



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Compostagem e sua simulação em reatores de bancada do tipo controle diferencial de temperatura

Leonardo de Souza Ramos

Monografia em Engenharia Ambiental

Orientador

Claudinei de Souza Guimarães, D.Sc.

Caio de Teves Inácio, D.Sc.

Setembro de 2019



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Compostagem e sua simulação em reatores de bancada do tipo controle diferencial de temperatura

Leonardo de Souza Ramos

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro

Orientadores:

Claudinei de Souza Guimarães

Caio de Teves Inácio

Rio de Janeiro
Setembro de 2019

COMPOSTAGEM E SUA SIMULAÇÃO EM REATORES DE BANCADA DO TIPO CONTROLE DIFERENCIAL DE TEMPERATURA

Leonardo de Souza Ramos

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE
DO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL

Examinado por:

X

Prof Claudinei de Souza Guimarães, D.Sc.

X

Prof Felipe Sombra dos Santos, D.Sc.

X

Prof Monica Pertel, D.Sc.

Rio de Janeiro

Setembro de 2019

FICHA CATALOGRAFICA

Ramos, Leonardo de Souza

Compostagem e sua simulação em reatores de bancada do tipo controle diferencial de temperatura / Leonardo de Souza Ramos, – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2019

VII,35 p. ;il ; 29,7 cm

Orientador: Claudinei de Souza Guimarães e Caio de Teves Inácio

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Ambiental, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 36-37

1. Compostagem 2. Reatores de bancada. 3. Controle diferencial de temperatura

I. Guimarães, Claudinei de Souza II. Universidade Federal do

Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia

Ambiental. III. Título.

Resumo da Monografia apresentada à Escola Politécnica como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenharia Ambiental.

COMPOSTAGEM E SUA SIMULAÇÃO EM REATORES DE BANCADA DO TIPO CONTROLE DIFERENCIAL DE TEMPERATURA

Leonardo de Souza Ramos

Setembro, 2019

Orientador: Prof. Claudinei de Souza Guimarães, D.Sc.

Prof. Caio de Teves Inácio, D.Sc.

RESUMO

A compostagem é uma técnica de tratamento dos resíduos sólidos de origem orgânica que permite a reinserção na cadeia produtiva de micro e macronutrientes que a princípio são retirados dos solos pela colheita agrícola, proporcionando assim, a substituição ou a redução na necessidade do uso de fertilizantes de natureza sintética. No entanto o estudo do processo de compostagem em escala real muitas vezes não é viável uma vez que necessita de muito insumos (grande volume de material a ser compostado, grande exigência de espaço físico etc.). Nesse âmbito o estudo de formas de simulação deste processo em escala reduzida é uma alternativa interessante. O presente trabalho apresenta as principais formas de compostagem e sua simulação em escala de bancada desenvolvidas até então e uma análise do método empregado para essa simulação no laboratório de biorreatores e bioprocessos na Embrapa-solos. Para a confirmação da metodologia aplicada no laboratório uma mistura de resíduos foi preparada, sua compostagem foi acompanhada ao longo de 22 dias e com o auxílio dos softwares Sitrad® e Origin® áreas e intervalos de tempo de interesse foram obtidos. Confirmando a confiabilidade e reprodutividade do método de simulação empregados no laboratório.

Palavras-chave: Compostagem, Reatores de Bancada, Controle Diferencial de Temperatura.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

COMPOSTING AND ITS SIMULATION IN DIFFERENTIAL TEMPERATURE CONTROL BENCH SCALE REACTORS

Leonardo de Souza Ramos

Setembro, 2019

Advisor: Prof. Claudinei de Souza Guimarães, D.Sc.

Prof. Caio de Teves Inácio, D.Sc.

ABSTRACT

Composting is a technique of treatment of solid residues of organic origin that allows the reinsertion in the productive chain of micro and macronutrients that are initially removed from the soil by the agricultural harvest, thus providing the substitution or reduction in the need for fertilizer from synthetic nature use. However, studying the full-scale composting process is often not feasible as it requires a lot of inputs (large volume of material to be composted, large physical space requirements, etc.). In this context, the study of small scale simulation of this process is an interesting alternative. The present work presents the main forms of composting and its bench scale simulation developed so far and an analysis of the method used for this simulation in the Embrapa-solos bioreactor and bioprocess laboratory. To confirm the methodology applied in the laboratory a waste mixture was prepared, its composting was followed over 22 days and with the aid of Sitrad® and Origin® software areas and time intervals of interest were obtained. Confirming the reliability and reproducibility of the simulation method employed in the laboratory

Keywords: Composting, Bench Reactors, Differential Temperature Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Perfil típico de temperatura de um processo de compostagem	3
Figura 2	Compostagem na gestão de resíduos sólidos	3
Figura 3	Desenho esquemático da compostagem com aeração forçada	6
Figura 4	Reator de temperatura fixa	8
Figura 5	Reator de auto aquecimento	9
Figura 6	Reator com CDT	10
Figura 7	Software SITRAD	11
Figura 8	Controlador MICROSOL II E PLUS	11
Figura 9	Laboratório bioprocessos	12
Figura 10	Biorreatores utilizados no laboratório de bioprocessos na Embrapa-solos	13
Figura 11	Rotâmetro para ajuste de vazão utilizado no laboratório de bioprocessos na Embrapa-solos	14
Figura 12	Armadilha ácida e filtro de sílica	14
Figura 13	Sistema de amostragem de gases	15
Figura 14	Controle de diferencial de temperatura	16
Figura 15	Fases do perfil típico de temperatura de um processo de compostagem	19
Figura 16	Perfil de temperatura reator 1	20
Figura 17	Perfil de temperatura reator 4	21
Figura 18	Perfil de temperatura reator 6	21
Figura 19	Perfil de temperatura reator 8	22
Figura 20	Perfil de temperatura reator 10	22
Figura 21	Curvas reator 1	23
Figura 22	Curvas reator 4	24
Figura 23	Curvas reator 6	24
Figura 24	Curvas reator 8	25
Figura 25	Curvas reator 10	25
Figura 26	Perfis de temperatura na ocasião da falta de luz	26
Figura 27	Balanço de massa fresca reator 1	28
Figura 28	Balanço de massa seca reator 1	28
Figura 29	Balanço de massa fresca reator 4	29
Figura 30	Balanço de massa seca reator 4	29
Figura 31	Balanço de massa fresca reator 6	29
Figura 32	Balanço de massa seca reator 6	30
Figura 33	Balanço de massa fresca reator 8	30
Figura 34	Balanço de massa seca reator 8	30
Figura 35	Balanço de massa fresca reator 10	31
Figura 36	Balanço de massa seca reator 10	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Condições adequadas e ideais para a compostagem	02
Tabela 2	Características físico-químicas dos constituintes de mistura	18
Tabela 3	Percentual dos constituintes da mistura	18
Tabela 4	Correspondência entre estações e reatores	19
Tabela 5	Áreas calculadas no Origin	26
Tabela 6	Duração dos períodos de interesse do processo de compostagem	27
Tabela 7	Condições iniciais do balanço de massa	28
Tabela 8	Resumo do balanço de massa	32
Tabela 9	Parâmetros de área utilizados para a validação do processo de compostagem	32
Tabela 10	Resultados de área obtidos com o experimento	33
Tabela 11	Comparação entre os valores experimentais de área e a referência	33
Tabela 12	Parâmetros de tempo utilizados para a validação do processo de compostagem	33
Tabela 13	Resultados de tempo obtidos com o experimento	34
Tabela 14	Comparação entre os valores experimentais de tempo e a referência	34

Sumário

Capítulo I – INTRODUÇÃO	10
Capítulo II – OBJETIVOS.....	12
Capítulo III – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
Capítulo IV – METODOLOGIA.....	19
Capítulo V – RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
Capítulo VI – CONCLUSÃO	43
Referências	44

Capítulo I – INTRODUÇÃO

A compostagem é um processo biológico de decomposição da matéria orgânica que tem como produto final o composto orgânico. Um insumo agrícola que tem valor comercial e que cumpre preceitos importantes no âmbito do desenvolvimento sustentável: minimização de impactos ambientais, minimização de rejeitos e maximização da reciclagem (INÁCIO, 2009)[1]

O processo de compostagem proporciona a reciclagem de nutrientes e matéria orgânica. Com o uso do composto uma gama de macronutrientes (como Fósforo e Potássio) e micronutrientes (Boro e Cobre, por exemplo), que a princípio, são extraídos do solo pela atividade produtiva e colheita agrícola podem ser reintroduzidos no sistema, suprimindo ou reduzindo a necessidade da aplicação de fertilizantes minerais.

A compostagem é um processo microbiológico e aeróbio de decomposição da matéria orgânica que gera calor levando a temperaturas típicas de 50°C a 65°C, podendo alcançar picos de 70°C. Os microrganismos atuantes na compostagem podem ser divididos em dois grupos principais:

- Mesófilos: com faixa de temperatura ótima de atuação até 45°C
- Termófilos: faixa de atuação ótima entre 40°C e 70°C

Diversos fatores do material a ser compostado devem ser levados em consideração para que a biodecomposição ocorra de forma satisfatória e rapidamente (EPSTEIN, 1997)[2] como: conteúdo de água, de oxigênio, relação Carbono e Nitrogênio, pH e densidade aparente. A **Tabela 1** apresenta as condições sugeridas para um bom processo de compostagem e a **Figura 1** ilustra o perfil típico de temperatura ao longo do tempo do mesmo processo.

Tabela 1: Condições adequadas e ideais para a compostagem. Fonte: RYNK 1992 [3]

Condições	Faixa adequada	Faixa preferível
Relação C:N	20:1 – 40:1	25:1 – 30:1
Umidade	40-65%	50-60%
Concentração de Oxigênio	Maior que 5%	Muito maior que 5%
Tamanho de partícula (cm)	0,3 – 1,5	Diversos
pH	5,5 – 9,0	6,5 – 8,0
Temperatura(°C)	43,5°C – 65,5°C	54,5°C – 60°C

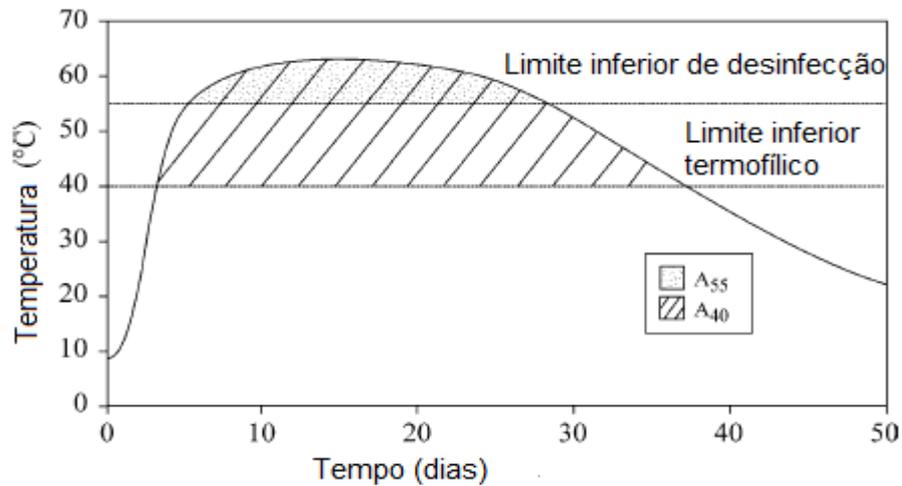


Figura 1: Perfil típico de temperatura de um processo de compostagem. Fonte: adaptado de RYNK 1992

A **Figura 2** ilustra como a compostagem pode se inserir de forma sustentável na gestão de resíduos sólidos.

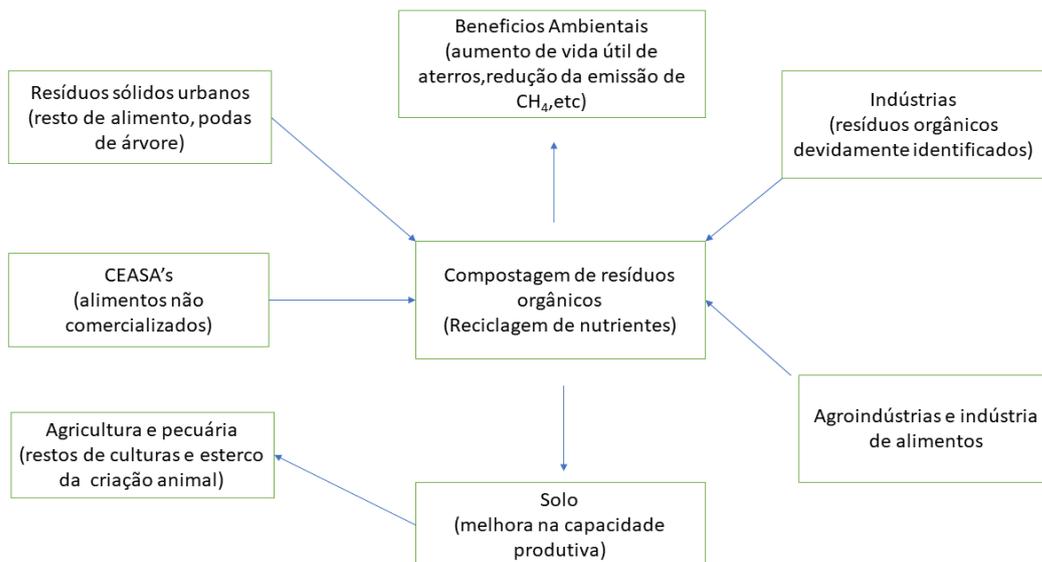


Figura 2: Compostagem na gestão de resíduos sólidos. Fonte INÁCIO, 2009

Capítulo II – OBJETIVOS

II.1 – OBJETIVO GERAL

Comprovar a eficiência e a robustez do método de simulação, em escala de bancada, do processo de compostagem empregado no laboratório de biorreatores e bioprocessos da Embrapa-solos.

II.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Preparo de uma mistura de resíduos (cama de cavalo, proteína de soja e amido de milho) com características físico químicas favoráveis a compostagem.
- Obtenção dos perfis de temperatura do processo de compostagem ocorridos em cada reator.
- Desenvolvimento de uma metodologia para o cálculo da área compreendida abaixo do perfil de temperatura.
- Cálculo da área do perfil de temperatura correspondente ao período termofílico (<40°C) do processo de compostagem de cada reator.
- Cálculo da área do perfil de temperatura durante o período em que a temperatura do processo de compostagem foi superior a 55°C em cada biorreator.
- Determinação da duração da fase termofílica de cada reator
- Determinação do intervalo de tempo durante o qual os reatores apresentaram temperaturas superiores a 55°C
- Realização do balanço de massa do processo de compostagem ocorrido nos reatores

Capítulo III – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

III.1 – Métodos de compostagem

A compostagem como técnica de tratamento de resíduos orgânicos visa a adoção de práticas que favoreçam a decomposição biológica em temperaturas termofílicas (entre 55°C e 75°C) de grandes volumes de matéria orgânica.

Essas práticas levam em consideração as características físicas e químicas dos materiais utilizados na compostagem e buscam garantir a aeração da leira, a correta umidade e o equilíbrio na relação carbono nitrogênio (relação C:N) da mistura.

O atendimento dessas condições ótimas leva a alta atividade microbiológica gerando calor no interior da leira de compostagem e a um processo com as seguintes características (INÁCIO, 2009):

- Evita proliferação de moscas e outros animais vetores.
- Evita a ocorrência de odores desagradáveis.
- Reduz a geração de chorume.
- Produção de um composto orgânico final sem riscos de contaminação do solo ou da água.
- Gera um produto adequado para uso na agricultura e recuperação de solos.

Os métodos de compostagem podem ser separados conforme o tipo de aeração, grau de revolvimento da leira ou se ele é realizado em leiras ou de forma confinada (reatores). As técnicas de compostagem podem ser divididas em:

- Leiras estáticas com aeração natural
- Leiras estáticas com aeração forçada
- Compostagem com revolvimento de leiras
- Compostagem em reatores (confinada)

III.2 – Compostagem com revolvimento de leiras

Nesta técnica de compostagem o material a ser degradado é disposto em grandes pilhas, chamadas de leiras, para que os microrganismos atuem sobre os resíduos.

Essas leiras têm dimensões variadas, mas usualmente tem seção reta triangular uma vez que o material a ser compostado é simplesmente despejado com o auxílio de pás, e tem seu comprimento e largura definidos de forma que o manejo dos equipamentos existentes e o transporte de material dentro do pátio de compostagem não seja atrapalhado.

Neste método é comum, e frequente, a interrupção da degradação aeróbia devido ao colapso da pilha de resíduos o que acarreta uma brusca queda da temperatura da leira.

O revolvimento constante das leiras é usado para recuperar a aeração do processo. No entanto o oxigênio fornecido por este revolvimento se esgota rapidamente (EPSTEIN, 1997), deixando claro a limitação da técnica quanto a continuidade da aeração e a obtenção prolongada de altas temperaturas.

Este método tem melhor desempenho na compostagem de grandes volumes de material vegetal, restos de poda, grama e folhas, componentes que garantem uma pilha

de resíduos bem estruturada, do que na compostagem de matérias mais pesados, com grande conteúdo de água, e que tendem a formar uma leira que colapsa, como restos de comida.

III.3 – Compostagem em leiras estáticas com aeração forçada

A compostagem com aeração forçada utiliza equipamentos para a injeção de ar no interior das leiras, resolvendo assim, um típico problema encontrado na compostagem: a falta de oxigênio no interior da leira causado pela intensa atividade biológica, sobretudo nos primeiros dias do processo.

Essa carência de oxigênio na leira acontece porque, normalmente, a mistura de resíduos não apresenta uma porosidade adequada para que um fluxo natural de ar seja estabelecido através da leira ou devido ao colapso da pilha de compostagem após o início da biodecomposição.

A aeração forçada é uma maneira mais eficiente que o revolvimento de leiras para a manutenção do processo de compostagem, via suprimento de oxigênio (EPSTEIN, 1997)

Mesmo com os equipamentos injetores de ar, como não há revolvimento da leira, um fluxo satisfatório de ar só acontecerá caso a mistura de resíduos apresente uma porosidade adequada. A **Figura 3** apresenta o esquema de uma leira com aeração forçada.

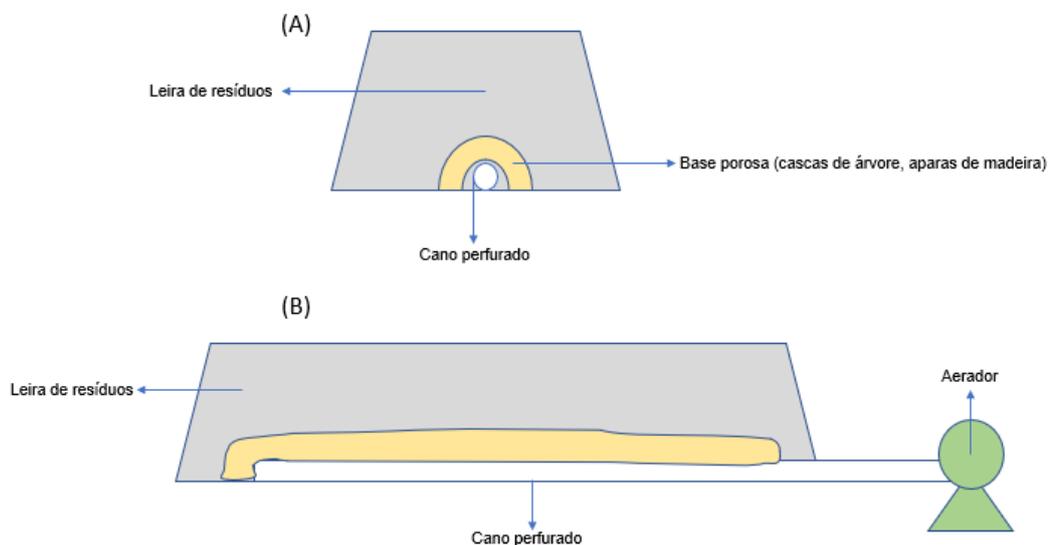


Figura 3: Desenho esquemático da compostagem com aeração forçada. (A) Corte transversal; (B) corte longitudinal.
Fonte: Adaptado de RYNK 1992

I.4 – Compostagem em leiras estáticas com aeração passiva.

Nesta técnica de compostagem as leiras são montadas, com auxílio de aparas de grama ou restos vegetais, com suas paredes perpendiculares ao solo conferindo um perfil retangular a pilha.

As leiras são estáticas (não há revolvimento da pilha) e toda vez que ela vai ser abastecida uma quantidade de material estruturante (serragem, biotério animal, por exemplo) é adicionada a mistura, garantindo uma densidade/porosidade ao substrato que permita que um fluxo de ar seja estabelecido através da leira. Além disso, toda vez que a leira recebe uma carga orgânica nova ela é misturada com o material que já se encontrava em decomposição.

As leiras são cobertas com material vegetal de forma a evitar que o material em decomposição fique exposto ao meio externo.

Todo o manejo da compostagem nesse método é baseado no entendimento dos fatores ecológicos de uma leira de compostagem que afetam, portanto, a atividade biológica, principalmente o oxigênio, a umidade, a densidade e a disponibilidade do substrato (INÁCIO 2009). Esse método dá ênfase a metódica montagem da leira e a densidade da mistura de resíduos.

III.5 – Compostagem em reatores

Existe uma gama de métodos de compostagem que enclausuram os resíduos a serem compostados em estruturas como containers, grandes cilindros metálicos, concreto ou alvenaria. Estas técnicas são dependentes dos mecanismos de aeração e revolvimento mecânico da massa compostada.

A compostagem em biorreatores não é afetada por fatores climáticos, como chuva ou vento e por ser altamente mecanizada, em geral, precisa de menos espaço físico que as técnicas mencionadas anteriormente. A mecanização do processo também favorece a homogeneidade da biodecomposição ajudando no controle de patógenos e odores (RYNK 1992).

A compostagem em reatores biológicos exige maiores investimentos em instalação e manutenção.

III.6 – Compostagem em reatores de bancada

Muitos estudos sobre compostagem têm sido conduzidos com a utilização de biorreatores em escala laboratorial (MASON 2005)[4]. Isso porque o emprego de reatores em escala de bancada permite um alto grau de controle dos parâmetros da compostagem (umidade da mistura, aeração, pH etc.) e grande reprodutibilidade com a utilização de uma pequena quantidade de resíduos e espaço quando comparados com o estudo em escala real.

A principal dificuldade na simulação da compostagem em escala de bancada está na obtenção de perfis de temperatura e umidade verossímeis (HOGAN et, al. 1989)[5].

Os reatores de bancada podem ser divididos em quatro principais grupos:

- Reatores de temperatura fixa

- Reatores de auto aquecimento
- Reatores com controle diferencial de temperatura (CDT)
- Reatores com controle do fluxo de calor (CFC)

III.6.1 – Reatores de temperatura fixa.

São reatores onde uma temperatura desejada é imposta, e mantida, por meios externos (de aquecimento e /ou resfriamento) e o processo de compostagem é estudado naquele patamar térmico.

Quando o objetivo da pesquisa é obter uma fotografia do processo em determinada temperatura ao invés de se acompanhar a dinâmica completa da compostagem os reatores de temperatura fixa são uma alternativa de relativa facilidade de implementação, manutenção e operação.

Reatores deste tipo já foram utilizados para o estudo de taxas de reação (KITHOME, 1999)[6], degradação de compostos (MICHEL, 1995)[7], temperatura ótima de atividade biológica (HUANG, 2000)[8]

A **Figura 4** exemplifica um reator de temperatura fixa onde a temperatura do reator e de parte de linha de ar é controlada com o auxílio de uma incubadora.

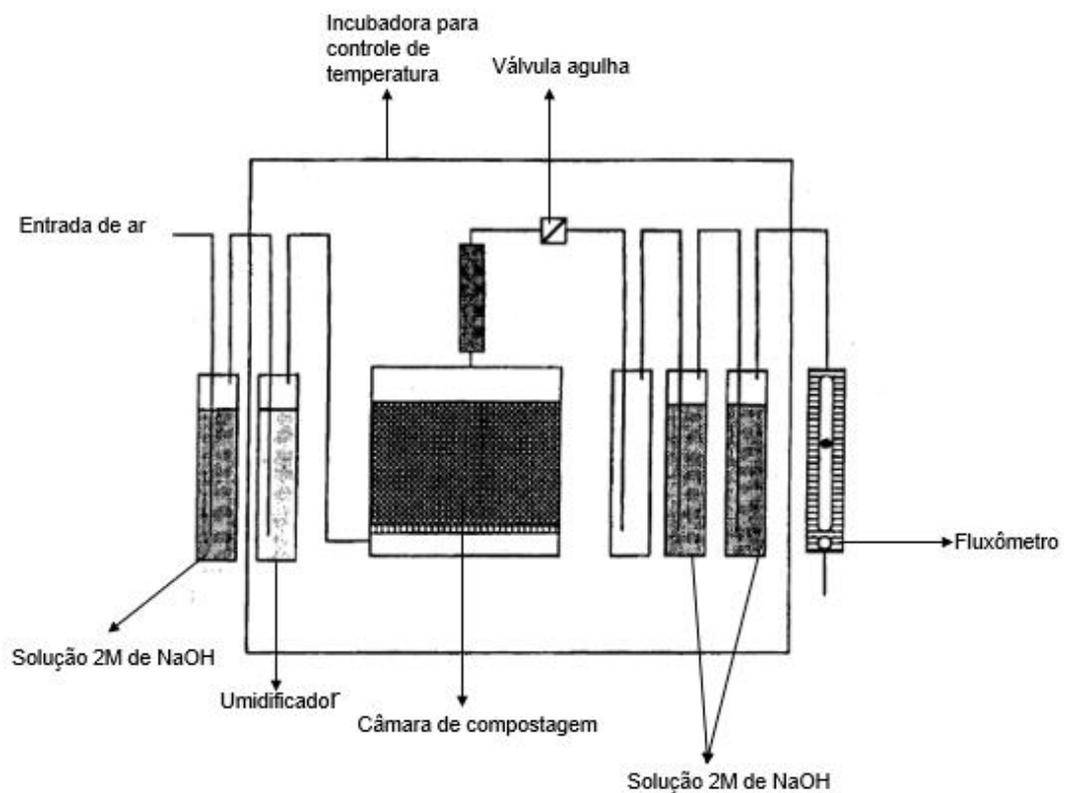


Figura 4: Reator de temperatura fixa Fonte: Adaptado de MICHEL et al., 1993[9]

III.6.2 – Reatores de auto aquecimento

São aqueles reatores que tem sua temperatura de operação dependente, exclusivamente, da atividade microbiológica ocorrida em seu interior, sem nenhum mecanismo de compensação das perdas de calor, e que, geralmente, contam com algum isolamento térmico do meio externo.

Esse tipo de reator é comumente empregado na avaliação do processo de compostagem (taxa de reação ótima, cinética etc.) (SUNDBERG e JONHSON, 2003)[10] e na suscetibilidade de determinado substrato a compostagem (KEENER et al 2002)[11]

A principal limitação deste tipo de reator está na elevada perda de calor para o meio externo, mesmo quando uma grande quantidade de material isolante é utilizado, acarretando o encurtamento do período termofílico e redução das temperaturas máximas atingidas pelo reator. Na **Figura 5** é apresentado um exemplo de um reator de auto aquecimento com isolamento e sistema de aeração forçada.

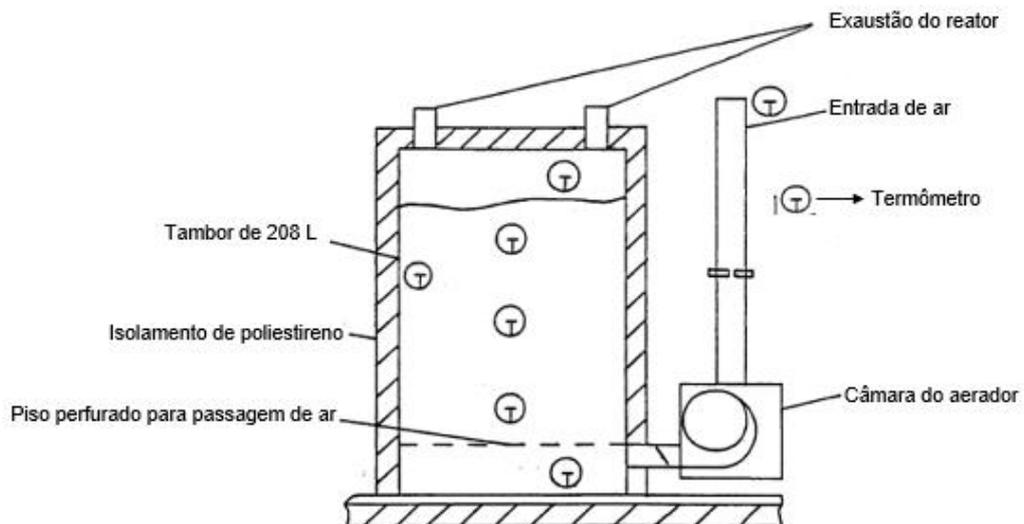


Figura 5: Reator de auto aquecimento Fonte: Adaptado de HANSEN et al., 1989[12]

III.6.3 – Reatores com controle diferencial de temperatura (CDT)

São reatores que têm sua temperatura de operação atrelada, exclusivamente, aos processos biológicos que ocorrem em seu interior. Esse tipo de reator compensa as perdas térmicas para o meio externo fornecendo calor para a parede externa do reator. Mantendo, desta forma, uma pré-determinada diferença de temperatura em todo reator e no material a ser compostado.

Reatores deste tipo já foram empregados no estudo de gases resultantes da compostagem (CRONJE et al 2003)[13], desenvolvimento de aparatos laboratoriais que auxiliam no estudo da compostagem (McCARTNEY e CHEN, 2001)[14] e avaliação de

taxas de reação, cinética e modelo matemático do processo de biodecomposição (van BOCHOVE et al 1995).[15]

A **Figura 6** apresenta o esquema de um reator com controle diferencial de temperatura.

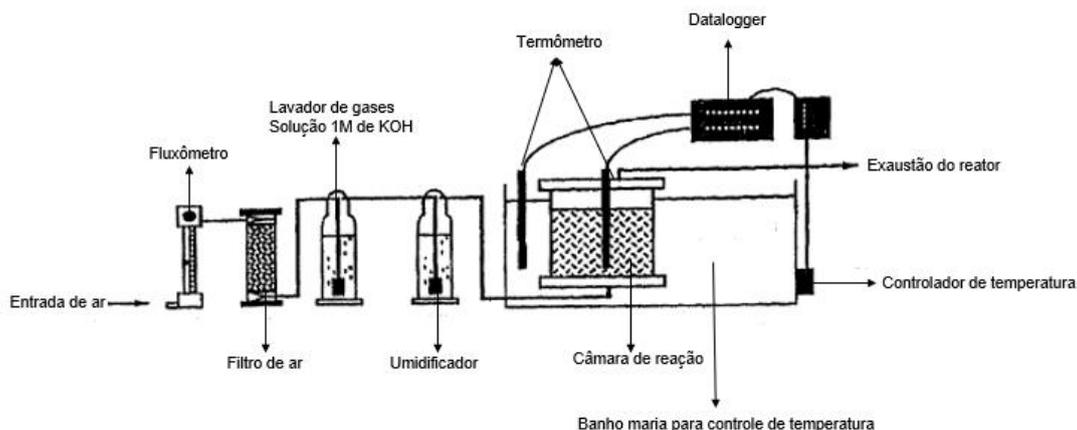


Figura 6:Reator com CDT. Fonte: Adaptado de COOK et al 1997[16]

III.6.4 – Reatores com controle do fluxo de calor (CFC)

São reatores que têm sua temperatura de operação atrelada, exclusivamente, aos processos microbiológicos ocorridos em seu interior. Esse tipo de reator compensa as perdas térmicas para o meio externo fornecendo calor à parede externa do reator, mantendo assim, um fluxo de calor pré-determinado através do reator e da massa em decomposição.

Na literatura encontramos este tipo de reator sendo utilizado para o estudo da capacidade de um determinado substrato ser compostado (STOCKS et al 2002)[17] e na avaliação da degradabilidade de um substrato (ATKINSON 1996)[18].

A única diferença prática entre os reatores que possuem CDT e os que utilizam CFC está na forma que estes reatores compensam as perdas de calor para o meio externo. Enquanto um utiliza uma diferença de temperatura o outro faz uso do fluxo de calor.

Capítulo IV – METODOLOGIA

IV.1 – Software SITRAD®

Desenvolvido pela Full Gauge Controls o software SITRAD® tem como finalidade o gerenciamento de instalações de refrigeração, aquecimento, climatização e aquecimento solar.

O software é capaz de se comunicar com uma gama de controladores, avaliando, configurando e armazenando dados de temperatura, permitindo a programação de agendas de eventos (início de amostragem de gases e acionamento de válvulas por exemplo) e que parâmetros de operação sejam alterados de forma remota através da internet ou celular como o ilustrado na **Figura 7**.

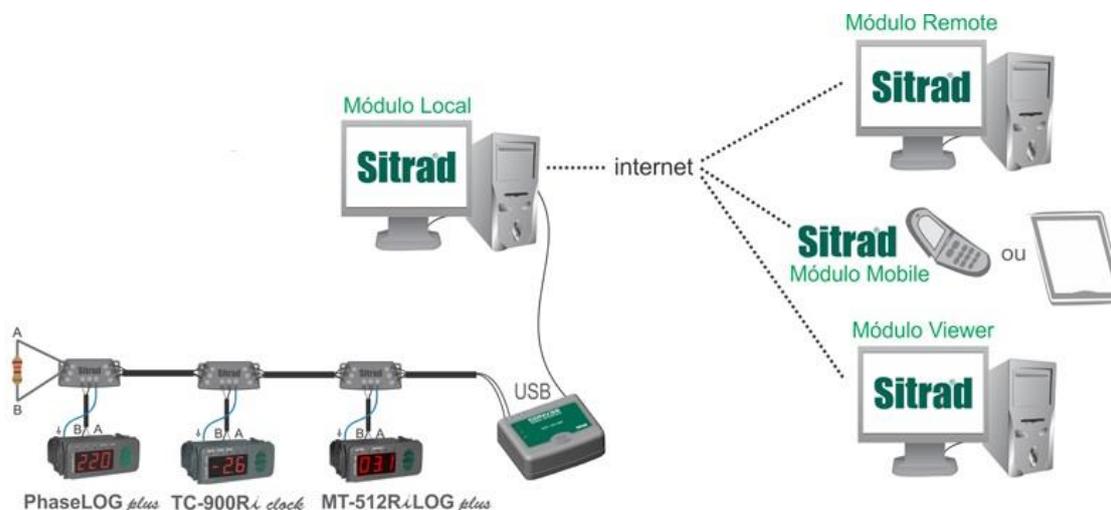


Figura 7: Software SITRAD Fonte: sitrad.com.br

IV.2 – Controlador MICROSOL II E plus

Produzido pela Full Gauge Controls o controlador (**Figura8**) conta com três sensores de temperatura e é o responsável pelos acionamentos da resistência elétrica que compensa as perdas de calor para o ambiente e das válvulas solenoides que conduzem ao sistema de respirometria.



Figura 8: Controlador MICROSOL II E PLUS Fonte: sitrad.com.br

A **Figura 9** apresenta, de forma simplificada o aparato utilizado no laboratório de biorreatores e bioprocessos da Embrapa-solos

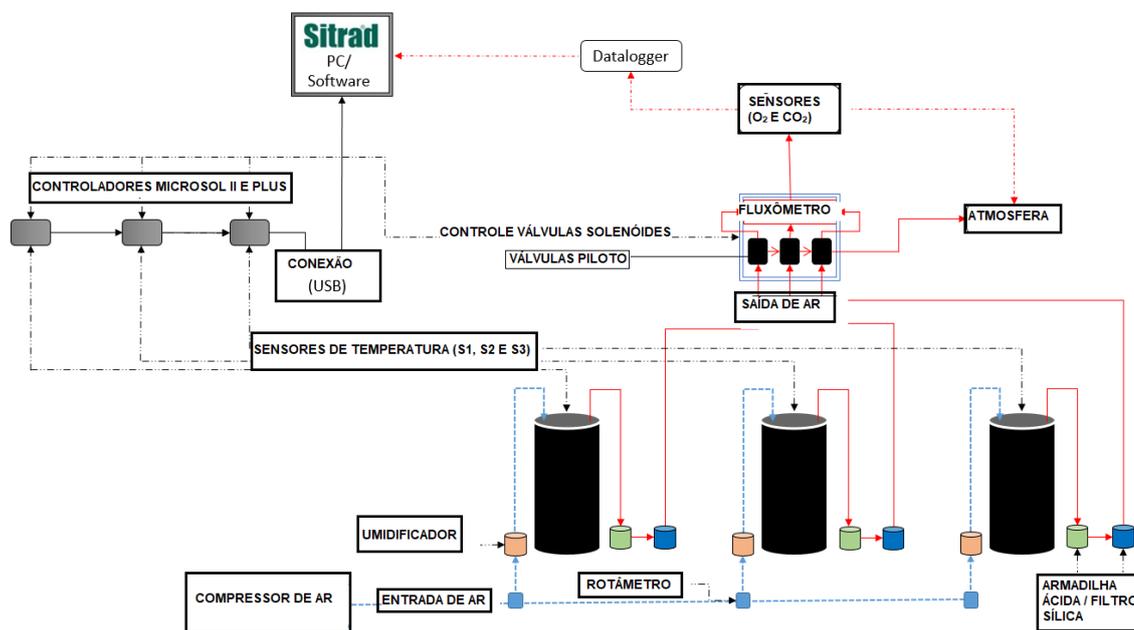


Figura 9: Laboratório bioprocessos Fonte: Autor

IV.3 – Módulos experimentais

Os biorreatores são produzidos em polipropileno (**Figura 10**) e cada reator é constituído de duas partes: uma casca cilíndrica externa e uma câmara de reação que se encaixa na cavidade interna da casca cilíndrica.

- A casca cilíndrica possui 40cm de altura e 20cm de diâmetro, no interior de sua parede há uma resistência elétrica e um sensor de temperatura, na sua face superior existem dois pares de furos por onde passam dois sensores de temperatura e as mangueiras de entrada e saída de ar. A casca cilíndrica tem a função de isolamento térmico e de, através do acionamento da resistência elétrica em seu interior, compensar as perdas de calor da câmara de reação para o meio externo.
- A câmara de reação possui 30cm de altura e 16cm de diâmetro, a 7cm do fundo da câmara há um disco perfurado de polipropileno com um prensa cabo em seu centro. Na tampa da câmara há um par de conexões de engate rápido para as mangueiras de entrada e saída de ar e um par de prensa cabos para a passagem dos sensores de temperatura. Uma mangueira liga o prensa cabo do disco de polipropileno à conexão de entrada de ar na tampa da câmara garantindo um fluxo ascendente de ar dentro do reator



Figura 10: Biorreatores utilizados no laboratório de bioprocessos na Embrapa-solos Fonte: Autor

IV.4 – Sistema de fluxo de ar

Nos reatores o suprimento de O_2 requerido pela microbiota responsável pela compostagem é fornecido por um compressor externo ao laboratório. O fluxo contínuo é regulado por um fluxômetro de baixa vazão, de até 10L/h (rotâmetro modelo 1900 APPLIETCH) (**FIGURA 11**). Ao entrar na câmara de reação, o ar é conduzido por uma mangueira de poliuretano de 8mm de diâmetro até o espaço existente entre o fundo da câmara de reação e o disco perfurado de polipropileno (*bottom space*). A massa de ar ascendente passa pela mistura em decomposição sendo, então, modificado em sua composição e se acumulando na região entre a superfície superior da mistura em decomposição e a tampa da câmara (*head space*) de onde é retirada do reator por outra mangueira de 8mm de diâmetro.

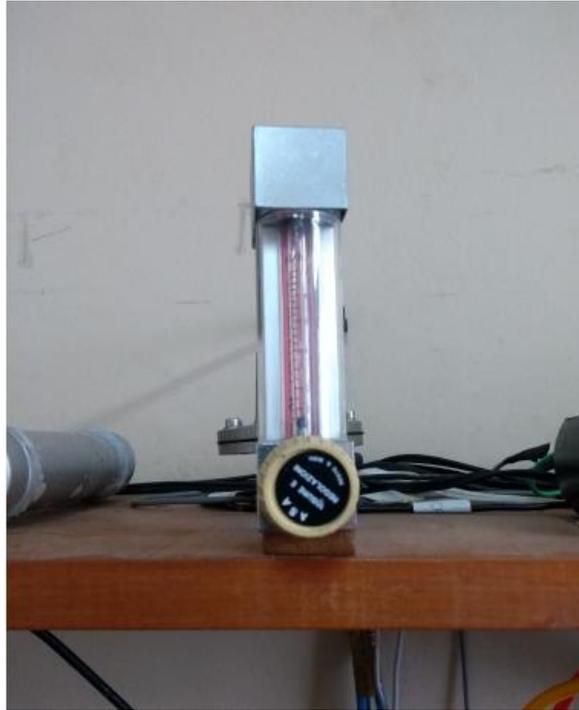


Figura 11: Rotômetro para ajuste de vazão utilizado no laboratório de bioprocessos na Embrapa-solos
Fonte: Autor

IV.5 – Armadilhas para a captura de amônia

A maior perda de nitrogênio durante a compostagem ocorre devido a volatilização da amônia (MAGALHÃE, 2015) [19], principalmente, durante a fase termofílica do processo uma vez que altas temperaturas favorecem esse fenômeno. Para a quantificação destas perdas todo o ar que sai dos reatores é encaminhado para armadilhas que consistem em frascos contendo uma solução ácida. Por motivos de facilidade experimental do laboratório a solução utilizada na Embrapa-solos é uma solução 0,5M de ácido sulfúrico.

Após a passagem pela armadilha o ar é encaminhado a um filtro de sílica (**Figura 12**) para a retirada da umidade e então encaminhado ao sistema de análise de gases.



Figura 12: Armadilha ácida e filtro de sílica Fonte: Autor

IV.6 – Multi amostrador e análise de gases

A amostragem dos gases provenientes dos reatores se dá de forma automática. Uma agenda de eventos programada no Sitrad aciona os controladores Microsol II *plus* que enviam um comando de acionamento para um conjunto de solenoides. Esses solenoides liberam a passagem de ar sob pressão até um conjunto de válvulas pilotos de três vias. Nessas válvulas o ar pressurizado empurra um embolo alterando o caminho original de exaustão dos gases provenientes dos biorreatores e os encaminhando para sensores aonde as concentrações de O₂ e CO₂ são registrados. O sistema de amostragem é exibido na **Figura 13**

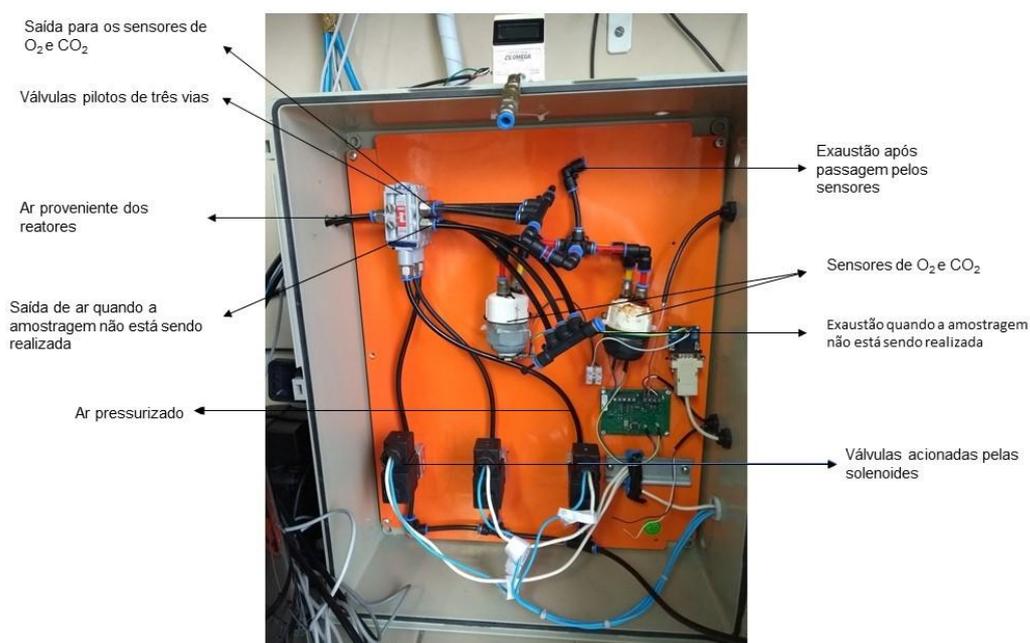


Figura 13: Sistema de amostragem de gases Fonte: Autor

IV.7 – Sistema de controle diferencial de temperatura (CDT)

O sistema de diferencial de temperatura é baseado nos termômetros presentes no biorreator. Os sensores térmicos presentes na câmara de reação são posicionados de forma que um sensor fique na altura média da câmara de reação, no meio do resíduo em compostagem, este sensor é chamado de S1. O segundo sensor, chamado de S2, é posicionado junto a parede da câmara de reação a mesma altura do sensor S1.

O controle diferencial de temperatura funciona de acordo com os seguintes parâmetros:

- Quando a diferença de temperatura entre os sensores S1 e S2 é maior que 1,2° C a resistência elétrica presente na casca cilíndrica é acionada impedindo que o material em compostagem venha a perder calor para o ambiente.

- Quando a diferença de temperatura entre os sensores S1 e S2 é menor que $0,9^{\circ}\text{C}$ a resistência elétrica da casca cilíndrica é desligada.
- A resistência da casca cilíndrica nunca é acionada quando a temperatura registrada pelo sensor S1 é superior a 55°C .

A correta calibração do sistema ilustrado na **Figura 14** impede que a massa seja aquecida de forma artificial ou perca calor para o meio externo enquanto a atividade microbológica ainda estiver em andamento. Todos os parâmetros do CDT podem ser alterados pelo Sitrad.

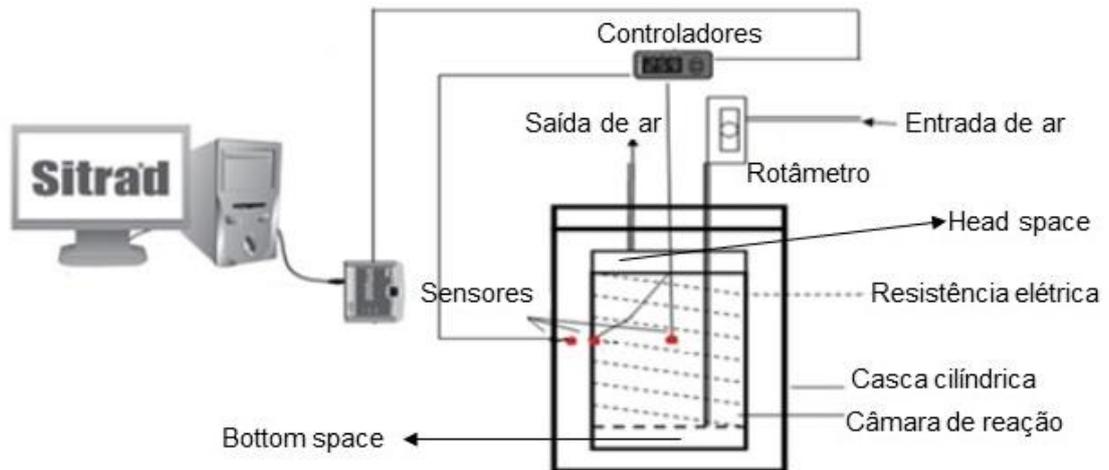


Figura 34 Controle de diferencial de temperatura Fonte: Autor

IV.8 – Experimento

O experimento consistia na montagem de cinco biorreatores contendo uma mistura de três constituintes: cama de cavalo, amido de milho e proteína de soja.

O resíduo cama de cavalo antes de ser utilizado na mistura deve sua umidade removida após passar uma semana em estufa de recirculação a 100°C .

O experimento deve duração de 22 dias e durante esse período as informações de temperatura dos sensores eram coletadas a cada 10,5 segundos e armazenadas pelo Sitrad. No entanto uma falta de luz nas instalações da Embrapa-solos impediu que alguns dados fossem coletados ocasionando uma lacuna nos registros de temperatura.

A vazão de ar fornecida a cada reator era ajustada diariamente para 120mL/min.

IV.9 – Balanço de massa

Ao longo dos vinte dois dias de experimento em duas oportunidades (além do dia inicial e final) o material no interior dos biorreatores foi pesado, revolvido e teve uma amostra coletada, para a determinação de sua umidade, e então devolvido para os reatores. Esses eventos ocorreram no terceiro e no nono dia de experimento.

A umidade do material, e conseqüentemente o percentual de massa seca, de cada reator era obtida após o material coletado para amostragem nos dias citados acima permanecer em uma estufa de recirculação com temperatura fixa de 60°C por 48h.

IV.10 – Cálculo da área das curvas de temperatura

O cálculo da área da curva de temperatura do processo de compostagem, do período termofílico e do período acima de 55°C foi realizado com o auxílio do software Origin versão 8.0.

Os registros de temperatura do Sitrad foram exportados para o Origin e lá os perfis de temperatura foram gerados novamente. As lacunas de registros ocasionadas pela falta de luz no laboratório foram truncados ocasionando um encurtamento das curvas.

As áreas de interesse foram então calculadas com recursos existentes dentro do software e a ajuda de duas curvas auxiliares $Y=40^{\circ}\text{C}$ e $Y=55^{\circ}\text{C}$.

A área total representa toda a área do processo de compostagem, a área do processo termofílico é a área acima da curva $Y=40^{\circ}\text{C}$ e a área acima do patamar de desinfecção é a área acima da curva $Y=55^{\circ}\text{C}$.

Os valores obtidos tinham como unidade ($^{\circ}\text{C} \times \text{s}$) e para facilidade de comparação com valores comumente encontrados na literatura foram então convertidos para ($^{\circ}\text{C} \times \text{dia}$).

Capítulo V – RESULTADOS E DISCUSSÃO

V.1 – Mistura introduzida nos reatores

Os cinco reatores utilizados no experimento foram abastecidos com uma mistura de três componentes: cama de cavalo, proteína de soja e amido de milho. A proporção de cada constituinte da mistura foi escolhida de forma a se obter um produto final com relação carbono/nitrogênio (relação C/N) igual a 30.

A relação C/N de um determinado resíduo orgânico têm influência direta sobre a atividade microbiana e sobre os grupos que irão predominar em sua decomposição resultando em maior ou menor tempo de completa decomposição. Quanto maior a C/N, maior o tempo de decomposição do material, valores entre 30 e 40 são os mais adequados para a compostagem (INÁCIO 2009).

Os microrganismos usam de 25 a 30 partes de carbono para cada parte de nitrogênio assimilada. O carbono é usado como fonte de energia e para formar a estrutura das células já o nitrogênio é importante na formação do DNA e RNA microbiano influenciando diretamente na capacidade de reprodução e crescimento da população da microbiota.

A **Tabela 2** apresenta as características físico-químicas dos constituintes da mistura.

Tabela 2 Características físico-químicas dos constituintes de mistura

Parâmetros	Cama de cavalo	Amido de milho	Proteína de soja
Massa seca (MS) (g/g)	0,95	0,95	0,95
Carbono (g/kg)	327	340	230
Nitrogênio (g/kg)	13,51	0,003	56
C/N	24,20	113333,33	4,11

Foram produzidos 2,5 kg de mistura (500g para cada reator) e a quantidade de cada constituinte é exibido na **Tabela 3**

Tabela 3 Percentual dos constituintes da mistura

	Massa Fresca(MF)(g)	Massa Seca (MS)(g)	Carbono (g)	Nitrogênio(g)	C/N
Cama de cavalo	360,58	342,55	112,02	4,62	24,22
Amido de milho	128,61	122,18	41,54	0,00	113333,33
Proteína de soja	10,82	10,28	2,36	0,58	4,11
Mistura	500,00	475,00	155,93	5,20	29,98

Para a correção da umidade foram acrescentados 700 mL de água destilada a cada 500g de mistura obtendo-se uma umidade de 60%. A manutenção da umidade é importante por dois motivos: a água é necessária para o metabolismo microbiano e a água concorre com o oxigênio pelos vazios na matriz da mistura. Para a prática da compostagem umidades entre 40% e 65% são indicadas (INÁCIO 2009).

V.2 – Perfis de temperatura

Os perfis de temperatura dos processos de compostagem ocorridos nos reatores foram obtidos com o auxílio do Sitrad. O software atribui uma estação para cada biorreator. A **Tabela 4** indica a estação correspondente a cada reator.

Tabela 4: Correspondência entre estações e reatores

Reator	Estação
1	1
4	54
6	6
8	8
10	10

O principal aspecto analisado nas curvas obtidas foi a sua semelhança com o com o perfil típico de temperatura obtido em uma leira de compostagem (**Figura 15**) que pode ser resumido em quatro etapas:

- Fase inicial: ocorre a expansão das colônias de microrganismos mesófilos e intensificação da ação de decomposição ocasionando liberação de calor e rápida subida de temperatura.
- Fase termofílica: caracterizada por temperaturas acima de 40°C, principalmente na faixa entre 50°C e 65°C, nessa fase há predomínio dos organismos termofílicos e a atividade de degradação é muito intensa. Ocorre a formação de água metabólica.
- Fase mesofílica: fase de degradação das substâncias orgânicas mais resistentes. Diminuição da atividade biológica e da temperatura.
- Maturação: Ocorre a maturação do composto com a formação de substâncias húmicas. O composto não possui mais capacidade de auto aquecimento.

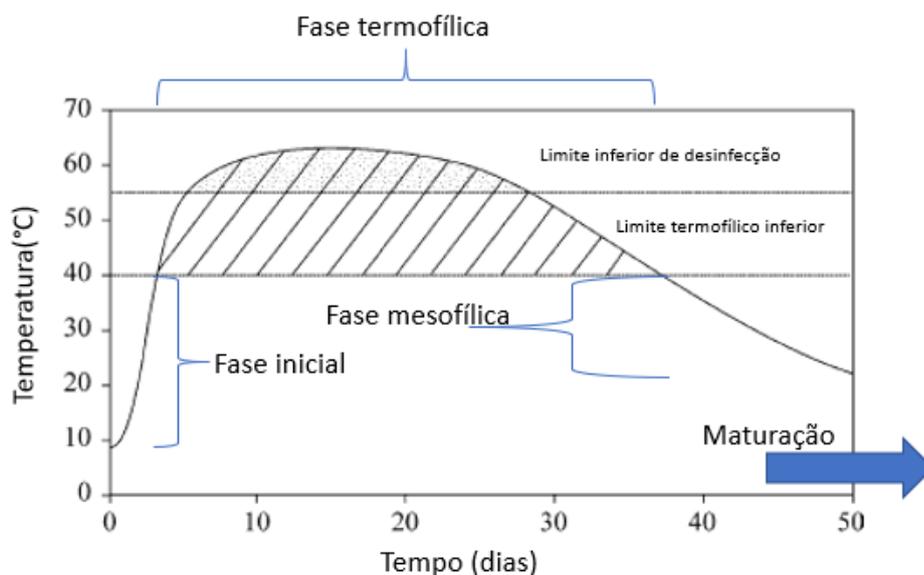


Figura 45: Fases do perfil típico de temperatura de um processo de compostagem Fonte: adaptado de RYNK 1992

Durante o primeiro processo de amostragem, ocorrido no terceiro dia de experimento, o composto ainda apresentava alguma capacidade de reaquecimento. Isso explica a retomada do aquecimento dos biorreatores, no caso do reator 10 superando o pico inicial de temperatura.

No processo seguinte de amostragem, ocorrido no nono dia o composto já não possuía mais matéria orgânica facilmente disponível o que é representado no perfil de temperatura pela incapacidade do composto de reaquecer-se.

As figuras (**Figuras 16 ,17 ,18 ,19 e 20**) a seguir representam os perfis de temperatura obtidos com os biorreatores.

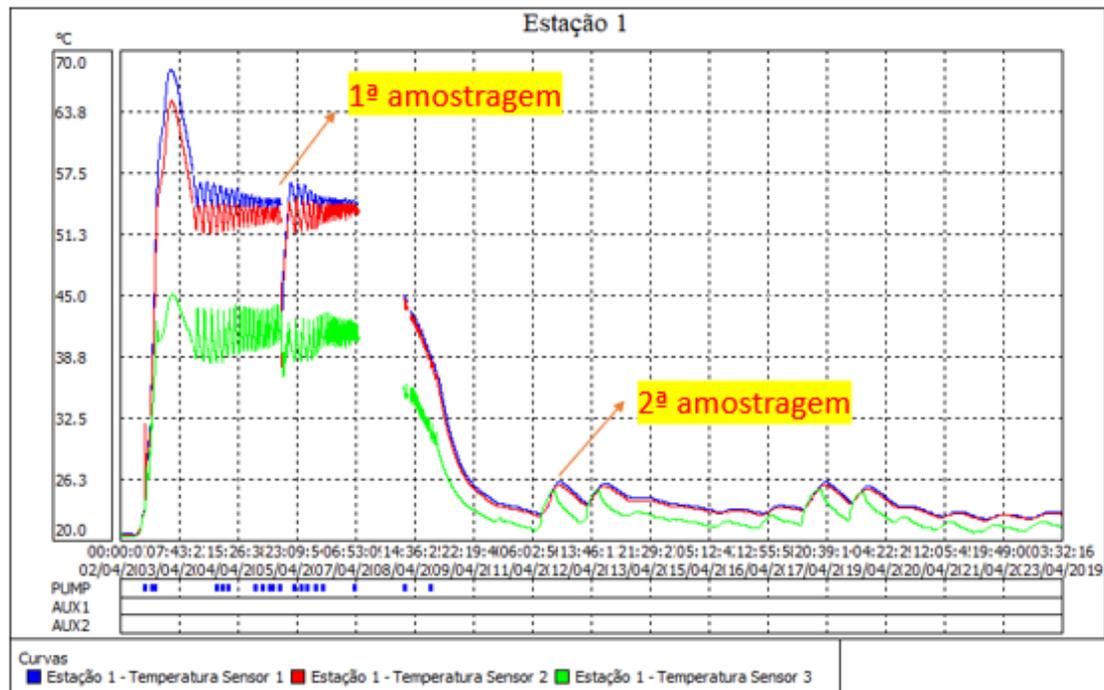


Figura 16: Perfil de temperatura reator 1

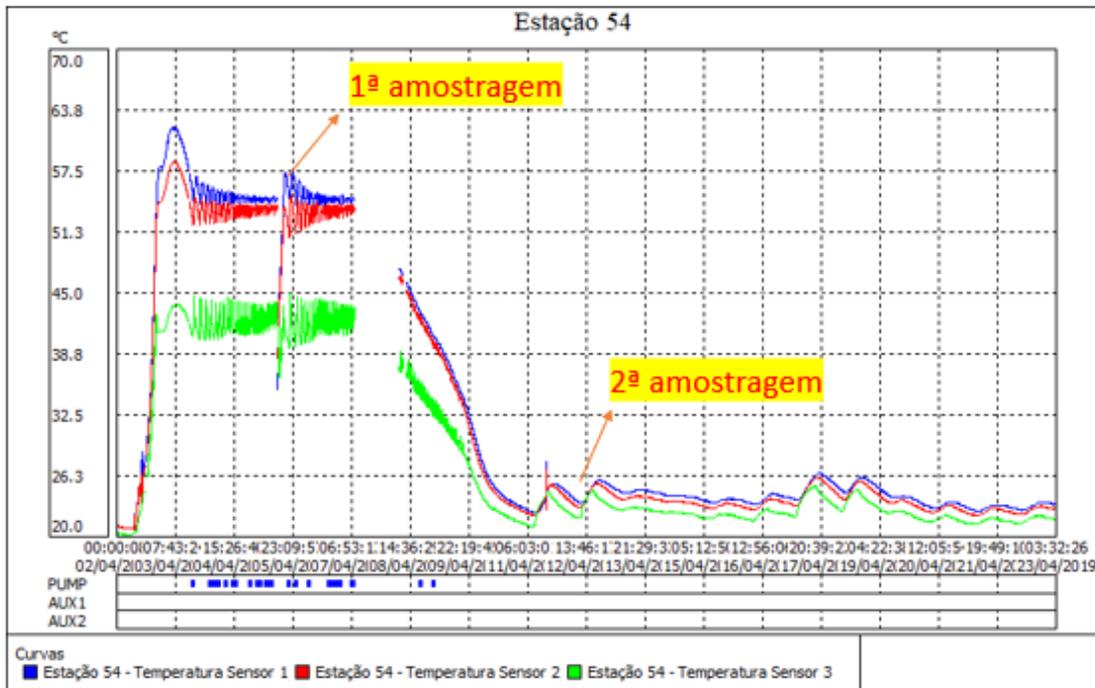


Figura 17: Perfil de temperatura reator 4

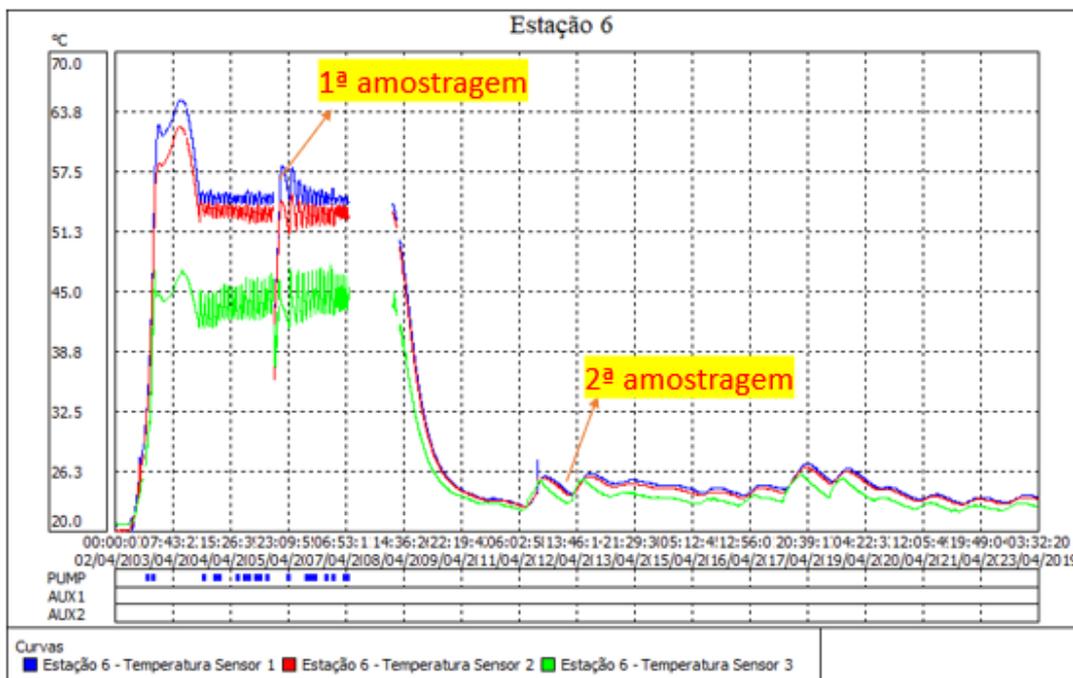


Figura 18: Perfil de temperatura reator 6

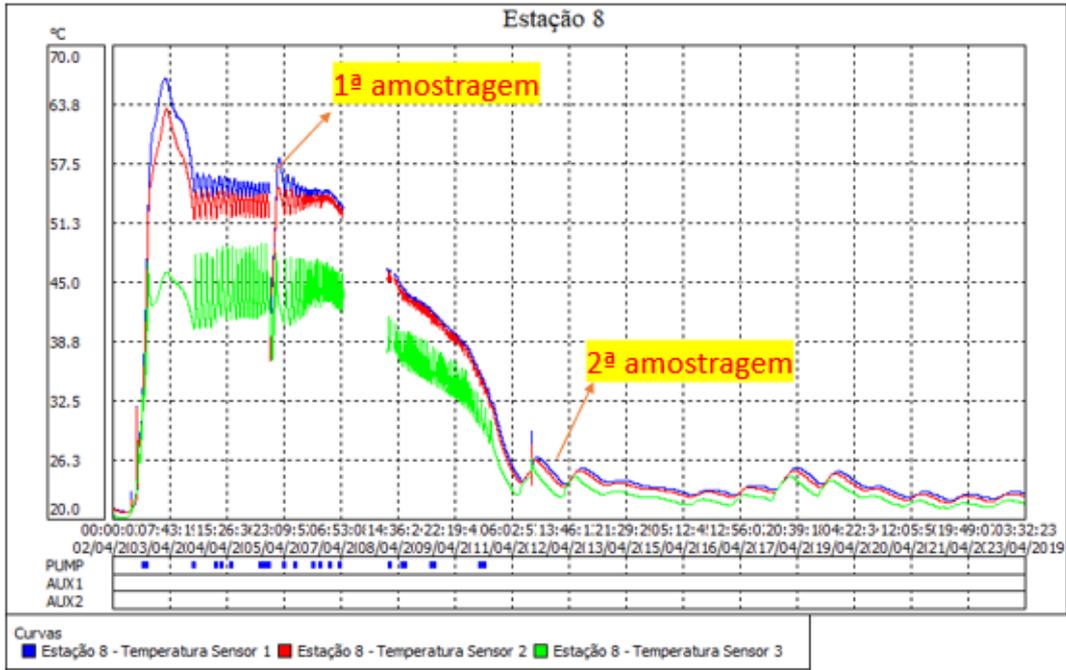


Figura 19: Perfil de temperatura reator 8

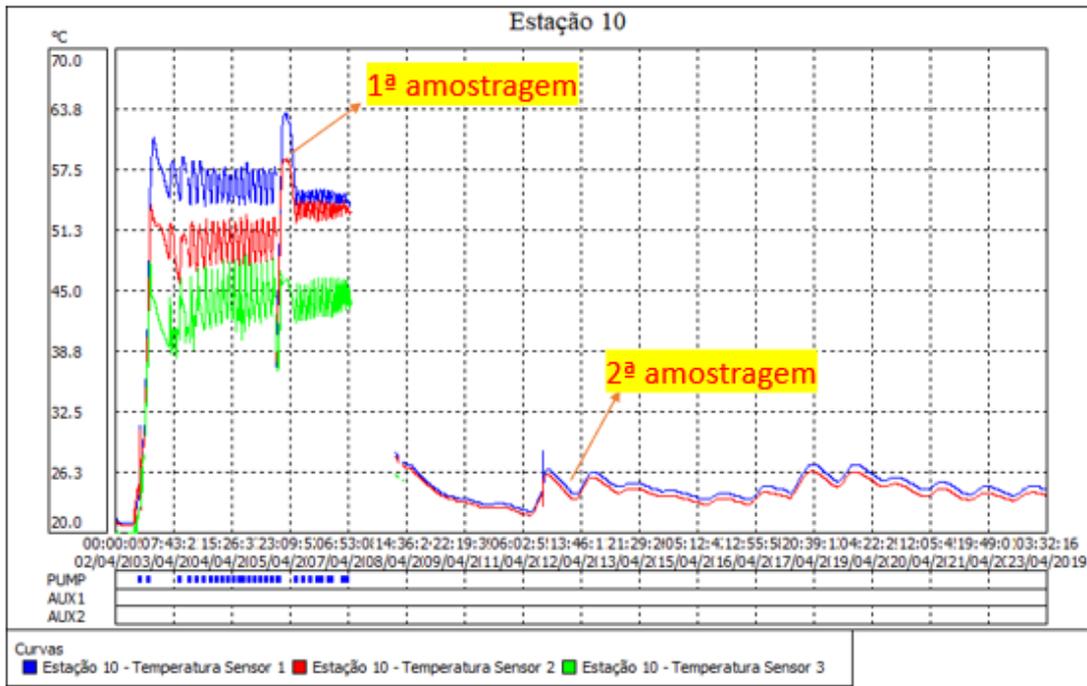


Figura 20: Perfil de temperatura reator 10

V.3 – Curvas geradas no Origin.

Ao término do experimento os registros do Sitrad foram exportados para o Origin e os perfis de temperatura foram gerados novamente. Neste programa foram calculadas, para cada reator, a área da curva de temperatura do processo de compostagem, bem como a área do perfil durante o processo termofílico e a área da curva superior a 55°C.

Esses valores foram escolhidos pois são, frequentemente, os parâmetros escolhidos para a verificação da qualidade de simulação de um processo de compostagem em escala da bancada.

Vale ressaltar que, devido à falta de luz ocorrida no laboratório e consequente perda de registros durante esse período, as curvas obtidas no Origin foram truncadas no período sem dados e os valores encontrados para as áreas calculadas são menores que os valores reais que seriam encontrados sem a ocorrência do imprevisto. As figuras a seguir (**Figuras 21, 22, 23, 24 e 25**) apresentam as curvas geradas no Origin e as áreas calculadas com o auxílio do programa.

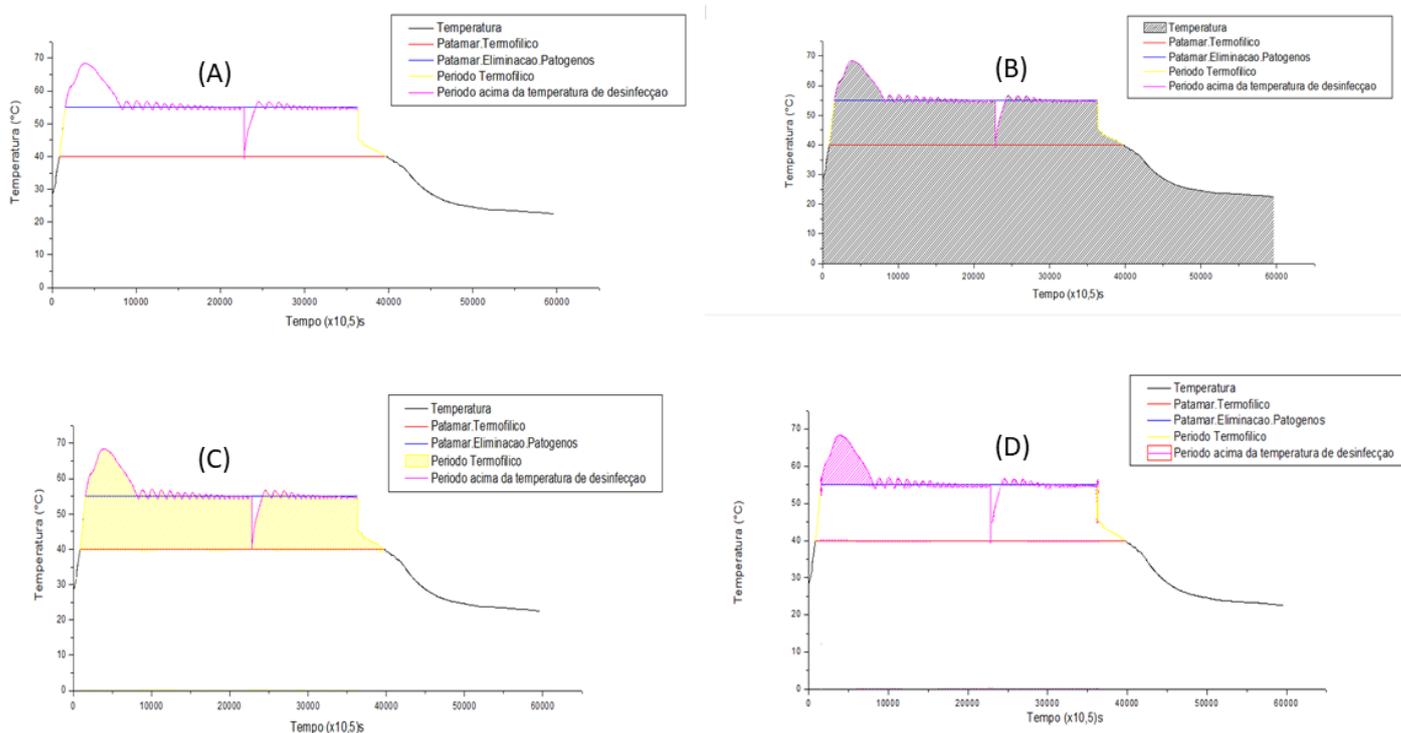


Figura 21: Curvas reator 1: (A) perfil de temperatura no Origin; (B) Área total do processo; (C) Área do processo termofílico; (D) Área acima do limiar inferior de desinfecção

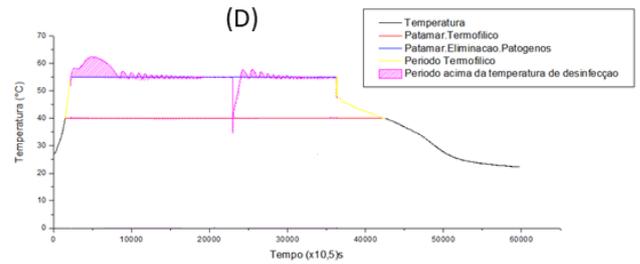
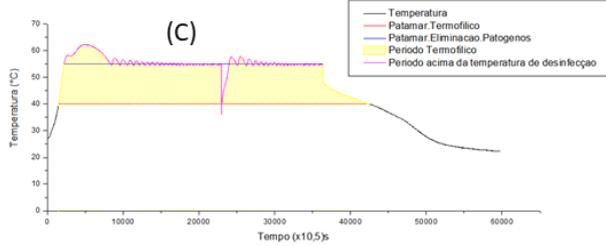
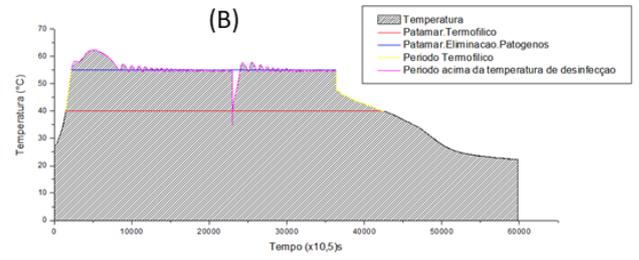
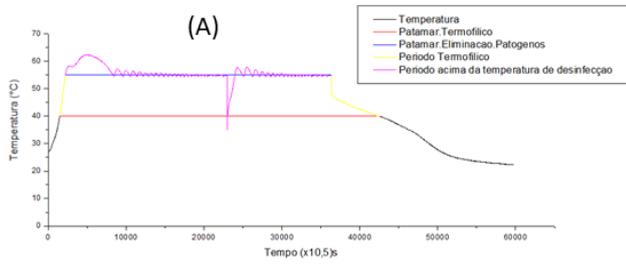


Figura 22: Curvas reator 4: (A) perfil de temperatura no Origin; (B) Área total do processo; (C) Área do processo termofílico; (D) Área acima do limiar inferior de desinfecção

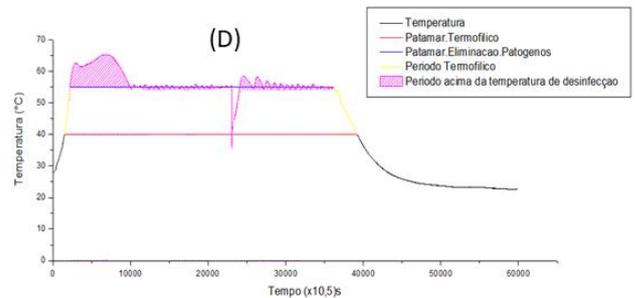
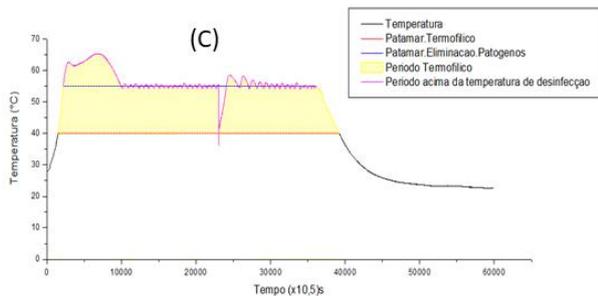
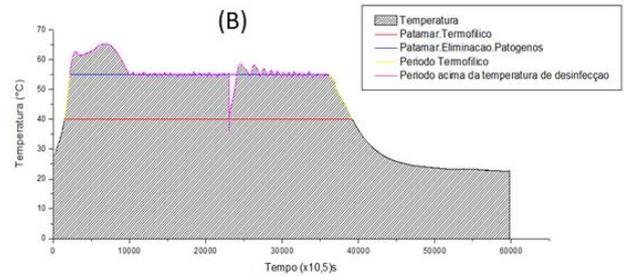
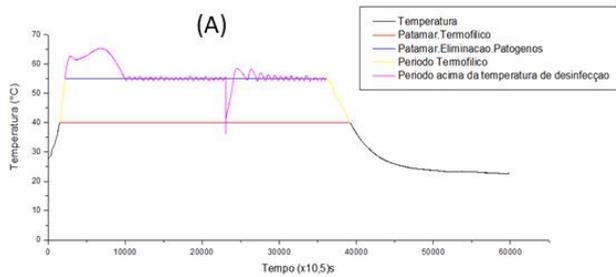


Figura 23: Curvas reator 6: (A) perfil de temperatura no Origin; (B) Área total do processo; (C) Área do processo termofílico; (D) Área acima do limiar inferior de desinfecção

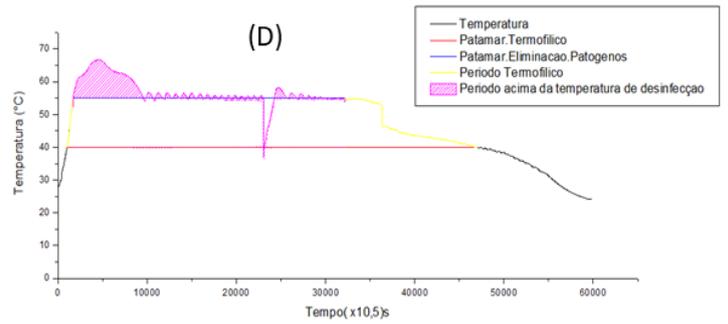
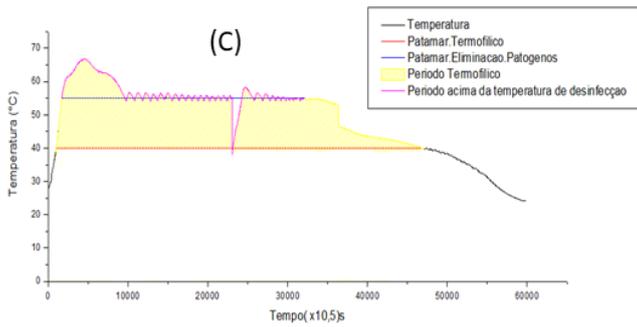
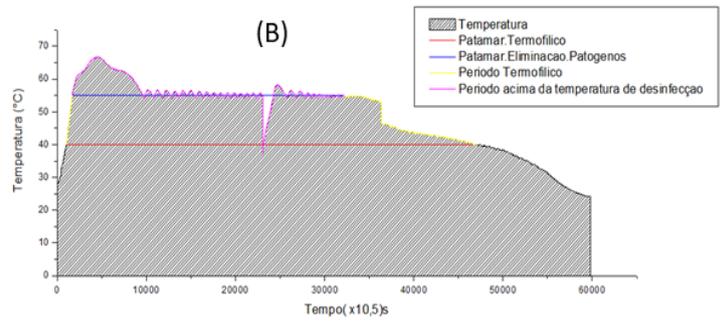
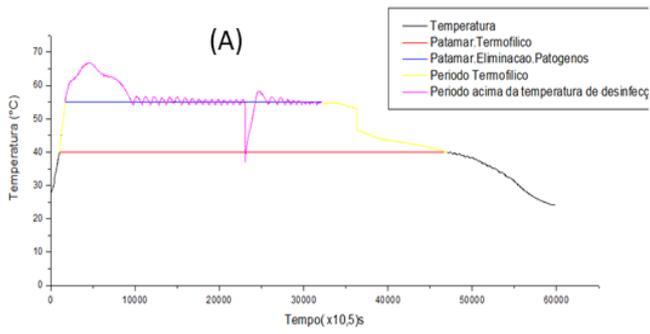


Figura 24 Curvas reator 8: (A) perfil de temperatura no Origin; (B) Área total do processo; (C) Área do processo termofílico; (D) Área acima do limiar inferior de desinfecção

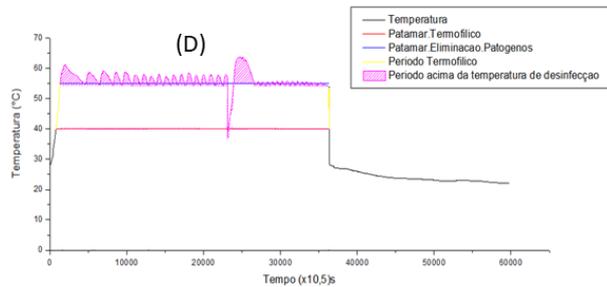
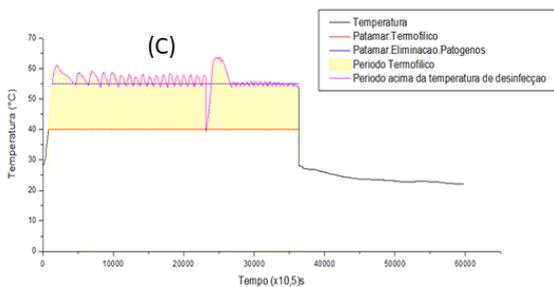
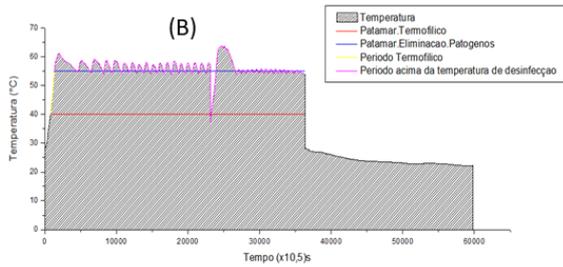
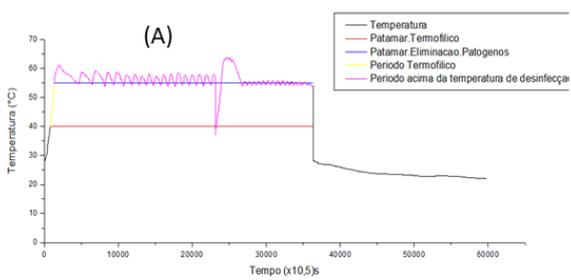


Figura 25: Curvas reator 10: (A) perfil de temperatura no Origin; (B) Área total do processo; (C) Área do processo termofílico; (D) Área acima do limiar inferior de desinfecção

Os valores das áreas indicadas nas figuras acima bem como as médias, desvio padrão e variância estão indicados na **Tabela 5**.

Tabela 5 Áreas calculadas no Origin

Reator	Atotal (°C.h)	A40(°C.h)	A55(°C.h)
1	7896,32	1706,98	146,77
4	8007,53	1642,46	73,79
6	7810,51	1726,40	157,38
8	8473,97	1781,27	166,02
10	7530,43	1669,68	127,98
Média	7943,75	1705,36	134,39
Desvio	344,98	53,47	36,73
Variância	4%	3%	27%

Um dos motivos que pode explicar a grande variância para o parâmetro (A55) pode ser falta de luz ocorrida no laboratório. A perda de registros ocorreu quando os reatores se encontravam próximo a este patamar de temperatura e informações de como os resíduos foram perdendo calor ao longo do tempo não puderam ser computadas como mostrado na **Figura 26**.

No entanto a baixa variância dos outros dois parâmetros são indicativos da robustez do método.

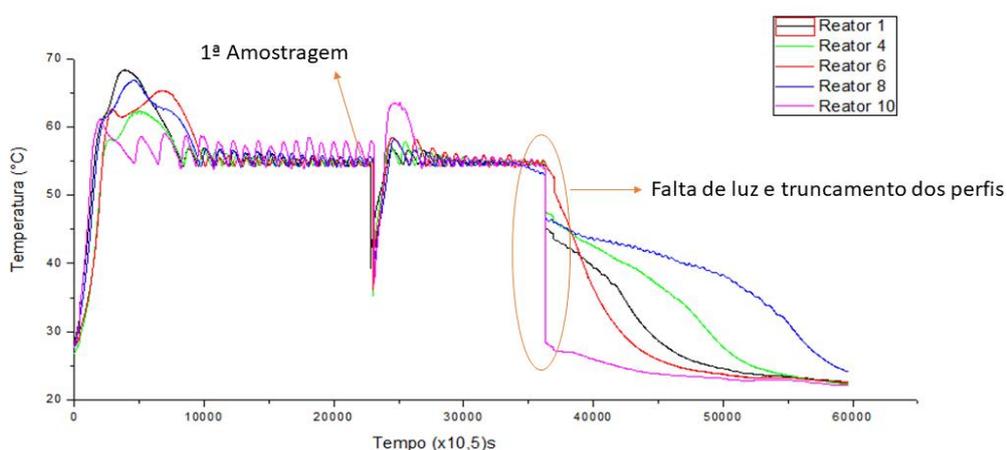


Figura 26: Perfis de temperatura na ocasião da falta de luz

V.4 – Duração de períodos de interesse

Assim como a área, a duração de determinados períodos de tempo também são utilizados para se verificar a qualidade da simulação do processo de compostagem. Esses períodos são: tempo necessário até o início da fase termofílica da compostagem, intervalo de tempo até o processo atingir sua temperatura máxima, duração da fase termofílica e intervalo de tempo do processo em temperaturas superiores a 55°C (limiar inferior de desinfecção de patógenos humanos). Os resultados obtidos são exibidos na **Tabela 6** a seguir:

Tabela 6: Duração dos períodos de interesse do processo de compostagem

Reator	Δt até 40 °C(h)	Δt até T _{max} °C(h)	Δt Termofílico(h)	Δt acima de 55°C(h)	T _{max} °C
1	2,45	11,19	138,2	60,68	68,4
4	4,28	14,13	144,6	57,75	62,3
6	4,32	18,87	135,2	68,01	65,3
8	2,91	12,86	158,4	61,38	66,8
10	2,32	72,00	70,1	75,39	63,6
Média	3,26	25,81	129,29	64,64	65,28
Desvio	0,98	25,98	34,26	7,08	2,44
Variância	30%	101%	26%	11%	4%

A queda de energia também teve impacto nos valores obtidos, no entanto, o valor real da fase termofílica (Δt Termofílico) poderia ser encontrado para 4 dos 5 reatores (1,4,6 e 8) uma vez que na última medição de temperatura antes da falta de luz e na primeira medição após o retorno da luz a temperatura dos reatores ainda se encontrava no patamar termofílico. Esse procedimento não foi realizado pois se estaria calculando a área e a duração termofílica de processos diferentes.

A grande variância encontrada no parâmetro intervalo até a temperatura máxima do processo de compostagem pode ser explicada pelo valor discrepante do reator 10. Isso aconteceu porque o biorreator 10 teve seu pico de temperatura após o revolvimento do resíduo em compostagem realizado após a primeira amostragem (terceiro dia de experimento). Realizada esta observação os demais parâmetros apresentam baixa variação quando se trata de processos biológicos.

V.5 – Balanço de massa

O balanço de massa, tanto fresca como seca, dos reatores também foi realizado. Nas tabelas a seguir temos as condições iniciais dos reatores tanto para massa fresca (MF) como massa seca (MS) dos reatores.

Tabela 7: Condições iniciais do balanço de massa

Reator	Tara (g)	Reator Cheio (g)	MF inicial(g)	MS inicial(g)
Reator 1	1527,3	2578,4	1051,1	436,2
Reator 4	1543,4	2550,0	1006,6	417,4
Reator 6	1562,2	2610,9	1048,7	429,4
Reator 8	1547,9	2689,2	1141,3	470,8
Reator 10	1541,7	2631,7	1090	414,7
Média	-	-	1067,5	433,7
Desvio	-	-	50,7	22,5
Variância	-	-	5%	5%

Os gráficos a seguir exibem o balanço de massa fresca e seca ao longo das amostragens realizadas ao longo do experimento. As amostragens foram realizadas no dia inicial, no terceiro, no nono e no último dia de experimento.

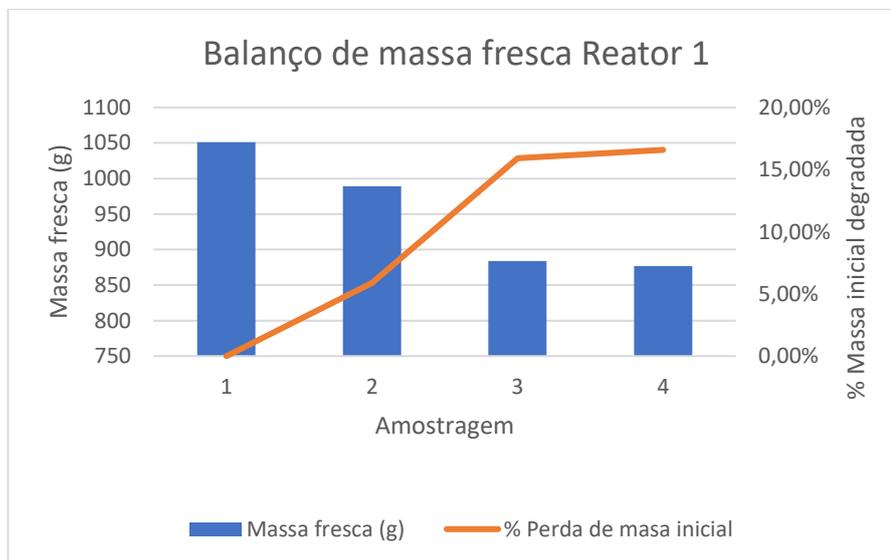


Figura 27: Balanço de massa fresca reator 1

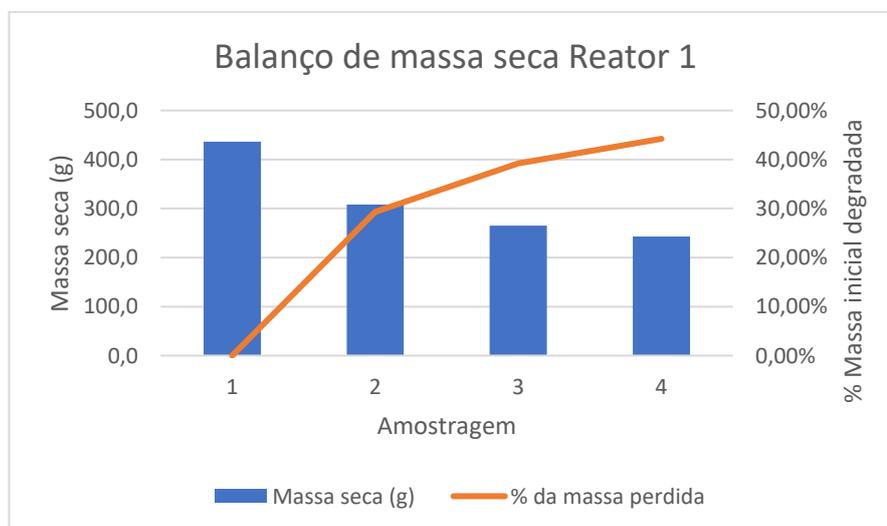


Figura 28: Balanço de massa seca reator 1

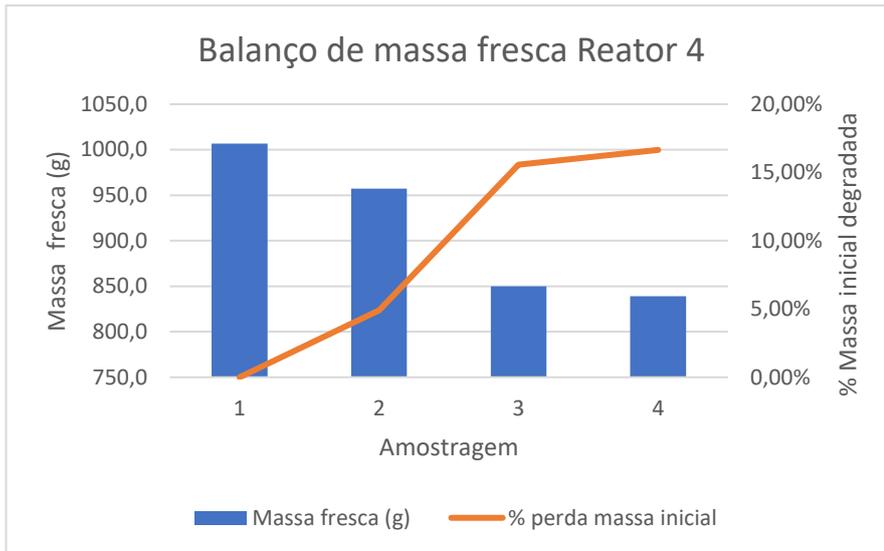


Figura 29: Balanço de massa fresca reator 4

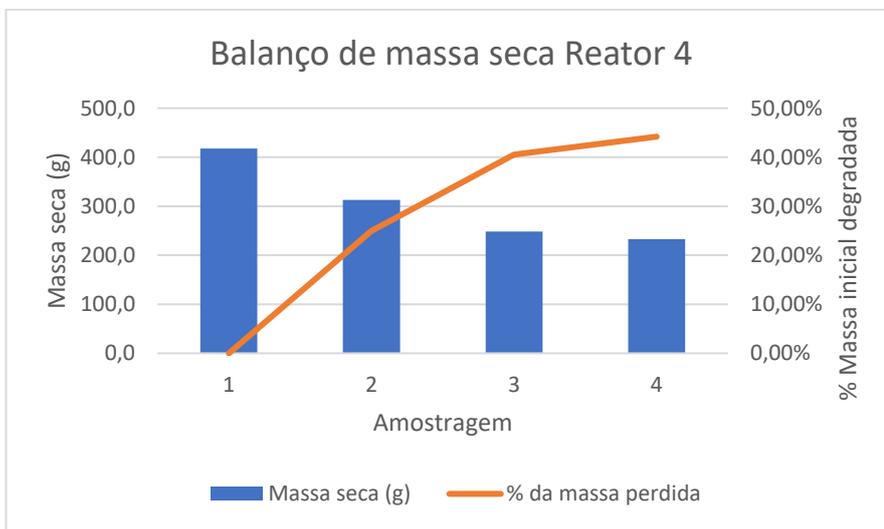


Figura 305: Balanço de massa seca reator 4

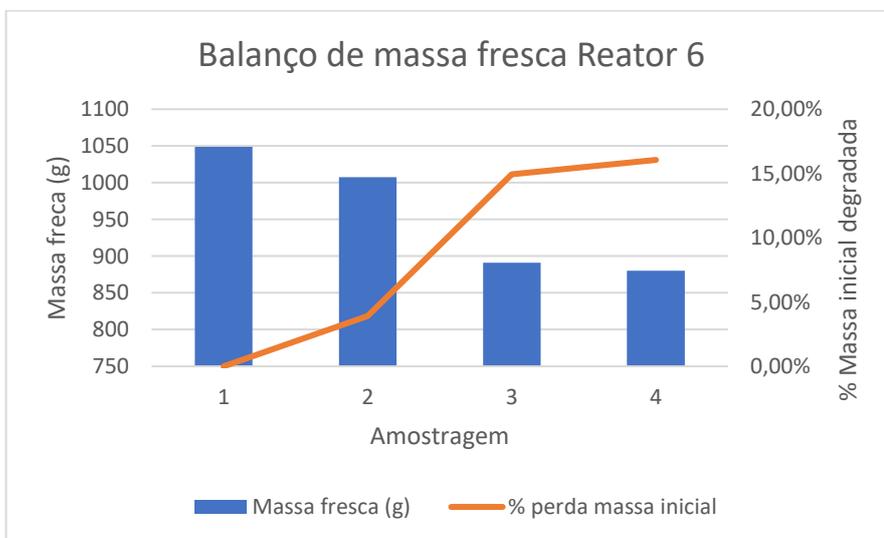


Figura 31: Balança de massa fresca reator 6

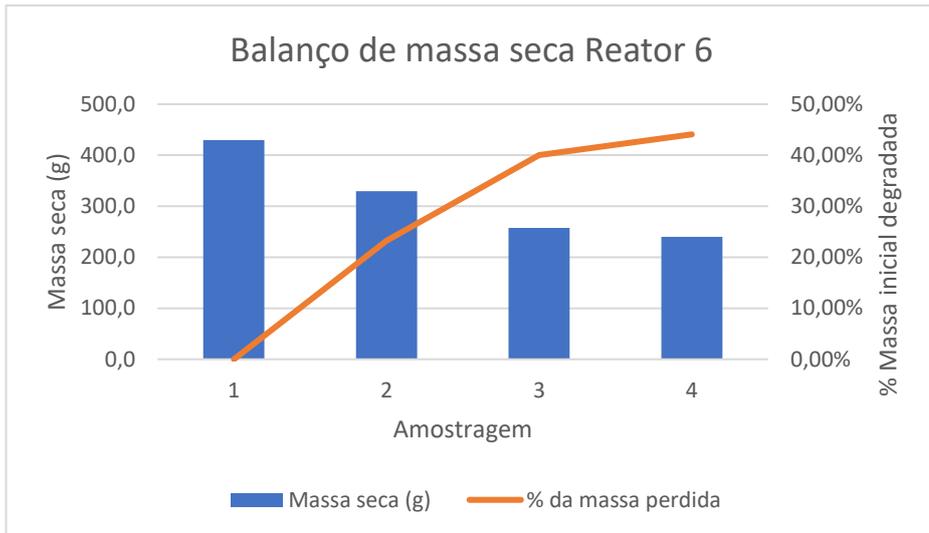


Figura 6: Balanço de massa seca reator 6

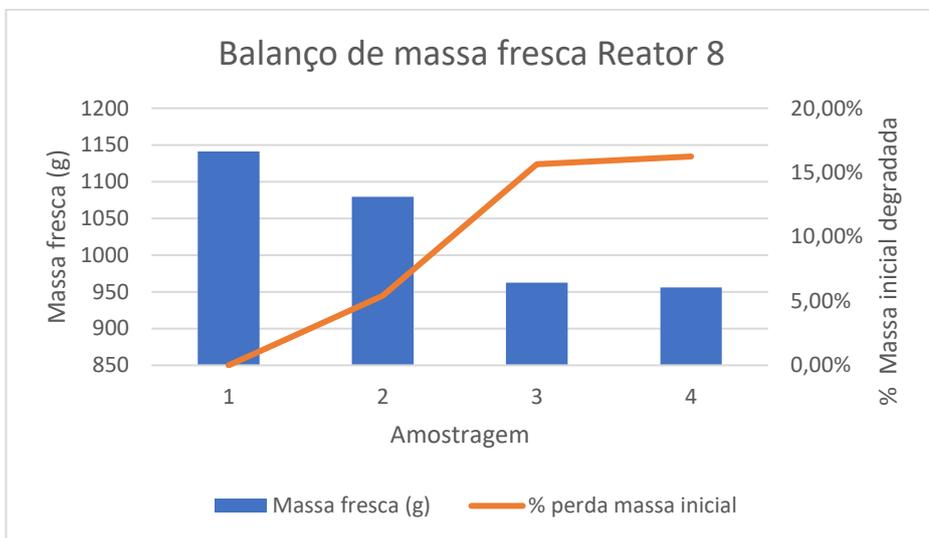


Figura 33: Balanço de massa fresca reator 8

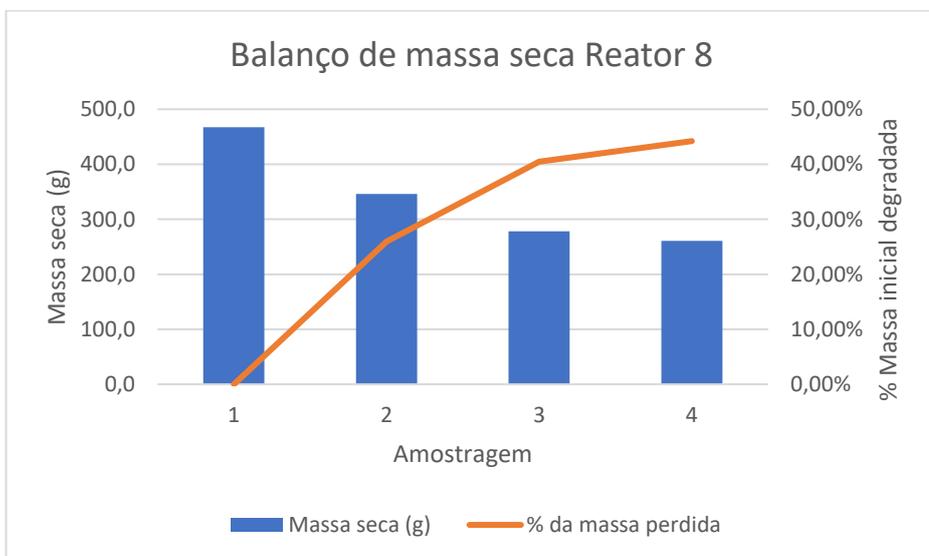


Figura 34: Balanço de massa seca reator 8

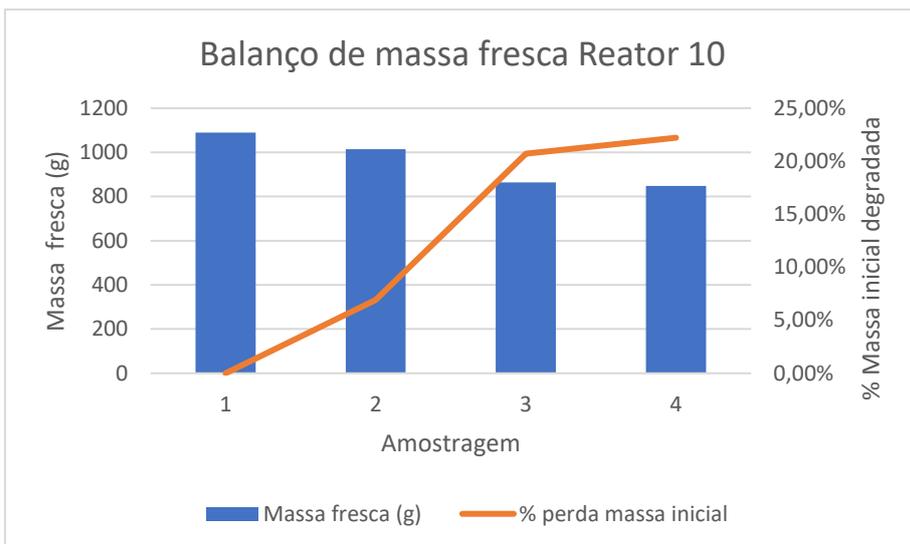


Figura 35: Balço de massa fresca reator 10

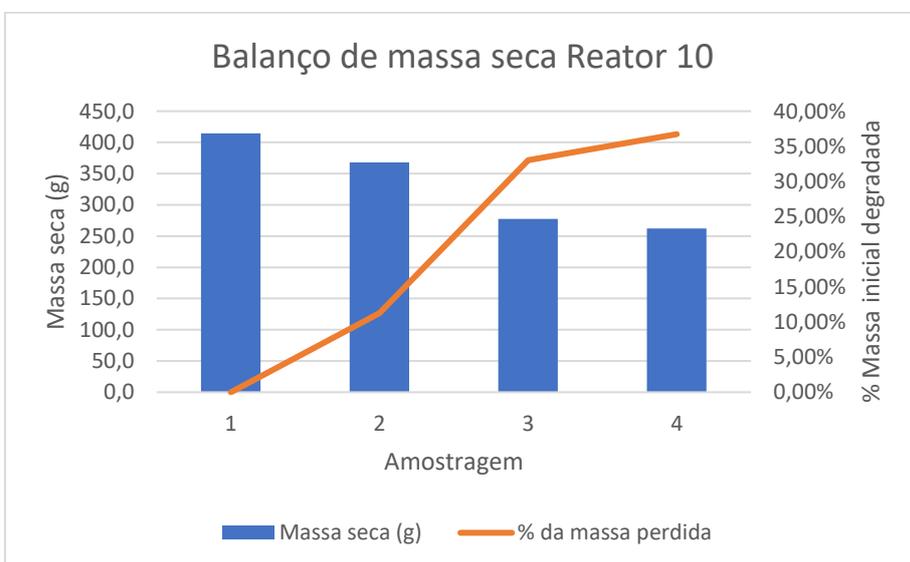


Figura 36: Balço de massa seca reator 10

Como era de se esperar a maior parte da degradação da matéria orgânica se dá durante a fase termofílica do processo de compostagem que tem duração em média de uma semana. A totalidade da matéria orgânica degradada durante o período termofílico é averiguada durante a terceira amostragem (ocorrida no 9º dia), a partir de então a quantidade de material degradado permanece praticamente igual mesmo com o material ficando nos reatores por mais 12 dias.

A **Tabela 8** traz um resumo do balanço de massa ocorridos nos reatores bem como suas médias, desvio e variância.

Tabela 8: Resumo do balanço de massa

Reator	MF inicial(g)	MS inicial(g)	MF final (g)	MS final (g)	Redução MF	Redução MS
Reator 1	1051,1	436,2	876,7	243,3	16,59%	44,23%
Reator 4	1006,6	417,4	839,0	233,0	16,65%	44,19%
Reator 6	1048,7	429,4	880,3	240,1	16,06%	44,08%
Reator 8	1141,3	470,8	955,9	260,7	16,24%	44,63%
Reator 10	1090	414,7	847,9	262,4	22,21%	36,72%
Média	1067,5	433,7	880,0	247,9	18%	43%
Desvio	50,70	22,53	46,05	13,0	0,0	0,0
Variância	5%	5%	5%	5%	15%	8%

V.6 – Análise comparativa

A comparação dos perfis de temperatura dos reatores com uma curva típica de um processo de compostagem (**Figura 1**) indica que, embora tenham formas ligeiramente diferentes, todos apresentam o mesmo padrão de comportamento:

- Elevação inicial de temperatura acelerada atingindo patamares termofílicos
- Estabelecimento de um platô em temperaturas termofílicas
- Gradual retorno da temperatura de operação a níveis mesofílicos e então a temperatura ambiente.

Além disso, os valores encontrados para a área do perfil de temperatura (A_{total}), área do perfil durante o período termofílico (A_{40}) e área do perfil acima dos 55°C (A_{55}) são muito próximos daqueles encontrados na literatura (MASON, 2005) para a avaliação da qualidade da simulação do processo de compostagem. As **Tabelas 9,10 e 11** demonstram essa proximidade:

Tabela 9 Parâmetros de área utilizados para a validação do processo de compostagem Fonte: Adaptado de MASON 2005

Tipo de Reator	Escala	Área T > 40°C (°C.dias)	Área T > 55°C(°C.dias)	Substrato utilizado	Fonte dos dados de temperatura
CDT	Bancada	85	3,2	Esterco de cavalo, alfafa e restos de papel	MAGALHÃES et al. 1993

Tabela 10 Resultados de área obtidos com o experimento

Reator	Atotal (°C.dia)	A40(°C.dia)	A55(°C.dia)
1	329,01	71,12	6,12
4	333,65	68,44	3,07
6	325,44	71,93	6,56
8	353,08	74,22	6,92
10	313,77	69,57	5,33
Média	330,99	71,06	5,60
Desvio	14,37	2,23	1,53
Variância	4%	3%	27%

Tabela 11 Comparação entre os valores experimentais de área e a referência

Reator	A40/Referência (%)	A55/Referência (%)
1	84%	191%
4	81%	96%
6	85%	205%
8	87%	216%
10	82%	167%
Média	84%	175%
Desvio	3%	48%
Variância	3%	27%

A duração dos períodos de interesse (duração da fase termofílica e tempo acima dos 55°C) também ficaram próximos aos encontrados na literatura.

Tabela 12 Parâmetros de tempo utilizados para a validação do processo de compostagem Fonte: Adaptado de MASON 2005

Tipo de Reator	Escala	$\Delta t T > 40^{\circ}\text{C}$ (dias)	$\Delta t T > 55^{\circ}\text{C}$ (dias)	Substrato utilizado	Fonte dos dados de temperatura
CDT	Bancada	6,6	3,7	Esterco de cavalo, alfafa e restos de papel	MAGALHÃES et al. 1993

Tabela 13 Resultados de tempo obtidos com o experimento

Reator	Δt Termofílico(dias)	Δt T>55°C (dias)
1	5,8	2,53
4	6,0	2,41
6	5,6	2,83
8	6,6	2,56
10	2,9	3,14
Média	5,39	2,69
Desvio	1,43	0,30
Var	26%	11%

Tabela 14 Comparação entre os valores experimentais de tempo e a referência

Reator	Δt Termofílico/Referência (%)	Δt T>55°C / Referência (%)
1	87%	68%
4	91%	65%
6	85%	77%
8	100%	69%
10	44%	85%
Média	82%	73%
Desvio	22%	8%
Var	26%	11%

Vale ressaltar que a interrupção de energia ocorrida no laboratório impediu que estes valores fossem ainda mais próximos que os encontrados na literatura.

Capítulo VI – CONCLUSÃO

A análise dos resultados do experimentos permite afirmar que o método empregado no laboratório de biorreatores e bioprocessos da Embrapa-solos simula de forma satisfatória o processo de compostagem em escala real. Possibilitando o estudo de aspectos da compostagem e o potencial de degradação de substratos utilizando quantidades de resíduos muito menores que os necessários para a realização dos mesmos em escala real, entre 36 e 40 litros de mistura para o abastecimento dos 12 reatores em comparação com toneladas de resíduos para a formação de uma leira. Tornando possível realizar planejamentos experimentais com repetições e planejamentos fatoriais de otimização do processo com grande rapidez na obtenção dessas respostas.

Esta afirmação é verdadeira uma vez que curvas de temperatura dos biorreatores obtidas compreendem as 4 fases da compostagem e principalmente a fase termofílica típica, com manutenção de temperaturas entre o patamar de 40°C e 65°C, como resultado da atividade biológica e retenção do calor. A forma de controle de temperatura por diferença (CDT) se mostrou eficiente na compensação das perdas de calor condutivo, permitindo a reprodução das curvas típicas do bioprocessos da compostagem. Soma-se a este fato a redução de massa seca (sólidos totais) encontrada em todos os reatores fato que evidencia a biodegradação ocorrida ao longo do experimento.

O pequeno coeficiente de variação encontrado (< 5%) demonstra a robustez (repetibilidade) do sistema, tornando-o apropriado para condução de experimentos controlados que irão ajudar no estudo técnico e científico do bioprocessos da compostagem. Abrindo caminho para avanços na manipulação do processo, que tem como principais desafios: redução do tempo de maturação do composto, volatilização de amônia, degradação de poluentes orgânicos (ex. antibióticos em esterco de animais). Uma vez que esses pequenos coeficientes de variação permitem a comparação do efeito diferentes tratamentos (inoculantes diferentes, por exemplo) na resposta dada pelo bioprocessos para essas questões com rigor científico

Referências

- [1] INÁCIO, C.T, MILLER, P.R.M; **Compostagem: Ciência e prática para a gestão de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa 2009
- [2] EPSTEIN, E; **The Science of composting**. Lancaster. Technomic publishing, 1997
- [3] RYNK, R. **On-farm composting handbook**. Ithaca, NY: NREAS.1998
- [4] MASON, I. G.; MILKE, M. W., “Physical modeling of composting environment: A review. Part 1: Reactor systems”. **Waste Management**. v.25, p481-500. 2005 a
- MASON, I. G.; MILKE, M. W., “Physical modeling of composting environment: A review. Part 2: Simulation performance.” **Waste Management**. v.25, p501-509. 2005b
- [5] Hogan, J.A., Miller, F.C., Finstein, M.S.,1989. “Physical modeling of the composting ecosystem.” **Applied and Environmental Microbiology** 55 (5),1082–1092.
- [6] Kithome, M., Paul, J., Bomke, A., 1999. “Reducing nitrogen losses during simulated composting of poultry manure using adsorbents or chemical amendments.” **Journal of Environmental Quality** 28 (1), 194–201.
- [7] Michel, F.C., Reddy, C.A., Forney, L.J., 1995. “Microbial-degradation and humification of the lawn care pesticide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid during the composting of yard trimmings”. **Applied and Environmental Microbiology** 61 (7), 2566–2571.
- [8] Huang, J., Wang, C., Jih, C., 2000. “Empirical model and kinetic behavior of thermophilic composting of vegetable waste.” **Journal of Environmental Engineering-ASCE** 126 (11), 1019–1025.
- [9] Michel, F.C., Reddy, C.A., Forney, L.J., 1993. “Yard waste composting: studies using different mixes of leaves and grass in a laboratory scale system.” **Compost Science & Utilisation** 1 (3), 85–96.
- [10] Sundberg, C., Jonsson, H., 2003.” Down-scaling a large composting plant to pilot-scale for systematic research.” In: **Proceedings of the Fourth International Conference of ORBIT Association on Biological Processing of Organics: Advances for a Sustainable Society**, 30th April–2 May, Perth, Australia, pp. 388–397.
- [11] Keener, H.M., Elwell, D.J., Grande, D., 2002. “NH₃ emissions and Nbalances for a 1.6 million caged layer facility: manure belt composting vs. deep pit operation”. **Transactions of the ASAE** 45 (6), 1977–1984.
- [12] Hansen, R., Keener, H., Hoitnick, H., 1989. “Poultry manure composting: an exploratory study”. **Transactions of the ASAE** 32 (6), 2151–2158.
- [13] Cronje, A., Turner, C., Williams, A., Barker, A., Guy, S., 2003. “Composting under controlled conditions”. **Environmental Technology** 24 (10), 1221–1234.

[14] McCartney, D., Chen, H., 2001. "Using a biocell to measure effect of compressive settlement on free air space and microbial activity in windrow." **Compost Science & Utilisation** **9** (4), 285–302.

[15] van Bochove, E., Couillard, D., Nolin, M.C., 1995. "Characterization of the composting stages by a multivariate-analysis – application to the nitrogen-cycle." **Environmental Technology** **16** (10), 929–941.

[16] Cook, B.D., Bloom, P.R., Halbach, T.R., 1997. "Fate of a polyacrylate polymer during composting of simulated municipal solid waste". **Journal of Environmental Quality** **26** (3), 618–625.

[17] Stocks, C., Barker, A.J., Guy, S., 2002. "The composting of brewery sludge". **Journal of the Institute of Brewing** **108** (4), 452–458.

[18] Atkinson, C.F., Jones, D.D., Gauthier, J.J., 1996a. "Biodegradabilities and microbial activities during composting of poultry litter". **Poultry Science** **75** (5), 608–617.

Atkinson, C.F., Jones, D.D., Gauthier, J.J., 1996b. "Biodegradabilities and microbial activities during composting of oxidation ditch sludge". **Compost Science & Utilisation** **4** (1), 84–96.

Atkinson, C.F., Jones, D.D., Gauthier, J.J., 1996c. "Biodegradabilities and microbial activities during composting of municipal solid waste in bench scale reactors." **Compost Science & Utilisation** **4** (4), 14–23.