

EDSON ALVES FIGUEIRA JÚNIOR

**PROJETO INDUSTRIAL PARA AERAÇÃO
AUTOMÁTICA DE LEIRAS DE COMPOSTAGEM
ORGÂNICA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2012

EDSON ALVES FIGUEIRA JÚNIOR

**PROJETO INDUSTRIAL PARA AERAÇÃO
AUTOMÁTICA DE LEIRAS DE COMPOSTAGEM
ORGÂNICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Solidônio R. de Carvalho

Co-orientador: Prof. Dr. Valério Luiz Borges

UBERLÂNDIA - MG

2012

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por nos dar saúde e força para enfrentar todos os desafios e dificuldades encontrados durante nossas vidas.

À Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Mecânica e à Pós-Graduação pela oportunidade de realizar este curso.

Ao orientador, Solidônio Rodrigues de Carvalho, pela confiança depositada para a realização deste trabalho e por toda orientação passada ao longo deste período.

Ao co-orientador, Válerio Luiz Borges, que sempre planta a semente da dúvida em nossos pensamentos, estimulando o raciocínio.

A toda equipe do Laboratório de Transferência de Calor e Massa que demonstraram em diversas oportunidades que lutamos juntos para alcançar o sucesso de todos.

Aos órgãos de fomento CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

À Valoriza Fertilizantes LTDA pelo financiamento do projeto e oportunidade de instalá-lo em uma planta industrial.

A toda minha família, em especial Tâmara Prado de Moraes, Edson Alves Figueira, Gizélia Pereira de Medeiros, Gisliane Alves Pereira, pelo apoio incondicional.

Aos amigos que direta ou indiretamente ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas.....	viii
Lista de Símbolos	ix
Resumo	xi
Abstract	xii
CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 - Introdução	4
2.2 - O processo de compostagem.....	5
2.3 - Fatores que afetam o processo de compostagem	8
2.3.1 - <i>Microrganismo</i>	9
2.3.2 - <i>Umidade</i>	9
2.3.3 - <i>pH</i>	10
2.3.4 - <i>Temperatura</i>	11
2.3.5 - <i>Aeração</i>	13
2.4 – Sistemas de Compostagem.....	15
2.5 – Tecnologia nos processos de compostagem	19
2.5.1 - <i>Automação do processo de compostagem</i>	19
2.5.2 - <i>Estudos envolvendo sistemas de aeração na compostagem orgânica</i>	23
CAPITULO 3 - CONCEPÇÃO E MONTAGEM DO SISTEMA DE AERAÇÃO	26
3.1 - Introdução	26
3.2 - Estudos de Caso: Processo de produção de fertilizantes da empresa valoriza	27
3.3 - Concepção do Sistema de Aeração Forçada Automatizada (SAFA)	29
3.4 - Montagem do SAFA	46
CAPITULO 4 - RESULTADOS	54
CAPITULO 5 - CONCLUSÃO	64
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ciclo da compostagem orgânica.....	6
Figura 2.2 - Fases da compostagem.....	7
Figura 2.3 - Pátio de homogeneização.....	7
Figura 2.4 - Pátio de compostagem	8
Figura 2.5 - Peneiramento do composto	8
Figura 2.6 - Efeito de diferentes percentagens de umidade (<i>MC</i>) na degradação de carbono orgânico total (<i>TOC degraded</i>) no processo de compostagem	10
Figura 2.7 - Variação temporal do pH em uma pilha de compostagem. As letras A, B, C e D representam cada fase do processo	11
Figura 2.8 - Temperatura durante o processo de compostagem orgânica.....	12
Figura 2.9 - Curva teórica da demanda de oxigênio na compostagem.....	14
Figura 2.10 - Modelo simplificado da compostagem orgânica	15
Figura 2.11 - Efeito chaminé em leiras de compostagem.....	15
Figura 2.12 - Revolvimento de leiras de compostagem.....	16
Figura 2.13 - Leiras estáticas com aeração forçada	17
Figura 2.14 - Reator de compostagem.....	17
Figura 2.15 - Sensor de oxigênio	19
Figura 2.16 - Aeração forçada, a) saídas de ar no piso e b) ventiladores centrífugos fixados na parede e conectados à tubulação	20
Figura 2.17 - Revolvimento automatizado de leiras de compostagem.....	20
Figura 2.18 - Equipamento utilizado para aquisição de dados de temperatura e teor de oxigênio	21
Figura 2.19 - Imagens do sistema de aeração desenvolvido pela <i>ECS</i>	21
Figura 2.20 - Sistemas improvisados de aeração de leiras de compostagem	22
Figura 2.21 - Esquema do processo de compostagem com aeração e monitoramento.....	23
Figura 2.22 - Temperaturas em diversas posições da leira	24
Figura 2.23 - Teor de oxigênio em diversas posições da leira.....	24
Figura 3.1 - Montagem da leira sobre a tubulação perfurada	27
Figura 3.2 - Tubulação utilizada para aeração das leiras de compostagem orgânica na empresa.....	28

Figura 3.3 - Trator adaptado com ventilador para aeração das leiras. a) Trator agrícola com ventilador centrífugo adaptado; b) Aeração no pátio de compostagem c) Conexão entre a tubulação de ar do trator e tubulação inserida no interior da leira	28
Figura 3.4 - Dimensões do pátio de compostagem: a) Disposição das leiras; b) Região de testes na qual será instalado o sistema de ventilação. Dimensões em metros	29
Figura 3.5 - Tubo de pitot e manômetro instalados na saída de ar do ventilador.....	30
Figura 3.6 - Esquema adotado para a definição da vazão e pressão de trabalho do ventilador	31
Figura 3.7 - Curva característica do ventilador.	32
Figura 3.8 - Fluxograma de funcionamento do algoritmo utilizado para solução da modelo matemático	35
Figura 3.9 - Curva característica do VCC1	36
Figura 3.10 - Gráfico da altura manométrica do VCC1	37
Figura 3.11 - Imagem do tubo de PVC obtida por interferometria a laser	38
Figura 3.12 - VCC2	39
Figura 3.13 - Curva de desempenho do VCC2.....	39
Figura 3.14 - Curvas de energia do VT e VCC2, juntamente com seus pontos de trabalho	40
Figura 3.15 - Comparação da vazão sem a leira do VCC2 com o VT	40
Figura 3.16 - Esquema do dispositivo desenvolvido para medição de pressão e velocidade do ar	41
Figura 3.17 - Mostra o aparato experimental em uso na empresa.....	42
Figura 3.18 - Detalhes da montagem experimental em uso na empresa.....	42
Figura 3.19 - Comparação da vazão do VCC com o VT, considerando $K = 69,97$	44
Figura 3.20 - Comparação da pressão do VCC com o VT, considerando $K = 69,97$	44
Figura 3.21 - Comparação da vazão do VCC com o VT, considerando $K = 303,29$	45
Figura 3.22 - Comparação da pressão do VCC com o VT, considerando $K = 303,29$	45
Figura 3.23 - Tubulação que conecta o ventilador às leiras de compostagem.....	46
Figura 3.24 - Tubulação de aeração: a) união das partes utilizando cola química; b) tubos de PVC conectado à leira; c) prática padrão da empresa que agrega perda de carga.....	47
Figura 3.25 - Central eletrônica dos ventiladores	48
Figura 3.26 - Placa mãe da central eletrônica	49
Figura 3.27 - Central eletrônica do sistema de aeração automatizado (SAFA).....	50
Figura 3.28 - Detalhes da rede elétrica do galpão de compostagem, canaletas fixadas na estrutura metálica e a posição onde a central do SAFA será instalada	51
Figura 3.29 - Posição do ventilador e posicionamento incorreto do fios	52
Figura 3.30 - SAFA instalado em uma leira.	53
Figura 3.31 - Esquema do SAFA instalado na empresa.	53

Figura 4.1 - Protótipo do sistema de aeração para oito leiras.....	54
Figura 4.2 - Gráfico de teor de O ₂ em leiras de compostagem usando sistema de aeração.....	55
Figura 4.3 - Coleta de amostras para análise do teor de umidade: a) trado a 0,30m; b) trado a 1,00m.....	57
Figura 4.4 - Peneiramento do fertilizante orgânico	59
Figura 4.5 - Composto peneirado.....	59
Figura 4.6 - Analisador de gases Testo 350s	60
Figura 4.7 - Monitoramento de gases e temperatura nas leiras: a) Equipamento Testo 350S, b) detalhes da tubulação.....	60
Figura 4.8 - Evolução da temperatura e teor de oxigênio durante o ciclo de compostagem orgânica.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Temperaturas e tempos de exposição para a destruição de microrganismos patogênicos	13
Tabela 2.2 - Principais vantagens e desvantagens dos sistemas de compostagem	18
Tabela 3.1 - Valores de pressão e vazão do VCC1, com os dados obtidos após os cálculos	36
Tabela 3.2 - Características da tubulação no dimensionamento do SAFA.....	38
Tabela 3.3 - Dados experimentais de duas leiras de compostagem orgânica	42
Tabela 3.4 - Estimativa da perda de carga de duas leiras de compostagem orgânica.....	43
Tabela 4.1 - Teor de umidade das leiras utilizando a prática padrão e o sistema de aeração automatizada	56
Tabela 4.2 - Taxa de peneiramento do produto obtido por meio da prática padrão	58
Tabela 4.3 - Taxa de peneiramento com sistema de aeração forçada automatizada (SAFA)	58
Tabela 4.4 - Níveis máximos e mínimos do teor de oxigênio e temperatura em função da variação do tempo de aeração. Data de coleta dos dados: 15° dia de compostagem.....	61

LISTA DE SÍMBOLOS

CV	Cavalo-Vapor
D	Diâmetro (m)
f	Fator de atrito
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
g	Gravidade (m/s ²)
H	Altura Manométrica (m)
h	Horas
K	Coeficiente de perda de carga
k	Constante de Chauvenet
L	Comprimento (m)
$L_{equivalente}$	Comprimento equivalente (m)
LTCM	Laboratório de Transferência de Calor e Massa
m	Metros
m ³	Metros cúbicos
min	Minutos
mm	Milímetros
mmca	Milímetros de coluna d'água
P	Pressão (KPa)
Pa	Pascal
PVC	Policloreto de polivinila
Q	Vazão (m/h ³)
Re	Número de Reynolds
s	Segundos
$R_{\Delta H}(Q)$	Resistência do fluido (m)
SAFA	Sistema de Aeração Forçada Automatizado
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
V	Velocidade do fluido (m/s)
VCC1	Ventilador Centrífugo Comercial 1
VCC2	Ventilador Centrífugo Comercial 2
\dot{V}_{ex}	Vazão experimental
\dot{V}_{st}	Vazão calculada

vent	Ventilador
VT	Ventilador acoplado ao trator
z	Elevação do fluido (m)
ε	Rugosidade absoluta da parede do tubo
ρ	Densidade (Kg/m ³)
α	Coeficiente de relaxação
ν	Viscosidade

FIGUEIRA JR, E.A. **PROJETO INDUSTRIAL PARA AERAÇÃO AUTOMÁTICA DE LEIRAS DE COMPOSTAGEM ORGÂNICA**. 2012. 86f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.

RESUMO

A compostagem é uma alternativa ambientalmente correta para o aproveitamento e tratamento dos resíduos orgânicos gerados pelo homem. Apesar de a decomposição ocorrer naturalmente, a manipulação de alguns fatores, como o nível de oxigênio, a temperatura, o teor de umidade e o pH, podem alterar a velocidade do processo, acelerando a atividade microbiana. A aeração é uma prática crucial durante o processo de compostagem, pois pode garantir suprimentos adequados de oxigênio, controlar a temperatura e reduzir o teor de umidade nas leiras. Objetivou-se neste trabalho desenvolver um processo automatizado de aeração de leiras de compostagem para acelerar e otimizar a produção de biofertilizantes em uma planta industrial. O experimento foi conduzido na Empresa Valoriza Agronegócios com sede na cidade de Uberlândia - MG. Baseado em testes realizados no sistema de ventilação padrão da empresa foi projetado um sistema de aeração forçada automatizado (SAFA). Após a instalação do sistema, testes de umidade, do teor de oxigênio e de temperatura foram realizados para verificar a eficiência do sistema de aeração desenvolvido.

Palavras-chave: compostagem orgânica, sistema automatizado de aeração forçada, teor de oxigênio, temperatura.

FIGUEIRA JR, E.A. **INDUSTRIAL PROJECT FOR AUTOMATED AERATION OF ORGANIC COMPOSTING PILES**. 2012. 86p. M. Sc. Dissertation Federal University of Uberlândia.

ABSTRACT

Composting is a safety environmental alternative to reuse and treat organic wastes produced by human-beings. Although decomposition naturally happens, the handling of some factors, such as oxygen level, temperature, moisture content and pH, can alter the process speed, accelerating microbial activity. Aeration is a crucial practice during the composting process, since it can ensure adequate oxygen supply, temperature control and moisture content reduction in the windrows. Therefore, this work aimed to develop an automated process of compost pile aeration in order to accelerate and optimize the production of biofertilizers in an industrial plant. The trial was carried out at Valoriza Fertilizantes Company located in the city of Uberlândia - MG. Based on previous tests done in the company's standard ventilation system an automated system of forced aeration (SAFA) was projected. After installing this system, moisture content, oxygen level and temperature tests were performed aiming to verify the efficiency of the developed aeration system.

Keywords: organic composting, automated system of forced aeration, oxygen content and temperature.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A compostagem orgânica é a destinação correta do lixo orgânico proveniente de centros urbanos, indústrias e da criação de animais. Nas últimas décadas, este material era destinado a lixões, aterros sanitários e aterros controlados, juntamente com o restante do lixo produzido, acarretando diversos danos ambientais. No Brasil, a porcentagem de coleta seletiva do lixo ainda é baixa, se comparada ao volume de resíduos orgânicos gerados pela população. De acordo com dados da organização não-governamental CEMPRE (Compromisso Empresarial para Reciclagem), constituída por empresas como a Alcoa, Ambev, Wal-Mart Brasil, Philips, Sadia, entre outras, o Brasil recicla, aproximadamente, 1,5% do lixo sólido orgânico urbano (CEMPRE, 2012). Esse dado reflete a necessidade de conscientização das pessoas sobre os impactos negativos do descarte irregular do material orgânico e sobre a importância do processo de compostagem.

Diante disso, a compostagem pode ser considerada uma alternativa sustentável para a redução dos resíduos orgânicos gerados pela humanidade. Trata-se de um processo antigo, realizado pelo homem desde os primórdios da agricultura, aproveitando resíduos orgânicos para produção de alimentos. Atualmente, é associada mais ao processo de tratamento dos resíduos orgânicos do que ao processo para seu aproveitamento. Para tanto, envolve necessariamente a ação humana para acelerar a decomposição, através da manipulação dos vários materiais orgânicos e da própria automação do processo de compostagem.

Em países desenvolvidos a compostagem é uma prática bastante difundida e tecnificada. Nos Estados Unidos e Alemanha, por exemplo, muitas empresas investem na automatização das plantas de compostagem para acelerar e otimizar o processo de

produção de biofertilizantes. Por outro lado, comparativamente, a compostagem em escala industrial no Brasil ainda é uma prática incipiente e arcaica, na qual, identifica-se uma grande ausência de tecnologias próprias, o que exige a adaptação de maquinários e técnicas oriundas de outros setores agrícolas (SCHALCH et al., 2002). Nesse sentido, é consenso entre pesquisadores que as instalações brasileiras de compostagem devem ser melhor estudadas, tanto em nível tecnológico como operacional, pois são grandes as expectativas quanto à otimização desse processo para auxiliar na redução do problema do descarte de resíduos orgânicos no país.

A maioria dos estudos sobre compostagem encontrados na literatura tem como foco a qualidade e destinação do produto, nota-se carência de informações tecnológicas acerca da otimização das etapas do processo. Partindo do pressuposto de que a aeração é um dos principais fatores que interferem na produção do composto orgânico e que sua realização normalmente envolve o uso de equipamentos adaptados, tornam-se necessárias pesquisas envolvendo o dimensionamento e a otimização deste sistema. Assim, melhorias na etapa de aeração podem garantir suprimentos adequados de oxigênio (O_2) e um melhor controle da temperatura nas leiras de compostagem, obtendo, assim, melhor desempenho dos microrganismos responsáveis pela decomposição.

Assim, esse trabalho tem como objetivo instrumentar um processo de aeração de leiras de compostagem orgânica destinadas à produção de fertilizantes agrícolas. O trabalho foi desenvolvido na FEMEC – UFU e na Empresa Valoriza Agronegócios com sede na cidade de Uberlândia - MG. Nesse sentido, baseado na prática padrão da Empresa, foi proposto um estudo do processo atual de ventilação mecânica das leiras para a obtenção de parâmetros para o dimensionamento, montagem e instalação do Sistema de Aeração Forçada Automatizada (SAFA). A Empresa possui atualmente 48 leiras que são aeradas por um trator agrícola no qual foi adaptado um ventilador centrífugo. Assim, este trabalho apresenta a concepção e montagem de um protótipo que deverá atuar inicialmente em oito leiras. Por meio da análise de desempenho do protótipo serão propostos, caso necessário, outros equipamentos para testar e corrigir possíveis falhas na especificação e montagem.

O Capítulo II deste trabalho apresenta-se uma revisão bibliográfica com informações sobre sistemas de aeração e práticas operacionais de empresas internacionais que promovem a compostagem orgânica. Além disso, são disponibilizados conceitos práticos e teóricos envolvendo níveis de oxigênio e temperatura durante o ciclo de compostagem. Tais informações contribuíram para a concepção do protótipo apresentado no Capítulo III, no qual são apresentadas as metodologias e a fundamentação teórica para a especificação do ventilador e tubulações, bem como o desenvolvimento do sistema eletrônico para a automação do processo.

No Capítulo IV são apresentados resultados preliminares obtidos a partir da instalação do protótipo nas oito leiras. Ressalta-se que a instalação e montagem do SAFA na empresa foi finalizada em Janeiro de 2012 e os resultados obtidos até o presente momento são promissores. A instalação foi apenas o primeiro passo para otimizar o ciclo de produção. Projetos paralelos serão desenvolvidos para ajustar o tempo de funcionamento dos ventiladores a partir de parâmetros medidos nas leiras, tais como: temperatura e níveis de oxigênio. Cabe salientar o interesse da empresa na expansão do projeto para as leiras remanescentes.

Por meio das conclusões apresentadas no Capítulo V, verifica-se que a automação do processo de aeração pode contribuir para a redução do tempo de produção, custos relativos à mão de obra e consumo de energia, além de melhorar a qualidade do fertilizante produzido. Trabalhos futuros serão desenvolvidos para comprovar tais expectativas.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

A compostagem é realizada pelo homem desde os primórdios, aproveitando resíduos orgânicos para a fertilização de plantas. Os primeiros relatos do emprego desse processo são originários da China e datam há mais de cinco mil anos (LINDENBERG, 1992). Naquela época, os pequenos agricultores chineses empilhavam restos agrícolas e dejetos, por certo período de tempo, até que atingissem estabilidade suficiente para sua posterior incorporação ao solo.

As principais referências sobre o desenvolvimento do processo de compostagem ao longo da história podem ser encontradas em um compilado feito por Alves (1998). O autor cita como exemplo o “*Bommer method of making manure*”, desenvolvido em 1843 por George Bommer, para decomposição de resíduos agrícolas por meio da recirculação de chorume (substância líquida resultante do processo de putrefação de matérias orgânicas). Além disso, afirma que o primeiro incentivo à compostagem no Brasil foi em 1888, na tentativa de minimizar a importação de adubos minerais pelos agricultores. Ainda segundo esse autor, em 1920, na Índia, Albert Howard sugeriu misturar resíduos vegetais com estrume animal, revolvendo essa mistura apenas duas vezes. Assim, as pilhas atingiam elevadas temperaturas e, após alguns meses, o resultado era uma matéria orgânica suficientemente estável para ser aplicada como fertilizante de solo.

Na década de 50 foram realizados os primeiros estudos sobre o processo de compostagem. Pesquisadores da Universidade da Califórnia mostraram a influência de

parâmetros como microrganismos, umidade, aeração e temperatura na degradação da matéria orgânica (ALVES, 1998).

Desde então, os estudos foram se intensificando, permitindo o desenvolvimento e aperfeiçoamento de diversos sistemas de compostagem (abertos e fechados), tais como a vermicompostagem, Dumfries, Windrow, Dano, Triga, Frazer-Eweson, Bio-Tank, Sanecon e outros (MOTTER et al., 1987; GÓMEZ, 1998; BERNABÉ, 2008).

O crescimento populacional tem elevado a demanda por alimentos, resultando na intensificação das atividades agropecuárias. Consequentemente, aumentaram o volume de dejetos orgânicos da produção animal e a utilização, pela maioria dos agricultores, de fertilizantes minerais sintéticos em detrimento aos orgânicos. A urbanização intensa e a atividade das agroindústrias incrementaram também a produção de resíduos sólidos e esgotos. Neste sentido, a compostagem é hoje associada ao processo de tratamento dos resíduos orgânicos, ou seja, está relacionada a uma prática sustentável para o aproveitamento dos resíduos agrícolas e da criação animal. No entanto, a sustentabilidade só é realmente alcançada minimizando, ou mesmo, suprimindo os impactos ambientais, por meio da adoção de práticas operacionais que minimizem os odores inerentes do processo, concentração de insetos e evitem a poluição de lençóis freáticos.

2.2. O processo de compostagem

A compostagem é o processo de transformação de lixo orgânico em fertilizantes utilizáveis na agricultura. Esse processo envolve transformações extremamente complexas de natureza bioquímica, promovidas por milhões de microrganismos do solo que têm na matéria orgânica *in natura* sua fonte de energia, nutrientes minerais e carbono. Basicamente, o composto é o resultado da degradação biológica da matéria orgânica, na presença de oxigênio do ar, sob condições que podem ser controladas pelo homem. Os produtos do processo de decomposição são: gás carbônico (em maior proporção), calor (temperaturas de até 70°C), água e a matéria orgânica "compostada" (PLANETA ORGÂNICO, 2011).

Sabe-se que a agricultura, pecuária e empresas do ramo alimentício são grandes produtoras de lixo orgânico, tais como restos de culturas vegetais e animais, os quais, em alguns casos, provocam sérios problemas de poluição ambiental. No entanto, quando manipulados adequadamente, podem suprir, com vantagens, boa parte da demanda de insumos minerais sem afetar os recursos do solo e do ambiente (OLIVEIRA et al., 2004). Na literatura, vários autores comentam sobre o uso de adubos orgânicos como alternativa para

diminuir o custo energético das lavouras, proporcionando economia de recursos naturais (COSTA, 2005; SILVA et al., 2007; ARAÚJO et al., 2007).

Nesse sentido, a prática da compostagem vem sendo utilizada por vários setores agroindustriais, comprovando a eficiência do processo na utilização dos resíduos gerados (VITORINO; PEREIRA NETO, 1994; FORTES NETO et al., 1997; SILVA et al., 1997). Esse aproveitamento dos resíduos pode, conforme ilustrado na Fig. 2.1, reduzir o acúmulo de lixo produzido pelas indústrias de alimentos e ser utilizado tanto como fonte de nutrientes para a produção vegetal quanto como condicionador de solo.



Figura 2.1 – Ciclo da compostagem orgânica (Fonte: Condomínio-ABC, 2011)

O processo de compostagem ocorre em três fases: fermentação (composto cru ou imaturo), fase de semi-cura ou bioestabilização e, por fim, uma terceira fase, de cura ou humificação do composto (Fig. 2.2). Na primeira fase o composto está imaturo e o pH e a temperatura gradativamente se elevam devido à atividade dos microrganismos. Na bioestabilização o processo de decomposição orgânica pouco progride até que, na terceira fase, ocorre a humificação da matéria orgânica, seguida de sua mineralização.

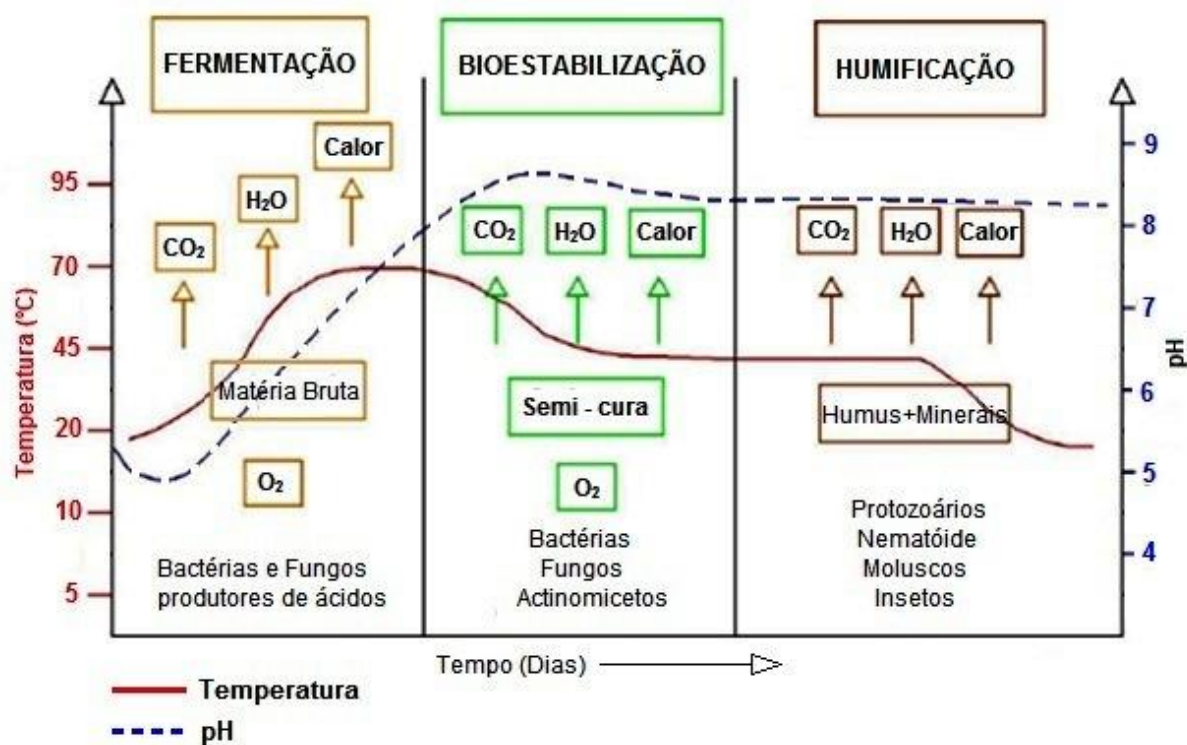


Figura 2.2 – Fases da compostagem (Fonte: Silva et al, 2009)

Segundo Beltrame (2008), o processo de compostagem de resíduos industriais é realizado na seguinte sequência: pátio de homogeneização, pátio de compostagem e peneiramento. O pátio de homogeneização é o local onde os resíduos orgânicos são descarregados. Nele, processa-se a mistura dos resíduos com estruturantes específicos (lascas de madeira), segundo proporção previamente calculada, com a finalidade de ajustar o balanço nutricional, a umidade e os espaços livres, visando à perfeita compostagem dos diferentes tipos de resíduos (Fig. 2.3).



Figura 2.3 – Pátio de homogeneização (Fonte: Beltrame, 2008)

O pátio de compostagem é o local onde ocorre a fase ativa da compostagem (Fig. 2.4). Nesta fase, o teor de oxigênio no interior das leiras reduz devido à atuação dos microrganismos. Portanto, torna-se necessário realizar procedimentos de revolvimento ou de aeração para a renovação do ar e, assim, manter as condições ideais para a decomposição da matéria orgânica (BELTRAME, 2008).



Figura 2.4 – Pátio de compostagem (Fonte: Beltrame, 2008)

No peneiramento (Fig. 2.5), o composto é separado das lascas de madeira remanescentes que, posteriormente, serão reutilizadas em novas misturas de resíduos no pátio de homogeneização (BELTRAME, 2008).



Figura 2.5 – Peneiramento do composto (Fonte: Beltrame, 2008)

2.3. Fatores que afetam o processo de compostagem

Diversos fatores podem influenciar de forma direta ou indireta no processo de compostagem. Dentre eles, citam-se: os microrganismos, a umidade, o pH, a temperatura e a aeração.

2.3.1. *Microrganismos*

Diferentes comunidades de microrganismos (incluindo bactérias, actinomicetos, leveduras e fungos) predominam nas diferentes fases da compostagem, o que se justifica pelas modificações nas condições do meio durante o processo (MILLER, 1993). Actinomicetos, bactérias e fungos termófilos começam a predominar em temperaturas superiores a 40°C (RIFFALDI et al., 1986). À medida que esta aumenta, muitos dos microrganismos patogênicos para os humanos ou para as plantas são destruídos, com a ressalva de que acima dos 70°C o calor limita as populações aptas, incluindo aquelas responsáveis pela decomposição, havendo um decréscimo da atividade biológica e prolongando o ciclo de compostagem (FERNANDES; SILVA, 1999).

A velocidade do processo de compostagem está, portanto, relacionada à atividade da microbiota presente no composto (MCKINLEY; VESTAL, 1985 citado por TIQUIA; TAM, 2000; MONDINI et al., 2004). Por sua vez, a intensidade da atividade desses microrganismos decompositores está estritamente relacionada à umidade do substrato, pH, temperatura e à adequada oxigenação. Assim, todos esses parâmetros devem ser cuidadosamente manipulados para acelerar a decomposição, propiciando um ambiente adequado à atividade dos microrganismos.

2.3.2. *Umidade*

A umidade é indispensável para a atividade metabólica e fisiológica dos microrganismos, sendo que a considerada ideal para a compostagem varia entre 40 e 60% (STENTIFORD, 1996 citado por TIQUIA et al., 1998a; OLIVEIRA et al., 2004; RODRIGUES et al., 2006). Acima desse percentual, o excesso de umidade reduz a penetração de oxigênio na leira, proporcionando uma decomposição lenta e afetando as propriedades físicas e químicas do composto (TIQUIA et al., 1998b). Semelhantemente, se a umidade for inferior a 40%, a atividade biológica da leira pode ser inibida, diminuindo com isso a velocidade de degradação (AZEVEDO, 1997; HAMODA et al., 1998). Neste escopo, Hamoda et al. (1998) estudaram a cinética do processo de compostagem e demonstraram os efeitos da umidade sobre a degradação do carbono orgânico total em resíduos sólidos (Fig. 2.6). Indiretamente, a umidade interfere também na temperatura do processo de compostagem, uma vez que afeta a atividade metabólica dos microrganismos.

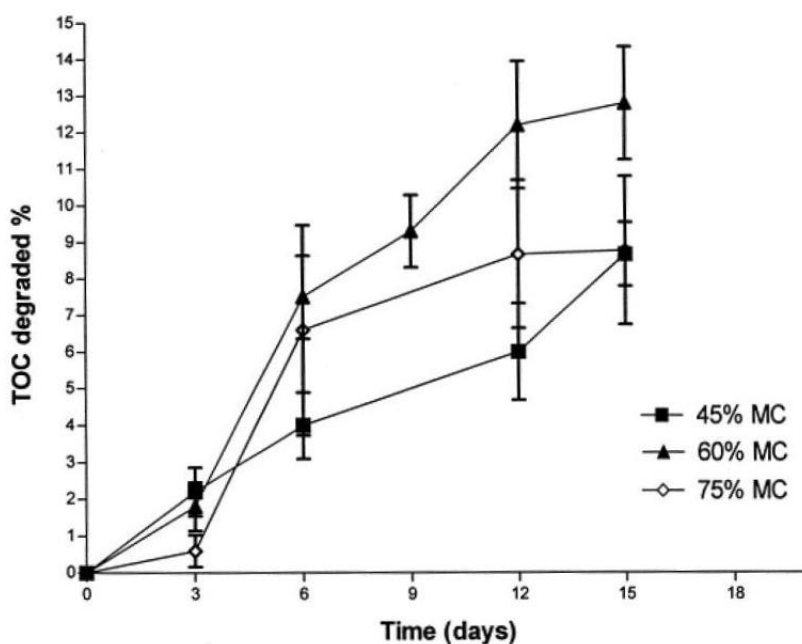


Figura 2.6 – Efeito de diferentes percentagens de umidade (MC) na degradação de carbono orgânico total (*TOC degraded*) no processo de compostagem (Fonte: Hamoda et al., 1998)

2.3.3. pH

As alterações do pH (potencial Hidrogeniônico) durante o processo de compostagem estão estritamente relacionadas às variações da temperatura, embora esta interação ainda não tenha sido bem investigada (SUNDBERG et al., 2004). Geralmente, os principais materiais de origem orgânica, utilizados como matéria-prima na compostagem, são de natureza ácida, com pH variando entre 4,5 e 6 (EKLIND et al., 1997). Essa acidez é devido à presença de ácidos orgânicos de cadeia pequena, principalmente ácidos láctico e acético (BECK-FRIIS et al., 2001), cujas concentrações aumentam durante a fase inicial da compostagem (NAKASAKI et al., 1993; BECK-FRIIS et al., 2003). A presença desses ácidos de cadeia curta em condições de pH baixo e sua ausência durante condições alcalinas indica que são fatores fundamentais na regulação do pH nos compostos (CHOI; PARK, 1998; BECK-FRIIS et al., 2003), sendo também um importante indicativo de estabilização da biomassa. Em síntese, o pH do composto aumenta à medida que o processo se desenvolve, atingindo muitas vezes níveis superiores a 8,0 (KIEHL, 2004).

A faixa de pH considerada ótima para o desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pela compostagem situa-se entre 5,5 e 8,5, uma vez que a maioria das enzimas se encontra ativa nesta faixa de pH (RODRIGUES et al., 2006). Conforme mencionado, à medida que as bactérias e os fungos digerem a matéria orgânica existente nos resíduos, liberam ácidos orgânicos que se acumulam durante a fase inicial da

compostagem. Esse acúmulo resulta na diminuição do pH e no crescimento de fungos que iniciam a degradação da lignina e da celulose. Esse metabolismo, associado à quebra dos ácidos orgânicos formados, progressivamente aumenta o pH durante o processo de compostagem (Fig. 2.7). No entanto, se o sistema torna-se anaeróbico, o acúmulo de ácidos pode reduzir o pH a 4,5 limitando a atividade microbiana. Nesse caso, a aeração deve ser suficientemente eficaz para retomar o pH do composto à faixa aceitável.

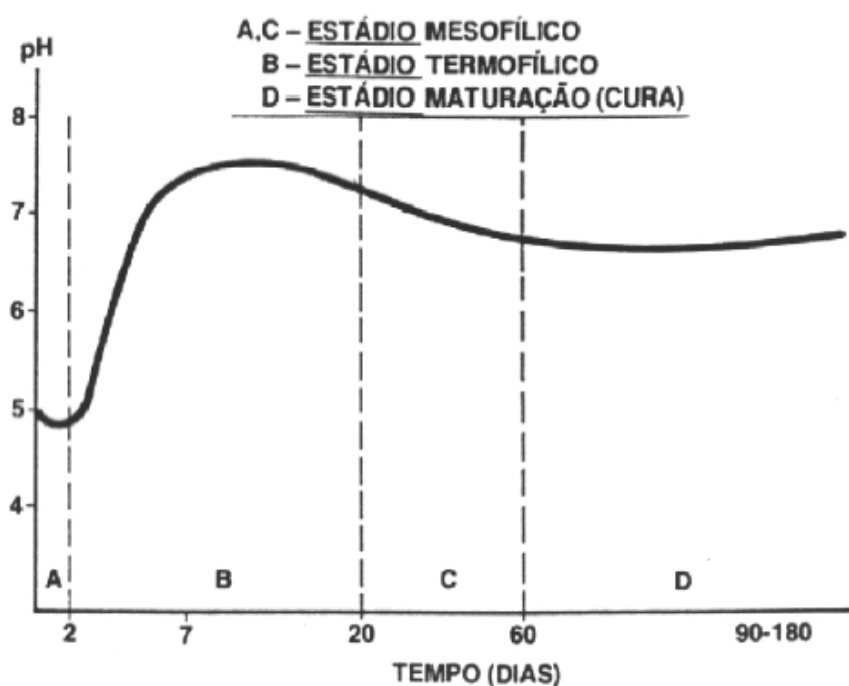


Figura 2.7 - Variação temporal do pH em uma pilha de compostagem. As letras A, B, C e D representam cada fase do processo (Fonte: Peixoto, 1988)

2.3.4. Temperatura

A atividade dos microrganismos durante o processo de decomposição é exógena, ou seja, libera calor. Este fica retido na leira de compostagem devido à propriedade isolante dos compostos orgânicos, resultando na elevação da temperatura. No entanto, se a temperatura ultrapassar 70°C pode prejudicar as atividades biológicas e o metabolismo dos microrganismos essenciais ao processo (GOMES; PACHECO, 1988). Considera-se, de maneira geral, que a faixa ótima para a compostagem seja de 45 a 65°C (KIEHL, 2004). Portanto, essa variável deve ser constantemente monitorada para garantir um ambiente ótimo ao desenvolvimento dos microrganismos.

Na Figura 2.8 é mostrada a variação da temperatura durante o processo de compostagem orgânica. Nota-se que a comunidade de microrganismos que realizam a

decomposição também é alterada. À medida que a temperatura aumenta, prevalecem bactérias e actinomicetos termófilos, seguida da colonização fúngica ao final da compostagem. O composto atinge temperaturas máximas em torno de 70°C e, na maturação, iguala-se à temperatura ambiente.

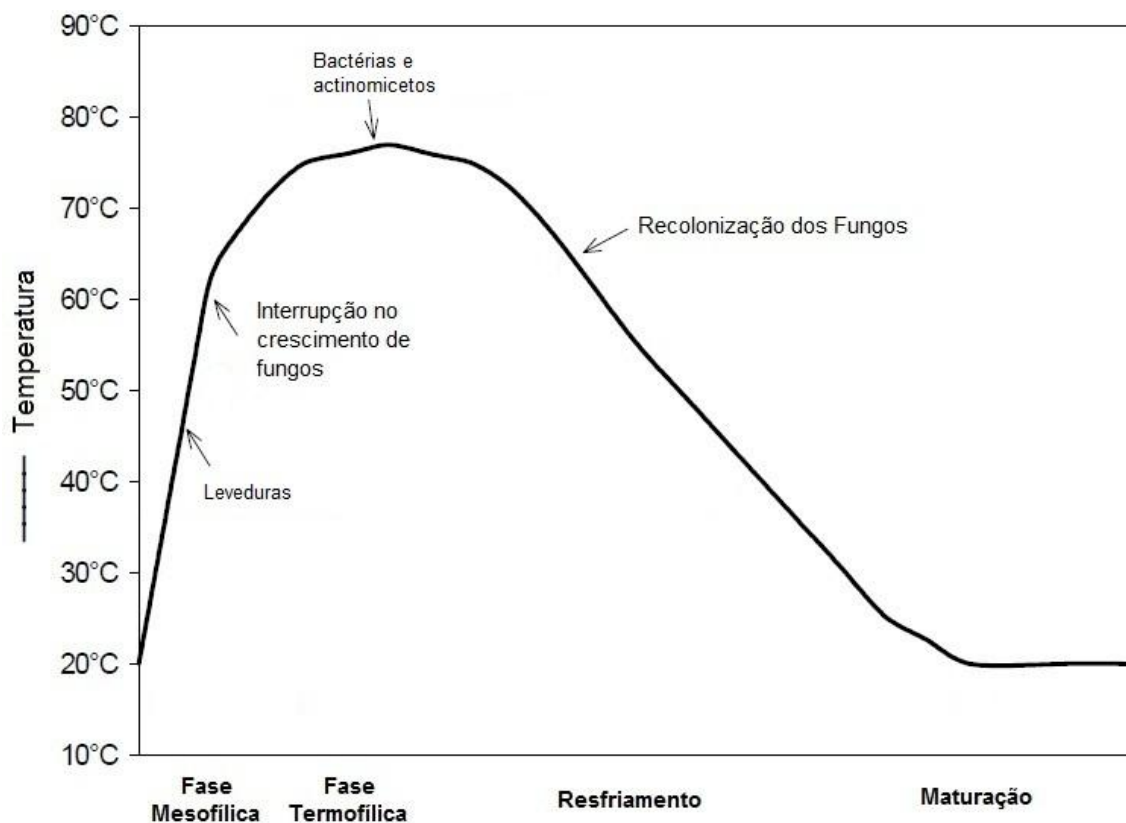


Figura 2.8 - Temperatura durante o processo de compostagem orgânica (Fonte: Beffa, 2002)

Além de interferir na atividade dos microrganismos benéficos ao processo de decomposição orgânica, o aumento na temperatura da leira de compostagem é primordial para a sanitização do composto, conforme apresentado na Tab. 2.1. Pode-se concluir que apenas 25 minutos a 70°C são suficientes para eliminação dos microrganismos patógenos ao homem e também às plantas. Entretanto, para não comprometer a decomposição, reitera-se que a temperatura máxima não pode exceder 70°C. Nesse sentido, algumas práticas de aeração (como o revolvimento das leiras, aspiração e/ou o insuflamento de ar) podem reduzir a temperatura durante a compostagem, mantendo as condições ideais ao processo e, até mesmo, acelerando a produção do composto.

Tabela 2.1 – Temperaturas e tempos de exposição para a destruição de microrganismos patogênicos (Fonte: Fernandes, 1999)

Organismo	Tempo de exposição (em minutos) para a destruição de patógenos a várias temperaturas				
	50°C	55°C	60°C	65°C	70°C
<i>Entamoeba histolica</i>	5				
Ovos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	60	7			
<i>Brucella abortus</i>		60		3	
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>		45			4
<i>Salmonella typhi</i>			30		4
<i>Escherichia coli</i>			60		5
<i>Micrococcus pyogenes</i> var. <i>aureus</i>					20
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>					20
<i>Shigella</i> sp.	60				
<i>Mycobacterium diphtheria</i>	45				
<i>Necatur americanus</i>	50				
<i>Taenia saginata</i>					5
Vírus					25

2.3.5. Aeração

O teor de oxigênio é o fator mais importante na compostagem, pois torna o processo aeróbico e permite a respiração e metabolismo dos microrganismos (DIAZ et al., 2002). A faixa ideal para o teor de oxigênio varia de 14 a 17%, enquanto que teores inferiores a 10% impossibilitam a compostagem aeróbica (DIAZ et al., 1982).

A demanda biológica de oxigênio varia durante a decomposição orgânica, conforme o gráfico da Fig. 2.9. Na primeira zona, na qual há a máxima atividade de decomposição dos microrganismos, a demanda de oxigênio é elevada (0,5 a 1m³/min por tonelada de matéria seca). Na zona 2, com o declínio da atividade de decomposição, a demanda de oxigênio reduz (0,5 a 0,1m³/min por tonelada de matéria seca), até a fase de maturação, na qual a demanda é mínima (0,1m³/min por tonelada de matéria seca).

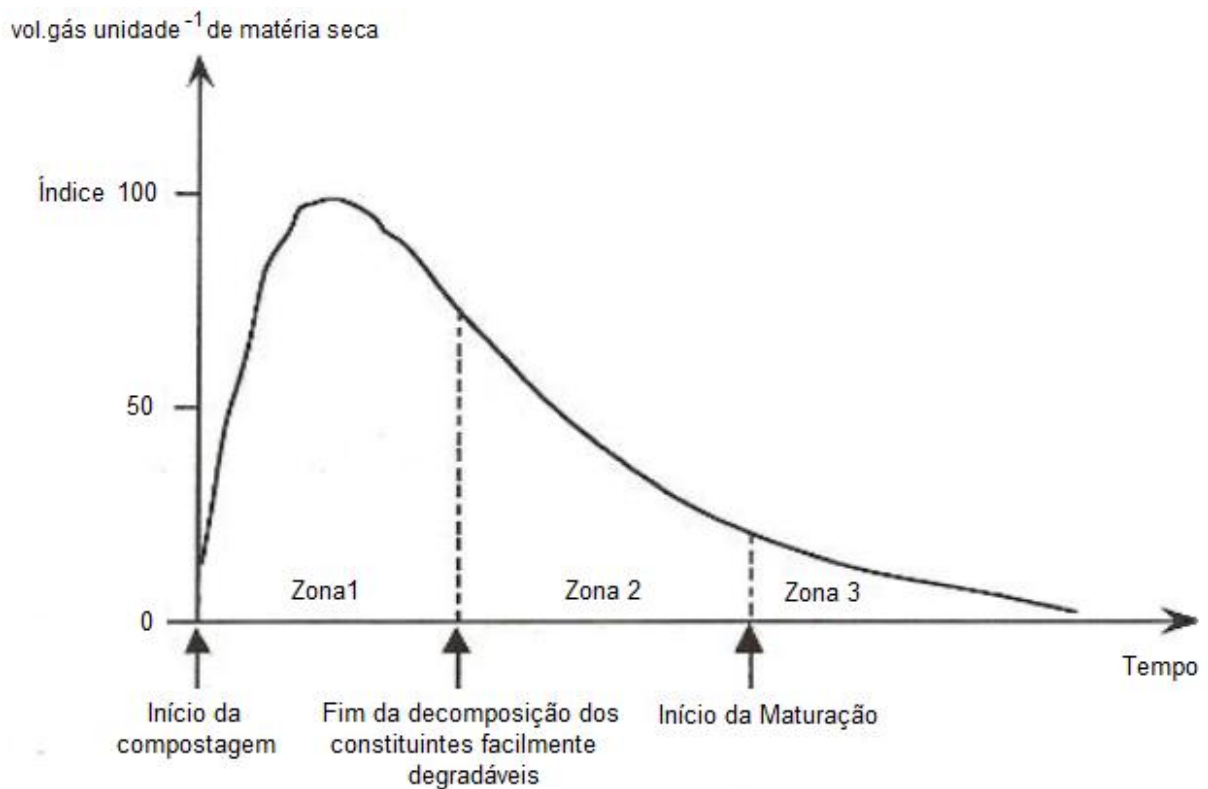


Figura 2.9 - Curva teórica da demanda de oxigênio na compostagem (Fonte: Mustin, 1987)

Além de influenciar diretamente a atividade dos microrganismos, a aeração permite controlar a umidade e a temperatura (PEREIRA NETO, 1989; KIEHL, 1998), sendo, portanto, um dos principais parâmetros no processo de decomposição da matéria orgânica.

Cabe ressaltar que os parâmetros citados anteriormente – microrganismos, pH, umidade, temperatura e aeração - não atuam de forma independente no processo de compostagem. Para exemplificar essa relação, Backhus (2012) demonstra, de uma forma simples, a interação entre microrganismos, umidade e aeração durante o processo de compostagem orgânica (Fig. 2.10). As partículas de composto (marrons) ficam envoltas por um filme de água (azul), onde vivem os microrganismos. Estes consomem o oxigênio do espaço livre (flechas verdes) e eliminam o dióxido de carbono (flechas vermelhas), produzido pela respiração. Assim, faz-se necessária a renovação do ar no interior das leiras.

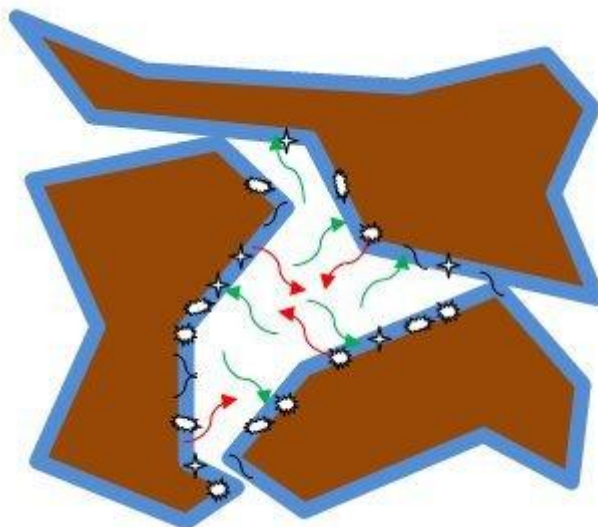


Figura 2.10 – Modelo simplificado da compostagem orgânica (Fonte: Backhus, 2012)

2.4. Sistemas de compostagem

Os sistemas de compostagem podem ser definidos de acordo com o método de aeração. A técnica mais simples para a renovação do ar no interior das leiras de compostagem é o efeito chaminé, ou convecção natural (Fig. 2.11), no qual o ar quente rico em CO_2 sai pelo topo da leira enquanto o ar fresco rico em O_2 é sugado pela base. Entretanto, essa técnica é utilizada apenas em pequenas e médias produções (BACKHUS, 2012).

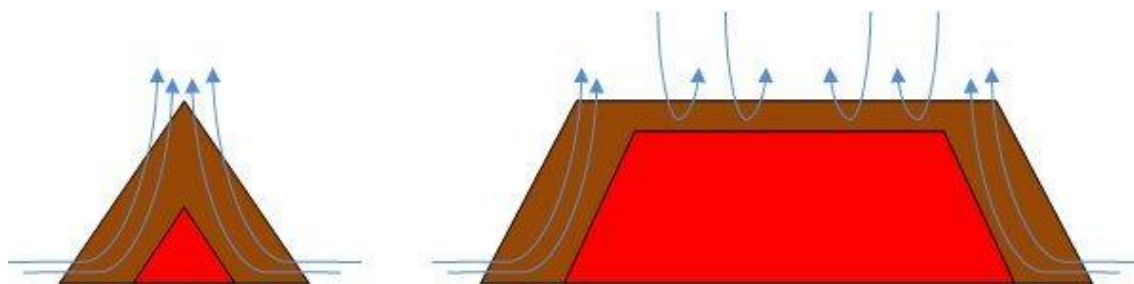


Figura 2.11 – Efeito chaminé em leiras de compostagem (Fonte: Backhus, 2012).

Zhu et al. (2004) afirmam que, economicamente, o sistema de aeração passiva, como aquele apresentado na Fig. 2.11, seja adequado para produção de biofertilizantes em pequena escala, enquanto sistemas de aeração forçada devem ser considerados em produções de média e grande escala, com elevado grau de industrialização. Os autores

ênfatisam ainda a necessidade de um sistema de controle ativo de aeração para evitar altas temperaturas durante a compostagem.

A compostagem em escala industrial é normalmente realizada em sistemas de leiras ou sistema de reatores. No sistema de leiras o lixo orgânico é misturado com elementos químicos e colocado em forma de montes. Neste sistema a renovação de ar pode ser realizada pelo revolvimento das leiras (Fig. 2.12) ou por insuflamento de ar em seu interior (Fig. 2.13). Quando o composto é revolvido, possibilita a convecção do ar no interior da leira. No entanto, este processo tem que ser repetido várias vezes ao dia, uma vez que estudos mostram que uma hora após o revolvimento, o teor de oxigênio é próximo de zero (KIEHL, 2004). Além dessa desvantagem, há a necessidade de, a cada revolvimento, remontar as leiras. Para a realização desta técnica são normalmente utilizados equipamentos específicos ou pás carregadeiras (FERNANDEZ; SILVA, 1999).

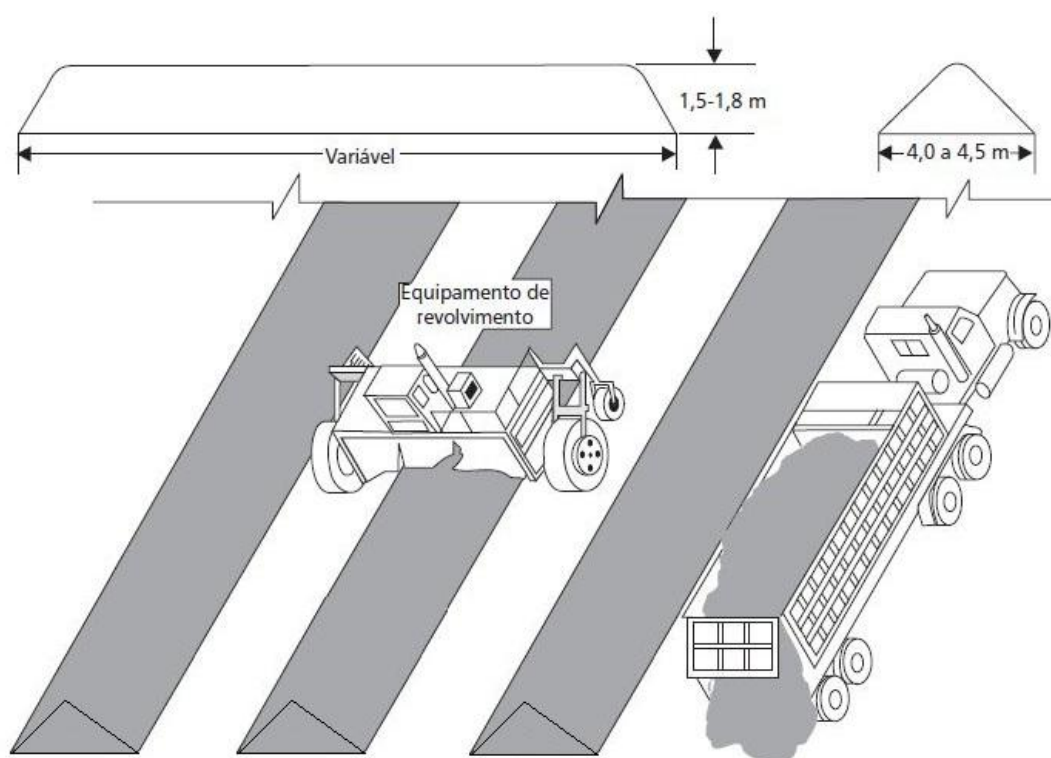


Figura 2.12 – Revolvimento de leiras de compostagem (Fonte: Andreoli, 2001)

No sistema de aeração forçada o ar é insuflado por ventiladores conectados a dutos perfurados posicionados na base da leira (Fig. 2.13). Neste processo, não é necessário realizar revolvimento do composto. Com a aeração forçada, podem-se satisfazer as demandas de oxigênio necessárias para o processo, remover o excesso de umidade e controlar a temperatura (FERNANDEZ; SILVA, 1999).

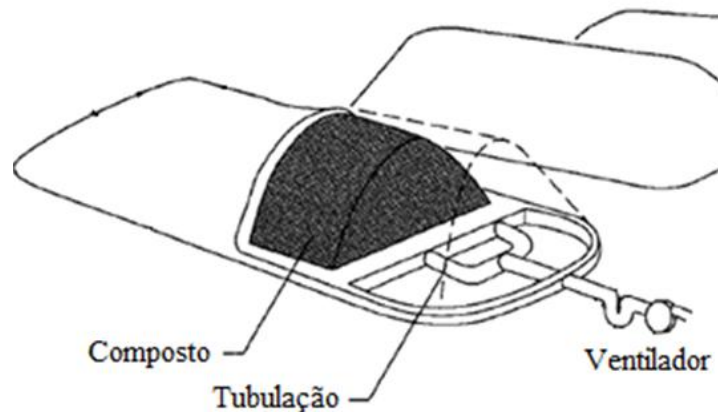


Figura 2.13 – Leiras estáticas com aeração forçada (Fonte: Fernandez; Silva, 1999)

O sistema de reatores, por sua vez, consiste em sistemas fechados nos quais a matéria orgânica misturada é colocada dentro dos reatores. A compostagem em reatores possibilita o controle de todos os fatores do processo de compostagem. Este sistema garante uma melhor homogeneidade do meio, em relação à temperatura, o controle de aeração é feito em função do teor de oxigênio que sai do reator, evitando assim anaerobiose (FERNANDEZ; SILVA, 1999).

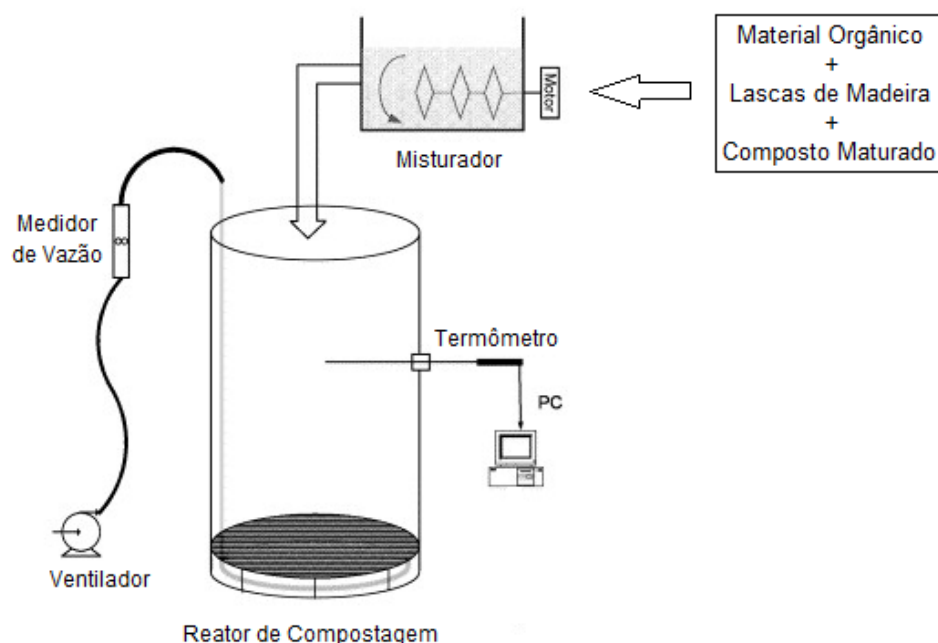


Figura 2.14 - Reator de compostagem (adaptado de Grube, 2006)

Um comparativo entre os diferentes sistemas de compostagem é apresentado na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 - Principais vantagens e desvantagens dos sistemas de compostagem (Adaptado de Fernandez e Silva, 1999)

Sistema de Compostagem	Vantagens	Desvantagens
Leiras revolvidas	<ul style="list-style-type: none"> - Investimento inicial moderado; - Flexibilidade de processar volumes variáveis de resíduos; - Simplicidade de operação; - Uso de equipamentos simples; - Produção de composto homogêneo e de boa qualidade; - Possibilidade de rápida diminuição do teor de umidade das misturas devido ao revolvimento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maior necessidade de área, pois, apesar das leiras terem pequenas dimensões, há necessidade de espaço livre entre elas; - O odor é mais difícil de ser controlado, principalmente no momento do revolvimento; - Se o pátio de compostagem não possuir cobertura o revolvimento não pode ser feito no período de chuvas; - O monitoramento da aeração deve ser mais cuidadoso para garantir temperaturas na faixa ideal de produção.
Leiras estáticas aeradas	<ul style="list-style-type: none"> - Investimento inicial moderado; - Melhor controle de odores; - Fase de bioestabilização mais rápida que o sistema anterior; - Possibilidade de controle da temperatura e da aeração; - Melhor uso da área disponível que no sistema anterior. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de bom dimensionamento do sistema de aeração e controle dos aeradores durante a compostagem;
Compostagem em reator	<ul style="list-style-type: none"> - Menor demanda de área; - Melhor controle do processo de compostagem; - Independência de agentes climáticos; - Facilidade para controlar odores; - Potencial para recuperação de energia térmica (dependendo do tipo de sistema). 	<ul style="list-style-type: none"> - Maior investimento inicial; - Dependência de sistemas mecânicos; - Menor flexibilidade operacional para tratar volumes variáveis de resíduos; - Produto final extremamente dependente da tecnologia incorporada no reator.

2.5. Tecnologias nos processos de compostagem

2.5.1. Automação do Processo de Compostagem

A compostagem de resíduos orgânicos é um processo natural e, portanto, o composto final pode demorar de algumas semanas a vários meses para ser obtido (MOTA, 2000). A automação do processo pode, contudo, permitir uma compostagem mais acelerada, diminuindo consideravelmente o tempo de produção.

Neste contexto, a empresa alemã *COMPAG* desenvolveu uma planta industrial totalmente automatizada para a produção de biofertilizantes. O controle do sistema é realizado em função de dados obtidos com o monitoramento da temperatura e do teor de oxigênio, fatores estes, extremamente importantes, que interferem diretamente no processo de compostagem e na qualidade do composto produzido. A importância em monitorar esses dois parâmetros durante o processo já foi relatada por Beffa (2002). Esse autor afirma que no início da compostagem o sistema deve ser monitorado de acordo com o teor de oxigênio. Posteriormente, o controle da temperatura (sempre inferior a 70°C), com o insuflamento de ar, garante a adequada oxigenação no interior da leira. Na *COMPAG*, o sensor de oxigênio foi desenvolvido pela própria empresa (Fig. 2.15).

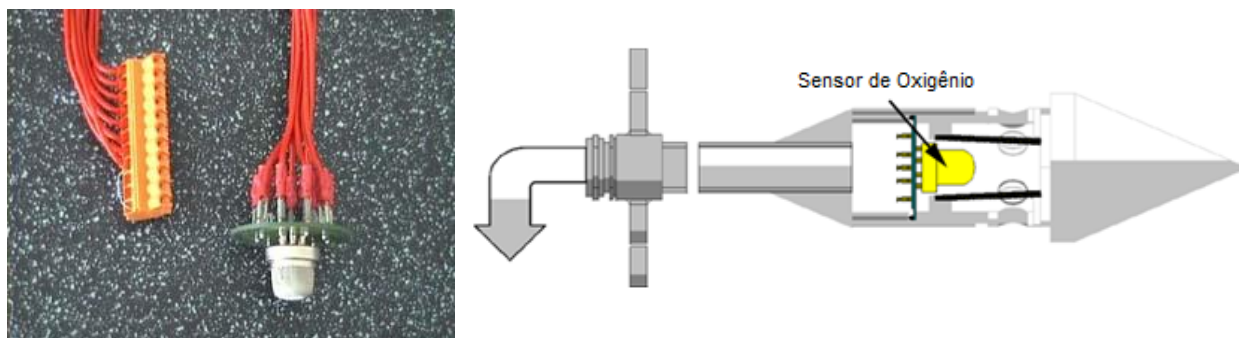


Figura 2.15 – Sensor de oxigênio (Fonte: *COMPAG*, 2011)

Neste sistema a renovação do ar na leira é realizada por dois métodos: insuflamento de ar e revolvimento. Para o insuflamento de ar são utilizados ventiladores centrífugos, conectados a uma tubulação com 4 ramificações que são distribuídas ao longo do piso de compostagem (Fig. 2.16). Já o revolvimento é feito utilizando um misturador acoplado a uma ponte rolante (Fig. 2.17). Esse misturador possui um motor com potência de 50cv.

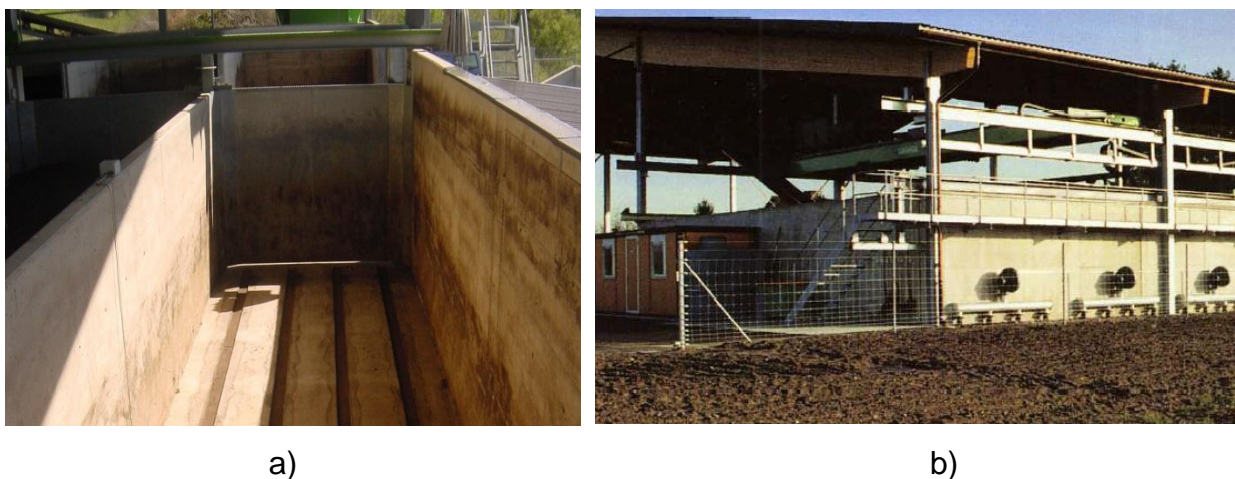


Figura 2.16 – Aeração forçada, a) saídas de ar no piso e b) ventiladores centrífugos fixados na parede e conectados à tubulação (Fonte: COMPAG, 2011).



Figura 2.17 – Revolvimento automatizado de leiras de compostagem (Fonte: COMPAG, 2011).

Semelhantemente, a empresa *Green Mountain Technologies* desenvolveu um sistema para monitoramento de oxigênio e de temperatura. A desvantagem é que os dados são coletados manualmente. Este equipamento, evidenciado na Fig. 2.18, é conectado a um computador portátil, o qual adquire e salva os dados. Posteriormente, os dados são transferidos a outro computador que sincroniza os resultados e gera os gráficos com os valores de temperatura e de oxigênio registrados em diferentes pontos da leira.



Figura 2.18 – Equipamento para aquisição de dados de temperatura e teor de oxigênio (Fonte: *Green Mountain Technologies*, 2012).

Outro exemplo de automação do processo de compostagem é o desenvolvido pela empresa Americana *Engineered Compost Systems* (ECS) (Fig. 2.19). Essa empresa é responsável pelo projeto de 15 plantas industriais de compostagem orgânica utilizando leiras estáticas aeradas. O controle da aeração é realizado por um software (*comptroller monitoring system*) que utiliza apenas dados de temperatura para controle dos ventiladores. O sistema gera gráficos de temperatura durante todo o ciclo de compostagem, além de fornecer dados de produção.



Figura 2.19 – Imagens do sistema de aeração desenvolvido pela ECS (Fonte: *ECS*, 2012).

Outros sistemas de aeração do composto orgânico podem ser identificados na Fig. 2.20.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 2.20 – Sistemas improvisados de aeração de leiras de compostagem

Apesar da reconhecida importância dos sistemas de ventilação utilizados em plantas de compostagem, sua implantação representa um custo significativo na produção. Para minimizar este custo é necessário ponderar as vantagens e benefícios de cada sistema e adotar aquele mais adequado à empresa. Nesse sentido, por meio de tecnologias e pesquisas, podem ser definidos parâmetros otimizados e equipamentos adequados para

garantir uma aeração correta com o menor consumo de energia elétrica (BARRINGTON et al., 2002).

2.5.2. Estudos envolvendo sistemas de aeração na compostagem orgânica

Van Oostrum (1991) estudou a aeração forçada de leiras utilizando sistemas semelhantes aos da Fig. 2.18, sejam eles controlados por um temporizador ou por meio da medição da temperatura nas leiras. De acordo com o autor, o primeiro controle é suficiente para oxigenar o composto, porém não impede a elevação da temperatura (que atinge valores entre 60 e 80°C). O segundo sistema, controlado pela temperatura, garante tanto a oxigenação correta quanto o controle da temperatura, além de reduzir os odores e a umidade do composto. Neste caso, a aeração era acionada quando um sensor, posicionado a 75cm da base da leira, registrava temperaturas acima de 50°C. O estudo foi realizado com leiras de volume variando entre 19 e 50m³ resultando em insuflamento entre 6 e 22m³ de ar m⁻² de área da base da leira h⁻¹ (VAN OOSTRUM, 1991).

Epstein et al. (1976) estudaram a aeração de leiras de compostagem com dimensão de 12 x 6 x 2,5m e volume aproximado de 90m³. Os autores utilizaram um ventilador centrífugo de 1/3cv, o qual permaneceu acionado durante todo o processo. A temperatura ambiente do local onde os experimentos foram realizados variavam de -2 a 10 °C. Os ciclos de compostagem tiveram duração média de 28 dias. Nos primeiros 20 dias o ventilador foi utilizado para succionar os gases no interior da leira, nos demais dias, o mesmo foi usado para insuflar ar. A Figura 2.21 demonstra esquematicamente a posição das tubulações e, além disso, apresenta o posicionamento de sensores de temperatura e oxigênio em uma leira.

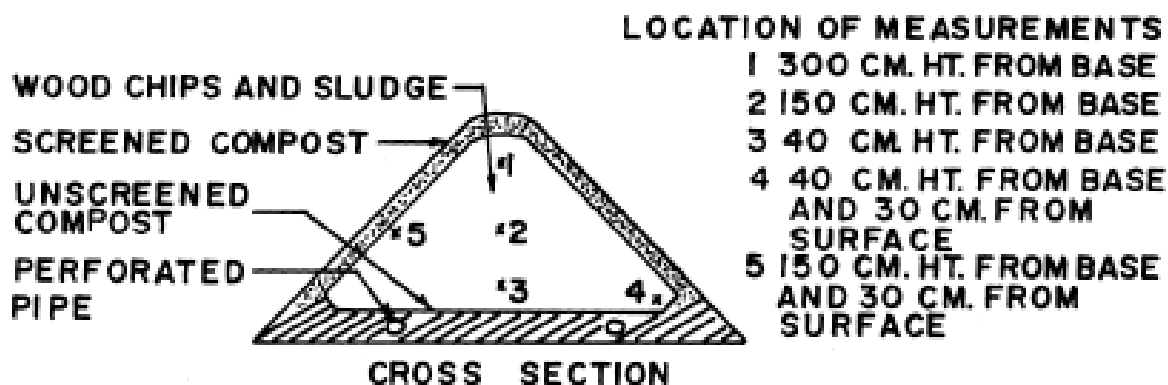


Figura 2.21 - Esquema do processo de compostagem com aeração e monitoramento (Fonte: Epstein, 1976)

Os gráficos de temperatura e os teores de oxigênio em função dos dias de produção são apresentados nas Fig. 2.22 e 2.23, respectivamente. A partir destes os autores concluíram que o teor de oxigênio reduz quanto a temperatura aumenta, a temperatura são mais altas quando o teor de oxigênio esta entre 10 e 13% e teores de oxigênio entre 5 e 12% não produzem odores, por fim afirmam que teores de O_2 superior a 15% indica excesso de aeração forçada. Leiras de compostagem com aeração forçada são mais eficientes para a destruição de coliformes e salmonela ambos patógenos a seres humanos. (EPSTEIN et al., 1976)

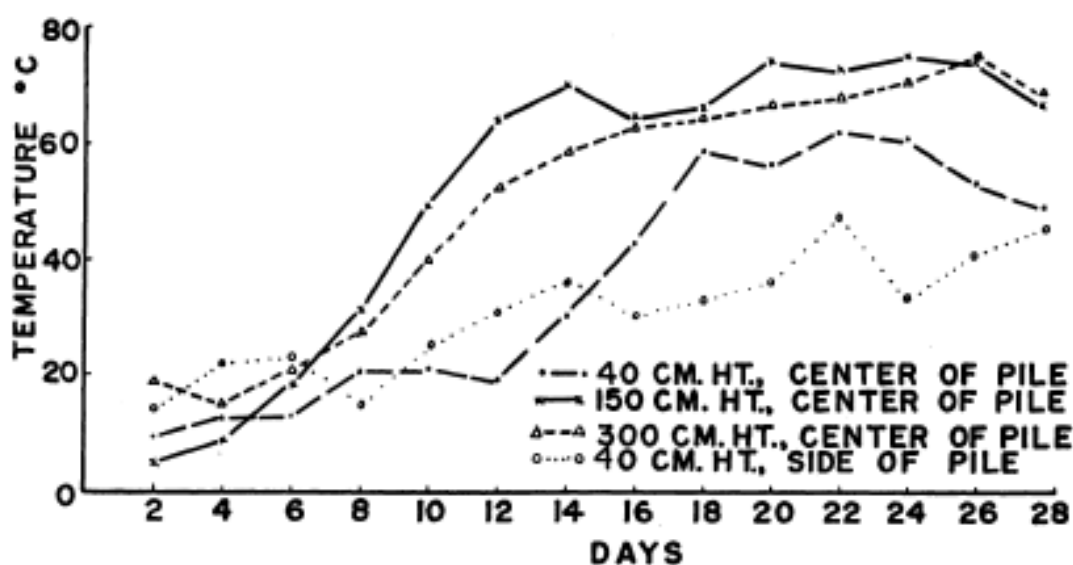


Figura 2.22 - Temperaturas em diversas posições da leira (Fonte: Epstein, 1976)

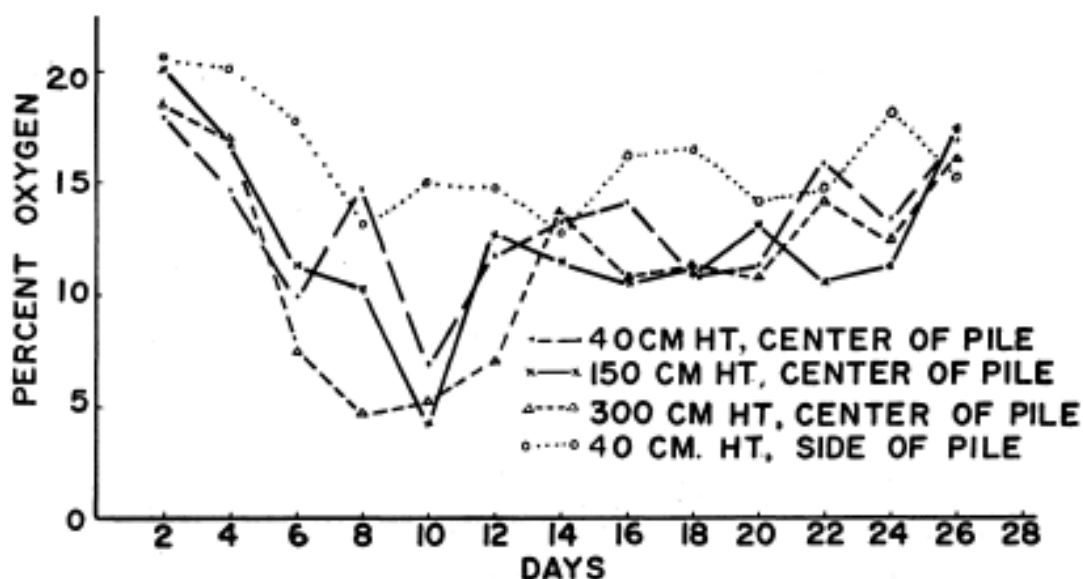


Figura 2.23 - Teor de oxigênio em diversas posições da leira (Fonte: Epstein, 1976)

A partir do exposto anteriormente, verifica-se que a automação do processo de compostagem assistida por sensores se apresenta como uma boa opção para as empresas interessadas em aprimorar suas práticas operacionais. Nesse sentido, por meio de uma parceria entre a empresa Valoriza Fertilizantes Ltda, sediada na cidade Uberlândia, Minas Gerais, e a Universidade Federal de Uberlândia, teve início este trabalho.

No próximo capítulo será apresentada a prática padrão utilizada pela empresa e detalhes envolvendo os equipamentos adotados neste trabalho incluindo a montagem do sistema eletrônico para acionamento automático dos ventiladores.

A partir dos testes experimentais e de informações disponíveis na literatura, espera-se verificar as vantagens e desvantagem da instalação dos equipamentos, analisar os custos envolvidos, verificar a viabilidade da instalação de sensores de temperatura e oxigênio nas leiras e avaliar o consumo de energia elétrica para uma possível expansão do projeto para as demais 40 leiras de compostagem da empresa Valoriza Fertilizantes.

CAPÍTULO III

CONCEPÇÃO E MONTAGEM DO SISTEMA DE AERAÇÃO

3.1. Introdução

O projeto foi desenvolvido considerando o atual sistema de aeração da empresa o qual, apesar de suprir a demanda de ar necessária para o processo de compostagem, não permitia sua automação. Inicialmente, foram realizados testes nesse sistema para identificar sua curva de desempenho. A partir de tais informações e de um algoritmo computacional desenvolvido no LTCM, diversos modelos de ventiladores centrífugos comerciais foram comparados. Por meio de tais procedimentos, tornou-se possível selecionar um ventilador de baixa potência que atendesse a demanda do sistema e que pudesse ser instrumentado e automatizado.

Além de definir o ventilador mais adequado ao processo, fez-se necessário selecionar novas tubulações. Para tanto, foram adotados os seguintes critérios: as tubulações e seus acessórios deveriam ser facilmente encontrados no mercado, diâmetro semelhante às aquelas disponíveis na empresa e perda de carga reduzida.

Cabe salientar que o sistema eletrônico responsável pela automação foi desenvolvido no LTCM/UFU. Além disso, o projeto foi concebido objetivando o mínimo de alterações no procedimento de produção atual da empresa. Para isso, os novos ventiladores foram fixados a bases metálicas móveis, facilitando o trabalho dos funcionários durante a montagem e desmontagem das leiras.

3.2 Estudo de Caso: Processo de Produção de fertilizantes da empresa Valoriza.

Na empresa Valoriza Fertilizantes Ltda o material orgânico (carcaças de aves, de suínos, presunto, salsichas, lodo e cama de frango) é recebido e direcionado ao pátio de homogeneização. Neste local os resíduos são misturados em proporções adequadas com elementos estruturantes (lascas de madeira). A mistura pronta é, em seguida, direcionada ao galpão de compostagem capaz de processar atualmente 48 leiras simultaneamente. As mesmas são montadas sobre uma tubulação perfurada coberta por lascas de madeira, para evitar que o composto obstrua os furos e impeça a aeração (Fig 3.1).



Figura 3.1 – Montagem da leira sobre a tubulação perfurada

A tubulação possui furos com espaçamento de 30 cm, totalizando 100 furos para cada leira. O diâmetro dos furos é padronizado em 2,2 cm e estes são intercalados com ângulo de 60° melhorando a distribuição do fluxo de ar no interior das leiras, conforme demonstrado na Fig. 3.2.

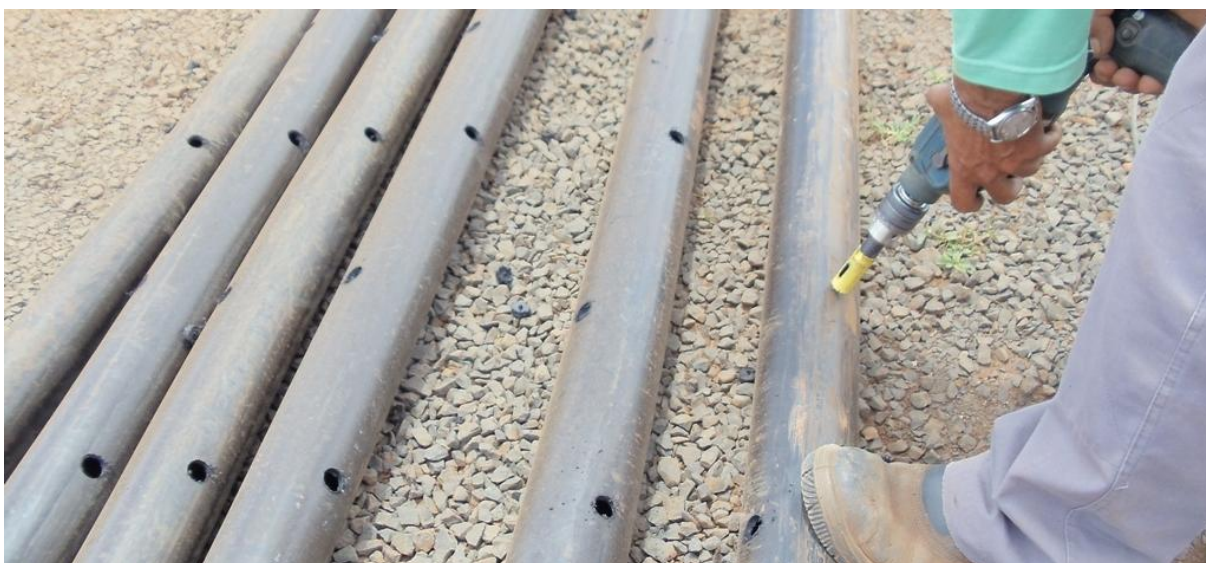


Figura 3.2 – Tubulação utilizada para aeração das leiras de compostagem orgânica na empresa

A prática padrão da empresa consiste em ventilar as leiras de compostagem por meio de um trator agrícola, no qual foi adaptado um ventilador que realiza o processo de aeração, conforme apresentado na Fig. 3.3.

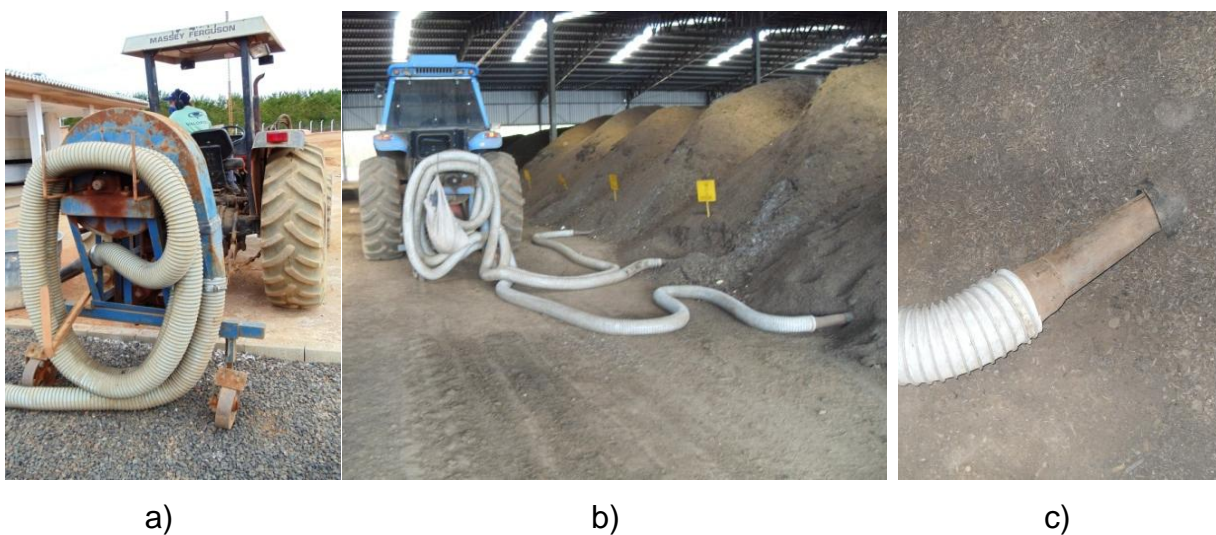


Figura 3.3 – Trator adaptado com ventilador para aeração das leiras. a) Trator agrícola com ventilador centrífugo adaptado; b) Aeração no pátio de compostagem c) Conexão entre a tubulação de ar do trator e tubulação inserida no interior da leira

O mecanismo de aeração da empresa permite ventilar no máximo 4 leiras a cada vez. A ventilação é realizada durante 5 minutos. Após esse tempo, as mangueiras são

desconectas das leiras e remanejadas para as demais. O processo de ventilação é realizado apenas durante o dia, pois depende do trabalho e disposição de um funcionário da empresa.

A Figura 3.4 apresenta as dimensões do pátio e a disposição das leiras de compostagem orgânica.

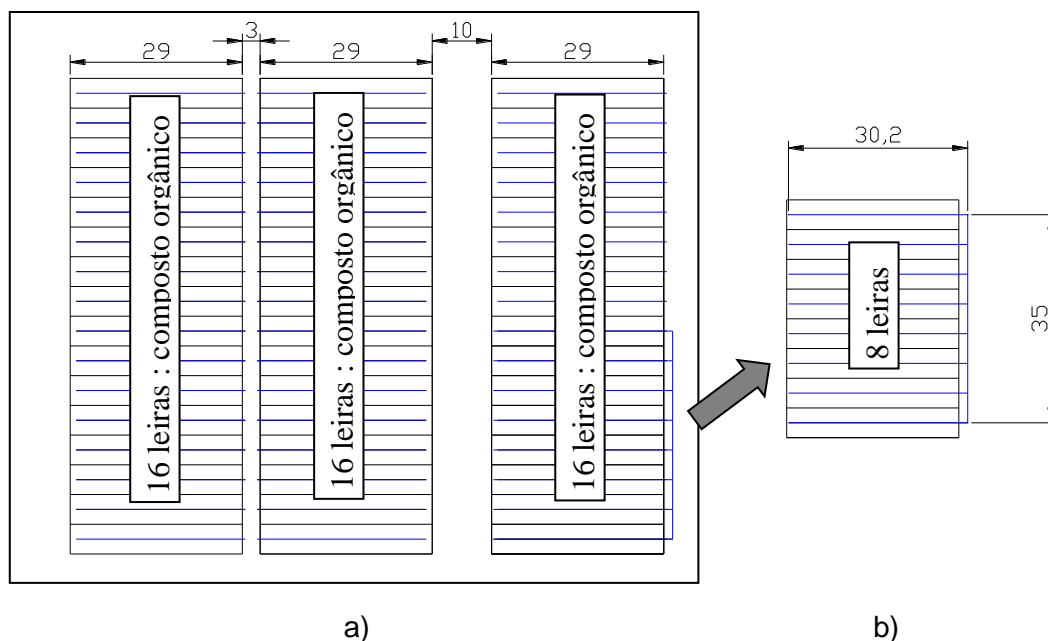


Figura 3.4 – Dimensões em metros do pátio de compostagem: a) Disposição das leiras; b) Região de testes na qual será instalado o sistema de ventilação. Dimensões em metros

O objetivo deste trabalho consiste em especificar, instalar e testar ventiladores industriais centrífugos com acionamento automático, para a injeção de ar em oito leiras de compostagem orgânica. Nesse sentido, após a etapa de especificação os equipamentos, estes serão instalados e testados na região definida na Fig. 3.4. O protótipo inicial deverá funcionar 24 horas por dia, ventilando 8 leiras, uma por vez, em intervalos de tempo pré-determinados, mantendo uma vazão de ar constante que será previamente ajustada por meio de dados experimentais coletados com um tubo de Pitot e equipamentos eletrônicos.

3.3. Concepção do Sistema de Aeração Forçada Automatizada (SAFA)

Para aerar as leiras de compostagem a empresa faz uso de um ventilador centrífugo acoplado a um trator agrícola. Este equipamento é capaz de aerar no máximo 4 leiras de uma única vez. No entanto, a empresa possui 48 leiras, o que faz com que esse trator fique transitando durante todo o dia no pátio de compostagem. Por se tratar de um processo que

depende de disponibilidade de funcionários para dirigir o trator e acoplar e desacoplar as tubulações, a aeração é realizada apenas em horário comercial, cessando no período da noite.

Por se tratar de um ventilador que fornece uma quantidade de ar significativa às leiras, foram realizados testes neste equipamento para definir sua vazão (m^3/h), pressão (mmca) e potência (CV). Nos testes foram utilizados os seguintes equipamentos: tubo de Pitot, manômetro, paquímetro; sistema de aquisição AXD 550 Micromanometer, mangueiras e tubulações e microcomputador.

Os ensaios foram realizados na Valoriza Fertilizantes Ltda, localizada na zona rural da cidade de Uberlândia - MG. A Figura 3.5 apresenta o tubo de pitot e manômetro posicionados na saída de ar do ventilador instalado no trator agrícola.



Figura 3.5 – Tubo de pitot e manômetro instalados na saída de ar do ventilador.

Para determinar a vazão do ventilador, mediu-se inicialmente o diâmetro da tubulação de ar. Na sequência, monitorou-se a velocidade de saída do fluido em seu interior utilizando o tubo de Pitot. Quatro testes foram conduzidos conforme esquema apresentado na Fig. 3.6. Em todos os casos a pressão foi monitorada utilizando um manômetro.

O procedimento experimental consistiu em acionar o ventilador e aguardar até que o mesmo entrasse em regime permanente de trabalho. No Teste 1 (Fig. 3.5) foram adquiridas a pressão e velocidade do ar na saída do ventilador, estes valores representam o ponto de funcionamento do sistema de aeração. No teste 2 a tubulação foi desconectada da leira e

teve seu comprimento reduzido. Repetiu-se novamente a coleta de pressão e velocidade do ar na saída do ventilador. Os testes 3 e 4 foram similares ao teste 2. A diferença em cada caso está relacionada ao comprimento da tubulação, fato este que modifica a perda de carga do sistema tornando possível calcular a curva de desempenho do ventilador.

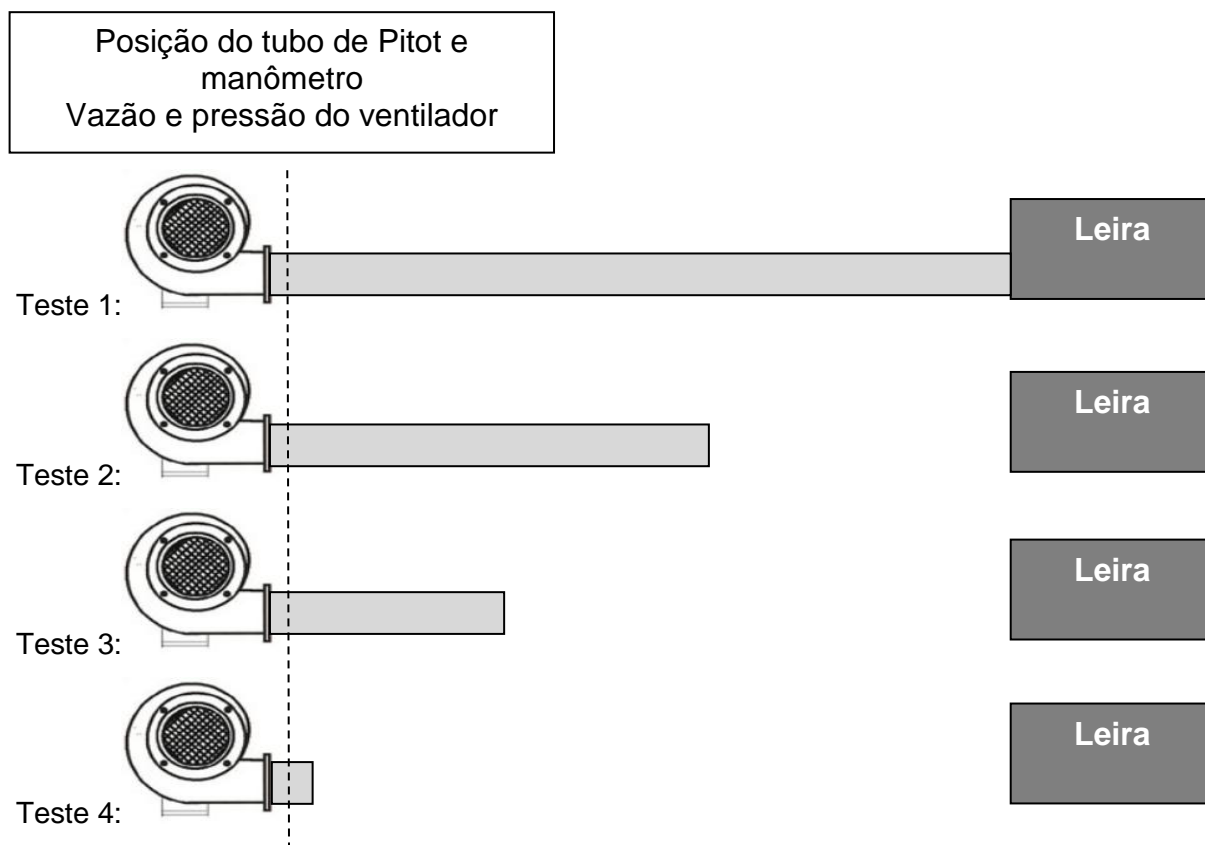


Figura 3.6 – Esquema adotado para a definição da vazão e pressão de trabalho do ventilador

Por meio dos dados coletados na empresa e formulações matemáticas disponibilizadas por Çengel (2007) e White (2002) foi definida a curva característica do ventilador. A curva relativa à pressão manométrica (mmca) em função da vazão de ar (m^3/h) monitorada na saída do ventilador é mostrada na Fig 3.7.

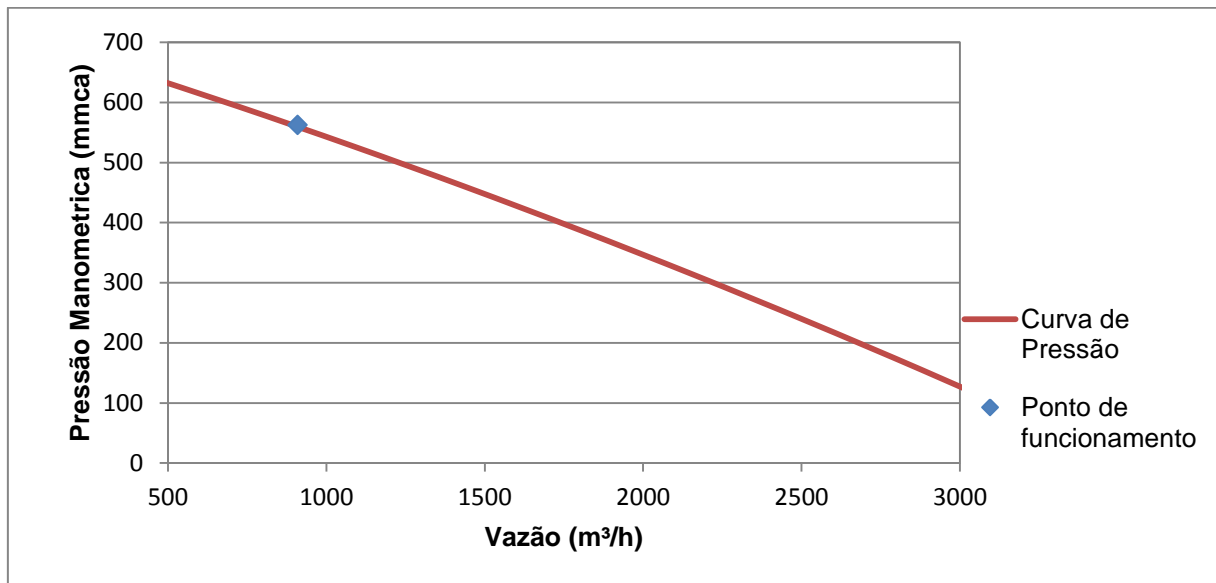


Figura 3.7 – Curva característica do ventilador.

O ponto destacado no gráfico representa a pressão e a vazão de funcionamento do ventilador em função do sistema de ventilação, e servirá para a especificação de um ventilador comercial. Os catálogos dos fabricantes contêm gráficos semelhantes à Fig. 3.7, que relaciona a pressão manométrica e a vazão.

Para que seja possível relacionar a curva e o ponto de funcionamento obtidos na Fig. 3.7, com informações disponíveis em catálogos de fabricantes de ventiladores, foi desenvolvido um algoritmo computacional seguindo o modelo matemático demonstrado a seguir.

O estudo da energia mecânica de um fluido se faz através da equação de Bernoulli modificada Eq. 3.1 (CLEZAR; NOGUEIRA, 1999)

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + \Delta H_{ganho} - \Delta H_{perdas} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (3.1)$$

onde, P é a pressão do fluido, ρ é a densidade do fluido, g é a gravidade, V é a velocidade do fluido, e z é a elevação do fluido, z representa a energia potencial do fluido, $P/\rho g$ é a energia devido a pressão e $V^2/2g$ a energia cinética.

O termo ΔH_{perdas} representa a energia perdida durante o escoamento ao longo de dispositivos como tubulações e acessórios, devido ao atrito interno e por perturbações no escoamento. Enquanto que o ΔH_{ganho} representa a energia concedida ao sistema por meio da instalação de dispositivos mecânicos, tais como: bombas e ventiladores.

Considerando, $z_1 = z_2$ obtém-se a equação geral para o cálculo da energia mecânica de um fluido escoando dentro de uma tubulação:

$$H_2 - H_1 - \Delta H_{ganho} + \Delta H_{perdas} = 0 \quad (3.2)$$

A perda de carga em tubos pode ser calculada por meio da equação universal de Darcy e Weisbach utilizando tanto os comprimentos de dutos (L), quanto o comprimento equivalente dos acessórios ($L_{equivalente}$), ou ainda a partir da energia cinética do escoamento, juntamente com um coeficiente de perda de carga K obtido experimentalmente (CLEZAR; NOGUEIRA, 1999). Sendo assim a perda de carga pode ser calculada em função da vazão do fluido.

$$\Delta H_{perdas} = \left(\frac{8}{\pi^2 g D^4} \right) f \frac{L + L_{equivalente}}{D} Q^2 + \left(\frac{8}{\pi^2 g D^4} \right) K Q^2 \quad (3.3)$$

onde D é o diâmetro dos dutos, f o fator de atrito.

O fator de atrito, por sua vez, é calculado a partir da equação de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{\frac{4 Q}{\pi D \vartheta} \sqrt{f}} \right) \quad (3.4)$$

onde ϑ é a viscosidade cinemática do fluido e ε a rugosidade absoluta.

Assim, reescrevendo a Eq 3.3 tem-se:

$$\Delta H_{perdas} = \left(\frac{8}{\pi^2 g D^4} \right) \left(f \frac{L + \sum L_{equivalente}}{D} + \sum K \right) Q^2 \quad (3.5)$$

fazendo

$$R_{\Delta H}(Q) = \left(\frac{8}{\pi^2 g D^4} \right) \left(f \frac{L + \sum L_{equivalente}}{D} + \sum K \right) |Q| \quad (3.6)$$

e substituindo a Eq. 3.6 na Eq. 3.5, tem-se a equação da perda de carga de um trecho de tubulação Eq 3.7. Neste caso, para simplificar, o termo $R_{\Delta H}(Q)$ foi substituído por a .

$$\Delta H_{perdas} = a Q \quad (3.7)$$

A equação geral da perda de carga em tubulações é demonstrada na Eq. 3.8.

$$H_{i+1} - H_i + a_{tubo} Q = 0 \quad (3.8)$$

A energia cedida ao sistema utilizando um ventilador centrífugo é representada matematicamente por uma equação de segunda ordem pela equação da altura manométrica.

$$\Delta H_{ganho} = a Q^2 + b Q + c \quad (3.9)$$

ou ainda,

$$\Delta H_{ganho} = (a Q + b) Q + c \quad (3.10)$$

Assim, a equação geral do ganho de energia em sistemas de ventilação pode ser demonstrada conforme a Eq. 3.11.

$$H_{i+1} - H_i - (a_{vent} Q + b_{vent}) Q = c_{vent} \quad (3.11)$$

Somando as Eq. 3.8 e Eq. 3.11 obtém-se a equação geral para o calculo do comportamento de sistemas de ventilação Eq. 3.20.

$$H_{i+1} - H_i + (-a_{vent} Q - b_{vent} + a_{tubo}) Q = c_{vent} \quad (3.12)$$

O fluxograma do algoritmo utilizado para solução do modelo matemático e computacional é apresentado na Fig. 3.8.

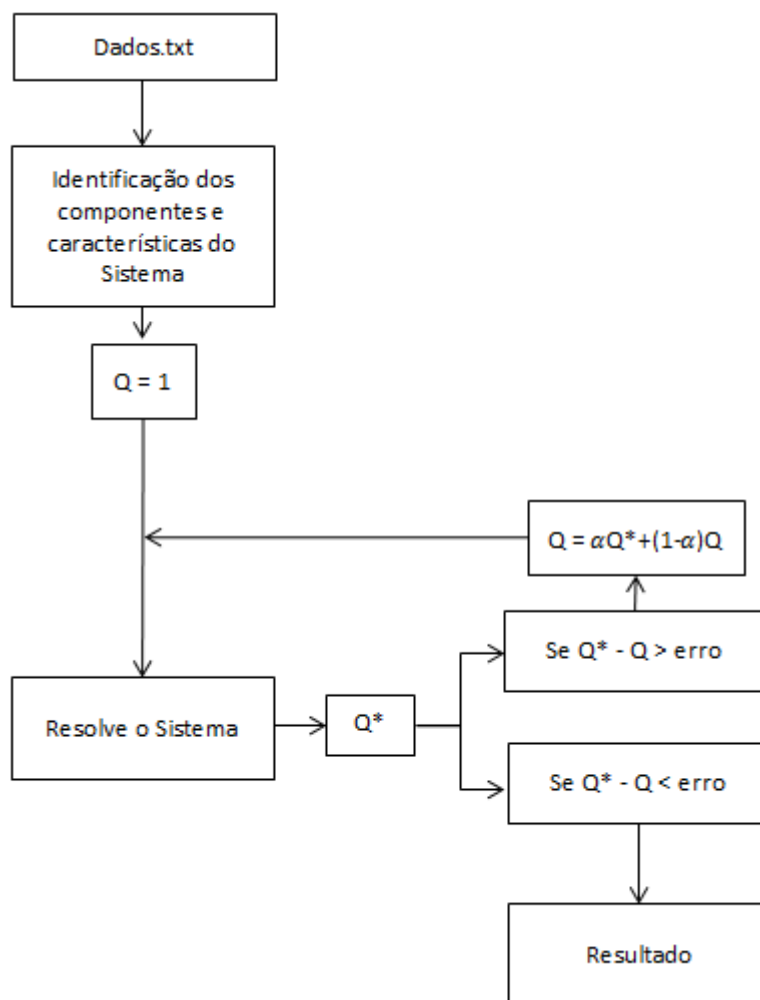


Figura 3.8 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo utilizado para solução da modelo matemático

O algoritmo lê o arquivo de entrada, este contém a equação da altura manométrica do ventilador, a viscosidade do fluido, o diâmetro e rugosidade absoluta das tubulações, o coeficiente de perda de carga ou comprimento equivalente dos acessórios. Esses dados permitem a caracterização do sistema. Neste mesmo arquivo contem informações sobre a conectividade dos nós e continuidade entre os mesmo.

O algoritmo após identificar as variáveis monta uma matriz esparsa, para a solução deste sistema considera-se o valor inicial de $Q = 1$, este é resolvido utilizando ferramentas do Matlab, obtendo como resposta o Q^* , enquanto a diferença entre o Q e Q^* for inferior ao erro estipulado obtém-se a resposta.

A equação da altura manométrica do ventilador é obtida utilizando a curva característica contido em catálogos de fabricantes. A metodologia utilizada para este cálculo é demonstrada a seguir, por meio da curva de desempenho de um Ventilador Centrifugo Comercial (VCC1).

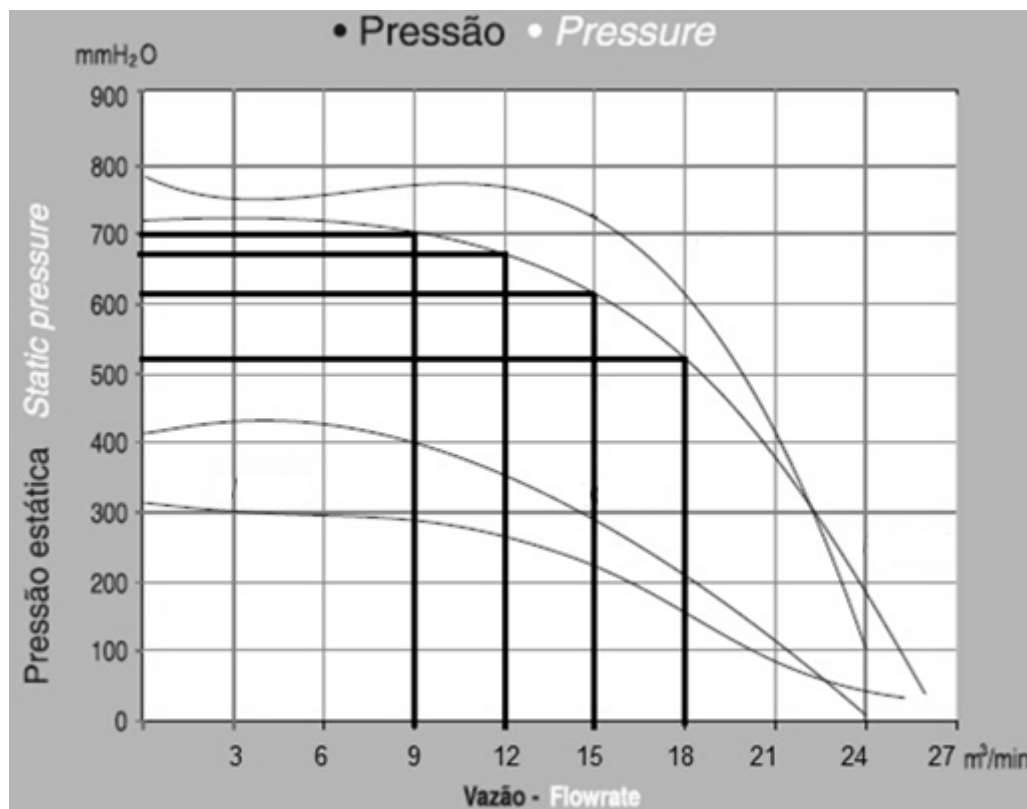


Figura 3.9 - Curva característica do VCC1

$$H = \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \quad (3.21)$$

Tabela 3.1 - Valores de pressão e vazão do VCC1, com os dados obtidos após os cálculos.

Vazão (m³/min)	Vazão (m³/s)	Pressão (mmca)	Pressão (KPa)	Velocidade (m/s)	Altura Manométrica (m)
9	0,15	700	6,86	13,72	592,74
12	0,2	670	6,57	18,30	575,22
15	0,25	610	5,98	22,87	534,83
18	0,3	520	5,10	27,45	471,59

Com estes dados, pode-se traçar o gráfico de altura manométrica em função da vazão de ar do ventilador, obtendo-se a equação da altura manométrica do ventilador com uma regressão polinomial de segunda ordem (Fig 3.10). Ressalta-se que, segundo a literatura científica, ventiladores centrífugos com rotor de pás inclinadas para trás tem como característica uma equação de segundo grau com concavidade para baixo (MACINTYRE, 1990).

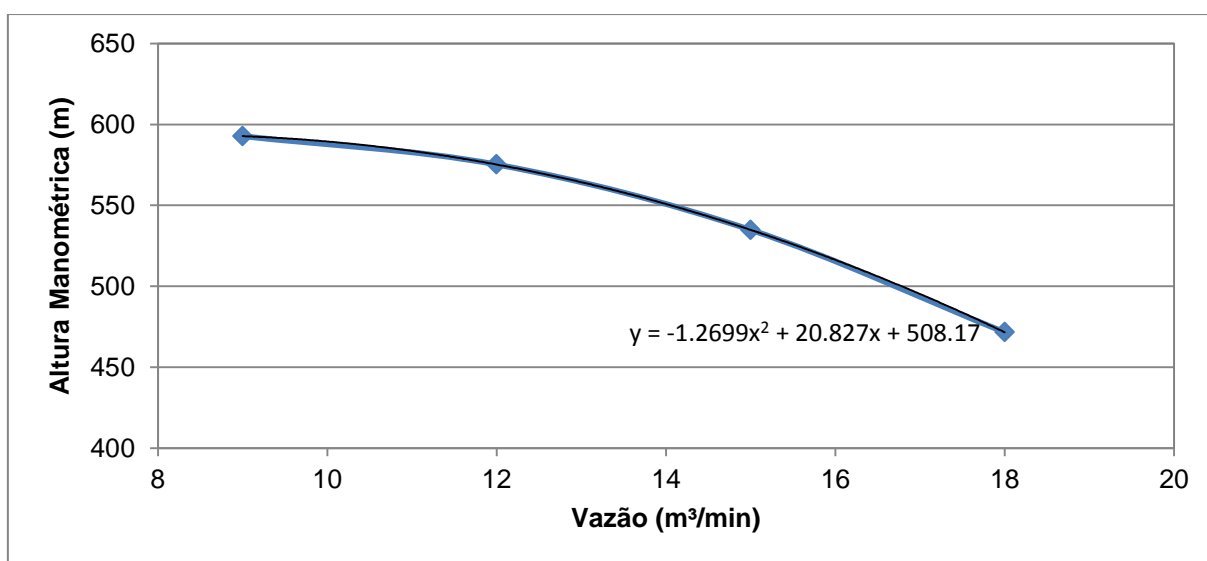


Figura 3.10 – Gráfico da altura manométrica do VCC1

Logo, a equação do ventilador centrífugo industrial VCC1 é dada por:

$$H = -1,2669 Q^2 + 20,827 Q + 508,17 \quad (3.22)$$

A rugosidade media absoluta do tubo foi medida por interferometria a laser Fig. 3.11. Os outros dados foram obtidos na literatura e são apresentados na Tabela 3.2.

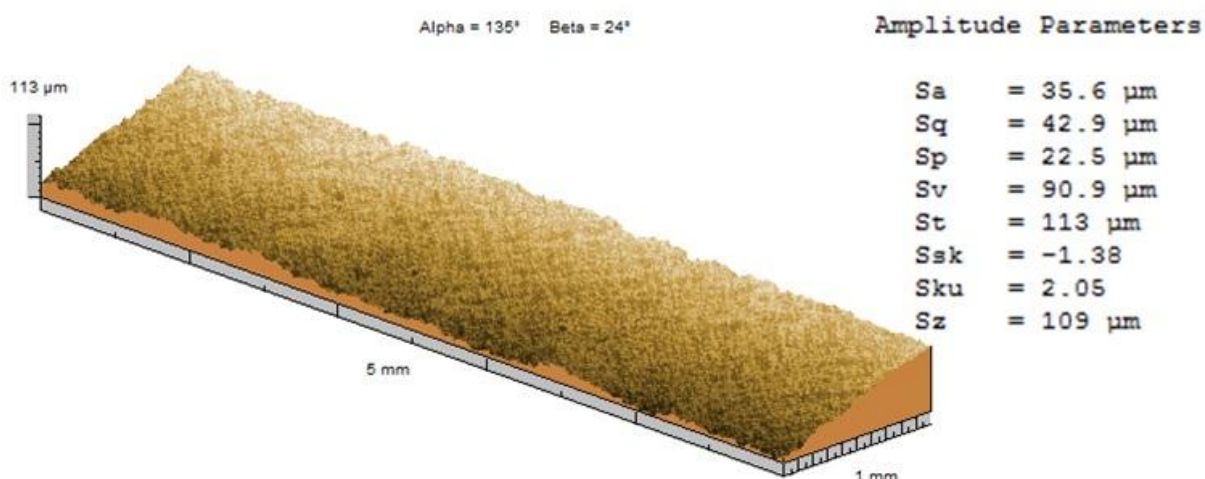


Figura 3.11 – Imagem do tubo de PVC obtida por interferometria a laser

Tabela 3.2 - Características da tubulação no dimensionamento do SAFA.

Acessórios	Coefficiente de perda de carga	Comprimento equivalente (m)	Rugosidade absoluta (mm)
Curva	-	1,22*	-
Tê	-	20*	-
Tubulação	-	-	0,036
Orifícios da tubulação	2,6*	-	-

*Fonte (Macintyre, 1990).

O VCC1 foi o primeiro ventilador a ser testado, no entanto este não foi considerado adequado, pois fornecia vazões superiores a necessidade do sistema. Além disso o motor utilizado em sua construção possuía potência de 5CV, este teste serviu como parâmetro para testar ventiladores de menor capacidade.

Na seleção dos ventiladores, diversas marcas e modelos foram testados, foi observado que na faixa de trabalho do sistema existiam poucas opções, sendo que estas, ou possuíam motores de potências elevadas, 3CV, acarretando alto gasto de energia, ou possuíam motores de 1CV, que ao serem analisados mostravam um desempenho inferior ao necessário para o sistema. Vale salientar que o desempenho do ventilador depende tanto do ventilador quanto do sistema que o mesmo se encontra.

Após testar diversos ventiladores centrífugos de diferentes fabricantes e características, foi selecionado o ventilador centrífugo comercial 2, com motor de 1,5CV, denominado VCC2, que demonstrou resultados próximos à demanda do sistema.



Figura 3.12 – VCC2 (Fonte: Catálogo do Fabricante)

A Figura 3.13 apresenta a curva de desempenho do VCC2.

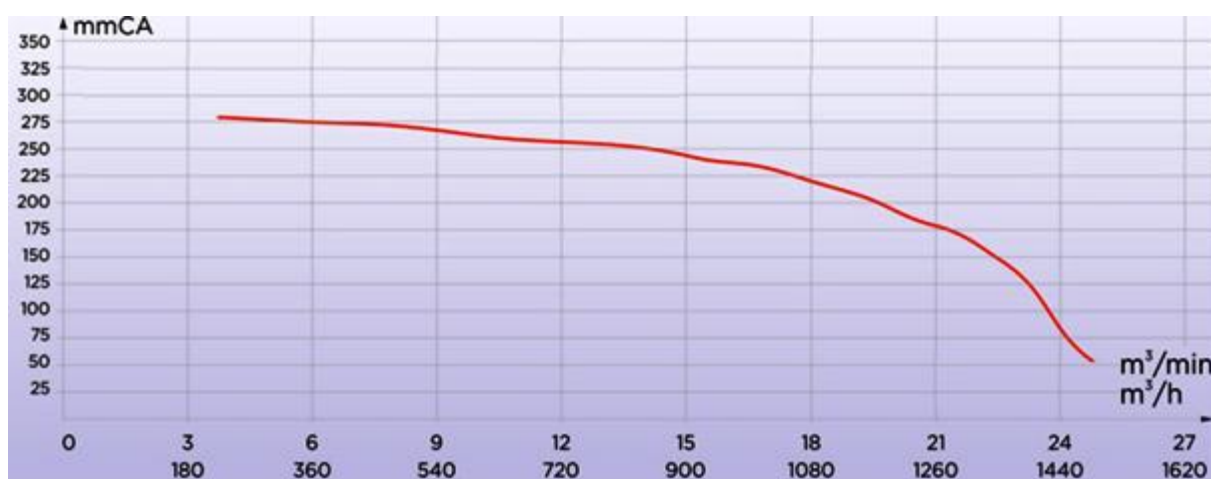


Figura 3.13 - Curva de desempenho do VCC2

Utilizando a mesma metodologia adotada na análise do VCC1 e utilizando os dados disponíveis na curva de desempenho mostrada (Fig. 3.13) foi construído o gráfico de $H \times Q$ do VCC2, obtendo-se assim a equação da altura manométrica em função da vazão do mesmo (Eq. 3.23).

$$H = -1288,9 Q^2 + 552,89Q + 204,09 \quad (3.23)$$

Na sequência, apresenta-se uma comparação entre o ventilador acoplado ao trator (denominado VT) e VCC2. Vale salientar que dentre os ventiladores selecionados este foi escolhido considerando a demanda do sistema, consumo de energia e o custo de aquisição do equipamento. Duas comparações distintas foram realizadas. Inicialmente, foi considerado o ventilador acoplado a uma tubulação perfurada sem a leira: Fig. 3.14 e Fig. 3.15.

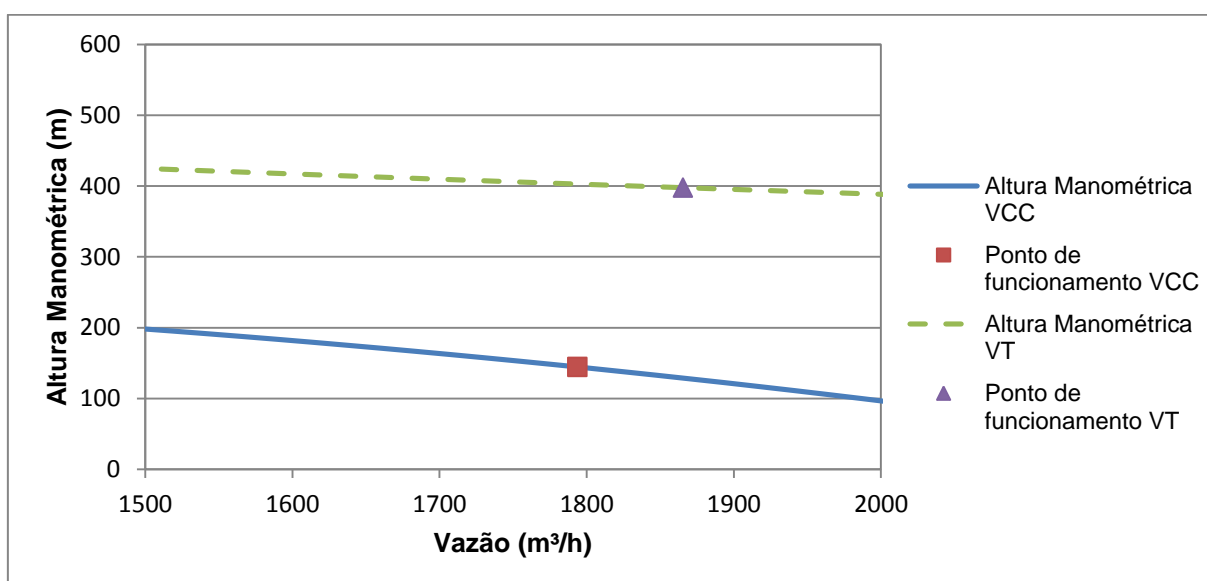


Figura 3.14 - Curvas de energia do VT e VCC2, juntamente com seus pontos de trabalho

Os pontos de trabalho de ambos ventiladores são destacados na Fig. 3.14. Por meio da análise destes pontos, verifica-se uma vazão de trabalho relativamente próxima, no entanto há uma diferença considerável na altura manométrica.

A Figura 3.15 relaciona o comprimento da tubulação sob a leira com a vazão de ar fornecida pelos ventiladores VT e VCC2. Nota-se nesse caso uma boa semelhança entre as vazões para o comprimento da tubulação superior a 15 metros.

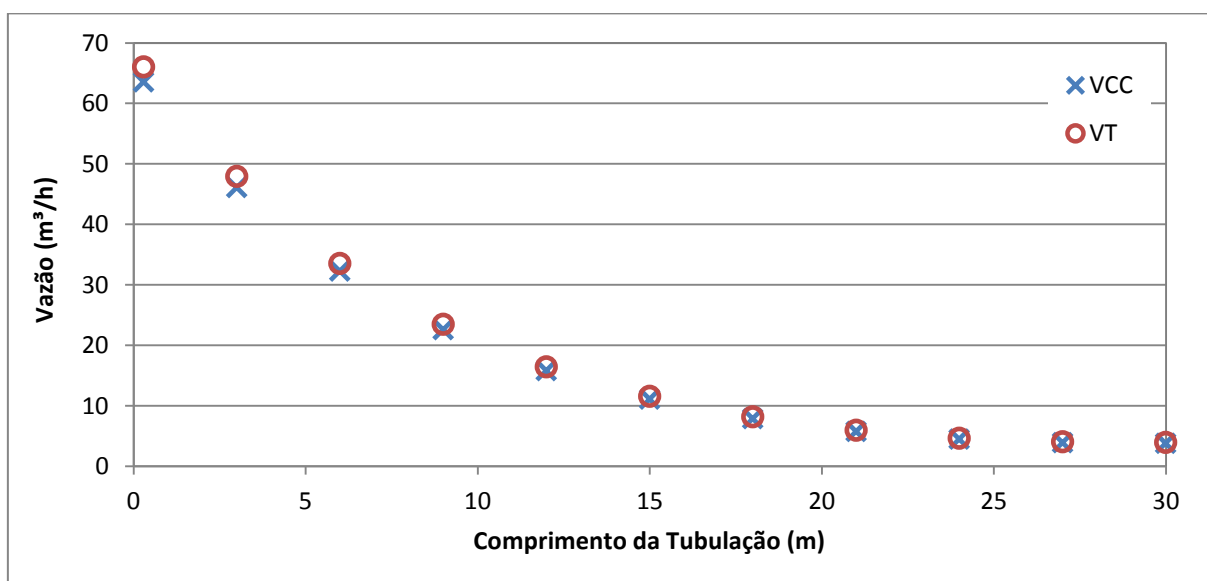


Figura 3.15 – Comparação da vazão sem a leira do VCC2 com o VT

Após a instalação dos ventiladores, novos testes foram realizados para determinar a pressão e a velocidade do ar no interior do tubo. Para isso, foi utilizado um dispositivo desenvolvido no LTCM, o qual é provido de sensores que convertem a pressão em sinal elétrico em função da curva de calibração fornecida pelo fabricante. A figura 3.16 mostra um esquema da montagem desse dispositivo.

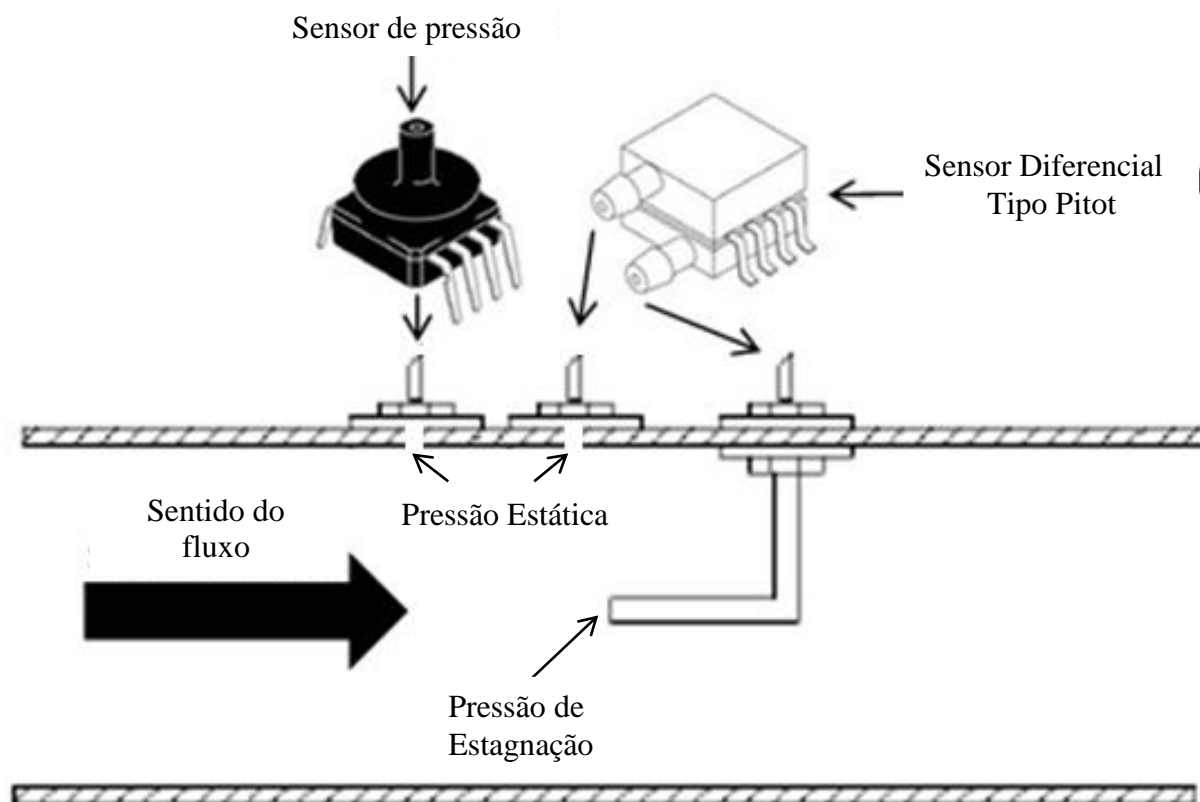


Figura 3.16 - Esquema do dispositivo desenvolvido para medição de pressão e velocidade do ar

Para visualizar os resultados adquiridos pelos sensores foi desenvolvida também uma placa de aquisição de dados. Com este aparato foram realizados testes para medir a velocidade e a pressão do ar nas leiras. As figuras 3.17 e 3.18 mostram detalhes do aparato experimental.



Figura 3.17 - Aparato experimental em uso na empresa.

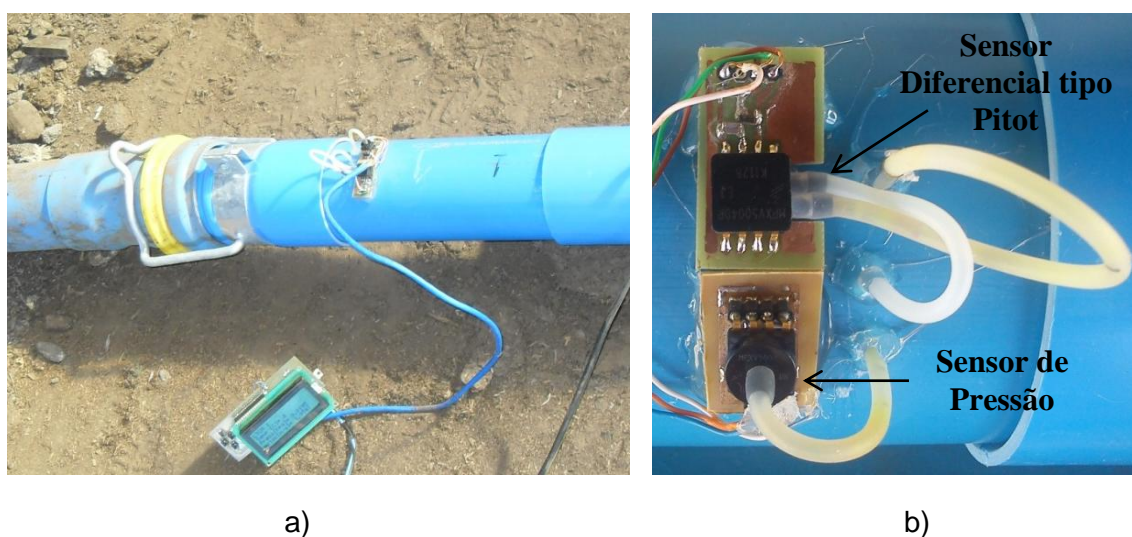


Figura 3.18 – Detalhes da montagem do tubo de Pitot nos dutos.

Os valores apresentados na tabela 3.3 foram obtidos a partir de medições realizadas nas leiras 3 e 4.

Tabela 3.3 – Dados experimentais de duas leiras de compostagem orgânica.

Leira	Pressão [KPa]	Velocidade [m/s]	Vazão [m³/h]	Altura Manométrica [m]
3	0,789	16,296	460,51	77,86
4	1,035	11,151	315,14	90,78

A partir das análises experimentais, a vazão e a altura manométrica do fluido foram calculadas. De posse desses dados e utilizando o método de otimização da Seção Áurea (VANDERPLAATS, 1999) foi possível estimar o valor médio aproximado da perda de carga da leira, definido como “K”. Basicamente, o método de otimização estima o valor de “K” usando uma função mínimos quadrados que relaciona a vazão de ar experimental e calculada na entrada da leira, conforme apresentado na Eq. (3.24):

$$F = (\dot{V}_{ex} - \dot{V}_{sl})^2 \quad (3.24)$$

Na equação anterior \dot{V}_{ex} é a vazão experimental medida a partir do tubo de Pitot e \dot{V}_{sl} é a vazão calculada conforme o valor de “K” estimado para a leira.

O valor estimado considera a perda de carga homogênea na leira. Os valores obtidos são apresentados na Tab. 3.4.

Tabela 3.4 – Estimativa da perda de carga de duas leiras de compostagem orgânica.

Leira	Coeficiente de Perda de Carga Estimado [K]
3	69,97
4	303,29

Ressalta-se que a diferença entre os valores estimados de “K” é atribuída ao processo de montagem das tubulações nas leiras. É muito comum nesta prática encontrar tubulações esmagadas ou mesmo acopladas de forma incorreta. No testes experimentais o produto compostado era o mesmo em ambas as leiras.

Usando o coeficiente de perda de carga estimado para a leira 3, as Figs. 3.19 e 3.20 apresentam as variações de pressão e vazão no interior da tubulação em função do comprimento da tubulação.

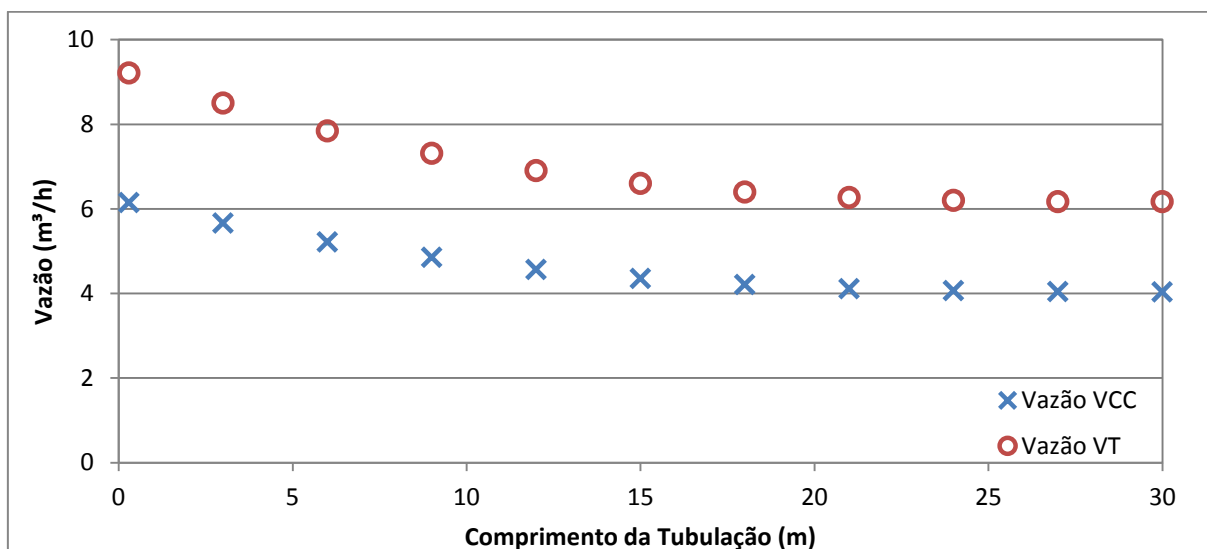


Figura 3.19 – Comparação da vazão do VCC com o VT, considerando $K = 69,97$

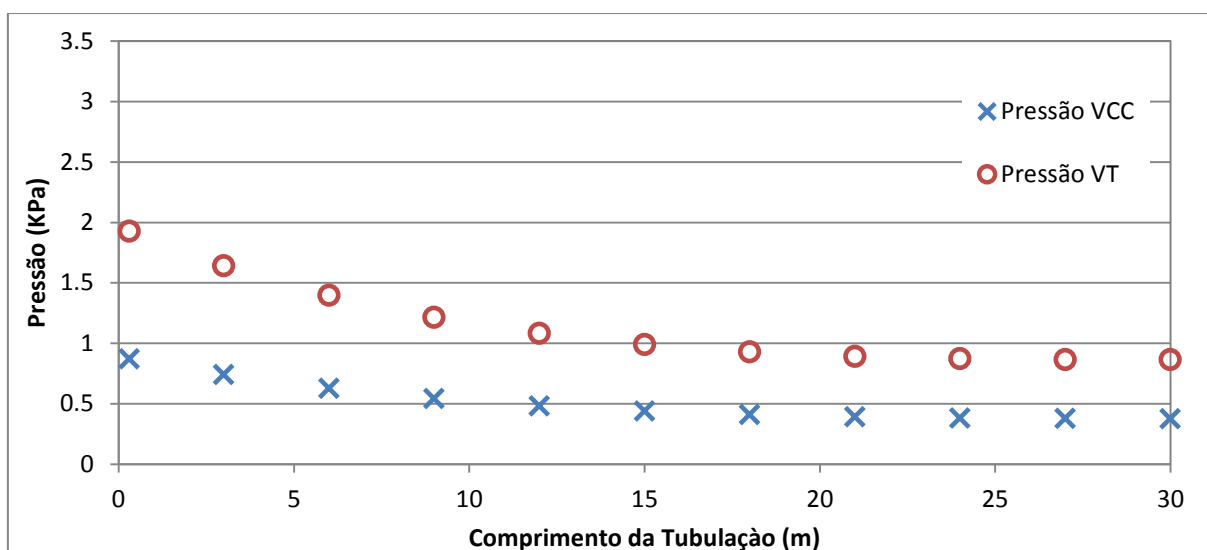


Figura 3.20 – Comparação da pressão do VCC com o VT, considerando $K = 69,97$

Na sequência são apresentados os resultados obtidos na leira 4 (Figs. 3.21 e 3.22). O maior coeficiente de perda de carga registrado nessa leira provavelmente ocorreu em virtude de junções feitas indevidamente ou simplesmente pelo esmagamento da tubulação durante o processo de montagem da leira.

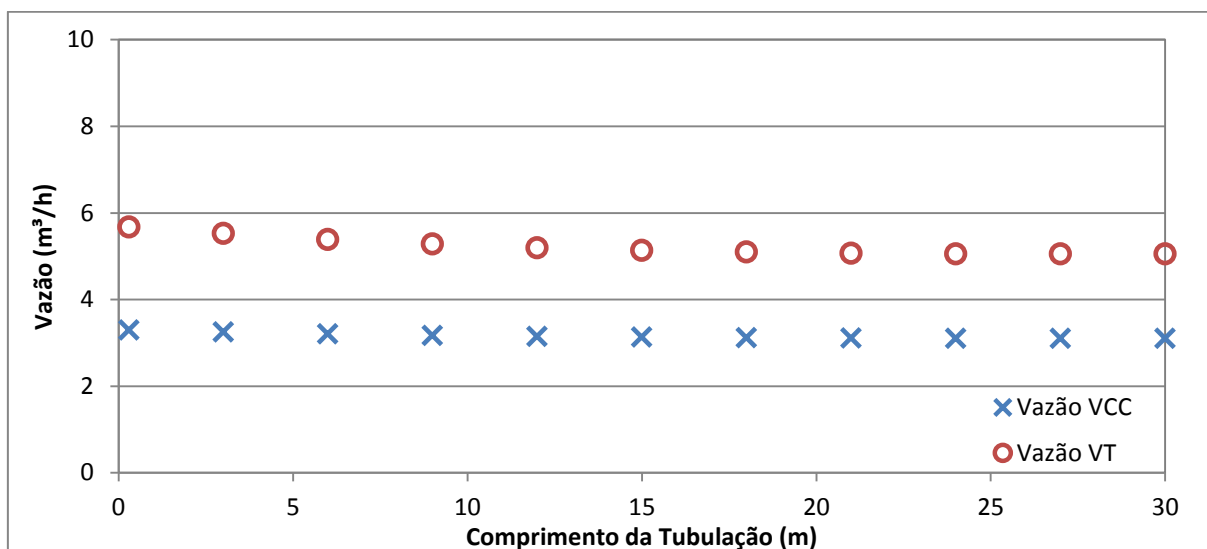


Figura 3.21 – Comparação da vazão do VCC com o VT, considerando $K = 303,29$

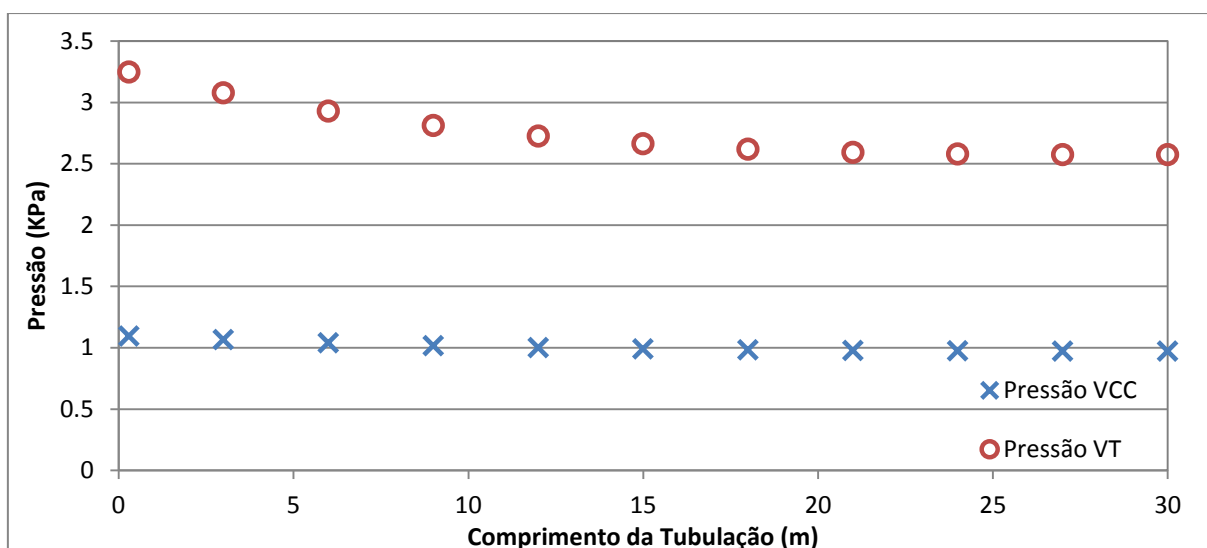


Figura 3.22 – Comparação da pressão do VCC com o VT, considerando $K = 303,29$

Apesar das figuras anteriores demonstrarem que o ventilador comercial VCC2 proporciona uma vazão inferior àquela obtida pelo VT, esta pode ser compensada aumentando o tempo de insuflamento. O aumento no tempo de insuflamento não implica em aumento no consumo de energia elétrica, visto que o VCC2 possui potência inferior ao VT. Nas figuras 3.19 e 3.21 observa-se também que a vazão para o VCC2 é mais homogênea ao longo da tubulação quando comparada ao VT. Assim, por meio dos resultados obtidos, o VCC2 apresenta-se como uma boa opção para substituir o ventilador atual da empresa. No entanto, faz-se necessário seu ajuste em campo a partir da análise de parâmetros monitorados durante o ciclo de compostagem, tais como: níveis de oxigênio, temperatura e umidade.

Na sequência são apresentados detalhes envolvendo a montagem do Sistema de Aeração Forçada Automatizado: tubulações, conexões e central eletrônica.

3.3. Montagem do SAFA

A tubulação utilizada na prática padrão para conexão do ventilador às leiras, Fig. 3.23, é de 5 polegadas de PVC flexível do tipo KVL com espiral de PVC rígido que melhora a resistência e permite a tubulação fazer curvas sem obstruir totalmente a passagem de ar. No entanto, este tipo de tubo apresenta uma perda de carga elevada, pois a parede interna do mesmo é corrugada.

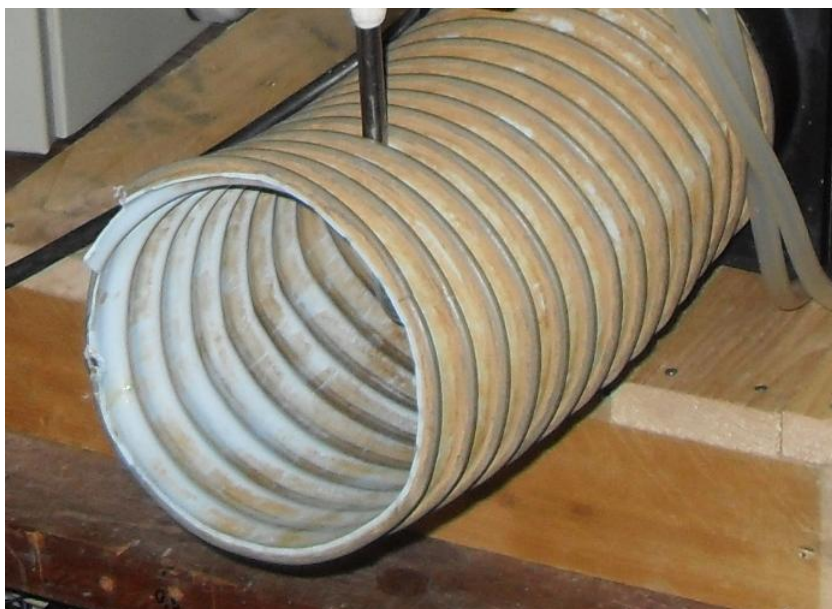
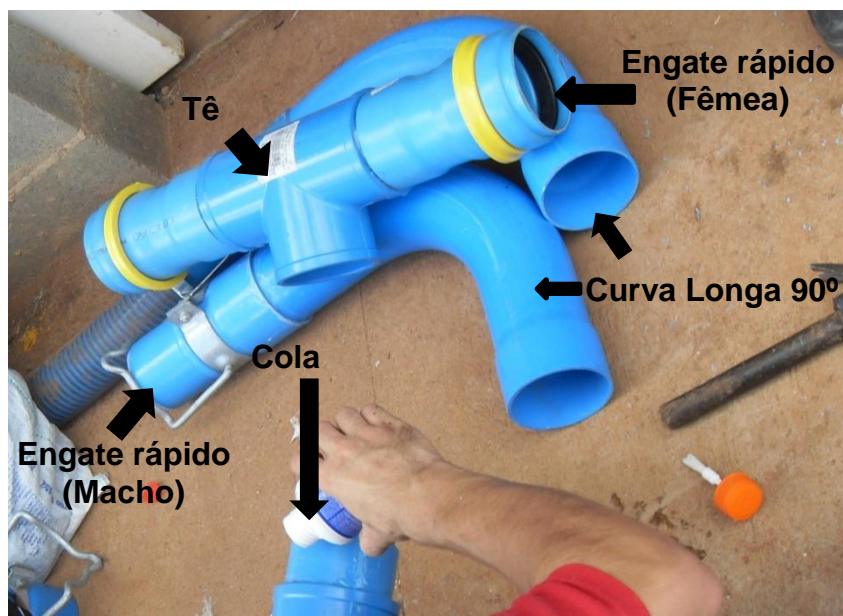


Figura 3.23 – Tubulação que conecta o ventilador às leiras de compostagem.

Conforme mencionado anteriormente a tubulação perfurada sob a leira possui um diâmetro de 4 polegadas, com furos de 22 mm espaçados a cada 300mm, com ângulo de 60 graus entre os mesmos. Já a tubulação que deverá atuar em conjunto com o SAFA deve possuir as seguintes características: diâmetro de 4 polegadas, rígida, com parede interna lisa. Por questões de custo, facilidade de substituição e compra, optou-se pela análise de alguns modelos de tubos de PVC.

O PVC branco utilizado na construção civil além de ser frágil não é disponível no diâmetro utilizado no projeto. O PVC marrom utilizado em tubulações de esgoto, possui o diâmetro necessário, entretanto há uma carência de acessórios para o mesmo. Por fim foram selecionadas tubulações de PVC azul utilizadas em sistemas de irrigação, pois

oferecem uma resistência considerável a um custo satisfatório. Para estas tubulações existem os acessórios (curvas, tês, luvas e engate rápido), tornando possível construir facilmente um sistema de ventilação com perda de carga inferior àquela obtida por meio da prática padrão da empresa (Fig. 3.24a).



a)



b)



c)

Figuras 3.24 - Tubulação de aeração: a) união das partes utilizando cola química; b) tubos de PVC conectado à leira; c) prática padrão da empresa que agrega perda de carga.

A Figura 3.24 apresenta os acessórios da tubulação que, neste caso, foram unidos com uma cola química. Além disso, apresenta-se a nova tubulação conectada à leira de compostagem por meio de um engate rápido. Tal prática foi adotada para substituir o antigo bocal que a empresa utilizava para conectar a mangueira corrugada à leira, o que agregava grande perda de carga ao processo de aeração.

O sistema eletrônico, por sua vez, tem como função acionar os ventiladores de maneira inteligente, visando uma aeração forçada automatizada, ou seja, que atenda as demandas de oxigênio necessárias para o metabolismo dos microrganismos, consumindo o mínimo possível de energia elétrica. Este sistema é composto por duas centrais eletrônicas, sendo uma individual, que se encontra próxima ao ventilador e outra, denominada placa-mãe que se situa distante, mas é comum para todos os equipamentos e responsável pelo acionamento ou não dos ventiladores.

A central que é instalada junto ao ventilador possui um disjuntor motor, um contator e um atuador (Fig. 3.25).

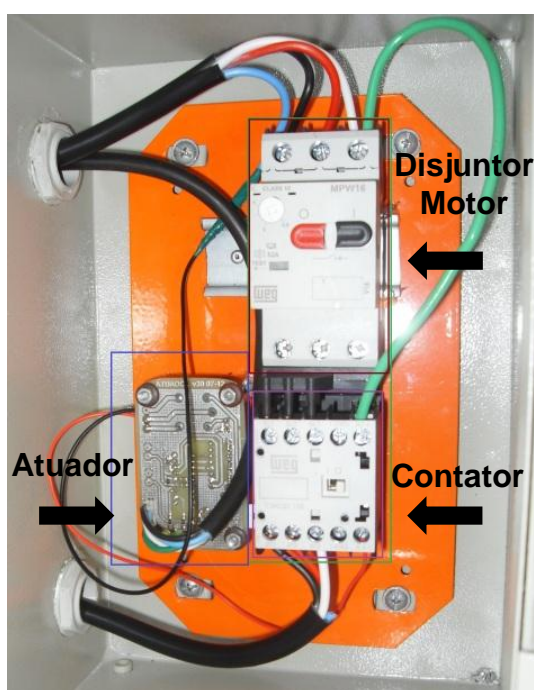


Figura 3.25 - Central eletrônica dos ventiladores.

O disjuntor motor é utilizado para proteger os ventiladores tanto na partida quanto em seu funcionamento. Possui alta capacidade de interrupção, assegurando total proteção ao circuito elétrico e ao motor através de seus disparadores térmicos. Além disso, é ajustável para proteção contra sobrecargas e dotado de mecanismo diferencial com sensibilidade a falta de fase, e magnético, calibrado para proteção contra curtos-circuitos (WEG, 2012.). Um conector trifásico é responsável pelo acoplamento entre o disjuntor e o contator.

O contator é acionado internamente por uma bobina de corrente alternada, dispensando a utilização de fontes de energia nas centrais dos ventiladores. O atuador, por sua vez, é responsável por receber os dados da central de controle do SAFA e acionar o contator por um intervalo de tempo programado.

A placa-mãe foi desenvolvida no LTCM-UFU (Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Universidade Federal de Uberlândia) conforme o trabalho de MULINA (2011). Esta tem a função de armazenar as informações do sistema e possui agregado um software que alterna o funcionamento e o tempo de atuação dos ventiladores. A placa segue o fluxograma apresentado por MULINA (2011) (Fig. 3.26).

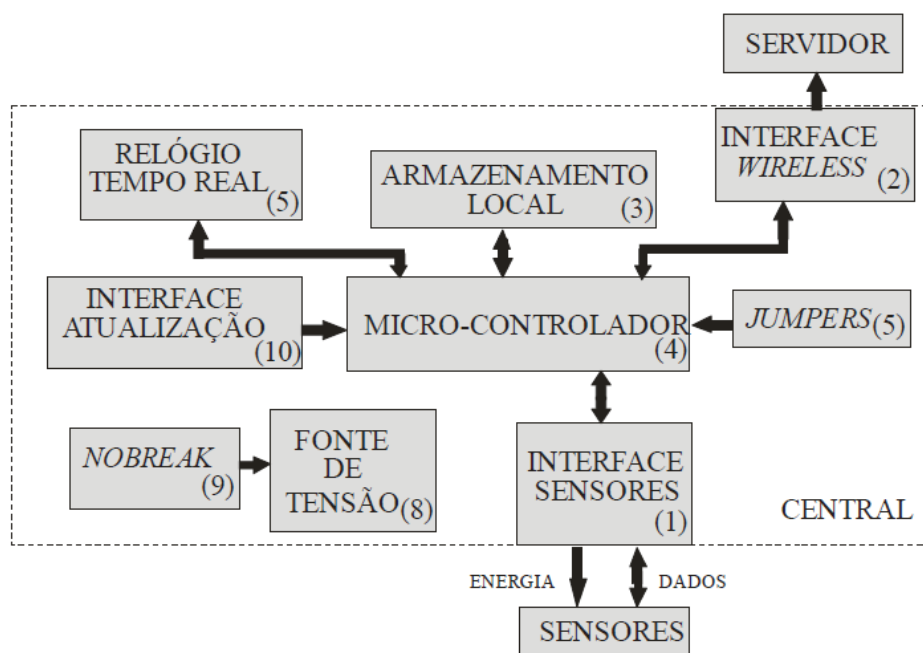


Figura 3.26 - Placa mãe da central eletrônica (fonte: MULINA, 2011)

A central que contempla a placa-mãe é apresentada na Fig. (3.27). Esta foi dividida em 4 partes. A primeira possui a entrada de energia e a proteção do sistema. Um disjuntor magnético tripolar é responsável pelas três fases e um monopolar para o neutro. Na saída de potência foi instalado um disjuntor motor, garantindo a segurança do sistema e possibilitando cessar a energia elétrica durante a manutenção do sistema. Na segunda parte do sistema foram instaladas tomadas de 220V, utilizadas para ligar a fonte e equipamentos necessários para algum reparo ou inovações no sistema. As demais partes são a placa mãe do sistema juntamente com a fonte de energia.

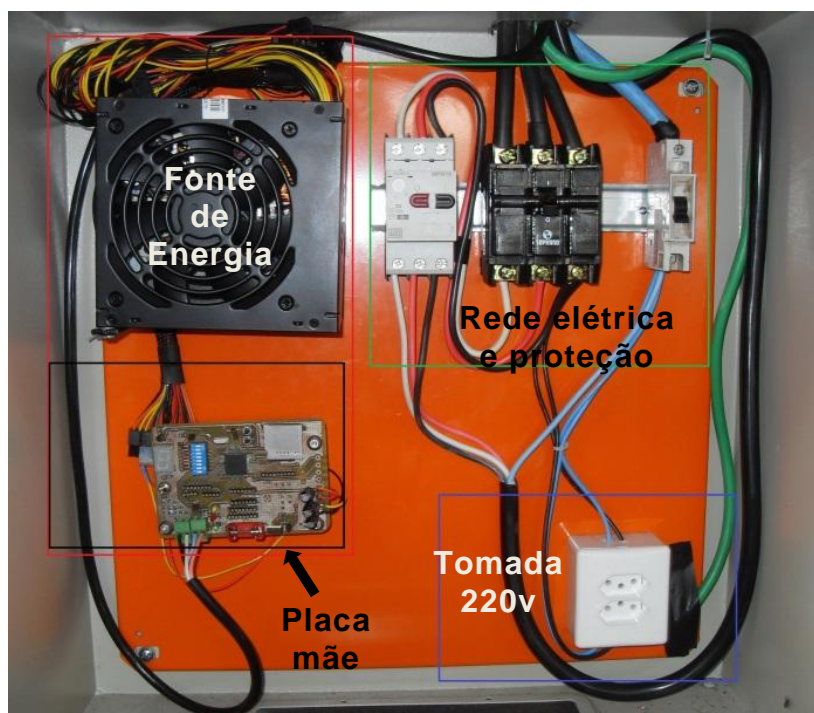


Figura 3.27 – Central eletrônica do sistema de aeração automatizado (SAFA)

Em projetos futuros podem ser utilizadas outras funções da placa-mãe como, por exemplo, o envio de dados a um servidor por meio de uma rede sem fio. Além disso, a placa poderá atuar sobre o processo de aeração a partir de dados monitorados nas leiras, tais como: temperatura e níveis de oxigênio.

Durante o processo de montagem do SAFA, tornou-se necessária a instalação de uma rede elétrica no galpão de compostagem. Este trabalho foi realizado por um técnico da empresa conforme orientações da equipe do LTCM. Na Figura 3.28 são apresentadas detalhes da instalação elétrica. A ligação entre o transformador de potência e o galpão foi feita de forma subterrânea. No galpão de compostagem, optou-se pela passagem dos fios e cabos dentro de canaletas fixas à estrutura do mesmo. Ainda nesta figura é indicado o local de instalação dos motores e central de controle do SAFA. No total são quatro ventiladores aerando oito leiras de compostagem.



Figura 3.28 - Detalhes da rede elétrica do galpão de compostagem, canaletas fixadas na estrutura metálica e a posição onde a central do SAFA será instalada.

Entre a central de controle e os ventiladores são usadas duas fiações distintas, sendo uma de potência e a outra para transferência de dados. Ambas foram também colocadas nas canaletas e em pontos pré-definidos, suspensas próximas ao solo. Após a instalação da rede elétrica, observou-se que esta havia sido posicionada erroneamente, entretanto este

problema foi resolvido aumentando o comprimento dos fios dos ventiladores, como pode ser observado na Fig. 3.29.



Figura 3.29 – Posição do ventilador e posicionamento incorreto do fios.

O sistema foi projetado para ser móvel, permitindo a sua retirada do local nas etapas de montagem e desmontagem de leiras. Entretanto a fiação não pode ser removida, para isso serão montados sistemas auxiliares utilizando carretilhas para recolher estes fios e evitar que as pás carregadeiras e caminhões se choquem com os mesmos. Durante o projeto houve a ideia de enterrar toda a tubulação, no entanto, por se tratar de um local com circulação diária de maquinário pesado, os mesmos poderiam acabar danificando a rede elétrica subterrânea.

Os ventiladores e o acionamento eletrônico foram montados em uma base de aço com as seguintes dimensões 0,50x0,50x0,06m.

Para cada ventilador foi construído um duto de ventilação composto por um “T”, duas curvas de 90° longas, um tubo de 2,5 metros em cada extremidade e quatro pares de engates rápidos. Todos com diâmetro de 4 polegadas. A fixação do tubo ao bocal do ventilador foi dificultada devido a ausência de acessórios, nesse caso, uma solução provisória foi encontrada durante a instalação do protótipo e consistiu em inserir com interferência o tubo dentro do bocal do ventilador. Ressalta-se que o uso dos engates rápidos melhorou bastante o manuseio das partes, tornando possível desconectar as tubulações dos ventiladores e remover todo o sistema durante a montagem e desmontagem das leiras.



Figura 3.30 - SAFA instalado em uma leira.

A figura 3.31 mostra um esquema do sistema instalado na empresa onde V1, V2, V3 e V4 representam os ventiladores de 1 a 4, respectivamente. Neste esquema é possível observar que as leiras são sobrepostas umas às outras.

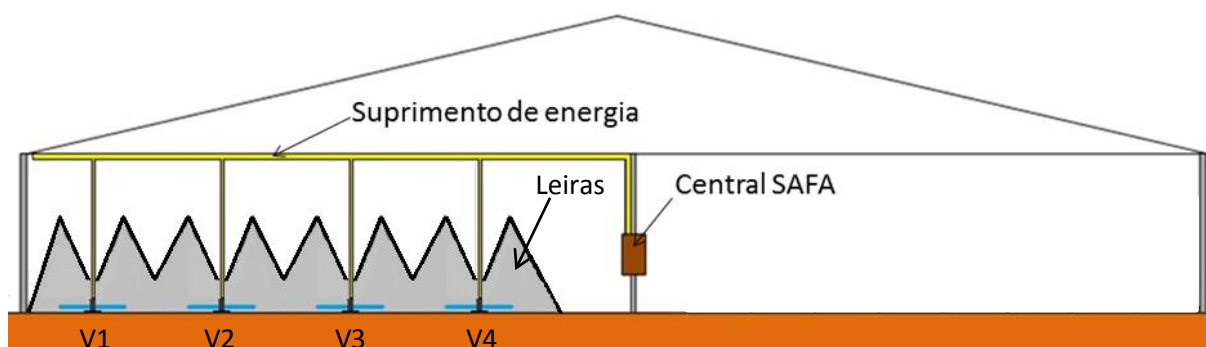


Figura 3.31 – Esquema do SAFA instalado na empresa

Detalhes do fabricante do ventilador e da construção das placas eletrônicas não foram apresentados em função do contrato de sigilo firmado entre a FEMEC-UFU e a Valoriza Fertilizantes.

No próximo capítulo serão apresentados resultados preliminares obtidos a partir do Sistema de Aeração Forçada Automatizado.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados preliminares identificados na prática de compostagem após a instalação do sistema de aeração forçada automatizado. Ressalta-se que por se tratar de um protótipo, o mesmo poderá ser ajustado conforme dados de produção ou falhas identificadas no decorrer da pesquisa. Nesse sentido, trabalhos futuros serão desenvolvidos com o objetivo de reportar detalhes envolvendo atualizações nas funções inseridas no sistema, possíveis falhas e reparos, e, por fim, disponibilizar informações concretas envolvendo melhorias nos ciclos de produção, baseadas em dados operacionais e ferramentas estatísticas.

Na etapa de testes o protótipo foi instalado para atuar em oito leiras, conforme apresentado na Fig. 4.1.



Figura 4.1 - Protótipo do sistema de aeração para oito leiras

Neste caso, foram instalados quatro ventiladores que funcionam individualmente aerando duas leiras por vez, durante intervalos de dez minutos. O ciclo tem início no primeiro ventilador e segue sequencialmente pelos demais, retornando novamente ao primeiro ventilador após 30 minutos. O tempo de atuação dos ventiladores (10 minutos) e de parada (30 minutos) foi ajustado com base em informações fornecidas pelos técnicos da empresa e dados identificados na literatura. A Figura 4.2, por exemplo, apresenta o declínio do teor de oxigênio em função do tempo na ausência de um sistema de aeração forçada. Nota-se que o teor de oxigênio no interior da leira tende a valores mínimos após 15 minutos (Environment Protection Agency, 1985) o que acaba sendo prejudicial para o processo.

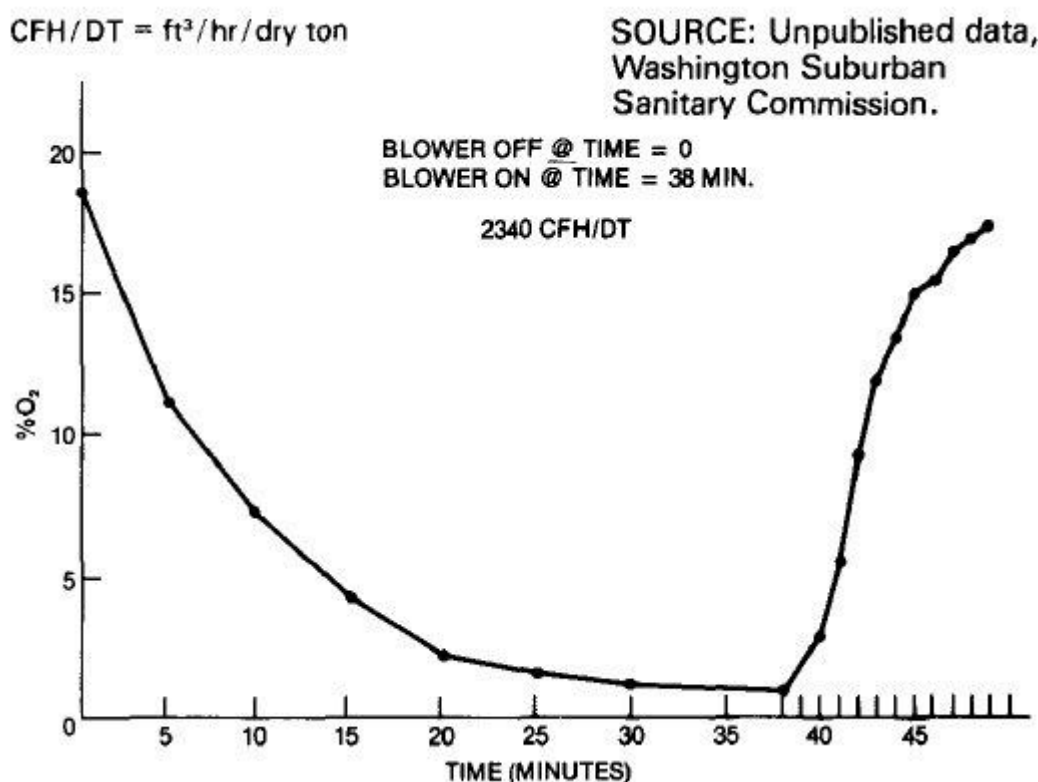


Figura 4.2 – Gráfico de teor de O₂ em leiras de compostagem usando sistema de aeração. (Fonte: EPA, 1985)

Por se tratar de um projeto de pesquisa que se encontra em andamento e de um sistema eletrônico robusto que permite ajustes em tempo real no processo de aeração, estudos paralelos estão voltados para a identificação dos níveis de oxigênio, temperatura e umidade das leiras para otimizar o ciclo de produção da empresa conforme o tipo de composto nas leiras.

Cabe salientar que o sistema foi instalado em Janeiro de 2012 e até a data de apresentação deste trabalho foram analisados dois ciclos de produção. Ressalta-se que

cada ciclo leva em torno de aproximadamente trinta dias, durante os quais, a empresa analisa a temperatura e, ao final, o teor de umidade. Conforme apresentado na revisão bibliográfica, a umidade do composto esperada no final do processo deve ser inferior a 30% e a temperatura próxima à ambiente. Nessas condições, a leira é desmontada e peneirada. Uma vez que o teor de umidade é inversamente proporcional à taxa de peneiramento valores acima de 30% inviabilizam a realização desta prática.

Durante a desmontagem da leira são retiradas amostras para determinação da qualidade do fertilizante orgânico produzido. A qualidade está diretamente relacionada à diversos parâmetros, tais como: mistura adequada entre insumos e materiais estruturantes, controle de temperatura, aeração correta, entre outros.

Nesse sentido, a Tab. 4.1 apresenta inicialmente uma comparação entre os teores de umidade de compostos com 30 dias, produzidos por meio da prática padrão da empresa e sob a influência do Sistema de Aeração Forçada Automatizado (SAFA).

Tabela 4.1 - Teor de umidade das leiras utilizando a prática padrão e o sistema de aeração automatizada

Amostra	% Umidade (Prática Padrão)	% Umidade (SAFA)
1	32,9	31,4
2	33,5	25,8
3	32,3	27,7
4	30,6	27,4
5	32	25,9
Média	32,26	27,64

Por se tratarem de leiras com aproximadamente 30 metros de comprimento, para definir o teor de umidade foram coletadas cinco amostras em 3 alturas distintas em cada leira (0,30m; 1,00m e 1,5m em relação ao topo da leira), por meio de um trado (Fig. 4.3).



Figura 4.3 – Coleta de amostras para análise do teor de umidade: a) trado a 0,30m; b) trado a 1,00m

Após a coleta das amostras, estas foram colocadas em uma balança de determinação de umidade (modelo IV2000 – Marca Gehaka) que promove a pesagem e secagem do composto até que a massa se torne constante, procedimento este que demora em torno de 10 minutos e ao final fornece os percentuais de umidade do composto.

Por meio da análise da Tab. 4.1, verifica-se que, considerando períodos semelhantes de produção e o mesmo tipo de composto, o produto final obtido com o SAFA possui um teor de umidade inferior àquele obtido por meio da prática padrão. Analisando o valor médio dos cinco testes, verifica-se uma redução no teor de umidade em 14%. Segundo informações da empresa, quando o teor de umidade reduz para valores abaixo de 30% o produto final se encontra pronto para o peneiramento. Nesse sentido, com base nos teores de umidades obtidos, é notório que o uso do sistema de aeração contribuirá para uma redução no tempo de produção. No entanto, é importante destacar que uma compostagem muito rápida pode influenciar na qualidade final do fertilizante. Nesse sentido, outros estudos devem ser realizados para encontrar o tempo de produção e de aeração corretos que permitam obter o fertilizante em menor tempo com a qualidade esperada.

Tais resultados foram obtidos devido à regularidade do sistema de aeração automatizado, seja durante o dia ou à noite. Por meio da prática padrão da empresa, ou seja, usando o ventilador acoplado ao trator agrícola, ar é insuflado em cada leira de 2 a 3 vezes, durante cada turno de trabalho dos funcionários, e no período da noite não há aeração, o que compromete o tempo de produção e possivelmente a qualidade do fertilizante.

Após a análise dos teores de umidade, as Tabs. 4.2 e 4.3 apresentam uma comparação entre as taxas de peneiramento dos produtos.

Tabela 4.2 - Taxa de peneiramento do produto obtido por meio da prática padrão

Pesagem Valoriza	Peso líquido (kg)	Tempo (min)	Taxa peneiramento (kg/min)
1 ^a	10140	18	563
2 ^a	10000	18	556
3 ^a	10940	15	729
4 ^a	10640	14	760
5 ^a	10480	15	699
Soma	52200	80	653

Tabela 4.3 - Taxa de peneiramento com sistema de aeração forçada automatizada (SAFA)

Pesagem UFU	Peso líquido	Tempo (min)	Taxa peneiramento (kg/min)
1 ^a	10400	15	693
2 ^a	9880	15	659
3 ^a	10880	13	837
4 ^a	10280	13	791
5 ^a	10600	14	757
Soma	52040	70	743

Para o processo de peneiramento, caminhões descarregam o composto na esteira 1, que o conduz para a peneira. Em seguida, o composto peneirado é conduzido pela esteira 2 para caminhões que o transportam para o pátio de armazenamento (Fig. 4.4). A taxa de peneiramento é calculada em função do tempo que o composto (com peso conhecido) demora para ser peneirado.



Figura 4.4 – Peneiramento do fertilizante orgânico.

Conforme mencionado anteriormente, a taxa de peneiramento está relacionada à umidade do composto a ser peneirado. Neste sentido, pode-se observar nas Tabs. 4.2 e 4.3 que o composto resultante do SAFA apresentou taxas de peneiramento superiores àqueles produzidos pela prática padrão da empresa o que proporcionou um acréscimo de 10% na produção nesta etapa do processo, devido ao menor teor de umidade. Assim, conclui-se que o SAFA contribui para a redução do tempo de peneiramento e, conseqüentemente, para o aumento da produção de fertilizante. A Figura 4.5 apresenta uma imagem do fertilizante peneirado alocado no pátio de armazenamento.



Figura 4.5 - Composto peneirado.

Para definir o tempo ideal de insuflamento de ar nas leiras foram realizadas coletas de dados referentes aos níveis de oxigênio, metano e temperatura. Tais parâmetros foram monitorados por meio do equipamento Testo 350S disponível no LTCM-FEMEC-UFU.



Figura 4.6 – Analisador de gases Testo 350s.

Os testes foram conduzidos usando a metodologia demonstrada na Fig. 4.7. Um tubo de PVC, com diversos furos e tampa na parte superior, foi posicionado verticalmente no centro de uma leira. Optou-se neste caso pela leira 4, uma vez que esta se encontra em uma região central entre as demais leiras compostagem. O tubo de 1,40 metros foi enterrado cerca de 1 metro na leira, de forma que todos os furos ficassem em contato com o produto. Este permaneceu enterrado durante os 30 dias de compostagem.



a)



b)

Figura 4.7 – Monitoramento de gases e temperatura nas leiras: a) Equipamento Testo 350S, b) detalhes da tubulação.

Uma vez por semana, a sonda do analisador de gases era inserida no interior do tubo de PVC. Durante os testes, a parte superior do tubo permaneceu fechada com tampa para evitar que o ar atmosférico comprometesse os resultados medidos.

Os gases provenientes do processo de compostagem foram analisados durante três ciclos distintos de aeração. No primeiro os ventiladores funcionavam de forma intercalada por um período 5 minutos. No segundo, o tempo de insuflamento de ar foi aumentado para 7 minutos e no terceiro para 10 minutos. O ciclo completo de ventilação em todos os casos, considerando os 4 ventiladores instalados na empresa, foi padronizado em 40 minutos.

A tabela 4.4 mostra os valores máximos e mínimos dos parâmetros analisados em função do tempo de aeração: 5, 7 e 10 minutos.

Tabela 4.4 – Níveis máximos e mínimos do teor de oxigênio e temperatura em função da variação do tempo de aeração. Data de coleta dos dados: 15º dia de compostagem

Tempo de aeração (minutos)	Níveis de Oxigênio e Temperatura	
	Máximo	Mínimo
5	12,2% de O ₂ e 65,1°C	8,52% de O ₂ e 61,1°C
7	16,1% de O ₂ e 69,3C	11,7% de O ₂ e 60,4°C
10	19,6% de O ₂ e 78,8°C	14,7% de O ₂ e 77,0°C

No primeiro de ciclo analisado, adotou-se um tempo de aeração de 5 minutos. Os resultados obtidos com este ciclo demonstram que a aeração é insuficiente, pois o teor de oxigênio foi inferior a 10%, o que pode desencadear um processo anaeróbico de compostagem (DIAZ et al., 1982).

No segundo ciclo, adotou-se um tempo de aeração de 7 minutos. Nesse caso, a temperatura e o teor de oxigênio oscilaram dentro da faixa ótima preconizada para a compostagem de resíduos orgânicos.

Ajustando o sistema de aeração para 10 minutos, verificou-se que o teor de oxigênio foi superior à faixa ideal proposta na literatura, que varia entre 14 e 17% (DIAZ et al., 1982), salientando-se que, em alguns momentos, o teor de oxigênio superou 19%. A temperatura durante o ciclo também foi maior que aquela considerada ideal (GOMES; PACHECO, 1988; FERNANDEZ, 1999). Vale salientar que a emissão de metano analisada durante todos os ciclos de produção do fertilizante orgânico não supera 0,5%.

Assim, dentre os ciclos de insuflamento estudados, o que se mostrou mais adequado foi aquele com tempo de aeração equivalente a 7 minutos. Nesse sentido, considerando

este último como adequado para a compostagem orgânica da empresa em questão, fez-se uma análise de um ciclo completo de compostagem. O critério estatístico de Chauvenet foi utilizado para analisar os dados de temperatura e do teor de oxigênio e, assim, definir a média e o desvio padrão dos parâmetros medidos.

A figura 4.8 mostra a evolução da temperatura e dos níveis de oxigênio nas leiras considerando o insuflamento de 7 minutos durante um ciclo de compostagem completo.

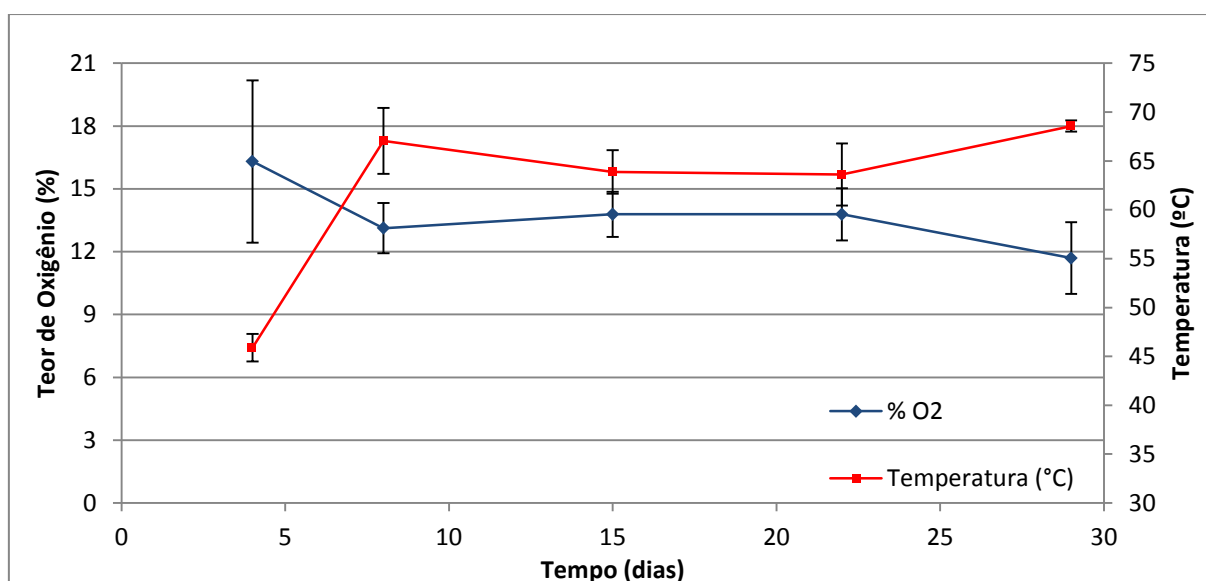


Figura 4.8 - Evolução da temperatura e teor de oxigênio durante o ciclo de compostagem orgânica.

Verifica-se na figura anterior que os valores medidos se mantiveram dentro da faixa esperada para compostagem orgânica, o que comprova a eficiência do SAFA. Ressalta-se que os testes foram realizados para apenas um tipo de produto, definido como aquele mais abundante na empresa. Outros devem ser conduzidos para ajustar o SAFA em função do tipo de produto e altura e comprimento das leiras.

Por meio dos resultados apresentados anteriormente, verifica-se que o Sistema de Aeração Forçada Automatizado se apresenta com uma ferramenta promissora na produção de fertilizantes orgânicos. Ressalta-se que a Empresa demonstrou interesse em expandir o mesmo para as demais 40 leiras de compostagem. O projeto final, caso seja executado, deverá aerar todas as leiras automaticamente, além disso o tempo de aeração será dependente do tipo de composto orgânico e poderá ser ajustado por meio de um computador conectado a uma rede sem fio à placa-mãe. Sondas estão sendo desenvolvidas em laboratório para mensurar os níveis de temperatura e oxigênio nas leiras em tempo real.

Ao final, espera-se desenvolver uma ferramenta inteligente que, com base em parâmetros medidos nas leiras, forneça a quantidade ideal para a prática de compostagem orgânica.

No próximo capítulo são apresentadas as conclusões acerca deste trabalho.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Neste trabalho teve-se como objetivo instrumentar um processo de aeração de leiras de compostagem orgânica de uma empresa produtora de biofertilizantes. Neste sentido, foram apresentados nos capítulos anteriores a concepção, o desenvolvimento e a montagem do protótipo de aeração.

Dificuldades foram encontradas tanto na seleção de equipamentos quanto na montagem do sistema. As tubulações anteriormente utilizadas pela empresa possuíam perda de carga elevada, portanto foram necessárias substituições por tubulações de irrigação, que possuem acessórios que facilitaram a montagem e desmontagem do sistema de ventilação.

Na etapa de avaliação e seleção dos ventiladores, levantou-se inicialmente o desempenho do ventilador disponível na empresa que estava acoplado ao trator agrícola. Verificou-se, por meio de tal equipamento, a necessidade de trabalhar com ventiladores centrífugos comerciais cuja potência estivesse na faixa de 1CV a 3CV, vazão próxima à 900 m³/h e altura manométrica de 470 metros. Nesse sentido, por meio da análise das curvas de desempenho de ventiladores de diversos fabricantes e de um algoritmo computacional desenvolvido no LTCM, chegou-se à especificação de um equipamento de potência de 1,5CV que, de acordo com a rede de ventilação projetada, opera com máximo desempenho (altura manométrica de 250 metros), menor consumo de energia (306 kWh) e vazão esperada (710 m³/h) para o processo de compostagem.

Durante o processo de montagem do sistema de aeração automatizado ocorreram atrasos referentes à entrega dos ventiladores e, quando estes chegaram, notou-se que o bocal que fazia a conexão entre o ventilador e a tubulação possuía um erro de projeto. Este

precisou ser usinado internamente para corrigir um rebaixo inapropriado que causaria grande perda de carga, o que acabou atrasando ainda mais a finalização do projeto.

Foram ainda encontrados problemas operacionais referentes à instalação elétrica dos fios e cabos na empresa. O serviço foi realizado por um técnico da empresa que posicionou os fios de forma incorreta o que acarretou no aumento dos fios dos motores. Durante os testes elétricos, verificou-se que a tensão máxima disponibilizada para os motores era de 350 Volts em média, enquanto que o esperado seriam 380 Volts, o que poderia comprometer o desempenho do sistema automatizado de ventilação. Tais falhas foram apresentadas à gerência da empresa que se comprometeu a corrigi-las.

De acordo com os resultados preliminares obtidos neste trabalho, conclui-se que a implantação do SAFA apresenta uma tendência de redução do tempo de produção do composto orgânico em pelo menos 3 dias. Segundo cálculos realizados em conjunto com a gerência da empresa, comprovada essa tendência de redução, a empresa teria 48 ciclos extras de produção por ano, o que permite um incremento de aproximadamente 8% na produção anual. A taxa de peneiramento do composto também foi alterada, em virtude de seu menor teor de umidade final. Além disso, o sistema aumentou a oxigenação nas leiras de compostagem, favorecendo a aerobiose.

A tendência de redução do tempo de produção do fertilizante pode ser atribuída aos ciclos de aeração contínuos, ou seja, ao insuflamento de ar durante 24 horas por dia, que permitiu a rápida redução da umidade do composto e maiores níveis de oxigênio no interior das leiras. Na presença de oxigênio, os microrganismos aumentam a velocidade de decomposição. Por outro lado, quando este reduz, o metabolismo da microbiota também se reduz, ou até se extingue devido à morte dos microrganismos, fato que poderia estar acontecendo durante o período da noite que não havia o processo de aeração pela prática padrão da empresa.

Assim, de maneira geral, o sistema de aeração forçada automatizado desenvolvido no LTCM da FEMEC - UFU em convênio com a empresa Valoriza Fertilizantes mostrou-se satisfatório, podendo substituir com o antigo sistema de ventilação da empresa. Ressalta-se que o consumo mensal de energia elétrica estimado para o SAFA (7350 kW) acarreta uma despesa de aproximadamente R\$ 2.700,00, enquanto que o antigo sistema, considerando combustível e dois motoristas para o turno diário de trabalho com o trator, gera um custo mensal de aproximadamente R\$ 5.500,00. Assim, verifica-se que o SAFA pode proporcionar redução de 50% na atual despesa mensal da empresa com a prática de aeração.

Além de substituir a prática padrão, o SAFA se apresenta como um equipamento que poderá inovar a prática de produção. Tanto que a empresa, de posse dos dados preliminares, manifestou interesse em instalar o sistema no restante do galpão de compostagem. Dessa forma, por meio da continuidade do projeto, espera-se que sejam desenvolvidos os seguintes trabalhos futuros:

- Monitorar a temperatura e o teor de oxigênio de vários ciclos tornando possível confirmar os dados preliminares obtidos neste trabalho;
- Definir uma aeração otimizada com base nos dados de temperatura, níveis de oxigênio e tipo de composto, de forma a reduzir o ciclo de compostagem;
- Aprimorar o sistema eletrônico para envio de dados via redes sem fio para um servidor, no qual poderão ser visualizados perfis de temperatura e o teor de oxigênio em função do tempo de compostagem;
- Definir experimentalmente a perda de carga da leira de compostagem para otimizar o sistema de ventilação, maximizando assim o rendimento dos ventiladores de forma a obter um melhor aproveitamento energético;
- Estudar o arranjo e o diâmetro dos furos da tubulação sob a leira, visando uma melhor distribuição do ar em seu interior;
- Aprimorar o arranjo, conexão e tipo de tubulação que encontra sob a leira. Por meio da prática padrão a tubulação fica curvada no interior da leira, seguindo a forma de um “S”. Nesse sentido, inicialmente, seria interessante usar tubos rígidos, separados em seções, de forma que a tubulação fique reta sob a leira. Além disso, durante o processo de montagem e desmontagem das leiras, devem ser incorporadas conexões de engate rápido para evitar perdas de carga no sistema de aeração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, W.L. **Compostagem e vermicompostagem no tratamento de lixo urbano**. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP, 1998. 53p.

ANDREOLI, C.V. **Resíduos sólidos do saneamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: Abbes, 2001. 282p.

ARAÚJO, E.N. et al. Produção do pimentão adubado com esterco bovino e biofertilizante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.5, p.466-470, 2007.

AZEVEDO, M.A. **Compostagem de resíduos sólidos orgânicos**: aspectos teóricos e operacionais. Viçosa: UFV, 1997. 44p.

BACKHUS ECO ENGINEER. **Compostagem estática VS compostagem dinâmica**. 2012. Disponível em: <http://www.backhus.com/323-1-Dynamic-versus-static-composting.html>. Acesso em: 29 jan. 2012.

BARRINGTON, S. et al. Compost airflow resistance. **Biosystems Engineering**, London, v.81, n.4, p.433-441, 2002.

BELTRAME, K.G. Compostagem de resíduos industriais, comerciais e agrícolas. In: AUDIÊNCIA DE SUSTENTABILIDADE, 11., 2008. São José dos Campos. **Apresentação...** São José dos Campos: Sabesp. 2008.

BECK-FRIIS, B. et al. Composting of source-separated household organics at different oxygen levels: gaining an understanding of the emission dynamics. **Compost Science/land Utilization**, Emmaus, v.11, n.1, p.41-50, 2003.

BECK-FRIIS, B. et al. Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.78, n.4, p.423-430, 2001.

BEFFA, T. **The composting biotechnology**: a microbial aerobic solid substrate fermentation complex process. 2002. 37p. Disponível em: <http://www.compag.ch/medien.php>. Acesso em: 9 nov. 2011.

BERNABÉ, G.A. **Extração e identificação de material lignocelulósico presente durante o processo de compostagem**. 2008. 114f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Araraquara, 2008.

CAMPBELL, S. **Manual de compostagem para hortas e jardins**: como aproveitar bem o lixo orgânico doméstico. São Paulo: Nobel, 1999. 149p.

CEMPRE. **Compromisso Empresarial para Reciclagem**. 2012. Disponível em: <http://www.cempre.org.br/>. Acesso em: 18 fev. 2012.

CHOI, M.H.; PARK, Y.H. The influence of yeast on thermophilic composting of food waste. **Letters in Applied Microbiology**, Oxford, v.26, p.175-178, 1998.

CLEZAR, C.A.; NOGUEIRA, A.C.R. **Ventilação Industrial**. Florianópolis: UFSC, 1999. 298p.

COMPAG. **Recycling und Umwelttechnik AG**. 2011. Disponível em: <http://www.compag.ch/medien.php>. Acesso em: 9 nov. 2011.

CONDOMINIO ABC. **Compostagem**. 2011. Disponível em: <http://condominio-abc.serrapress.com/com-dominio/compostagem-compostagem-e-compostores>. Acesso em: 16 ago. 2011.

COSTA, L.A.M. **Adubação orgânica na cultura do milho**: parâmetros fitométricos e químicos. 2005. 121f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2005.

CUNHA, J.D.M. **Metodologias para a produção de carvão vegetal em fornos RAC220**. 2009. 52f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

DIAZ, L.F.; SAVAGE, G.M.; GOLUEKE, C.G. **Resource Recovery from Municipal Solid Wastes**. Final Processing. v.2. Boca Raton: CRC Press, 1982.

DIAZ, L.F.; SAVAGE, G.M.; GOLUEKE, C.G. Composting of municipal solid wastes. In: TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. (eds.) **Handbook of Solid Waste Management**. 2. ed. New York/Chicago/San Francisco/Lisbon/London/Madrid/Mexico City/Milan/New Delhi/San Juan/Seoul/Singapore/Sydney/Toronto: McGraw-Hill, 2002. p.423-492.

ECS. **Engineered compost systems**. 2012. Disponível em: <http://www.compostsystems.com>. Acesso em: 21 jan. 2012.

EKLIND, Y. et al. Chemical characterization of source-separated organic household waste. **Swedish Journal of Agricultural Research**, Stockholm, v.27, p.167-178, 1997.

EPA. United States Environmental Protection Agency. **Composting of municipal wastewater sludges**. Chicago: U. S. Environmental Protection Agency, 1985. 73p.

EPSTEIN, E. et al. A forced aeration system for composting wastewater sludge. **Journal of the Water Pollution Control Federation**, Alexandria, v.48, n.4, p.688-694, 1976.

FERNANDES, F.; SILVA, S.M.C.P. **Manual prático para a compostagem de biossólidos**. Rio de Janeiro: Abbes, 1999. 84p.

FIGUEIRA JÚNIOR, E.A.; PESSOA, J.S. **Análise imediata de carvão vegetal**. 2009. 17f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

FORTES NETO, P.; FORTES, N.L.P.; SELBACH, P.A. A ação da temperatura, bactérias e fungos no controle de microorganismos patogênicos durante a compostagem de lixo urbano domiciliar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBCS. 1997, CD-ROM.

GOMES, W.R. da; PACHECO, E. **Composto orgânico**. Lavras: Escola Superior de Agricultura de Lavras, 1988. 11p. (Boletim Técnico, 11).

GÓMEZ, A. The evaluation of compost quality. **Trends in Analytical Chemistry**, Amsterdam, v.17, n.5, p.310-314, 1998.

GREEN MOUNTAIN TECHNOLOGIES. 2011. Disponível em: www.compostingtechnology.com. Acesso em: 12 nov. 2011.

GRUBE, M. et al. Evaluation of sewage sludge-based compost by FT-IR spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.130, n.3/4, p.324-333, 2006.

HAMODA, M.F.; ABU-QDAIS, H.A.; NEWHAM, J. Evaluation of municipal solid waste composting kinetics. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v.23, n.4, p.209-223, 1998.

KEENER, H.M.; ELWELL, D.L.; MONNIN, M.J. Procedures and equations for sizing of structures and windrows for composting animal mortalities. **Applied Engineering in Agriculture**, Saint Joseph, v.6, p.681-692, 2000.

KIEHL, E.J. **Manual de compostagem**: maturação e qualidade do composto. Piracicaba: E.J. Kiehl, 1998. 171p.

KIEHL, E.J. **Manual de compostagem**: maturação e qualidade do composto. 4. ed. Piracicaba: E.J. Kiehl, 2004. 173p.

LINDENBERG, R.C. **60 questões sobre a compostagem**. São Paulo: ABLP, 1992. 15p.

MACINTYRE, A.J. **Ventilador Industrial e Controle de Poluição**. Rio de Janeiro: LTC, 1990. 403p.

MAIA, I.M.O. et al. Definição do cenário base e a análise da emissão de CH₄ em fornos destinados à produção de carvão vegetal. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6., 2010. Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Anais do VI CONEM. v.1. p.1-6. 2010.

MILLER, F.C. Composting as a process based on the control of ecologically selective factors. In: METTING, F.B. (ed.) **Soil Microbiology and Ecology**. New York: Marcel Dekker, 1993. p.515-543.

MONDINI, C.; FORNASIER, F.; SINICCO, T. Enzymatic activity as a parameter for the characterization of the composting process. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.36, p.1587-1594, 2004.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. Rio de Janeiro: Abbes, 2000. 415p.

MOTTER, O.F. et al. **Utilização de minhocas na produção de composto orgânico**. São Paulo: CETESB, 1987. 26p.

MULINA, B.H.O. **Desenvolvimento de um sistema eletrônico para monitoramento térmico de fornos industriais**. 2011. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

MULINA, B.H.O. **Desenvolvimento de um sistema supervisor para medição de temperaturas em fornos de produção de carvão**. 2009. 31f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

MULINA, B.H.O. et al. Instrumentação térmica aplicada ao processo de produção de carvão vegetal em fornos de alvenaria. In: FEIRA E CONGRESSO MERCOFRIO, 2010. Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ASBRAV (Associação Sul Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado, Aquecimento e Ventilação), p.10. 2010.

MULINA, B.H.O. et al. Development of a supervisory system to measure the temperature inside charcoal kilns. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 20., 2009. Gramado. **Anais...** Gramado: Anais do XX COBEM. v.1. p.1-10. 2009.

MUSTIN, M. **Le compost gestion de la matière organique**. Édition François Dubusc, 1987. 954p.

NAKASAKI, K. et al. Effects of pH control on composting of garbage. **Waste Management and Research**, London, v.11, n.2, p.117-125, 1993.

OLIVEIRA, F.N.S.; LIMA, H.J.M.; CAJAZEIRA, J.P. **Uso da compostagem em sistemas agrícolas orgânicos**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2004. 14p.

OLIVEIRA, R.L.M. et al. Análise térmica e do rendimento gravimétrico em fornos de produção de carvão vegetal. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6., 2010. Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Anais do VI CONEM. v.1. p.1-10. 2010.

OLIVEIRA, R.L.M. **Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal**. 2009. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

OLIVEIRA, R.L.M. et al. Analysis of the thermal profiles and the charcoal gravimetric yield in three variations of rectangular brick kilns. In: ENCIT: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING, 13., 2010. Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: Anais do XIII ENCIT. v.1. p.1-10. 2010.

PLANETA ORGÂNICO. **Compostagem**: a arte de transformar o lixo em adubo orgânico. 2011. Disponível em: <http://www.planetaorganico.com.br/composto.htm>. Acesso em: 16 ago. 2011.

PEIXOTO, R.T.G. **Compostagem**: opção para manejo orgânico do solo. Londrina: IAPAR, 1988. 15p.

PEREIRA NETO, J.T. Conceitos modernos de compostagem. **Engenharia Sanitária**, Rio de Janeiro, v.28, n.3, p.104-109, 1989.

RIFFALDI, R. et al. Evaluation of compost maturity by means of chemical and microbial analyses. **Waste Management and Research**, London, v.4, n.1, p.387-396, 1986.

RODRIGUES, M.S. et al. Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos. In: SPADOTTO, C.; RIBEIRO, W. (eds.) **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. Botucatu: FEPAF, 2006. p.63-94.

SCHALCH, V. et al. **Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos**. São Carlos: USP, 2002. 97p.

SCHLOSS, P.D.; WALKER, L.P. Measurement of process performance and variability in inoculated composting reactors using ANOVA and power analysis. **Process Biochemistry**, London, v.35, n.9, p.931-942, 2000.

SILVA, J.G.; EIGENHEER, E.M.; ROGRIGUES, D.C. Produção e aproveitamento de composto orgânico a partir de resíduos de origem vegetal no campus da Universidade Federal Fluminense/Niterói-RJ. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 5., 2009. Niterói. **Anais...** Niterói. 2009. 11p.

SILVA, M.S. et al. Compostagem de resíduos sólidos de frigorífico, visando o saneamento ambiental e a produção de adubo orgânico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBCS. 1997, CD-ROM.

SILVA, T.O. et al. Adubação orgânica da batata com esterco e, ou, *Crotalaria juncea*: I – produtividade vegetal e estoque de nutrientes no solo em longo prazo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.1, p.39-49, 2007.

SUNDBERG, C.; SMÅRS, S.; JÖNSSON, H. Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. **Bioresource Technology**, Essex, v.95, p.145-150, 2004.

TIQUIA, S.M.; TAM, N.F.Y.; HODGKISS, I.J. *Salmonella* elimination during composting of spent pig litter. **Bioresource Technology**, Essex, v.63, p.193-196, 1998a.

TIQUIA, S.M.; TAM, N.F.Y.; HODGKISS, I.J. Changes in chemical properties during composting of spent pig litter at different moisture contents. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.67, p.79-89, 1998b.

TIQUIA, S.M.; TAM, N.F.Y. Co-composting of spent pig litter and sludge with forced-aeration. **Bioresource Technology**, Essex, v.72, n.1, p.1-7, 2000.

VANDERPLAATS, G.N. **Numerical Optimization Techniques for Engeneering Desing: With Applications**. USA: McGraw-Hill, 1999.

VAN OOSTRUM, A.J.; McPHAIL, N.G. **Composting abattoir/feedlot waste solids**. Australia: Meat & Livestock Australia, 1991. 56p.

VITORINO, K.M.N.; PEREIRA NETO, J.T. Estudo da compostabilidade dos resíduos da agricultura sucroalcooleira. In: CONFERÊNCIA SOBRE AGRICULTURA E MEIO AMBIENTE, 1994. Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV-NEPEMA, 1994. 12p.

ÇENGEL, Y.A.; CIMBALA, J.M. **Mecânica dos fluidos**: fundamentos e aplicações. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2007. 816p.

WEG. 2012. Disponível em: <http://www.weg.net>. Acesso em: 20 jan. 2012.

WEPPEN, P. Process calorimetry on composting of municipal organic wastes. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.21, n.4, p.289-299, 2001.

WHITE, F.M. **Mecânica dos fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2002. 570p.

ZHU, N. et al. Performance characteristics of three aeration systems in the swine manure composting. **Bioresource Technology**, Essex, v.95, n.3, p.319-326, 2004.