

## **Compostagem de resíduos orgânicos domésticos em reator: um estudo sobre a formação de CH<sub>4</sub> NH<sub>3</sub> e a influência do isolamento térmico**

### **Domestic organic waste reactor composting: a study on the formation of CH<sub>4</sub> NH<sub>3</sub> and the influence of thermal insulation**

DOI:10.34117/bjdv7n9-498

Recebimento dos originais: 07/08/2021

Aceitação para publicação: 28/09/2021

#### **Karine Marcondes da Cunha**

Mestre em Química Aplicada

Docente no Instituto Federal de Santa Catarina e Pós Graduanda Doutorado em Química na Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Av. Expedicionários, 2150 - Campo da Água Verde, Canoinhas – SC  
Karine.marcondes@ifsc.edu.br

#### **João Victor Tischler Nizer**

Pós Graduando - Mestrado em Tecnologia em Alimentos

Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Av. General Carlos Cavalcanti, 4748 – Uvaranas, Ponta Grossa – PR  
joaovictortischler@gmail.com

#### **Alexandre Augusto Alberto Moreira de Abreu**

Mestre em Ciência da Computação

Docente no Instituto Federal de Santa Catarina  
Av. Expedicionários, 2150 - Campo da Água Verde, Canoinhas – SC  
alexandre.abreu@ifsc.edu.br

#### **Sandro Xavier de Campos**

Doutorado em Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento)

Docente na Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Av. General Carlos Cavalcanti, 4748 – Uvaranas, Ponta Grossa – PR  
Campos@uepg.br

### **RESUMO**

A compostagem em reator vem se mostrando uma alternativa promissora no tratamento de resíduos orgânicos domésticos. Neste trabalho avaliou-se a influência do isolamento térmico no funcionamento do reator e a liberação de NH<sub>3</sub> e CH<sub>4</sub> ao longo do processo. Para isso, construiu-se dois reatores, sendo que em um deles utilizou-se isolamento térmico. Para o monitoramento do processo de compostagem, realizou-se análises de temperatura e umidade. Para verificar a evolução das etapas de transformações da matéria orgânica durante o tempo analisou-se a evolução na liberação dos gases NH<sub>3</sub> e CH<sub>4</sub>. Os resultados de temperatura, umidade, e emissão dos gases NH<sub>3</sub> e CH<sub>4</sub> mostraram distinção no processo de decomposição entre as partes superiores e inferiores dos reatores, com características aeróbicas (superior) e anaeróbicas (inferior), evidenciando um sistema facultativo. O reator com isolamento térmico apresentou menores diferenças de temperatura e maiores valores de umidade nos pontos analisados.

**Palavras-chave:** Biodegradação, Reator facultativo, Trocas térmicas, Gás amônia, Gás metano.

## ABSTRACT

Reactor composting has shown itself to be a promising alternative to domestic organic waste treatment. In this work, the influence of thermal insulation on the operation of the reactors and the release of  $\text{NH}_3$  and  $\text{CH}_4$  during the process was evaluated. For this, two reactors were built, one of which used thermal insulation. For monitoring the composting process, temperature and humidity analysis were carried out. To verify the transformation evolution stages of organic matter over time, the evolution in the release was analysed  $\text{NH}_3$  and  $\text{CH}_4$  gases. The results of temperature, moisture and emission  $\text{NH}_3$  and  $\text{CH}_4$  showed a distinction in the decomposition process between the upper and lower parts of the reactors, with aerobic (upper) and anaerobic (lower) characteristics, showing a facultative system. The thermally insulated reactor showed lower temperature differences and higher humidity values at the points analysed.

**Keywords:** Biodegradation, Facultative reactor, Thermal exchanges, Ammonia gas. Methane gas.

## 1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, a geração de resíduos tornou-se um grande problema ambiental, desses mais de 50% são resíduos sólidos orgânicos, os quais podem ser tratados por compostagem e gerar produtos estabilizados (Silva, 2017).

Os resíduos orgânicos domésticos, são geralmente dispostos em aterros sanitários ou lixões, gerando grande problemas de gestão. Estudos tem demonstrado a importância crescente da compostagem doméstica em relação aos parâmetros técnicos e científicos (Campos, Ressetti e Zittel, 2014). Uma solução para os resíduos orgânicos seria realizar a compostagem de forma doméstica e desta forma, reduzindo a necessidade de instalações de alto custo ou grandes infraestruturas (Ricci, Otero e Romero, 2018; Vasconcelos *et al.*, 2021).

Há diversas maneiras de se realizar a compostagem de resíduos orgânicos domésticos, no entanto quando ela é realizada em reator pode processar grandes quantidades de resíduos sem ocupar tanto espaço quanto o método de leira (Iyengar e Bhave, 2006)).

Diferentes tipos de reatores (aeróbicos, anaeróbicos e facultativos) tem sido estudado. O reator facultativo com trocas gasosas de forma passiva tem se mostrado uma forma eficiente de compostagem, aliando atributos dos reatores aeróbicos e anaeróbicos no mesmo processo.

O reator facultativo apresenta região de decomposição aeróbica na parte superior e anaeróbica na parte inferior, resultando em um composto com maior estabilização.

Ainda apresenta as vantagens de não precisar de revolvimento da massa de compostagem, não apresentar maus odores, não atrair pragas como ratos, moscas e baratas e possui baixo custo de produção e manutenção, podendo, portanto, ser desenvolvido em qualquer ambiente, mesmo próximos a restaurantes e residências (Campos, Ressetti e Zittel, 2014; Cunha *et al.*, 2018; Zittel *et al.*, 2020).

Campos *et al.* (2014), Cunha *et al.*, 2018 e Zittel *et al.*, 2018 avaliaram a compostagem de diversos resíduos utilizando diferentes reatores (tamanho, formato e design) e após analisar dados de temperatura e pH concluíram que os mesmos apresentaram características de um reator facultativo. Esses trabalhos não avaliaram a emissão de gases, entretanto durante a compostagem, a emissão de amônia ( $\text{NH}_3$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ) podem caracterizar as condições do processo (aeróbio ou anaeróbio).

O  $\text{CH}_4$  é o subproduto das reações de respiração microbiana que ocorrem na ausência de oxigênio e em várias etapas. Inicialmente sólidos voláteis são decompostos, posteriormente ocorre a transformação desses compostos em acetato, hidrogênio e  $\text{CO}_2$  e na última etapa o acetato é convertido em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  (McMAHON *et al.*, 2001). Já o  $\text{NH}_3$  passa pelo processo de Mineralização e nitrificação, que são reações aeróbias, referem-se ao aspecto microbiano onde o nitrogênio orgânico (nitrogênio complexado com carbono, e. g. proteínas) é decompostos até a liberação de  $\text{NH}_3$ , posteriormente é transformado em  $\text{NH}_4$ , e depois  $\text{NO}_3^-$  (Bremner e Blackmer, 1978). Portanto, avaliar a liberação de  $\text{CH}_4$  e  $\text{NH}_3$  ao longo do processo pode ampliar a compreensão da biodegradação ocorrida no reator (Ermolaev *et al.*, 2014).

Outro aspecto importante no estudo de reatores e que ainda carece de mais estudos é a troca energética (na forma de calor) que ocorre entre o reator e o ambiente. A transferência de calor através da parede do reator possivelmente altera as variações de temperatura do processo de compostagem, podendo chegar a diferenças entre 30% e 90%, dependendo da eficácia do isolamento térmico (Alkokaik *et al.*, 2018; Wang, Niu e Ai, 2016).

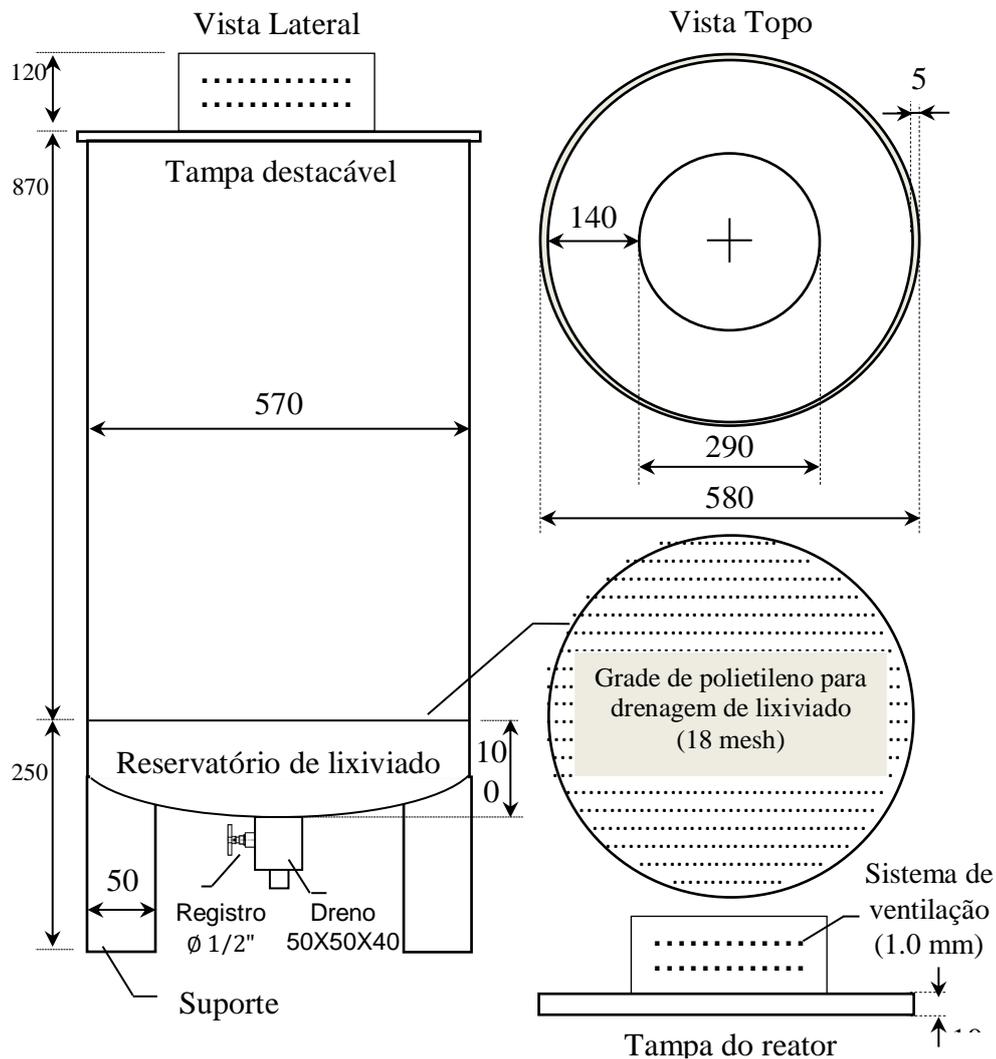
Assim, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a influência de isolamento térmico em reatores e verificar evolução na geração de  $\text{NH}_3$  e  $\text{CH}_4$ , durante o processo de compostagem.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 MONTAGEM DOS REATORES

Os dois reatores utilizados no trabalho foram adaptados do modelo proposto por Zittel (2014). A Figura 1 apresenta o desenho esquemático do reator sem isolamento térmico (Reator A).

Figura 1: Esquema do reator sem isolamento térmico (Reator A). Todas as dimensões estão em milímetros



Fonte: Zittel, 2014.

Para o reator com isolamento térmico (Reator B), seguiu-se o modelo apresentado na figura 1 e revestiu-se suas paredes com uma camada de 10 mm de espessura de polietileno expandido, associado a um isolante de alumínio de 1 mm de espessura na parte exposta ao ambiente (camada externa). Os dois reatores foram preenchidos em uma única

batelada com a homogeneização dos seguintes resíduos: 27,1 Kg tabaco de cigarro contrabandeado (adquiridos da Receita Federal do Brasil, em atividade de apreensão) 27,1 Kg de cepilho e 27,1 Kg resíduos de alimentos (composto por: carnes 4%, leguminosas 7%, cereais 10%, tubérculos 17%, folhas 26% e frutos 36%). A mistura de resíduos apresentou inicialmente a razão C/N de 21, pH de 5,5 e umidade de 75,36%.

## 2.2 ANÁLISE DE TEMPERATURA E EMISSÃO DE GASES

Os dados de temperatura de cada reator foram medidos em dois pontos. O primeiro ponto de medição estava a 10 cm e o segundo ponto a 70 cm, ambos em relação à superfície do composto. Os sensores de temperatura foram posicionados em contato com o composto e equidistante da parede do reator. Além desses pontos de leitura de temperatura, um outro sensor foi adicionado externo aos reatores para coletar os dados de temperatura ambiente.

Para a aquisição dos dados de emissão dos gases foram utilizados, para cada reator, dois sensores: O sensor MQ-2 para o CH<sub>4</sub> (composto por um micro tubo cerâmico de óxido de alumínio e camada sensível de dióxido de estanho) (ELECTRONICS, 2020a) e o sensor MQ-135 para o NH<sub>3</sub> (também composto por um micro tubo de cerâmica, seguido de uma camada sensível de dióxido de estanho), (ELECTRONICS, 2020b). Os sensores de gases foram posicionados dentro do reator, porém sem contato com o composto e a uma distância de 20 cm da superfície do composto (posicionados no sistema de ventilação – figura 1).

Todos os sensores (temperatura e gases) estavam interligados a uma placa Raspberry Pi 3, um dispositivo compacto voltado à execução de tarefas de automatização Raspberry Pi ©(2019). Todas as medidas (temperatura e gases), de ambos os reatores, foram aferidas de forma automatizada a cada 15 minutos durante 70 dias.

## 2.3 UMIDADE

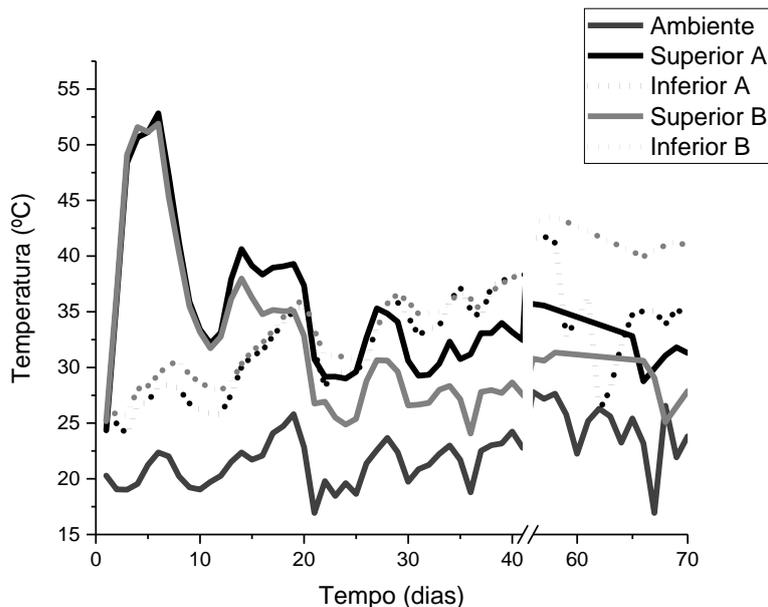
As análises de umidade foram realizadas pelo método da secagem em estufa, as amostras foram recolhidas das partes superior e inferior dos reatores (a parte superior foi amostrada a 10 cm e a parte inferior a 70 cm, ambos em relação à superfície do composto). As análises ocorreram no primeiro e último dia do processo de compostagem (Fialho *et al.*, 2010).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 TEMPERATURA

A figura 2 apresenta os resultados da temperatura média diária medida nos reatores A e B nas partes superior e inferior, bem como a temperatura média diária do ambiente.

Figura 2: gráfico da temperatura média diária versus tempo para cada reator (fase superior e inferior) e para a temperatura ambiente



Observa-se na figura 2 que na parte superior dos reatores houve o aumento da temperatura média (em relação à ambiente) nos primeiros 10 dias do processo de compostagem, demonstrando a fase termófila. Essa fase é caracterizada pelo aumento rápido e temperatura acima de 40°C (MARGARITIS et al., 2017), isso se deve a alta disponibilidade de nutrientes, alta taxa de oxigenação, umidade adequada, propiciando um ambiente ótimo para o crescimento microbiano responsável pela decomposição, sendo a degradação dos resíduos rápida e com grande liberação de energia (Bernal *et al.*, 2017).

Ainda na parte superior nota-se que entre os dias 10 e 60 a temperatura média em ambos os reatores ficou abaixo de 40°C, o que indica a fase mesófila (Margaritis *et al.*, 2017), nesse período o consumo de nutrientes biodisponíveis para os microrganismos reduzem, diminuindo também a atividade metabólica (Alkoik *et al.*, 2018). Após a fase mesófila, a temperatura apresenta uma tendência de aproximar-se da temperatura ambiente, indicando então a fase de estabilização (Bernal *et al.*, 2017). Os dois reatores

avaliados na parte superior apresentam características de decomposição aeróbia, pois atingem altas temperaturas nos primeiros dias do processo e posterior diminuição da temperatura até alcançar a temperatura ambiente (Iyengar e Bhave, 2006))

Analisando as partes inferiores, no reator A, a fase termófila, com temperatura média acima de 40°C ocorreram provavelmente a partir do 53° dia (infelizmente houve problemas no envio dos dados entre os dias 42 e 53 devido a falha no sistema automatizado), atingindo a temperatura máxima de 41,8°C, após esse período a temperatura média reduz, evidenciando a fase mesófila e posterior estabilização (BERNAL et al., 2017). No reator B (com isolante térmico) a temperatura média atinge a fase termófila possivelmente no 53° dia e permanece nessa fase até o 70° dia, possuindo a maior temperatura 43,5°C no 58° dia. As partes inferiores de ambos os reatores apresentam características de digestão anaeróbia, pois apresentam uma fase mesófila inicial de maior duração para posteriormente atingir a fase termófila, que também ocorre em menores temperaturas quando comparada ao processo aeróbio (Walker, Charles e Cord-Ruwisch, 2009).

### 3.2 UMIDADE

A Tabela 1 apresenta os valores de umidades obtidos nos reatores.

Tabela 1: Umidade obtida ao início e ao final do processo de compostagem nos reatores A e B, tanto para as fases superior como inferior.

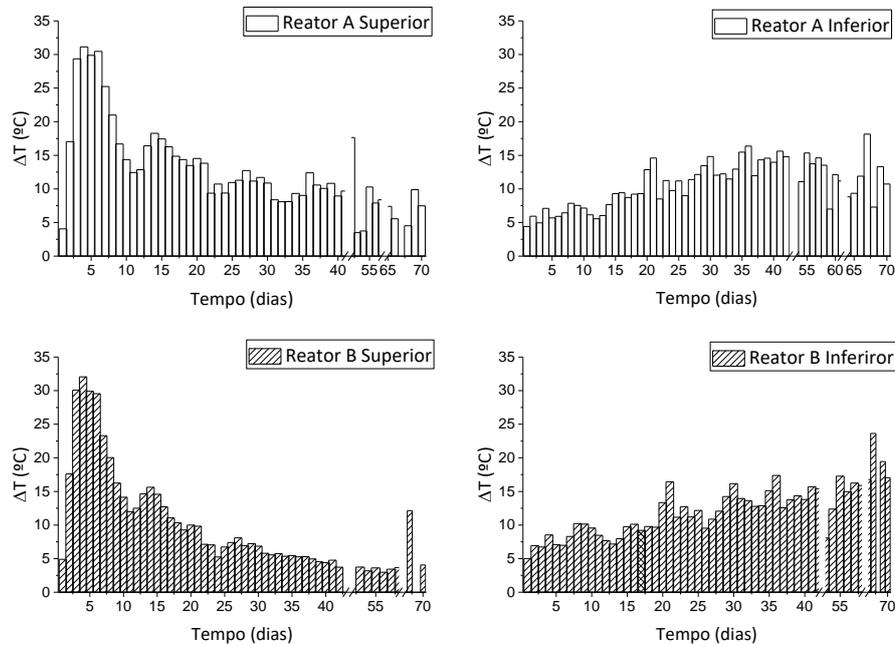
		<b>Reator A</b>	<b>Reator B</b>
<b>Início</b>	Umidade parte superior (%)	73,60	74,85
	Umidade parte inferior (%)	76,17	76,75
<b>Fim</b>	Umidade parte superior (%)	50,52	69,13
	Umidade parte inferior (%)	60,69	70,28

Observa-se que ambos os reatores, tanto no início como no final do processo de compostagem, há maior umidade na parte inferior quando comparada com a superior, a alta umidade dificulta as trocas gasosas, diminuindo a captação do oxigênio e favorece a degradação anaeróbica (Onwosi *et al.*, 2017). Em menores valores de umidade, o que acontece na parte superior dos reatores, é propiciado as trocas gasosa, favorecendo um processo de compostagem aeróbio (Richard *et al.*, 2002). À vista disso os resultados apresentados evidenciam a atividade aeróbia na parte superior e atividade anaeróbia na parte inferior de ambos os reatores.

### 3.3 INFLUÊNCIA DO ISOLAMENTO TÉRMICO

A figura 3 apresenta a diferença entre a temperatura média diária do interior do reator e a temperatura média diária do ambiente.

Figura 3: Diferença de Temperatura ( $\Delta T$ ) entre parte interna do Reator e a Temperatura Ambiente para os reatores A (parte superior e inferior) e reator B (parte superior e inferior)



Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** pode-se observar que nas partes superiores a diferença de temperatura nos primeiros 10 dias (fase termófila) é muito próxima entre os reatores, no entanto após esse período há uma redução, sendo os menores valores o do reator B. Nas partes inferiores as diferenças de temperatura em ambos os reatores seguem muito próximas.

Os reatores analisados possuem trocas gasosas de forma passiva na parte superior, o que favorece as formas convectivas de perda de calor. O reator A (sem isolante térmico) possui maiores perdas em comparação ao reator B (com isolante térmico) por apresentar maiores valores de diferença de temperatura entre a parte superior do reator e a ambiente (Alkoaik *et al.*, 2018).

Os dados de umidade (tabela 1) mostraram que o valor para o reator A na parte superior é, aproximadamente, 4 vezes menor se comparado com o valor da parte superior do reator B ao longo do processo. Já na parte inferior, o valor de umidade do reator A foi, aproximadamente, 2,4 vezes menor que do reator B. Segundo (Wang, Niu e Ai, 2016) a

redução da umidade está associada a perda de calor latente, o que evidencia a maior troca de calor por essa forma no reator A.

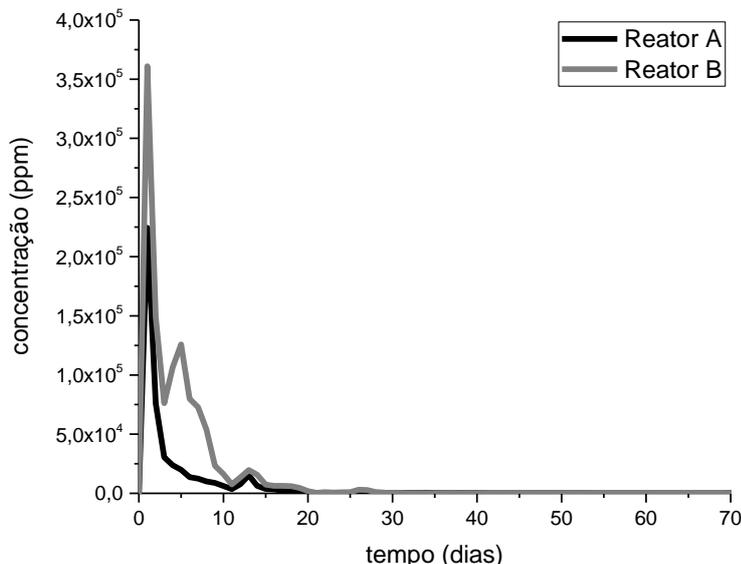
Na parte superior dos reatores, a forma convectiva é a majoritária, tendo, portanto, maior influência nas diferenças de temperatura (consequentemente também nos valores de umidade). O reator A apresenta menor umidade na parte superior e como a água apresenta valor de calor específico elevado (funcionando como um regulador térmico), as maiores diferenças de temperaturas foram observadas nesse reator. Entretanto, as outras trocas de calor (condutiva e irradiativa) estão presentes no processo e, devido ao isolamento térmico presente no reator B, houve comportamento distinto entre  $\Delta T$  dos reatores A e B na parte superior.

Na parte inferior a ação da perda de calor convectiva é reduzida, mas há ainda trocas através da parede do reator (Wang, Niu e Ai, 2016). Considerando que a parte inferior do reator possui maior umidade ao longo do processo, os valores de temperatura da parte inferior são menores que os apresentados na parte superior. A utilização do isolamento térmico no reator B tem a função de dificultar a troca de calor que ocorre pela parede na forma condutiva e irradiativa. Na parte inferior, a forma condutiva é majoritária e houve menos perda de umidade pelo reator B, o que corrobora com a menor troca de calor esperada.

### 3.4 GÁS METANO (CH<sub>4</sub>)

A figura 4 demonstra a variação do CH<sub>4</sub> durante o processo de compostagem, para os reatores A e B.

Figura 4: Variação da concentração do gás metano ( $\text{CH}_4$ ) durante o processo de compostagem analisado, para os reatores A e B.



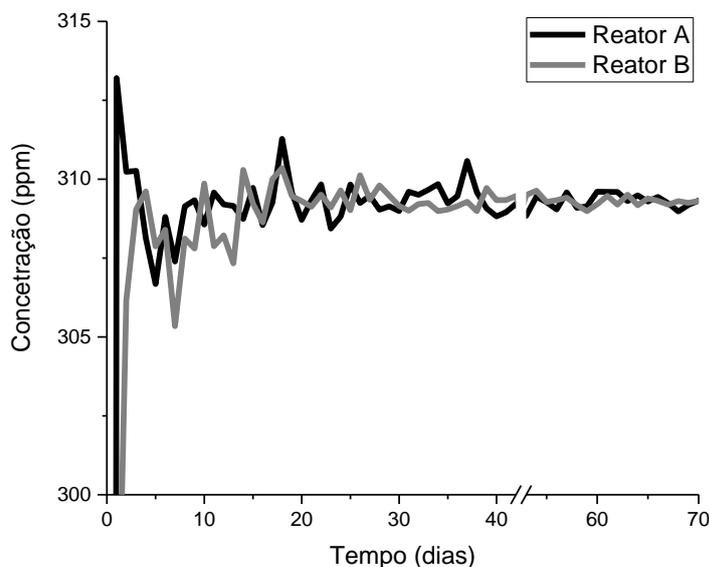
Observa-se que em ambos os reatores há um pico da liberação do  $\text{CH}_4$  nos primeiros 10 dias, após esse período a concentração do gás é reduzido para valores que tendem a 0. No reator B há uma maior liberação do  $\text{CH}_4$  quando comparado ao reator A, provavelmente devido a maior umidade deste reator (o que dificulta as trocas gasosas e favorece a decomposição anaeróbia).

Juntamente com as maiores liberações de  $\text{CH}_4$  (figura 4), tem-se as maiores temperaturas (figura 2) para ambos os reatores. Segundo Beck-Friis *et al.* (2000) e Beck-Friis *et al.* (2003) altas concentrações de  $\text{CH}_4$  ocorrendo juntamente com altas temperaturas são indicativos de que houveram degradações anaeróbica e aeróbia transcorrendo simultaneamente. Dessa forma é observado, comportamento facultativo nos reatores.

### 3.5 GÁS AMÔNIA ( $\text{NH}_3$ )

A figura 5 demonstra a variação da concentração do gás  $\text{NH}_3$  para ambos reatores.

Figura 5: variação do gás  $\text{NH}_3$  durante os 70 dias analisados no processo de compostagem em reator.



Observando-se a figura 5 verifica-se que há um aumento rápido do  $\text{NH}_3$  nos primeiros dias de compostagem para ambos os reatores, sendo pouco mais acentuado no reator A. Após 5 dias ocorre a oscilação do gás e as concentrações do gás estabilizam após 20 dias próximo a 310 ppm.

Os resultados avaliados nos reatores indicam o processo de amonificação, que ocorreu no início da compostagem, juntamente com a fase termofílica (figura 2) o que é característico da decomposição aeróbica, pois nas primeiras etapas do processo de compostagem os materiais proteicos são decompostos até a liberação de  $\text{NH}_3$ , que posteriormente diminui devido à volatilização e assimilação e nitrificação de  $\text{NH}_4^+$  (Cáceres, Malinska e Marfã, 2018).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises de liberação dos gases  $\text{CH}_4$  e  $\text{NH}_3$  ao longo do processo de decomposição, conjuntamente com a aferição dos dados de temperatura e umidade possibilitaram constatar o caráter facultativo do processo de decomposição em ambos os reatores analisados.

A adição do isolamento térmico no reator B parece ter influenciado as trocas energéticas, com menores diferenças de temperatura, em especial na forma condutiva. Como consequência o reator B apresentou, em relação ao reator A, maior umidade nos

pontos analisados e maior liberação de CH<sub>4</sub>. Assim, pode-se concluir que a influência do isolamento térmico não exclui o caráter facultativo do processo de decomposição.

### **AGRADECIMENTOS**

Agradecimento ao prof. MSc Mario Augusto Camargo por toda ajuda prestada e a Receita Federal por disponibilizar o cigarro contrabandeado.

## REFERÊNCIAS

ALKOAİK, F. N. *et al.* Energy Analysis of a Rotary Drum Bioreactor for Composting Tomato Plant Residues. *Energies*, v. 11, n. 2, p. 449, 2018.

BECK-FRIIS, B. *et al.* FORMATION AND EMISSION OF N<sub>2</sub>O AND CH<sub>4</sub> FROM COMPOST HEAPS OF ORGANIC HOUSEHOLD WASTE. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 62, n. 3, p. 317–331, 2000.

BECK-FRIIS, B. *et al.* Composting of Source-Separated Household Organics At Different Oxygen Levels: Gaining an Understanding of the Emission Dynamics. *Compost Science & Utilization*, v. 11, n. 1, p. 41–50, 2003.

BERNAL, M. P. *et al.* Current Approaches and Future Trends in Compost Quality Criteria for Agronomic, Environmental, and Human Health Benefits. *In: Advances in Agronomy*. [s.l: s.n.]. p. 144–217.

BREMNER, J. M. ; BLACKMER, A. M. Nitrous oxide: Emission from soils during nitrification of fertilizer nitrogen. *Science*, v. 199, n. 4326, p. 295–296, 1978.

CÁCERES, R.; MALINSKA, K.; MARFÀ, O. Nitrification within composting: A review. *Waste Management*, v. 72, p. 119–137, 2018.

CAMPOS, S. X.; RESSETTI, R. R.; ZITTEL, R. Monitoring and characterization of compost obtained from household waste and pine sawdust in a facultative reactor by conventional and spectroscopic analysis. *Waste Management & Research*, v. 32, n. 12, p. 1186–1191, 2014.

COPYRIGHT RASPBERRY PI. Compute Module 3+ Datasheet.

CUNHA, K. M. DA *et al.* TREATMENT OF SMUGGLED CIGARETTE TOBACCO AND FOOD SOLID WASTE IN A 2000 L FACULTATIVE REACTOR. *Detritus*, v. In Press, n. 0, p. 1, 13 nov. 2018.

ELECTRONICS, H. TECHNICAL DATA MQ-2 GAS SENSOR.

\_\_\_\_. TECHNICAL DATA MQ-135 GAS SENSOR.

ERMOLAEV, E. *et al.* Greenhouse gas emissions from home composting in practice. *Bioresource Technology*, v. 151, p. 174–182, 2014.

FIALHO, L. L. *et al.* INTERFERÊNCIA DA LIGNINA NA QUANTIFICAÇÃO DE RADICAIS LIVRES NO PROCESSO DE COMPOSTAGEM. *Química Nova*, v. 33, n. 2, p. 364–369, 2010.

IYENGAR, S. R.; BHAVE, P. P. In-vessel composting of household wastes. *Waste Management*, v. 26, p. 1070–1080, 2006.

MARGARITIS, M. *et al.* Improvement of home composting process of food waste using different minerals. *Waste Management*, v. 73, p. 87–100, 2017.

MCMAHON, K. D. *et al.* Anaerobic Codigestion of Municipal Solid Waste and Biosolids

Under Various Mixing Conditions II: Microbial Population Dynamics. *Water Research*, v. 35, n. 7, p. 1817–1827, 2001.

ONWOSI, C. O. *et al.* Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Management*, v. 190, p. 140–157, 2017.

RICCI, M.; OTERO, G. G. P.; ROMERO, F. Roteiro para aproveitamento dos resíduos orgânicos. *Albrepe*, 2018.

RICHARD, T. L. *et al.* Moisture Relationships in Composting Processes. *Compost Science & Utilization*, v. 10, n. 4, p. 286–302, 2002.

SILVA, S. P. NA ORGANIZAÇÃO COLETIVA DE CATADORES DE MATERIAL RECICLÁVEL NO BRASIL: DILEMAS E POTENCIALIDADES SOB A ÓTICA DA ECONOMIA SOLIDÁRIA. IPEA - Instituto de Pesquisa Economica e Aplicada., 2017.

VASCONCELOS, O. L. S. *et al.* Métodos de compostagem doméstica de materiais orgânicos produzidos em ambiente urbano. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 4, p. 40341–40353, 2021.

WALKER, L.; CHARLES, W.; CORD-RUWISCH, R. Comparison of static, in-vessel composting of MSW with thermophilic anaerobic digestion and combinations of the two processes. *Bioresource Technology*, v. 100, p. 3799–3807, 2009.

WANG, Y.; NIU, W.; AI, P. Assessing thermal conductivity of composting reactor with attention on varying thermal resistance between compost and the inner surface. *Waste Management*, v. 58, p. 144–151, 2016.

ZITTEL, R. ; *et al.* Availability of nutrients, removal of nicotine, heavy metals and pathogens in compounds obtained from smuggled cigarette tobacco compost associated with industrial sewage sludge. *Science of the Total Environment*, v. 699, p. 134377, 2020.

ZITTEL, R. TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DOMÉSTICOS, TABACO DE CIGARROS CONTRABANDEADOS E RESÍDUOS DE MADEIRA EM BIOREATOR. UEPG, 2014.

ZITTEL, R. *et al.* Treatment of smuggled cigarette tobacco by composting process in facultative reactors. *Waste Management*, v. 71, p. 115–121, 2018.