouros contribuem com significativa parcela da produção industrial em diversos países, sendo responsáveis por um grande volume de efluente gerado durante as etapas de beneficiamento da carne e limpeza das instalações. Embora a composição desse tipo de efluente possa variar em função do tipo de animais, processos produtivos e da região onde se situa, sempre são verificadas altas cargas orgânicas e de nutrientes (Bustillo-Lecompte e Mehrvar, 2017). Assim, esse efluente dotado de altas concentrações de demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) deve receber adequado tratamento antes de ser disposto no ambiente ou mesmo em rede coletora, sob pena de se tornar um problema econômico, ambiental e de saúde pública (Alvarez e Lidén, 2008; Bayr et al., 2012).

A digestão anaeróbia é normalmente a opção utilizada para o tratamento de efluentes de alta carga orgânica como o de abatedouros, apresentando alta eficiência na remoção de DQO e DBO, baixa geração de lodo e potencial de reaproveitamento do metano para a geração de energia (Chan et al., 2009; Hamza, Iorhemen e Tay, 2016; McCabe et al., 2020). Dentre as tecnologias possíveis, o sistema de lagoas de estabilização com a conformação anaeróbia seguida de facultativa é a mais utilizada para esse tipo de efluente (Harris e McCabe, 2015).

A eficiência dos tratamentos anaeróbios de efluentes de abatedouros é influenciada por diversos fatores, sendo os principais a natureza do efluente, o tempo de detenção hidráulica (TDH) e a temperatura (US EPA, 2004).

## 2 OBJETIVOS

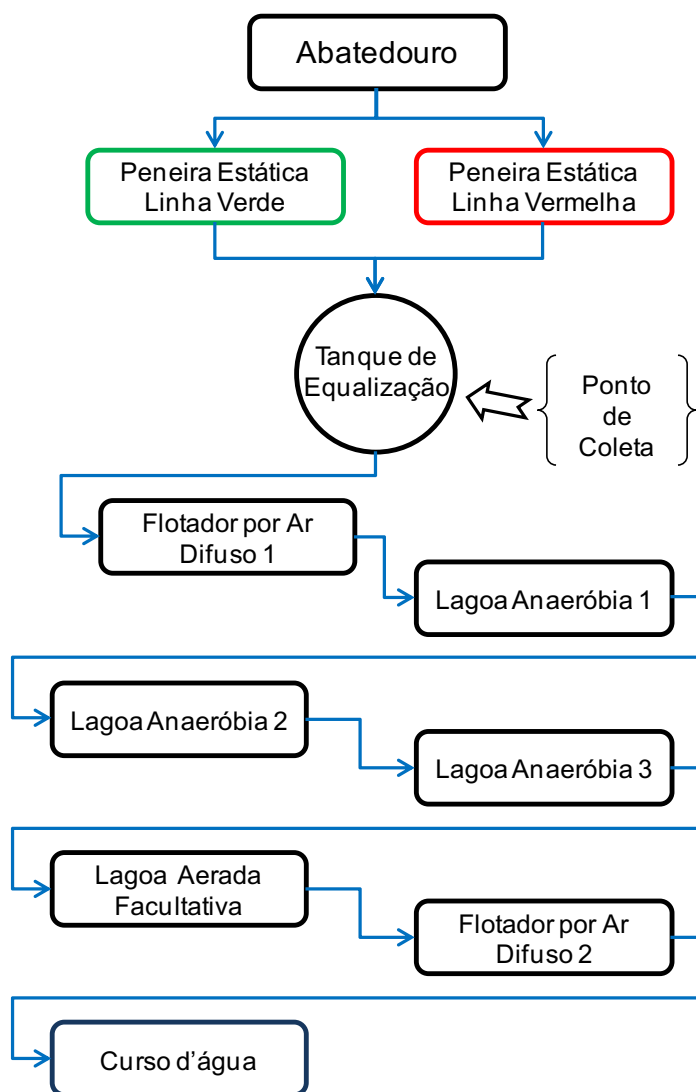
Apresentar um modelamento matemático capaz de fornecer a eficiência na remoção de DBO em função da temperatura, em sistemas de lagoas de estabilização voltado ao tratamento de efluentes de abatedouro, gerando subsídios para o dimensionamento otimizado desse tipo de sistema de tratamento.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Área de estudo

O abatedouro objeto de estudo é situado na cidade de Piracicaba-SP, coordenadas 22°41'40,9"S; 47°40'22,1"O, e apresenta uma produção média de 100 bovinos por dia, com a vazão média de efluente gerado igual a 30 m<sup>3</sup>/h. As amostras foram coletadas após o tanque de equalização (reservatório em chapas de alumínio corrugadas), o qual recebe contribuição do setor de limpeza (linha verde) e do setor de abate (linha vermelha) após passarem por peneira estática (0,75 mm), - conforme demonstrado na Fig. 1.

As amostras foram coletadas e transportadas em caixas térmicas até o laboratório, onde foram homogeneizadas e ensaiadas.

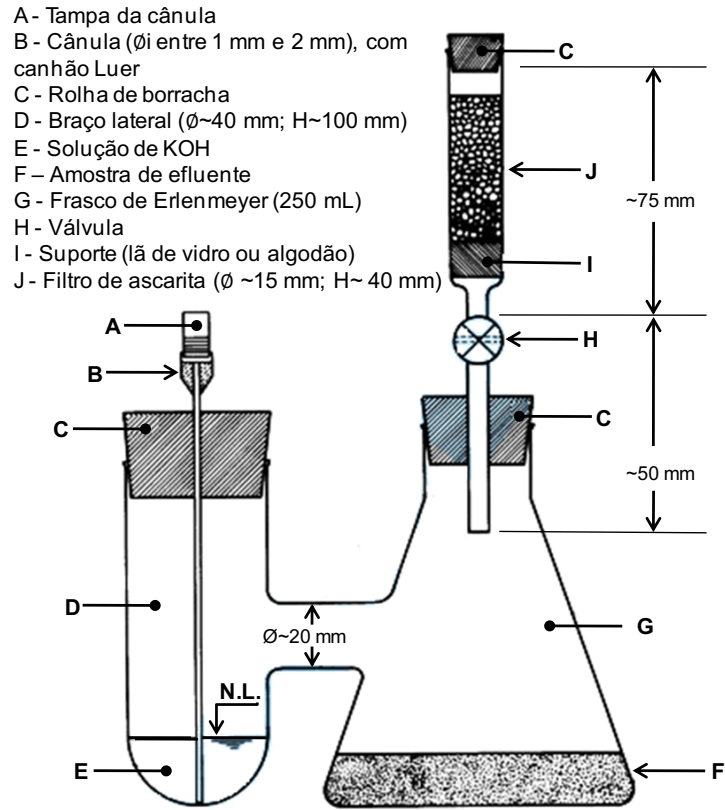
**Figura 1.** Diagrama de fluxo do sistema de tratamento do abatedouro objeto de estudo

### 3.2 Delineamento experimental:

A amostra coletada foi submetida a digestão em incubadora de DBO com temperatura do ambiente controlada (15, 17, 20, 25, 30 ou 35°C), em dois recipientes diferentes: a) um frasco de vidro de 250 mL semi-fechado, de onde foram retiradas alíquotas para os ensaios de tem-

peratura da massa líquida, DQO e DBO; b) um respirômetro de Bartha (Fig. 2), onde 100 mL de amostra foram deixados em regime estático pelo número de dias do experimento, servindo como base para se avaliar a respiração bacteriana e emissão de CO<sub>2</sub>. As incubações foram realizadas em triplicata.

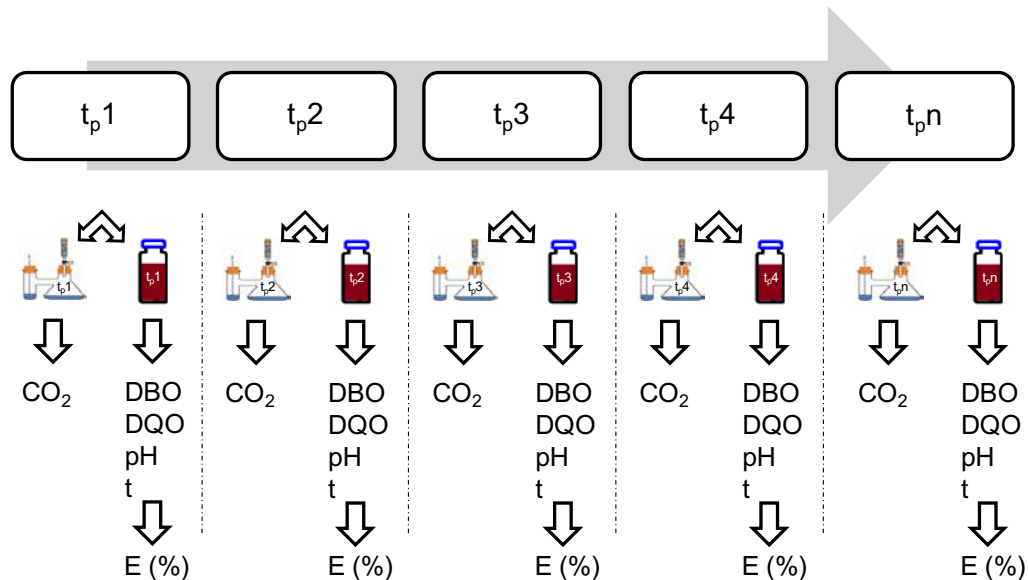
**Figura 2.** Respirômetro de Bartha esquematizado



Adaptado de: (Bartha e Pramer, 1965)

Na Fig. 3 pode ser mais bem entendido o delineamento experimental.

**Figura 3.** Delineamento experimental - esquemático



A adaptação da respirometria consistiu em colocar 100 mL de amostra de efluente líquido no respirômetro (vide item F, Fig. 2), onde originalmente se colocam amostras de solo. Além disso, a técnica original avalia o comportamento das bactérias aeróbias, enquanto no presente estudo a perfeita vedação do sistema, aliada à alta carga orgânica do efluente e à presença dos micro-organismos nativos, garantiu uma situação predominantemente de anaerobiose. Os respirômetros foram mantidos dentro de uma incubadora tipo BOD (TE 057, Tecnal) a temperatura constante. O CO<sub>2</sub> gerado no processo era absorvido por 15 mL de uma solução de KOH 0,4 N, disposta no reservatório contíguo ao da amostra, cujas atmosferas se comunicam. A cada intervalo de tempo pré-determinado, a solução receptora de CO<sub>2</sub> era totalmente extraída com o auxílio de uma seringa e transferida quantitativamente para um erlenmeyer, onde se acrescentavam 1,0 mL de solução de BaCl<sub>2</sub> e três gotas de solução indicadora de fenolftaleína. Procedia-se a titulação da mistura contra solução padronizada de HCl 0,1 N, comparando-se o resultado com a titulação de um respirômetro-controle, contendo água isenta de CO<sub>2</sub> em lugar da amostra. O cálculo da massa de CO<sub>2</sub> produzida a cada titulação é dado pela Eq. 1, adaptado da literatura (APHA, AWWA e WEF, 2012).

$$mCO_2 = [(A - B) \times 50] \times (0,044) \times (f \text{ HCl}) \quad (1)$$

onde:  $mCO_2$  = Massa de CO<sub>2</sub> emitido (mg);

A = Média dos volumes de HCl (mL) gastos na titulação dos brancos;

B = Média dos volumes de HCl (mL) gastos na titulação das amostras;

50 = Fator de conversão de  $neq_{CO_2}$  em  $n_{CO_2}$ , expressa em  $\mu\text{mol}$ ;

0,044 = Fator resultante da multiplicação de três outros fatores:

$10^{-6}$  = Fator de conversão para  $n_{CO_2}$ , de  $\mu\text{mol}$  para mol;

$MM_{CO_2} = 44$ , massa molar do CO<sub>2</sub> (g mol<sup>-1</sup>);

1000 = Fator de conversão de gramas para miligramas;

$f \text{ HCl}$  = Fator de correção da concentração real da solução de HCl.

O frasco de vidro contendo a amostra ensaiada no respectivo respirômetro era utilizado para que não se alterasse o volume da amostra da respirometria com as retiradas de alíquotas de amostra para os ensaios de DQO e DBO, realizados de acordo com os Métodos 5220 D e 5210 B, respectivamente, da literatura indexada (APHA, AWWA e WEF, 2012).

Após a titulação da solução básica, pôde-se calcular a concentração de CO<sub>2</sub> gerada pela amostra, em mg/L, dividindo-se o resultado obtido na Eq. 1 pelo volume da amostra de efluente, em litros (0,100 L).

O controle de temperatura da incubadora foi monitorado utilizando-se termo higrômetro digital (Incoterm), o qual fornece, além da temperatura pontual, as máximas e mínimas durante o período. Leituras diárias foram realizadas para garantir que nenhum evento pudesse ter alterado a temperatura dos ensaios.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Temperatura dos ensaios

Após o monitoramento da temperatura durante os ensaios, obtiveram-se os seguintes valores reais para as temperaturas programadas (Tabela 1):

**Tabela 1.** Valores de temperatura aferidos para os ensaios.

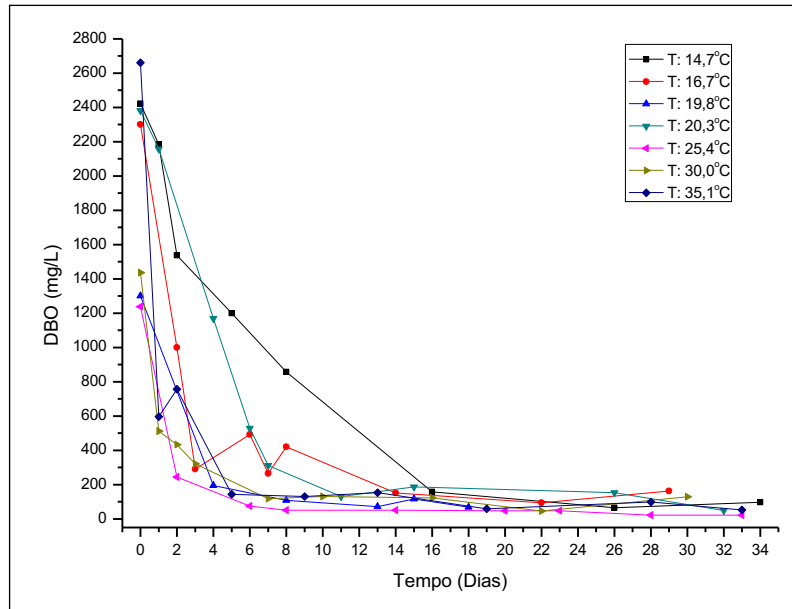
Temperatura programada (°C)	Temperatura média do período ± desvio padrão (°C)
15	14,7 ± 0,4
17	16,7 ± 0,2
20	20,3 ± 0,4
25	25,4 ± 0,4
30	30,0 ± 0,2
35	35,1 ± 0,2

#### 4.2 Remoção de DQO e DBO

As coletas de amostras (alíquotas) dos frascos reagentes foram realizadas em triplicata, porém homogeneizadas um único béquer antes das análises de DQO e DBO. A periodicidade foi

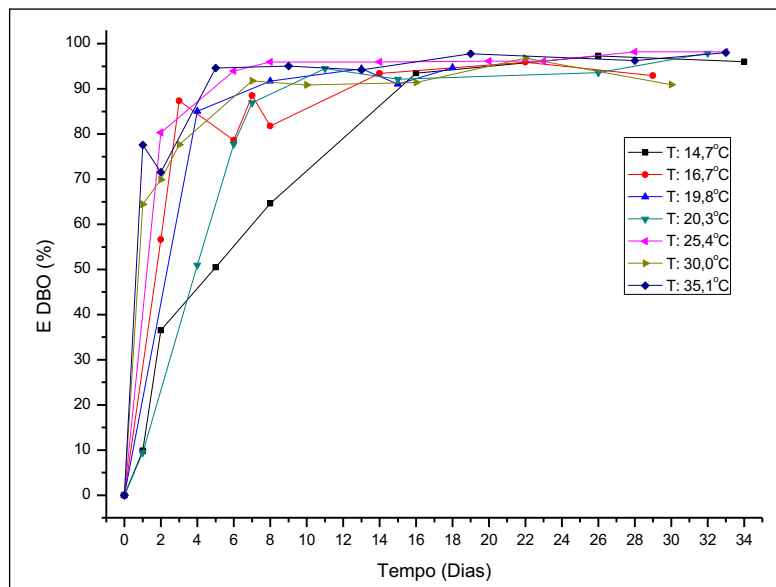
realizada concomitantemente aos ensaios com os respirômetros. Na Fig. 4 estão apresentados graficamente os resultados da redução de DBO em função das temperaturas médias ao longo do tempo nas campanhas validadas.

**Figura 4** – Resultados da redução de DBO (mg/L) das amostras do efluente em várias temperaturas médias ao longo do tempo



Na Fig. 5 estão apresentados graficamente os valores de eficiência acumulada de redução de DBO em função das temperaturas médias ao longo do tempo nas campanhas validadas.

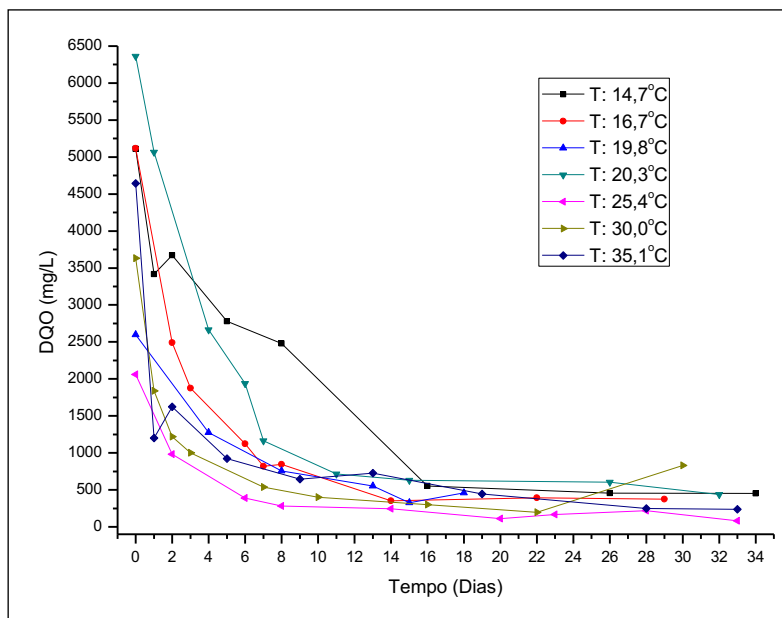
**Figura 5** – Resultados da eficiência acumulada de redução de DBO (em %) em várias temperaturas médias ao longo do tempo



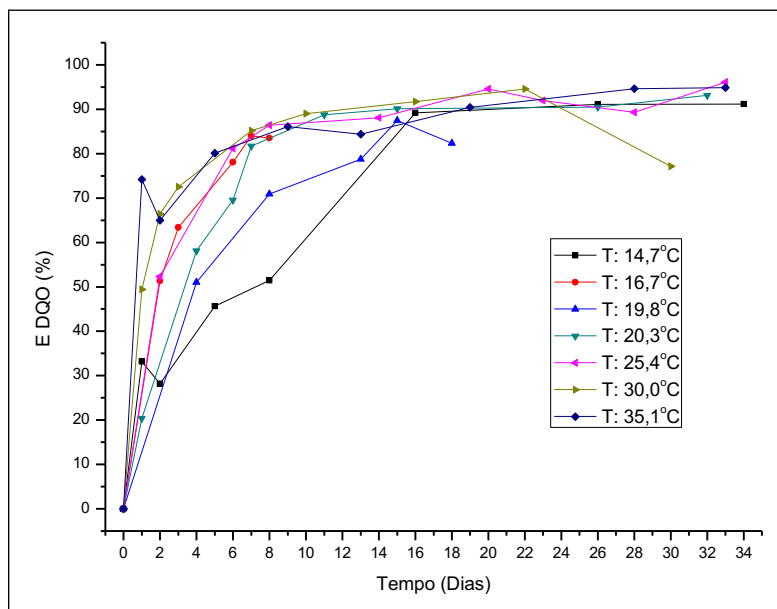
Na Fig. 6 estão apresentados graficamente os resultados da redução de DQO em função das temperaturas médias. Na Fig. 7 estão apresen-

tados graficamente os valores de eficiência acumulada de redução de DQO em função das temperaturas médias.

**Figura 6** - Resultados da redução de DQO (mg/L) das amostras do efluente em várias temperaturas médias ao longo do tempo



**Figura 7** - Resultados da eficiência acumulada de redução de DQO (em %) em várias temperaturas médias ao longo do tempo



Tanto para DBO como para DQO, a redução é influenciada pela temperatura, principalmente

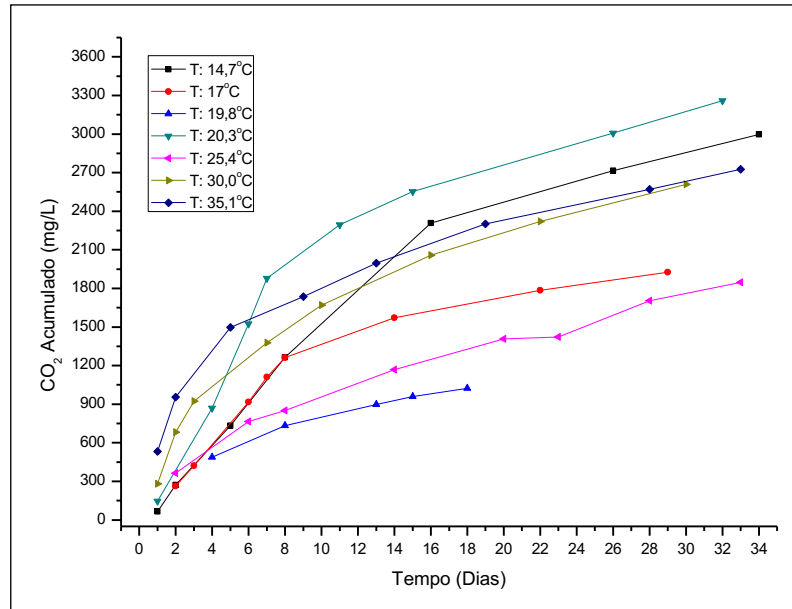
até a faixa de 20°C, onde notadamente a redução é menos acentuada na faixa de 20°C a 35°C.

As eficiências nas temperaturas de 15°C e 17°C vão se alinhar com as demais por volta do 16º dia, o que leva a deduzir que é o período de adaptação dos microrganismos.

#### 4.3 Eficiência na produção de CO<sub>2</sub> em função da temperatura

Na Fig. 8 está apresentada a representação gráfica dos valores de CO<sub>2</sub> acumulado em função do tempo para as temperaturas médias.

**Figura 8** - Produção de CO<sub>2</sub> acumulado em função do tempo para as temperaturas médias em amostras de efluente



O cálculo da eficiência de geração de CO<sub>2</sub> é proposto através da Eq. 2.

$$ECO_2 = \left( \frac{DQO_0}{CO_{2\text{ acum}} \right) \times 100 \quad (2)$$

onde: ECO<sub>2</sub> = eficiência na geração de CO<sub>2</sub>, (%);

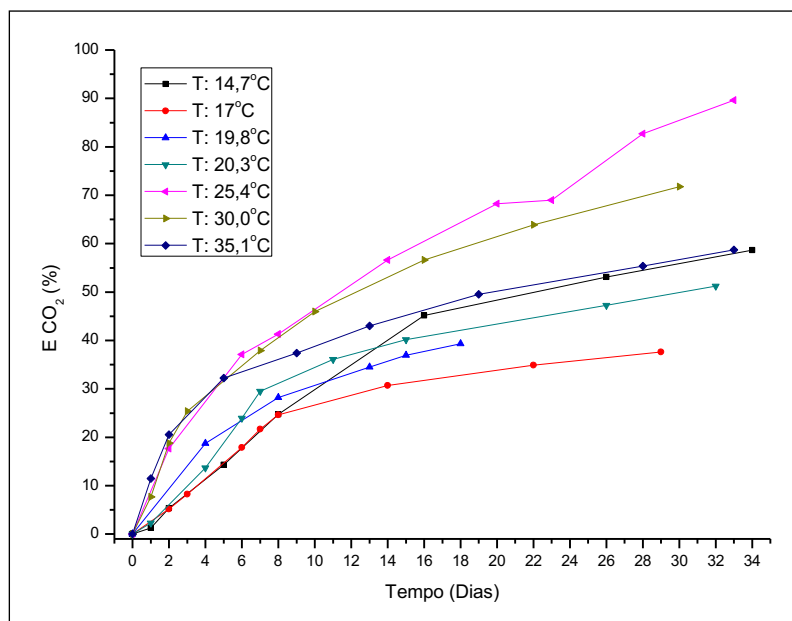
DQO<sub>0</sub> = concentração de DQO no efluente, (mg/L);

CO<sub>2</sub> Acum = valor de CO<sub>2</sub> gerado ao longo do tempo, (mg/L).

Na Fig. 9 está a representação gráfica dos valores de eficiência de produção de CO<sub>2</sub> acumulado, calculados conforme Eq. 1 para os respectivos valores médios de temperatura.



**Figura 9** - Resultados da eficiência de produção de CO<sub>2</sub> acumulado (em %) em função do tempo para valores médios de temperatura ambiente em amostras de efluente no respirômetro



A análise das curvas de eficiência na geração de CO<sub>2</sub> não deixa evidenciado um rendimento criterioso em que se possa, ao menos com essa quantidade de dados, prever um equacionamento para descrever o comportamento de emissão desse gás.

No entanto, é possível constatar 3 comportamentos distintos em função de faixas de temperatura, que aqui iremos denominar de:

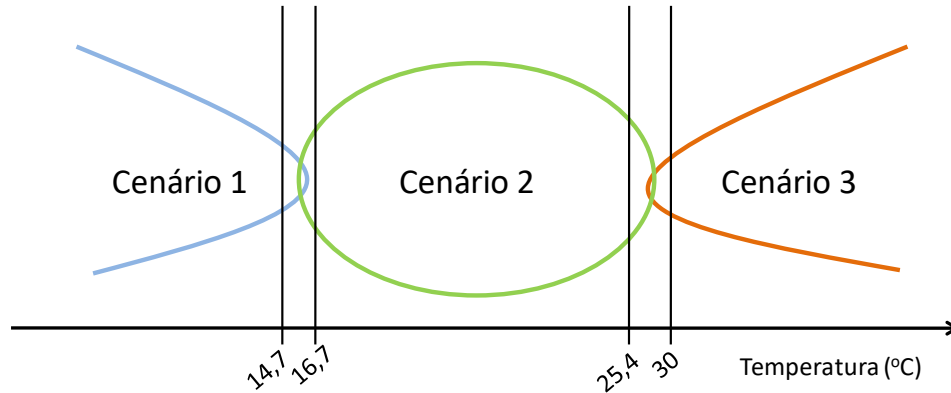
- Cenário 1: faixa de temperatura compreendida até uma temperatura intermediária entre 14,7°C e 16,7°C;
- Cenário 2: faixa de temperatura compreendida entre a linha de corte do Cenário 1 até a temperatura intermediária entre 25,4°C e 30°C;
- Cenário 3: faixa de temperatura compreendida acima da linha de corte do Cenário 2.

Essas segmentações se dão de forma hipotética, estipuladas através do comportamento diferen-

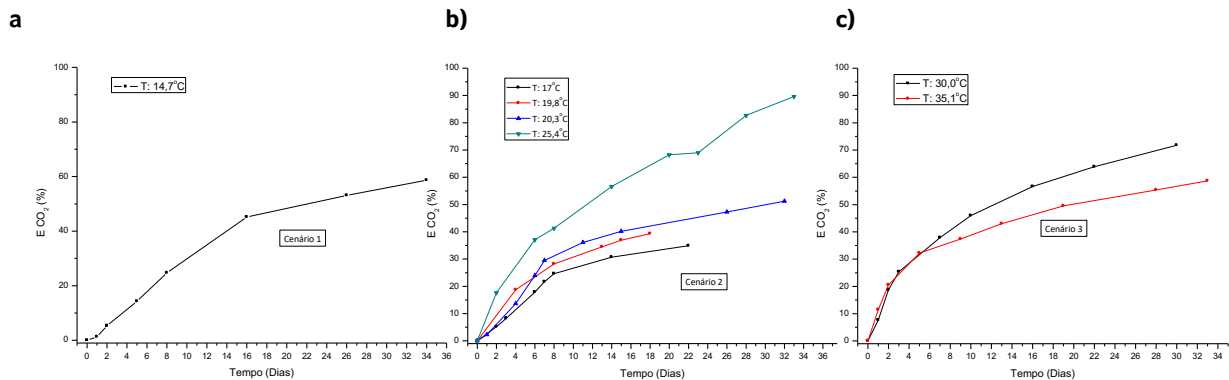
ciado de emissão de CO<sub>2</sub> entre essas faixas de temperatura. É notório que as condições ambientais referentes à temperatura ideal interferem na reação de produção de biogás e/ou outros componentes do balanço de massa da degradação da carga orgânica durante a transformação da mesma em outros produtos.

Provável é que exista uma temperatura de cisão de desempenho entre essas linhas de corte em função dos tipos de microrganismo, de forma que altere a eficiência de geração do gás CO<sub>2</sub> sem alterar proporcionalmente a eficiência de remoção de carga orgânica em termos de DBO. A carga orgânica removida, ao que tudo indica, transforma-se em outros produtos (gás, lodo ou escuma de sebo “croast fat”).

Na Fig. 10 está demonstrada esquematicamente a segmentação de comportamento/desempenho que ocorre na produção de CO<sub>2</sub> em função da temperatura.

**Figura 10** - Segmentação de comportamento/desempenho que ocorre na produção de  $\text{CO}_2$  em função da temperatura

Na Fig. 11 estão apresentadas as curvas de resultados da eficiência de produção de  $\text{CO}_2$  acumulado em função do tempo para valores médios de temperatura ambiente em amostras de efluente no respirômetro: a) Cenário 1; b) Cenário 2; c) Cenário 3.

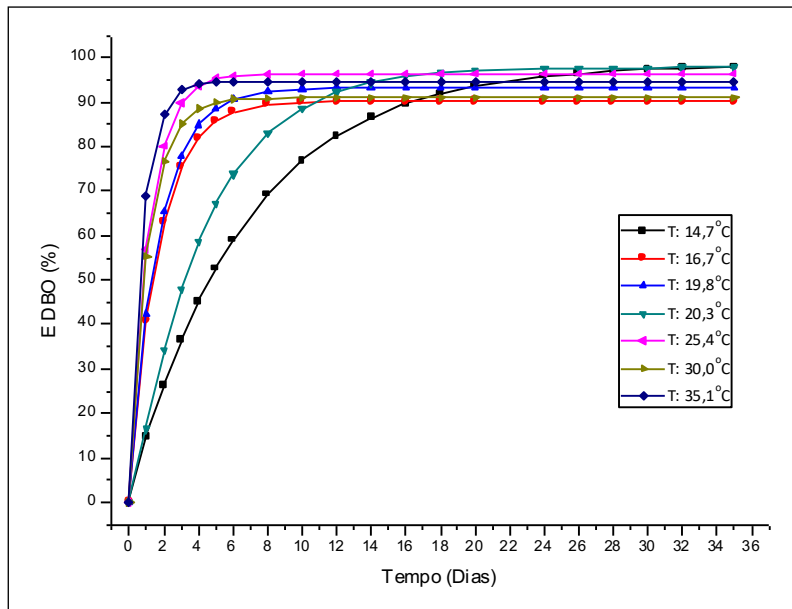
**Figura 11** - Resultados da eficiência de produção de  $\text{CO}_2$  acumulado em função do tempo para valores médios de temperatura ambiente em amostras de 100 mL de efluente no respirômetro – a) Cenário 1; b) Cenário 2; c) Cenário 3

#### 4.4 Equacionamento matemático

Para a eficiência de redução de carga orgânica em termos de DBO, o desempenho dos resultados nos experimentos permitiu equacionar os dados. Para realizar as curvas de regressão, foram avaliados os modelos não lineares logístico e assintótico de 1ª parametrização, onde o se-

gundo se adequou melhor aos resultados experimentais. Na Fig. 12 estão apresentados os gráficos de eficiência de redução de DBO ao longo do tempo em cada temperatura, resultantes dos dados das equações obtidas com os ajustes das curvas de regressão assintótica de 1ª parametrização, para encontrar equações que definam os comportamentos observados.

**Figura 12** - Eficiência de redução de DBO em várias temperaturas médias ao longo do tempo - Curvas obtidas através da aplicação das equações ajustadas através de regressão assintótica de 1ª parametrização.



Todas as equações de cada curva ajustada foram incorporadas em uma única, resultando na Eq. 3:

$$E_{DBO} = (96,58655 - 0,08886 \times T) - (99,48485 - 0,2034 \times T) \times (-0,07092 + 1,58557 \times 0,95842^T)^{t_p} \quad (3)$$

Onde:  $E_{DBO}$ : Eficiência de remoção de DBO (%);

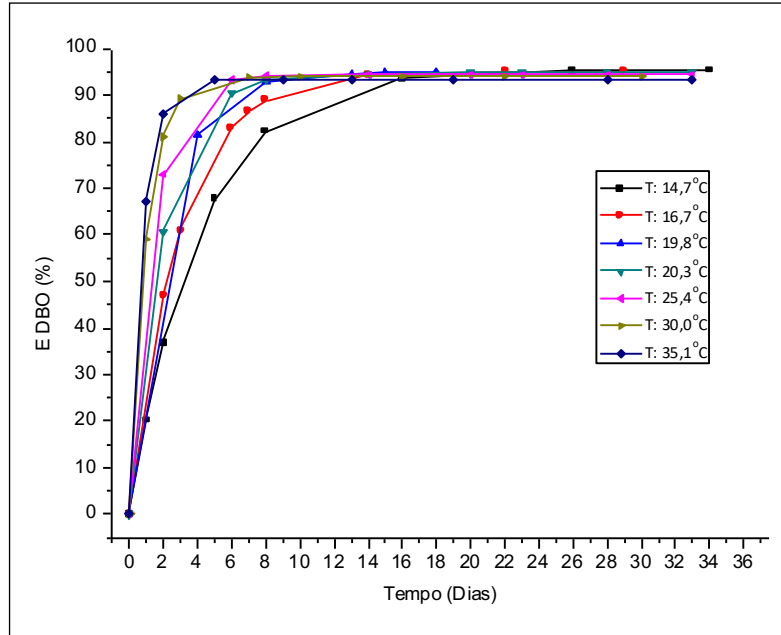
$T_p$ : Tempo de permanência (dias);

T: temperatura média do ambiente (°C)

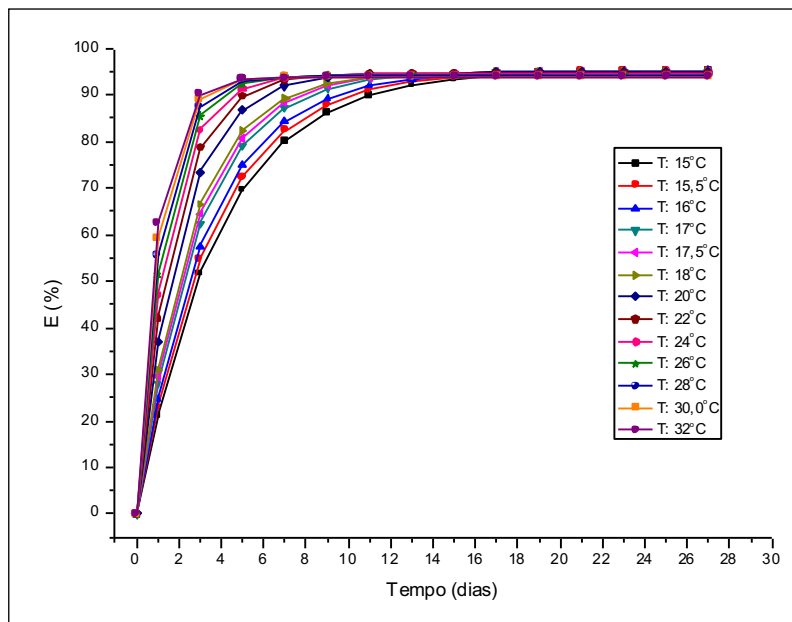
Na Fig. 13 está apresentado o gráfico com as curvas simuladas utilizando a Eq. 3 nos mesmos

períodos de tempo e temperaturas utilizados nos experimentos. Na Fig. 14 está apresentado o gráfico de simulação com diversas temperaturas aleatórias, para verificar o comportamento da equação ao se utilizar temperaturas diferentes das trabalhadas em laboratório.

**Figura 13** - Eficiência de redução de DBO em várias temperaturas médias ao longo do tempo - Simulação utilizando a Eq. 2 nas mesmas temperaturas e períodos de tempo utilizados nos experimentos



**Figura 14** - Eficiência de redução de DBO simuladas com várias temperaturas aleatórias ao longo do tempo - Simulação utilizando a Eq. 3



## 5 CONCLUSÕES

Os resultados simulados em laboratório utilizando água residuária de abatedouro de bovinos demonstram que é possível adaptar o método de respirometria de Bartha em efluentes líquidos como uma ferramenta para investigar a degradação anaeróbia. Por esta técnica, pode-se relacionar a emissão de CO<sub>2</sub> com a redução de carga orgânica no líquido em função da temperatura, demonstrando a cinética de indicadores de degradação anaeróbia de efluentes de abatedouro de bovinos em estado estacionário. Os organismos decompositores são influenciados pela faixa de temperatura adotada, resultando em comportamentos cinéticos diferentes, principalmente pela dificuldade na adaptação causada pelo regime estacionário.

## 6 AGRADECIMENTOS

Ao Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão da Universidade Estadual de Campinas (Faepex-Unicamp) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp - proc. 2014/17774-1) pelo auxílio financeiro.

## 7 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

## 8 REFERÊNCIAS

ALVAREZ, R.; LIDÉN, G. Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. **Renewable Energy**, v. 33, p. 726–734, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.05.001>

APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Washington (DC): American Public Health Association, 2012. ISBN: 087553287X.

BARTHA, R.; PRAMER, D. Features of a flask and method for measuring the persistence and biological effects of pesticides in soil. **Soil Science**, v. 100, n. 1, p. 68–70, 1965.

BAYR, S.; RANTANEN, M.; KAPARAJU, P.; RINTALA, J. Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of rendering plant and slaughterhouse wastes. **Bioresource Technology**, v. 104, p. 28–36, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.104>

BUSTILLO-LECOMPTE, C. F.; MEHRVAR, M. Treatment of actual slaughterhouse wastewater by combined anaerobic-aerobic processes for biogas generation and removal of organics and nutrients: An optimization study towards a cleaner production in the meat processing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 278–289, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.060>

CHAN, Y. J.; CHONG, M. F.; LAW, C. L.; HASSELL, D. G. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. **Chemical Engineering Journal**, v. 155, p. 1–18, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.06.041>

HAMZA, R. A.; IORHEMEN, O. T.; TAY, J. H. Advances in biological systems for the treatment of high-strength wastewater. **Journal of Water Process Engineering**, v. 10, p. 128–142, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.02.008>

HARRIS, P. W.; MCCABE, B. K. Review of pre-treatments used in anaerobic digestion and their potential application in high-fat cattle slaughterhouse wastewater. **Applied Energy**, v. 155, p. 560–575, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.026>

MCCABE, B. K.; HARRIS, P.; ANTILLE, D. L.; SCHMIDT, T.; LEE, S.; HILL, A.; BAILLIE, C. Toward profitable and sustainable bioresource management in the Australian red meat processing industry: A critical review and illustrative case study. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 0, n. 0, p. 1–25, 2020. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1712310>

US EPA. Technical development document for the final effluent limitations guidelines and standards for the meat and poultry products point source category (40 CFR 432) - EPA-821-R-04-011. **United States Environmental Protection Agency**. Washington (DC): 2004.