

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

MARCUS VINÍCIUS MONTEIRO TOLEDO TAVEIRA

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO USO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NA
COMPOSTAGEM POR AERAÇÃO FORÇADA**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2023

MARCUS VINÍCIUS MONTEIRO TOLEDO TAVEIRA

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO USO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NA
COMPOSTAGEM POR AERAÇÃO FORÇADA**

Relatório final, apresentado à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências para obtenção do
título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

Orientador: Alisson Carraro Borges

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2023

MARCUS VINÍCIUS MONTEIRO TOLEDO TAVEIRA

**AValiação da Viabilidade do uso de Energia Fotovoltaica na
Compostagem por Aeração Forçada**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

APROVADO: 06 de julho de 2023.

Assentimento:

Marcus Vinicius m. T. Taveira

Marcus Vinicius Monteiro Toledo Taveira
Autor



Alisson Carraro Borges
Orientador

Dedico esse trabalho a Deus, a minha esposa Taís Toledo que sempre esteve ao meu lado e a minha avó Sandra Monteiro (*in memoriam*) que sempre me incentivou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tornar esse sonho realidade.

A minha esposa Taís Toledo que sempre acreditou na minha capacidade, que me ajudou a ser uma pessoa mais forte dia após dia, meus sinceros agradecimentos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Alisson Borges por sempre estar disponível quando precisava e por trilhar meu caminho para esse feito se tornar realidade.

Aos profundos agradecimentos aos membros da banca, Profa. Dra. Fernanda Sousa e ao Dr. Lucas Lommez, pelas sugestões para enriquecimento desse trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola pelas condições oferecidas nesse trajeto.

À minha família, pelo incentivo e dedicação dia após dia.

Aos amigos que construí ao decorrer da graduação, agradeço a convivência, amizade, e aos conselhos dados no decorrer desse trabalho.

Agradeço aqueles que participaram desse trabalho diretamente e indiretamente.

*“A confiança em si mesmo é o primeiro
segredo do sucesso.”*

Ralph Waldo Emerson

RESUMO

A compostagem é um processo biológico que ocorre em condições controladas. Dentre os vários métodos de compostagem atualmente disponíveis, neste trabalho foram avaliados os métodos de reviramento de leiras e por aeração forçada, com a especificidade do possível uso da energia fotovoltaica para este último. Dimensionaram-se pátios de compostagem para ambos os métodos, tendo-se os cálculos empregados baseados na literatura, bem como informações importantes como a área demandada, energia necessária e avaliação de impactos ambientais. Por fim, foi feito um estudo de viabilidade econômica, no qual foram utilizados critérios como valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR), índice de lucratividade (IL) e o prazo de retorno do investimento ou *payback* (PB), para avaliar se a compostagem por aeração forçada utilizando energia fotovoltaica é vantajosa em relação a compostagem *windrow*. Foram obtidas uma menor área destinada ao método por aeração forçada, um menor impacto ambiental e um investimento econômico favorável na instalação de placas fotovoltaicas para suprir a demanda energética dos compressores radiais no método por aeração forçada. Diante disso, conclui-se que a utilização de placas fotovoltaicas no método por aeração forçada é uma estratégia promissora e ambientalmente amigável.

Palavras-chaves: Placas solares. Viabilidade econômica. Windrow.

ABSTRACT

Composting is a biological that occurs in controlled conditions. Among currently available techniques for composting, windrow and forced aeration methods were considered for this study as well as the possibility of using photovoltaic energy for the latter. Composting yards were designed for both methods, with calculations based on literature and important information such as required area, energy demand, and assessment of environmental impacts. Lastly, an economic feasibility study was conducted, utilizing criteria such as net present value (NPV), internal rate of return (IRR), profitability index (PI), and payback period (PB), to assess whether photovoltaic-powered forced aeration composting is better than windrow composting. There are obtained a smaller area dedicated to forced aeration method and a lower environmental impact. Additionally, there is a favorable economic investment in installing photovoltaic panels to meet the energy demand of radial compressors in the forced aeration method. Therefore, it can be concluded that the use of photovoltaic panels in the forced aeration method is a promising and environmental friendly strategy.

Keywords: Solar panels. Economic feasibility. Windrow.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1	COMPOSTAGEM: CONCEITOS	12
2.2	AERAÇÃO FORÇADA E A POSSIBILIDADE DE USO DE FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA.....	14
2.3	AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS	15
2.4	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	16
3	MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1	OBTENÇÃO DOS DADOS	18
3.2	MARCHAS DE CÁLCULO PARA PROJETO DAS LEIRAS.....	18
3.2.1	MÉTODO <i>WINDROW</i>	18
3.2.2	MÉTODO POR AERAÇÃO FORÇADA	21
3.3	COMPARAÇÃO E AVALIAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS UTILIZADOS.....	23
3.3.1	AVALIAÇÃO ENERGÉTICA.....	24
3.3.2	AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ECONÔMICA	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1	MEMORIAL DE CÁLCULOS	26
4.1.1	DIMENSIONAMENTO DAS LEIRAS PELO MÉTODO <i>WINDROW</i>	26
4.1.2	DIMENSIONAMENTO DAS LEIRAS PELO MÉTODO DE AERAÇÃO FORÇADA	30
4.2	AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS	35
4.2.1	LEIRAS DE COMPOSTAGEM	35
4.2.2	PLACAS SOLARES	37
4.3	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	38
4.3.1	MÉTODO <i>WINDROW</i>	38

4.3.2 MÉTODO DE AERAÇÃO FORÇADA.....	39
4.3.3 UTILIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	41
4.4 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE COMPOSTAGEM	43
4.4.1 ÁREA	43
4.4.2 GASTO ENERGÉTICO	43
4.4.3 EMISSÃO DE GASES POLUENTES.....	44
4.4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA	44
5 CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS.....	47
APÊNDICES	52
APÊNDICE A	52
APÊNDICE B	53

1 INTRODUÇÃO

O correto gerenciamento de resíduos sólidos orgânicos é um desafio que permanece atualmente, envolvendo o manejo eficiente e sustentável dos resíduos produzidos pelas populações nas áreas urbanas e rurais. Com o aumento da população e o crescimento das cidades, a geração de resíduos vem se tornando uma preocupação global na sociedade. Dentre as várias formas de se gerir e tratar o problema da disposição de resíduos orgânicos, uma, destacada por sua simplicidade e sustentabilidade, é a compostagem.

A compostagem é um processo controlado e biológico, no qual tem-se como objetivo se alcançar temperaturas termofílicas para a eliminação de patógenos e decomposição da matéria orgânica. Além disso, na compostagem, há uma etapa de maturação para estabilizar e transformar o produto resultante em um material humificado (AZEVEDO, 1993).

Vários são os métodos de compostagem, sendo o principal e mais usado, o de reviramento de leiras, conhecido na literatura como *windrow* (TEIXEIRA, 2014). Além do método *windrow*, existe também a compostagem doméstica (DA ROSA *et al.*, 2019), a vermicompostagem (SENA *et al.*, 2019), a compostagem em reator fechado (GOMES, 2021) e o método por aeração forçada (TEIXEIRA, 2014). A compostagem por aeração forçada é vista como uma das principais alternativas ao método tradicional de revolvimento das leiras (TEIXEIRA, 2014).

Segundo Matos (2014) e Leitão (2008), o tempo para a compostagem por aeração forçada é de 90 a 120 dias, onde 30 dias são referentes a fase termofílica (fase ativa) e 60 a 90 a fase para maturação. Já o tempo demandado no método *windrow* gira em torno de 120 a 150 dias, onde 60 a 90 dias são destinados a fase termofílica (fase ativa) e 30 a 60 dias são destinados a fase de maturação. Por sua vez, Tiquia *et al.* (1998) afirmam que ambos os métodos possuem uma eficiência similar, atingindo a maturidade final no mesmo tempo e que o material compostado apresenta características físicas, químicas e microbiológicas semelhantes. Contudo, de acordo com os mesmos autores (MATOS, 2014;TIQUIA *et al.*, 1998) o requerimento de energia para a realização de compostagem por aeração forçada é um ponto a ser considerado, assim como analogamente o custo de mão de obra no caso do método de revolvimento *windrow*.

Almeida et al. (2012) citam que o método de leiras estáticas aeradas (ou por aeração forçada) é considerado o mais indicado para o processamento em larga escala. Porém, os autores ressaltam que, para garantir a efetividade do processo e redução do consumo de energia, é crucial que o sistema de aeração seja apropriadamente dimensionado. O cálculo da potência elétrica demandada pelo ventilador em projetos de sistemas de compostagem em leiras por aeração forçada é realizado a partir do conhecimento do gradiente de pressão estática do ar observado para determinada vazão específica (SILVA, *et al.*, 2008).

Uma alternativa que vem ganhando atenção quando se considera a necessidade de uso eficiente de energia é o uso de fontes renováveis, como é o caso da energia solar (SILVA; ARAÚJO, 2022). Tal observação ganha mais importância quando considerados os processos de tecnologia ambiental, como é o caso da compostagem por aeração forçada.

A energia solar pode ser convertida em energia térmica ou elétrica. A primeira conversão é feita por meio de coletores ou concentradores. A segunda é feita por meio de painéis fotovoltaicos, que são feitos de materiais semicondutores (FEAM, 2014). A taxa de energia solar é denominada irradiância média em (W m^{-2}), sendo sua integral em função do tempo a energia ou irradiação (Wh m^{-2}) acumulada em um intervalo de tempo (ABES, 2017).

Como o custo para aquisição de equipamentos para a geração de energia é elevado, um estudo sobre a viabilidade técnica e econômica para o aproveitamento de energia solar fotovoltaica para o funcionamento dos ventiladores centrífugos operando em leiras estáticas aeradas pode ser considerado interessante e bem-vindo.

O presente trabalho se justifica à medida em que se constata a importância da investigação da provável vantagem na utilização da compostagem em aeração forçada com a utilização de placas fotovoltaicas em comparação a compostagem *windrow*, visando-se também estudar a viabilidade econômica em se adquirir os equipamentos necessários. Portanto, esse trabalho teve como objetivo a avaliação da viabilidade econômica e ambiental do uso de energia fotovoltaica no método de compostagem por aeração forçada, comparando-o com o método *windrow*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPOSTAGEM: CONCEITOS

No Brasil, de acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, aproximadamente metade dos resíduos sólidos urbanos (PLANARES) é composta por material orgânico. Essa fração orgânica possui um grande potencial de reaproveitamento, no qual pode ser explorado por meio de diversas abordagens, tendo como a compostagem uma delas (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2022). Pode-se enfatizar então, que estudos relacionados às vantagens na utilização para compostagem como meio de disposição de resíduos serão de grande importância nos próximos anos.

A compostagem é uma prática realizada há muitos anos, na qual se tem como objetivo a reciclagem de nutrientes utilizando-se resíduos orgânicos. É um processo aeróbio, no qual a decomposição do resíduo é dividida em duas fases distintas: Na primeira fase ocorre reações bioquímicas de oxidação, principalmente termofílicas e na segunda fase ocorre o processo de humificação do material, fase conhecida como “fase de maturação” (PEREIRA NETO; STENTIFORD; MARA, 1986).

Antes da fase de maturação, existem três etapas distintas de temperatura, uma etapa mesofílica, seguida de uma etapa termofílica e, por fim, o retorno a temperaturas mesofílicas antes da fase de humificação. Na etapa mesofílica basicamente ocorre a liberação de calor por meio do vapor de água e CO₂ devido ao aumento na quantidade de microrganismos mesofílicos, como bactérias e fungos. Na fase termofílica existe um aumento da temperatura devido ao processo de biodegradação da matéria, levando à diminuição dos microrganismos mesofílicos e crescimentos dos microrganismos termofílicos. Essa etapa é a responsável pela eliminação dos patógenos presentes no meio, a faixa de temperatura nessa fase varia entre 50 e 65 °C, e há decomposição intensa do material pelos organismos termofílicos. Por fim, ocorre novamente a etapa mesofílica, onde as substâncias mais resistentes começam a ser decompostas e a atividade de biodegradação diminui, resultando na diminuição da temperatura e dos microrganismos termofílicos (INACIO; MILLER, 2009).

O estágio final do processo de compostagem é denominado fase de maturação ou humificação. Nesta fase, maior parte do substrato já foi degradado e como existe baixa atividade metabólica dos microrganismos, não existe auto aquecimento

(INACIO; MILLER, 2009). Quando o processo de compostagem se encontra na fase de maturação, o composto já pode ser utilizado em campo como fertilizante agrícola (COELHO, 2007).

De acordo com Matos (2014), dos diversos fatores que influenciam a compostagem, destacam-se a temperatura, a relação C/N, o conteúdo de água, o pH e a disponibilidade de oxigênio. Como citado anteriormente, a temperatura irá variar de acordo com as fases/etapas da compostagem. No que se refere ao conteúdo de água, os valores ideais se encontram 50 e 60 dag kg⁻¹, sendo que, conteúdos abaixo de 35 dag kg⁻¹, prejudicam expressivamente a atividade microbiana retardando o processo de compostagem. A proporção de carbono e nitrogênio (C/N) na composição do substrato influencia diretamente o processo de compostagem, tendo-se como o ideal que essa proporção varie entre 25 e 30/1 (AZEVEDO, 1993). De acordo com Inácio (2009), nos substratos que contém uma relação C/N maior que a indicada, a população microbiana não terá um crescimento ideal, portanto a velocidade de decomposição será baixa. Já em casos que os substratos que contém uma relação C/N abaixo que a indicada, o composto será facilmente decomposto, porém o nitrogênio será perdido na atmosfera em forma de amônia.

O método mais tradicional e por excelência o mais próximo aos processos de decomposição da matéria orgânica que ocorre na natureza, é o método de revolvimento de leiras, também conhecido por *windrow*, que em inglês significa “amontoado de qualquer coisa” ou “leira”. Este método consiste na disposição do material composto em leiras no qual sua aeração é feita a partir de reviramentos periódicos do material em compostagem (TEIXEIRA, 2014).

Apesar das inerentes vantagens, como a simplicidade, o baixo valor de investimento inicial, menor grau de exigência de acompanhamento técnico especializado e possuir flexibilidade em processar grandes volumes de resíduos (INACIO; MILLER, 2009).

Segundo Paiva (2011), a compostagem *windrow*, possui algumas limitações, como elevada mão de obra demandada para o reviramento das leiras e uma área relativamente extensa para disposição dessas leiras.

2.2 AERAÇÃO FORÇADA E A POSSIBILIDADE DE USO DE FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA

O processo de compostagem necessita de oxigênio para que o processo de degradação bioquímica do material orgânico aconteça, uma vez que a concentração de oxigênio influencia diretamente na atividade microbológica e na taxa de degradação do composto. Nos sistemas de leiras estáticas por aeração forçada, a aeração acontece por meio de insuflação ou sucção de ar no substrato a ser compostado, onde por sua vez essa insuflação e/ou sucção acontece por meios de dutos perfurados instalados ao longo das leiras, não havendo revolvimento manual ou mecanizado (PAIVA, 2011).

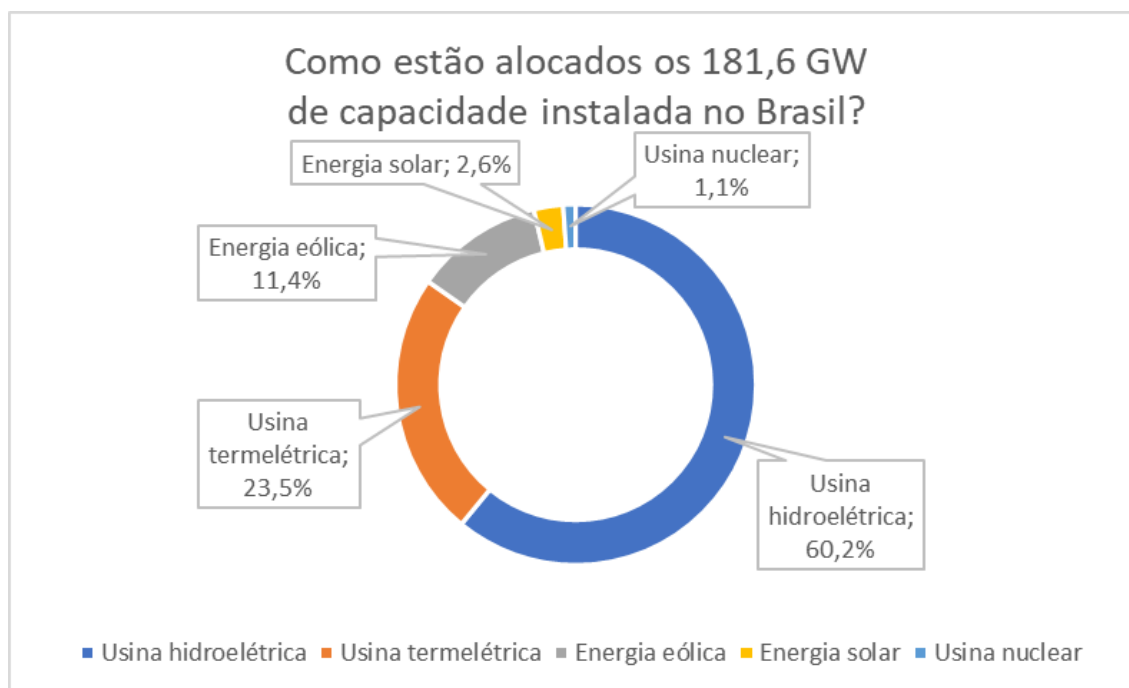
Para garantir que a compostagem em leiras estáticas aeradas seja bem-sucedida, é importante que o dimensionamento dos ventiladores seja eficaz para atender a demanda bioquímica do material em compostagem e controlar a temperatura dentro da faixa termofílica, onde a vazão e a pressão estática do ar fornecido pelo ventilador são importantes a serem considerados ao selecioná-lo. A pressão estática, força exercida pelo escoamento do ar no sistema, precisa ser forte o bastante para superar a resistência encontrada ao passar pela camada de material em compostagem e ao atrito com as paredes dos dutos e peças especiais do sistema de aeração (TEIXEIRA, 2014).

A compostagem por aeração forçada requer compressores para fornecer o escoamento de ar no sistema, necessitando assim de energia elétrica para o seu funcionamento. A energia solar vem como uma opção interessante para fornecimento dessa energia elétrica no sistema de aeração forçada.

A energia solar representa uma relevante opção de energia em substituição aos combustíveis fósseis e é a forma mais abundante de energia disponível em nosso planeta (DESIDERI *et al.*, 2013). Por meio do efeito fotovoltaico, as células solares transformam a energia solar em eletricidade de maneira estática, sem ruídos, sem causar poluição e de forma sustentável. (RÜTHER, 2004).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 60,2% da energia elétrica brasileira provém das usinas hidrelétricas e apenas 2,6% provem de energia solar (EPE, 2022) (Figura 1). Entretanto de acordo com o mesmo estudo (EPE, 2022), o maior destaque de crescimento está na instalação de plantas para geração de energia solar.

Figura 1 – Fontes de energia demandada no Brasil



Fonte: Adaptada de EPE (2022).

Devido à atual escassez hídrica, se faz necessário buscar outras fontes de energias, também renováveis. O conceito de energia renovável está associado às fontes que são naturalmente reabastecidas, como a energia proveniente do sol, dos rios, da chuva, do vento e das marés (DJØRUP; THELLUFSEN; SORKNÆS, 2018) Sendo assim, a energia fotovoltaica também é uma opção interessante para suprir o crescimento por demanda de eletricidade.

A vasta extensão geográfica, permite ao Brasil ter um enorme potencial de produção de eletricidade a partir da energia solar, em particular, devido às altas e constantes taxas de irradiação ao longo de todo o ano (DIAS *et al.*, 2017).

2.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

Segundo Cardoso (1992), durante o processo de compostagem, a matéria orgânica se decompõe, onde no processo de respiração microbiana aeróbia, consome O_2 e libera CO_2 . Apesar de ser considerado um processo aeróbio, se todo o O_2 for consumido na compostagem, pode haver atividade microbiana anaeróbia, produzindo-se o gás metano (CH_4). O CH_4 , na presença de O_2 , pode ser oxidado por

microrganismos termofílicos metanotróficos ((JÄCKEL; THUMMES; KÄMPFER, 2005)

Os valores de concentração de metano no processo de compostagem podem variar de acordo com a porosidade, estrutura (BECK-FRIIS *et al.*, 2000), dimensões das leiras (JÄCKEL; THUMMES; KÄMPFER, 2005), tipo de resíduo orgânico, umidade e relação C/N (AMLINGER; PEYR; CUHLS, 2008), aeração insuficiente (VANDERGHEYNST *et al.*, 1998) e temperatura (JÄCKEL; THUMMES; KÄMPFER, 2005).

De acordo com Peng (2013), uma das vantagens da utilização de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica durante sua operação é a não emissão de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera. Contudo, durante a produção e instalação desses sistemas, ocorre um expressivo consumo de materiais e energia, resultando em impactos ambientais nos processos de extração, fabricação e montagem dos módulos de energia solar fotovoltaica. Segundo Solar (2022), cada placa possui uma vida útil estimada de 20 a 25 anos e contém diversos materiais nocivos em sua composição. Alguns exemplos desses materiais são o silício amorfo (a-Si), o telureto de cádmio (CdTe) e o cobre (Cu), que no final do seu ciclo de vida, podem contribuir para prejudicar o ambiente. Ademais sua produção ainda tem um custo considerado elevado.

A análise de ciclo de vida (ACV) é a abordagem atualmente utilizada para se medir e avaliar de forma abrangente os impactos ambientais e energéticos relacionados à produção de um bem ou serviço. Ela permite a quantificação dos gastos de energia ao longo de todo o ciclo de vida desse produto, desde a obtenção e processamento da matéria-prima até sua disposição final (berço até o túmulo) (ABNT, 2009). Segundo Mendes (2013) e Monaro (2014), essa ferramenta é caracterizada como um recurso de análise para avaliação de impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida de um produto.

2.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

É um verdadeiro desafio fazer uma análise de viabilidade econômica de um projeto, porém existem ferramentas que facilitam nessa análise. Em projetos de

grande escala dois métodos para análise de projetos de investimento são utilizados, o método do valor presente líquido (VPL) e o método da taxa interna de retorno (TIR).

O VPL e a TIR são considerados e denominados em grande parte da literatura financeira como os métodos mais tradicionais e eficientes na avaliação de projetos de investimentos. Além destes dois métodos, o critério de período de *payback* (PB) é frequentemente utilizado. Um estudo realizado por Eld (1996) sobre técnicas de análise de investimentos utilizadas pelas empresas no Brasil mostrou que 52% delas usam a taxa interna de retorno (TIR) em algum momento, enquanto 51% dessas empresas utilizam o *payback* (PB), enquanto 41% delas utilizam o valor presente líquido (VPL).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 OBTENÇÃO DOS DADOS

Para a realização desse estudo, uma unidade fictícia, gerando resíduos de comercialização de hortifruti granjeiros foi idealizada.

Como tais unidades produzem muitos resíduos, a previsão dos dados “normalizados” pela população não é afetada por problemas de escala. Estes entrepostos, conhecidos como a Companhia de Entrepostos e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP), Centrais Estaduais de Abastecimento (CEASA), entre outros, estão entre as unidades que realmente fazem compostagem em escala plena no Brasil.

Os dados de caracterização física e química dos resíduos foram obtidos por levantamento bibliográfico, adotando-se valores de literatura para parâmetros como relação entre a quantidade de carbono e nitrogênio presente no composto (C/N), massa específica, conteúdo de água inicial, altura da leira, entre outros.

3.2 MARCHAS DE CÁLCULO PARA PROJETO DAS LEIRAS

Como não há uma normativa (NBR) para projeto de dimensionamento das leiras de compostagem, foram utilizadas formulações e recomendações contidas em Matos (2014).

3.2.1 MÉTODO *WINDROW*

Primeiro se fez necessário encontrar o cálculo da quantidade de massa úmida em cada leira, utilizando a Equação 1.

$$u (\%bu) = \left(\frac{m_a}{m_t} \right) * 100 \quad (1)$$

Em que:

$u (\%bu)$ = umidade em base úmida (%);

m_a = massa de água (t);

m_t = massa total (t).

Utilizando a Equação 2, é possível encontrar a massa seca de cada leira de compostagem.

$$m_s = m_t - m_a \quad (2)$$

Em que:

m_t = massa total (t);

m_a = massa de água (t);

m_s = massa seca (t).

Para o cálculo do volume de cada leira é necessário para encontrar o comprimento das leiras e posteriormente a área utilizada. Utilizando-se a Equação 3, é possível encontrar essa variável.

$$V = \frac{m_t}{m_{esp}} \quad (3)$$

Em que:

V = volume (m^3);

m_t = massa total (kg);

m_{esp} = massa específica ($kg\ m^{-3}$).

Dentre os tipos de formatos de leiras de compostagem, foi considerado nesse trabalho as leiras no formato triangular, portanto utilizando a Equação 4 calculou-se a área da seção triangular dessas leiras.

$$A_t = \frac{b \times h}{2} \quad (4)$$

Em que:

A_t = área da seção triangular (m^2)

b = largura da leira (m);

h = altura da leira (m).

Para o cálculo do comprimento de cada leira, utilizou-se a Equação 5.

$$c = \frac{V}{A_t} \quad (5)$$

Em que:

c = comprimento da leira (m);

V = volume da leira (m^3);

A_t = área da seção triangular (m^2).

Para encontrar a área necessária para cada leira, utiliza-se a Equação 6.

$$A_b = b * c \quad (6)$$

Em que:

A_b = área da base (m^2);

b = largura da leira (m);

c = comprimento da leira (m).

Para dimensionamento do comprimento do pátio, se fez necessário a utilização de uma folga de 15% para manobras e passagem de funcionários ao redor das leiras, sendo assim, utilizou-se a Equação 7.

$$c_p = c * 1,15 \quad (7)$$

Em que:

c_p = comprimento do pátio (m);

c = comprimento da leira (m).

Para o cálculo da quantidade de leiras necessárias no pátio de compostagem, é necessário estabelecer o tempo de permanência das leiras de compostagem, que

no caso do método *windrow* foi de 120 dias e por aeração forçada foi de 90 dias, e dividir pela frequência de recebimento do resíduo, Equação 8.

$$Q_t = \frac{t}{f} \quad (8)$$

Em que:

Q_t = Quantidade de leiras (un);

t = tempo de permanência (dias);

f = frequência de recebimento do resíduo (dias).

3.2.2 MÉTODO POR AERAÇÃO FORÇADA

Para o cálculo da potência ser mais preciso, a potência demandada pelo ventilador foi calculada considerando-se apenas a potência demandada para vencer a queda na pressão estática do ar imposta por uma camada de material de 1 m de altura, considerando-se uma taxa de aeração de $1200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ t}^{-1}$ (ANDREOLI; SPERLING; FERNANDES, 2014) e considerando-se o rendimento do ventilador de 60%. Assim, a vazão de ar foi calculada conforme a Equação 9.

$$Q_t = Q_a * ms \quad (9)$$

Em que:

Q = vazão de ar ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$);

Q_a = vazão específica de ar ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ t}^{-1}$);

ms = massa seca (t).

Na falta de uma equação específica, para o cálculo de pressão estática foi utilizada a Equação 10 obtida para mistura de bagaço de cana-de-açúcar com cama de frango.

$$\Delta P = 6843,566 * \left(\frac{\dot{Q}}{A_b}\right)^{1,179} \quad (10)$$

Em que:

ΔP = gradiente de pressão estática (Pa m⁻¹);

Q = vazão de ar (m³ s⁻¹);

A_b = área da base (m²).

Para cálculo da potência necessária, se fez necessário o cálculo da perda de pressão devido à resistência do material, no qual essa variável pode ser obtida a partir da Equação 11.

$$P = \Delta P * H \quad (11)$$

Em que:

P = perda de pressão devido à resistência do material (Pa);

ΔP = gradiente de pressão estática (Pa m⁻¹);

H = altura do material (m).

Utilizando a Equação 12, foi possível encontrar a potência elétrica absorvida pelo ventilador.

$$Pot = \frac{P * Q}{\eta} \quad (12)$$

Em que:

Pot = Potência elétrica absorvida pelo ventilador (W);

P = Pressão total fornecida pelo ventilador (Pa);

Q = vazão de ar (m³ s⁻¹);

η = rendimento do ventilador (adimensional).

Por fim, foi utilizada a Equação 13 para calcular o consumo de energia total dos motores elétricos.

$$C \left(\frac{KWh}{h} \right) = \frac{P (cv) * 0,736}{\eta} * 100\% \quad (13)$$

Em que:

C = Consumo de energia (kWh h^{-1});

Pot = Potência elétrica absorvida pelo ventilador (cv);

η = rendimento do ventilador (adimensional).

De acordo com Almeida et al. (2012) e Matos et al. (2012) a resistência oferecida à passagem do ar através da camada de material orgânico é totalmente associada à quantidade de poros entre as partículas, assim como da conectividade entre eles, onde ela é alterada ao longo do processo de compostagem. Esses fatores influenciam diretamente na demanda de potência requerida pelo ventilador, portanto foi necessário o emprego de um fator de segurança para o cálculo de potência necessária, no caso desse projeto, utilizou-se o fator de segurança igual a 2.

Para um cálculo do fator de segurança mais assertivo se faz necessário um estudo relacionando a variação da porosidade em relação ao tempo dos principais compostos, tendo-se assim um melhor gradiente de pressão e um fator de segurança mais condizente.

O funcionamento dos ventiladores foi programado para seguir as recomendações de Matos et al. (2012) onde cada ventilador deverá ser acionado de acordo com as faixas ideais de temperatura no termostato digital, onde esse termostato será configurado para que a temperatura da massa no centro da leira fique entre 55 e 65°C.

3.3 COMPARAÇÃO E AVALIAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS UTILIZADOS

Após o dimensionamento dos pátios de acordo com métodos supracitados foram comparados os dados de áreas utilizadas, energia demandada, custo operacional por tonelada em base úmida de leira, custo total por tonelada em base úmida de leira, avaliação de impactos ambientais e por fim foi feita uma análise de viabilidade econômica em se adquirir os equipamentos, utilizando indicadores como a taxa interna de retorno (TIR), o valor presente líquido (VPL), índice de lucratividade (IL) e o *payback*.

3.3.1 AVALIAÇÃO ENERGÉTICA

De acordo com metodologia proposta por Matos (2014) no método *windrow* tradicional o reviramento das leiras foi feito a cada três dias nos primeiros 30 dias, devido a temperatura do material aumentar expressivamente e, sua demanda por oxigênio é muito grande. A partir de 30 até 60 dias, devido a menor intensidade das reações, o reviramento pode ser feito a cada cinco dias.

Foi levado em consideração o gasto energético (kcal min^{-1}) de trabalhadores em áreas relacionadas, quanto à estudos no Brasil. Para comparação, foi considerado o valor de $5,2 \text{ kcal min}^{-1}$ para o gasto energético por trabalhador, de acordo com Duarte et al. (1998). O gasto energético final foi convertido para kW e comparado ao método de aeração forçada por kW t^{-1} .

De acordo com Azevedo (1993), o rendimento operacional para criação de uma leira é de 20 min t^{-1} com 3 homens, considerando que reviramento das leiras é a criação de uma nova leira, pode-se dizer que o rendimento para revirar essas leiras são de aproximadamente 20 min t^{-1} com 3 homens

A avaliação energética das leiras forçadas foi baseada no consumo de energia demandada de acordo com o dimensionamento dos compressores radiais necessário para aeração das leiras.

3.3.2 AVALIAÇÃO AMBIENTAL E ECONÔMICA

A avaliação de impactos ambientais dos métodos, foi realizada de maneira simplificada, por meio da estimativa de emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o gás carbônico (CO_2) e o metano (CH_4), emitidos para cada tonelada de composto orgânico.

Para análise de viabilidade econômica foram avaliados os custos para aquisição dos equipamentos necessários para o processo de compostagem com aeração forçada e os equipamentos necessário para aproveitamento da energia solar. No caso do processo *windrow*, os equipamentos, limitados às ferramentas manuais como pás, carrinhos de mão e caçambas foram desconsiderados, pois (a) seu valor é diminuto em relação aos investimentos com o método por aeração forçada e (b), pelo fato de serem instrumentos necessários em qualquer pátio de compostagem. Assim, foram avaliados os seguintes equipamentos:

- Ventilador axial;
- Tubulação;
- Placas fotovoltaicas;
- Inversor solar;
- Cabos elétricos;
- Estrutura de Aço Carbono.

Para a avaliação econômica foram utilizados os valores de VPL, TIR e PB. Se fez necessário a utilização da Equação 14 para encontrar o VPL do investimento.

$$V_{pl} = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{FC_t}{(1+i)^n} \quad (14)$$

Em que:

VPL = Valor presente líquido;

Fc = fluxo de caixa

t = momento em que o fluxo de caixa ocorreu

i = taxa de desconto (ou taxa mínima de atratividade)

n = período

A TIR foi calculada com base na projeção do fluxo de caixa do investimento, considerando o seu valor presente bruto igual a 0, podendo indicar se o investimento é um projeto viável ou não.

O *payback* indica qual o tempo de retorno do investimento gasto em se adquirir o conjunto de equipamentos para a energia solar, e seu cálculo foi feito com uma projeção de fluxo de caixa comparando-se o gasto do investimento dos equipamentos de energia fotovoltaica com a energia elétrica gasta se o proprietário não tivesse adquirido esses equipamentos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MEMORIAL DE CÁLCULOS

Primeiro se fez necessário dimensionar o projeto das leiras pelo método *windrow* e depois comparar os resultados com o método por aeração forçada.

Sendo assim, apresentam-se a seguir as marchas de cálculo:

4.1.1 DIMENSIONAMENTO DAS LEIRAS PELO MÉTODO *WINDROW*

De acordo com Índice de Desperdício de Alimentos 2021, do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), considera-se em nível global *per capita*, 121 kg de alimentos são desperdiçados anualmente por cada habitante (QUESTED; FORBES, 2021), em outras palavras, 2,33 kg por semana.

Foi considerado para o dimensionamento um valor de 151,7 toneladas semanais, típico de um entreposto de uma cidade de cerca de 65107 habitantes.

Segundo Azevedo (1993) e Pereira Neto (2004), o conteúdo ideal de água para o processo de compostagem varia entre 50 a 60 dag kg⁻¹. Considerando que o conteúdo de água no material constituinte das leiras seja de 60 dag kg⁻¹ ou 60%, utilizando a Equação 1, foi encontrado uma massa de água de 91,0 toneladas por semana.

Foi possível mensurar, utilizando a Equação 2, a quantidade de massa seca em tonelada por semana do material compostado, encontrado assim um valor de 60,7 toneladas por semana de massa seca.

A faixa da massa específica dos resíduos alimentares está na faixa de 131,0 kg m⁻³ a 481,0 kg m⁻³. Vamos fixar para base de cálculos o valor de massa específica de 446 kg m⁻³ (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993). Substituindo então esses valores na equação 3, foi possível encontrar o volume de cada leira como 340,1 m³.

De acordo com Matos (2014), no processo de compostagem por reviramento, as leiras devem possuir de 1,0 a 4,0 m de base e de 1,0 a 1,8m de altura. Utilizando a equação 4 e 5 para encontrar a área da seção triangular e o comprimento de cada leira, considerando uma altura de 1,8m e 4,0 de base, viável para que um operador

faça o reviramento, foi possível encontrar a área de 3,6 m² de área de seção triangular e 94,5 m de comprimento de leira.

Para calcular a quantidade de leiras a ser utilizada, foi encontrado a área da base de cada leira e comprimento do pátio utilizando a equação 6 e 7 para esses fins, no qual encontramos o valor de 378 m² da área da base da leira e 108,7 m como comprimento do pátio.

Por fim, utilizando a Equação 8 para encontrar a quantidade de leiras necessárias, encontramos uma área total equivalente a 18 leiras (17 leiras em operação e uma área “extra” para efetuar o reviramento), que devem ser disponibilizadas para alocação da compostagem pelo método *windrow*, sendo que uma dessas leiras não terá composto orgânico, ficando disponível para auxiliar o revolvimento dessas leiras pelo operador.

O método tradicional de cálculo utilizado por Matos (2014), multiplica-se a área da base total multiplicado por 2, porém nesse processo não há necessidade de uma folga nessa proporção para o reviramento das leiras, ficando então uma área “extra” para executar o reviramento.

Para fins de comparação, foi relacionado o gasto energético entre os dois métodos, no método *windrow* com reviramento manual, tal gasto consiste no gasto energético do operador, onde, cada leira deverá ser revirada a cada 3,5 dias nos seus primeiros 30 dias, e a cada 7 dias dos 30 a 60 dias da fase termofílica lembrando que o composto só é revirado na fase termofílica (fase ativa).

Convertendo o rendimento operacional citado por Azevedo (1993) para um rendimento semanal por operador, considerando que a carga de trabalho de cada operador é de 8 horas diárias em 5 dias na semana, foi possível encontrar que cada operador conseguirá revirar 40 toneladas por semana.

Para encontrarmos a quantidade necessária de operador para reviramento dessas leiras, foi criado o cronograma encontrado no apêndice A, no qual foi possível perceber que a partir da semana 9, a quantidade de operadores necessários para execução do reviramento dessas leiras será de 46 operadores no pátio de compostagem.

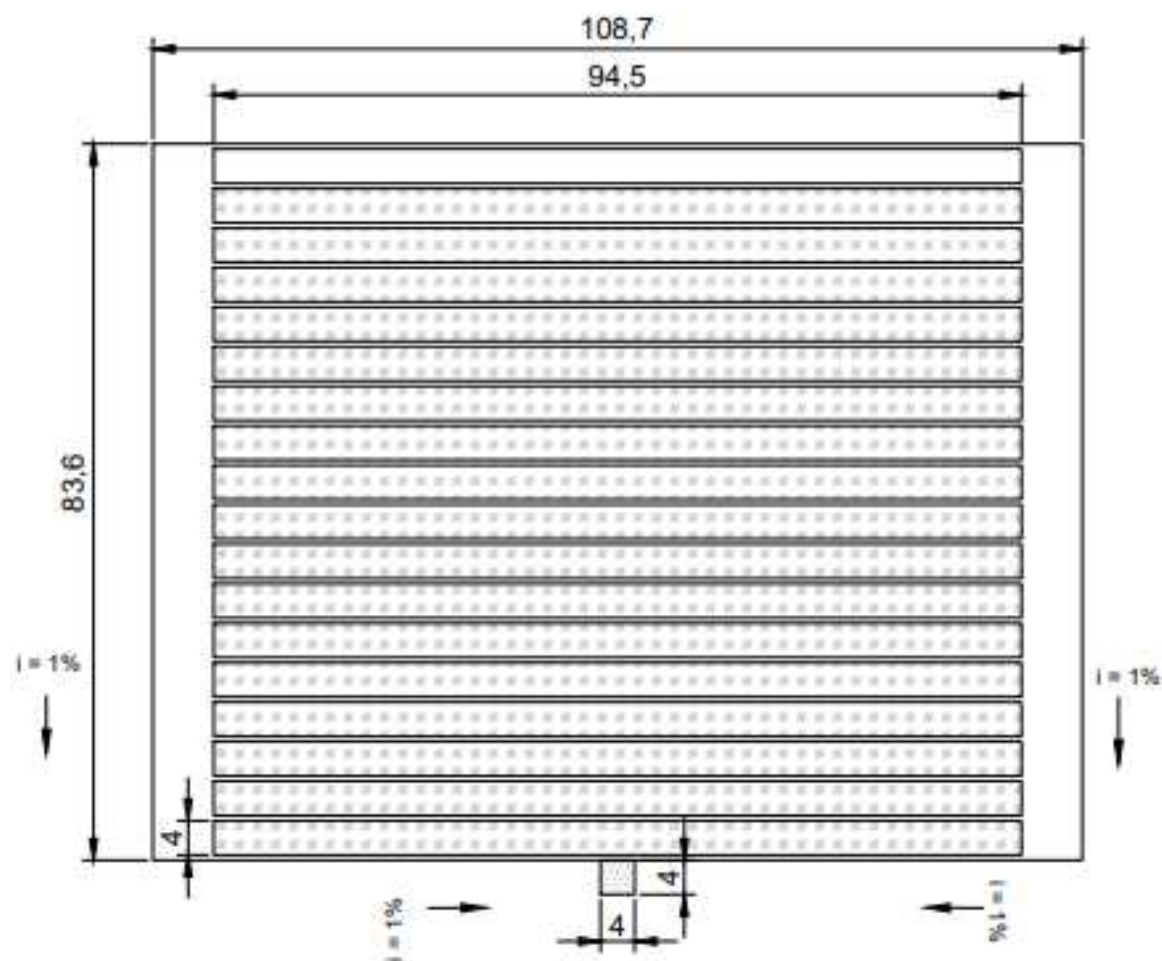
Como 1 kcal h⁻¹ equivale a 1,163W, considerando um gasto energético do operador de 5,2 kcal min⁻¹, (ANJOS; FERREIRA, 2000) chega-se a 362,9W ou 0,362

kW, em uma carga horária de 40 horas semanais, podemos afirmar que o gasto energético de cada operador será de 14,5 kW por semana.

Portanto cada operador terá um gasto energético de 14,5 kW semana⁻¹, porém como haverão 46 operadores na área de compostagem, vamos ter um gasto energético total de 667 kW por semana, considerando 4 semanas por mês haverá um gasto energético de 2.668 kW por mês.

O projeto do pátio de compostagem terá uma inclinação de 1%, de modo que toda a água pluvial escoe do pátio de compostagem, sendo coletadas por canaletas e conduzidas até o reservatório. A água coletada e armazenada nesse tanque será para umedecer das leiras de compostagem sempre que for necessário. Assim, foi dimensionado um reservatório de 4 m x 4 m com altura de 1 m, todo construído em alvenaria (melhor custo-benefício).

O projeto foi feito pelo autor, utilizando o software em versão gratuita. Na Figura 2 visualiza-se a imagem referente ao desenho do projeto.

Figura 2 – Projeto de compostagem pelo método *windrow*

Legenda:

- Leiras de Compostagem
- Área de Reviramento
- Reservatório

Projeto - Composteira	
Demanda	151,7 t/semana
Massa específica seca	60 dag/kg
Massa seca total	60,7 t/semana
Altura da leira	1,8 m
Base da leira	4 m
Comprimento da leira	94,5 m
Volume da leira	340,1 m ³
Folga	15%
Permanência	120 dias
nº de leiras	17
nº de leiras para reviramento	1
Comprimento do pátio	108,7 m
Largura do pátio	83,6 m
Área do reservatório	4 m x 4 m
Altura do reservatório	1 m

Fonte: Autor.

4.1.2 DIMENSIONAMENTO DAS LEIRAS PELO MÉTODO DE AERAÇÃO FORÇADA

Para comparação das áreas utilizadas entre os dois métodos, também se efetuou o dimensionamento das leiras necessárias pelo método por aeração forçada. O processo das leiras estáticas aeradas, diferente do método *windrow* necessita de um tempo de permanência mínimo de aproximadamente de 90 dias, utilizando a equação 8, foi possível encontrar um total de 13 leiras necessárias para o método por aeração forçada.

Ressalta-se aqui que como é um processo estático não há necessidade de uma leira a mais para reviramento.

- Potência demandada

Para o dimensionando o motor trifásico dos compressores radiais que será necessário para o método por aeração forçada, faz-se necessário encontrar a vazão de ar e o fluxo de vazão a ser aplicado em cada leira, utilizando a vazão específica de $1200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ t}^{-1}$, valor máximo entre a faixa recomendada por Matos (2014) de 70 a $1200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ t}^{-1}$. Foi possível encontrar a vazão de ar igual a $20,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e o gradiente de pressão estática igual a $214,4 \text{ Pa m}^{-1}$, utilizando a equação 9 e a 10 respectivamente.

Como a faixa proposta por Matos (2014) é uma faixa de vazão específica ampla, é interessante para futuros trabalhos um estudo mais preciso para encontrar a faixa de vazão específica para resíduos alimentares.

A perda de pressão devido à resistência do material, fator primordial para o cálculo da potência do motor, foi encontrado utilizando a Equação 11, o valor de $385,9 \text{ Pa}$, no qual foi considerada a altura da leira como 1,8 metros, igualmente calculada no método *windrow*, e o gradiente de pressão estática igual a $214,4 \text{ Pa m}^{-1}$.

Por fim, utilizando a Equação 12 encontra-se a potência elétrica absorvida pelo compressor radial de $12992,0 \text{ W}$ ou $17,7 \text{ cv}$ demandada em cada leira de compostagem. Utilizando um fator de segurança igual a 2, encontramos uma potência elétrica igual a $35,4 \text{ cv}$ para cada leira de compostagem.

Como não são encontrados comercialmente compressores radiais com 35,4cv, vamos fazer os cálculos considerando 3 compressores radiais de 15cv, onde esses compressores foram instalados de forma fracionada nas leiras.

- *Dimensionamento das placas solares*

Convertendo para o cálculo do consumo de energia elétrica, levando em consideração que o rendimento do motor é 60%, podemos encontrar o consumo de energia elétrica utilizando a Equação 13, encontrando um valor de 55,2 KWh h⁻¹.

O funcionamento dos compressores radiais seguiu as orientações de Paiva (2011), onde a cada vez que a temperatura no centro da pilha atingir 65°C, um termostato digital acionou o motor do compressor, e o conjunto de compressores foi desligado quando a temperatura da massa atingir 55°C. Utilizando o ciclo de aeração de acordo com Figueira Junior (2012), em que o tempo de aeração para que a leira atinja temperatura mínima é de 10 minutos para cada ciclo com um tempo de parada de 30 minutos, podemos encontrar que o compressor será acionado 36 vezes ao dia, equivalendo então a 6 horas por dia. Ressalta-se que a aeração será necessária somente no período de fase termofílica (fase ativa), ou seja, nos seus primeiros 30 dias que a leira será aerada, após esse dia, a compostagem entra na fase de maturação.

Como o consumo de energia elétrica dos compressores será de 55,2 kWh h⁻¹, pode-se considerar que o consumo diário de energia elétrica de cada leira, sendo acionado 6 horas diárias, é de 331,2 kW d⁻¹ ou aproximadamente 9936 kW mês⁻¹ para cada leira.

De acordo com o apêndice B, foi feito um cronograma de gasto de energia elétrica no decorrer das semanas, pensando que a fase ativa que ocorre aeração das leiras, em outras palavras, seria a fase que teria um gasto de energia elétrica. Mediante a esse resultado é possível mensurar a quantidade de placas solares necessárias para instalação no pátio de compostagem. Mediante a esse cronograma, foi possível analisar que a partir da semana 04, o gasto energético estabiliza no gasto de 9273,6 kW semanais, ou 39744kW mensais.

Serão utilizadas placas solares fornecidas por empresas da área, para base de cálculos, utilizou-se, o painel solar fotovoltaico 460W - Sunova SS-460-60-MDH, que

possui uma potência de 460W, gera aproximadamente 2.200 Wh/d, com dimensões de 1903 x 1134 x 30mm.

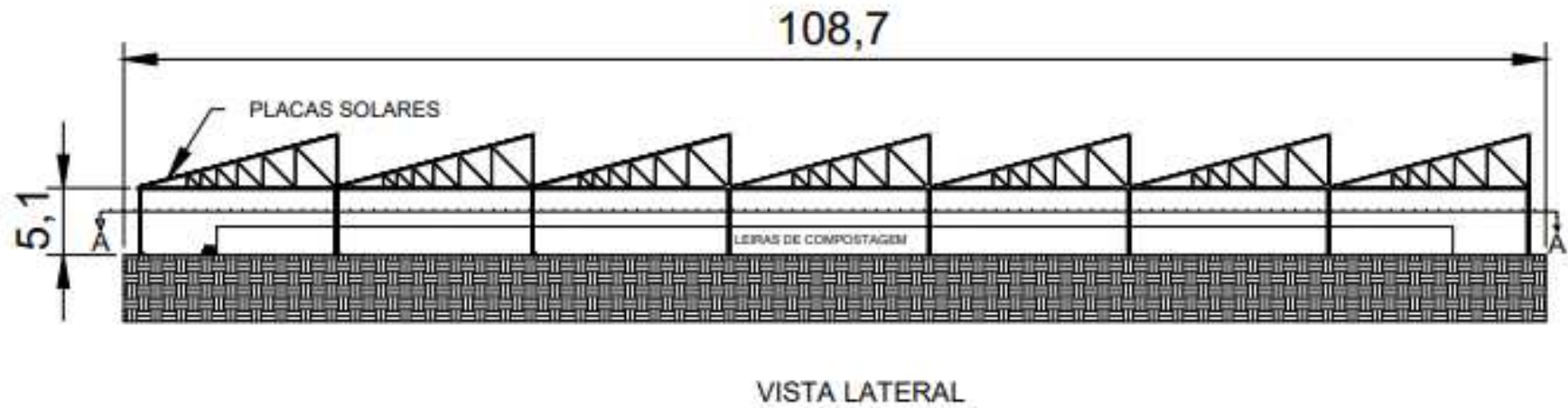
Como a demanda energética será de 39744 kW no mês, cada placa gera 2,2 kWh por dia, portanto, foram necessárias 602 placas fotovoltaicas para esse projeto de compostagem por aeração forçada utilizando energia solar.

Vale ressaltar que, se existente, a energia excedente proveniente das placas solares pode ser injetada na rede de distribuição de energia da concessionária local, gerando créditos ao produtor e contribuindo para geração distribuída.

Para aproveitamento de espaço essas placas poderão ser instaladas em cima da estrutura metálica que cobrirá as leiras de compostagem.

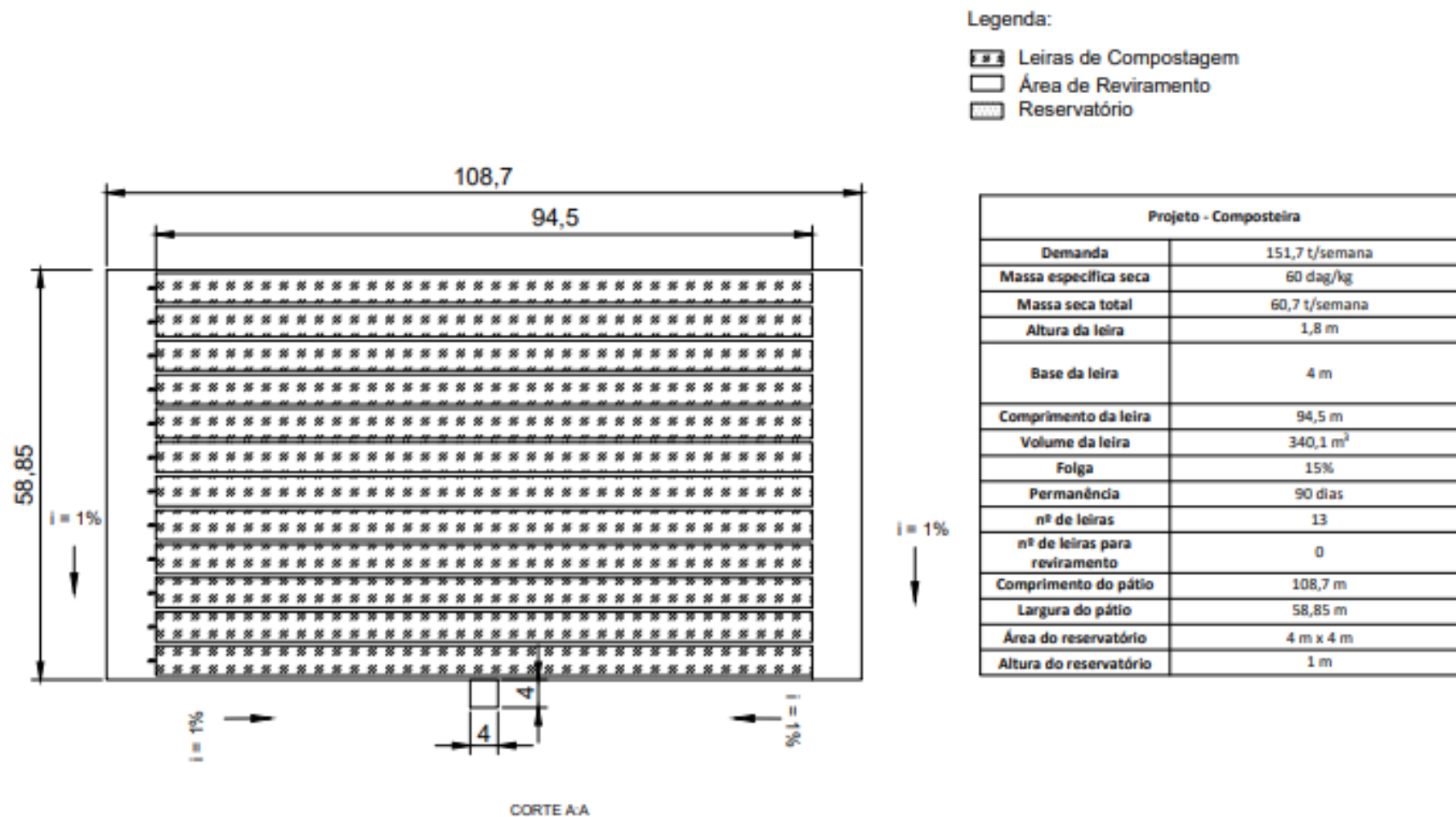
São apresentadas Figuras 3 e 4, o projeto conforme o dimensionamento realizado.

Figura 3 – Projeto de compostagem pelo método de aeração forçada



Fonte: Autor.

Figura 4 – Projeto de compostagem pelo método de aeração forçada



Fonte: Autor.

O projeto do telhado da estrutura metálica (Figura 3) para leiras de compostagem por aeração forçada foi em um tipo de *shed* para melhor ventilação natural no local e maior quantidade de luz no interior do galpão.

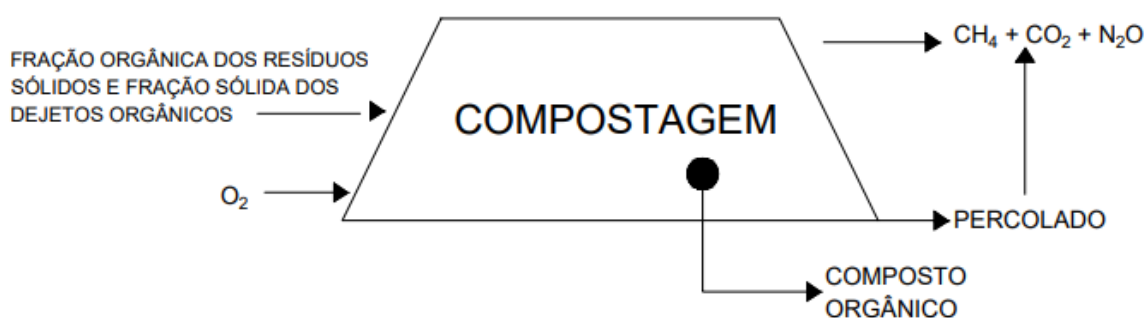
4.2 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

O estudo de avaliação de impactos ambientais neste trabalho constituiu-se em duas frentes, primeiro o levantamento de gases de efeito estufa gerados por leira de compostagem e depois os gases de efeito estufa mediante ao uso das placas solares, utilizados na compostagem pelo método por aeração forçada.

4.2.1 LEIRAS DE COMPOSTAGEM

Na Figura 7, visualizam-se as emissões de gases de efeito estufa oriundos do processo de compostagem, sendo eles o gás carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). As concentrações dentro da leira de compostagem variam de acordo com atividade biológica e do estado oxidativo no ambiente microbiano.

Figura 7 - Emissão de gases do processo de compostagem



Fonte: Adaptado de Inácio (2010).

O nível das emissões pode variar de um método de compostagem para o outro, Miller et al. (1992) destacaram que embora a compostagem seja realizada de diferentes métodos, todas elas afetam diretamente na emissão de metano. No entanto, certas práticas de compostagem podem levar a emissões de metano mais

altas do que o esperado devido à disponibilidade de oxigênio para as atividades biológicas.

Para base de comparação, foi utilizado o estudo realizado por Angnes (2012), no qual a concentração de gás carbônico variou em todo processo de compostagem de 2.000 a 4.000mg CO₂ m⁻², sendo aqui utilizado o valor mediano de 3.000 mgCO₂ m⁻².

Como no método *windrow* e pelo método por aeração forçada, temos a mesma área, 378 m² em cada leira, foi encontrado uma concentração de emissão de gás carbônico de 1,134 kg em cada leira, convertendo para emissão por tonelada de composto, foi encontrado o valor de 0,019 kg t⁻¹;

Em relação à produção de gás metano no processo de compostagem. De acordo com AMS. III. F (Avoidance of methane emissions through controlled biological treatment of biomass) (2016), onde sugere uma base de cálculo para emissão de metano na compostagem, sugere-se um fator de emissão de metano no valor é de 10,0 g kg⁻¹ de resíduo em base seca ou de 4 g kg⁻¹ de resíduo levando em consideração em base úmida, levando em consideração que o tratamento aeróbico por compostagem e aplicação adequada do composto do solo.

Realizando-se o cálculo com o resíduo em base seca, e sabendo-se que cada leira possui 60,7 toneladas de resíduo em base seca, tem-se que a concentração de metano para ambos os métodos, foi de 607 kg de metano por leira, ou, convertendo para emissão por tonelada de composto, 10 kg t⁻¹.

Vale ressaltar que na literatura existem outros valores de concentração de metano acordo com o composto das letras utilizadas. Entretanto, como no estudo a finalidade é a em base de comparação de dois métodos de compostagem, iremos utilizar apenas um estudo, pois nos dois métodos será considerado que eles utilizam o mesmo tipo de composto orgânico.

Na unidade funcional no presente estudo para a etapa de comparação entre os métodos foi a emissão em tonelada de CO₂ por tonelada de leira. Sendo assim fez-se necessário a conversão das unidades na emissão de outros gases.

Conforme UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (2016), considera que o gás metano (CH₄) tem um potencial de aquecimento global em 21 vezes maior que o gás carbônico (CO₂), portanto o fator de conversão de metano em termos de gás carbônico será equivalente a 21 vezes.

Portanto, convertendo a geração de metano em gás carbônico equivalente ($\text{CO}_2\text{-eq}$), temos que a concentração de gás carbônico potencialmente de $210\text{kgCO}_2\text{-eq ton}^{-1}$ para ambos os casos. Ressalta-se que essa emissão seria em condições anaeróbias, no qual não é uma condição desejável na compostagem, visto que é necessária sua aeração em períodos pré-determinados, enfatizando então da importância da aeração do composto.

Somando a emissão de gás carbônico com o gás carbônico equivalente, temos $210,02\text{ kg t}^{-1}$, independente de qual método de compostagem, pois o carbono é emitido proporcionalmente ao material orgânico que chega. Nesse trabalho, considerou-se como diferença o tempo de permanência entre eles, lembrando que, no método *windrow* é de 120 dias e no método por aeração forçada, 90 dias.

Como tem-se pouco estudo na literatura de emissão de óxido nitroso em compostagem e sua geração não impacta no resultado, vamos desconsiderar a emissão de óxido nitroso

4.2.2 PLACAS SOLARES

A composição das placas solares, variam de acordo com o tipo de células fotovoltaicas, porém um estudo levantado pelo FENG et al (2014), fez um levantamento da avaliação do ciclo de vida de diversos sistemas fotovoltaicos, onde pode-se verificar as emissões de CO_2 de acordo com a Tabela 1. No qual as emissões de CO_2 equivalente variam de acordo com sua tecnologia entre $9,4$ e 217 g (kWh)^{-1} , possuindo uma média global das emissões desses módulos fotovoltaicos em torno de $63,91\text{ g (kWh)}^{-1}$.

Tabela 1 - Avaliação do ciclo de vida com diferentes tipos de célula fotovoltaica

Tipo de célula	Tempo de vida (anos)	Emissões de CO ₂ eq g (kWh) ⁻¹
FV amorfo solar	20	47,0
FV monocristalino	20	91,0
FV amorfo solar	-	50,0
Sistema nano-cristalino	20	19,0 – 47,0
FV monocristalino	20	64,8
FV policristalino	30	12,0
FV policristalino	30	53,4
FV policristalino	-	104,0
FV monocristalino	25	217,0
FV monocristalino	24	165,0
FV monocristalino	30	44,0
FV amorfo solar	30	39,0
FV amorfo solar	30	15,6
FV amorfo solar	20	34,3
FV policristalino	30	9,4
FV policristalino	30	12,1

Fonte: FENG (2014).

A placa solar que utilizaremos nesse presente estudo, possui a capacidade de geração de energia de 92 Wh, ou seja 0,092 kWh aproximadamente e como iremos utilizar 602 placas fotovoltaicas para geração de energia necessária, nosso conjunto de placas solares emitirá no decorrer do seu ciclo de vida, um total de 3539,6 g de CO₂-eq.

Como a vida útil de cada placa gira em torno de 20 anos, pensando na concentração de gás carbônico emitido mensalmente, tem-se uma faixa de 14,7 g de gás carbônico emitido na atmosfera proveniente dessas placas solares, ou seja, um valor inexpressivo mediante a vantagens na utilização de placa solares como fonte de energia alternativa.

4.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Em um primeiro momento, realizou-se o levantamento do investimento em cada situação, e após esse levantamento foi feita a utilização das ferramentas de análise de viabilidade econômica para verificar se o investimento é viável economicamente.

4.3.1 MÉTODO *WINDROW*

Pelo método *windrow*, pode-se perceber de acordo com a Tabela 2, os dois tipos de custos, o custo inicial de investimento, que se trata da compra da área necessária para deposição dos resíduos, onde esse valor é a média dos lotes disponíveis para venda na zona rural, e um custo fixo mensal, para contratação dos operadores de compostagem.

Serão necessários 46 funcionários para o reviramento das leiras, porém, levando em consideração férias e possíveis atestados, vamos arredondar esse valor para 50 funcionários. Constando de acordo com a Tabela 2 um valor expressivo mensal para de mão de obra do reviramento dessas leiras.

Tabela 2 - Custo de investimento pelo método *windrow*

Investimento	Quant.	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)	Fonte
Área (m ²)	9087,3	40,00	363.492,00	Espaço Imobiliário VRB, 2023
Custo Mensal				
Operador (un)	50	1.596,00	79.800,00	Glassdoor (2023)

Fonte: Autor.

4.3.2 MÉTODO DE AERAÇÃO FORÇADA

Pode se perceber de acordo com a Tabela 2, os valores necessários para aquisição dos equipamentos e por ser necessário menos leiras de compostagem, iremos precisar da aquisição de um terreno com menores proporções.

Tabela 3 - Custo de investimento pelo método por aeração forçada

Investimento	Quant.	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)	Fonte
Área (m ²)	6397	40,00	255.880,00	Espaço Imobiliário VRB, (2023)
Compressor Radial Duplo Ibram CR 15 (un)	39	24.569,00	958.191,00	IBRAM (2023)
Tubo galvanizado para ar comprimido 2" (un)	236	389,00	91.804,00	Loja quality tubos (2023)
Curva galvanizada 2" BSP (un)	117	29,81	3.487,77	Loja quality tubos (2023)
Luva galvanizada 2" BSP (un)	117	19,49	2.280,33	Loja quality tubos (2023)
Niple galvanizado 2" BSP (un)	117	17,89	2.093,13	Loja quality tubos (2023)
Placas solares (un)	602	1.089,00	655.578,00	Neo Solar (2023)
Inversor Híbrido On + Off Grid Deye SUN5K - 5000W - 48/220V (un)	43	10.599,00	455.757,00	Neo Solar (2023)
Cabo Flexível 6mm 100Metros Preto 750V (Un)	15	467,90	7.018,50	Loja quality tubos (2023)
Estrutura em aço carbono (m ²)	6397	150,00	959.550,00	Structur aço (2023)
Total			3.391.639,73	
Custo Mensal				
Operador (un)	4	1.596,00	6384,00	Glassdoor, (2023)

Fonte: Autor.

O dimensionamento da quantidade de inversores seguiu o raciocínio da máxima potência de painel instalada, sendo que esse inversor selecionado tinha sua potência máxima de instalação de 6500 Wp (Watt-pico). Como serão 602 placas solares de 460 Wp, vamos precisar de 43 inversores a serem instalados para suprir a demanda.

Os valores com maior impacto no investimento foram nas aquisições dos 39 compressores radiais CR-15, necessários para oxigenação das leiras estáticas, a estrutura em aço carbono e o conjunto com 602 placas solares com os inversores solares, responsáveis para conectar o sistema fotovoltaico à rede elétrica e também a estrutura metálica onde irá ficar dispostas as leiras de compostagem abaixo delas e na sua cobertura será instalado as placas solares.

Não existe necessidade de operador de composteira para o reviramento das leiras, mas é se fez necessário uma quantidade mínima de operadores para criação e desmontagem das leiras no processo por aeração forçada, de acordo com a Tabela 3, foi considerado 4 operadores para esse procedimento.

Vale ressaltar que o no método de aeração forçada não é obrigatório cobrir o galpão, foi uma escolha de projeto para aproveitamento de área para as instalações das placas solares em sua cobertura.

Outro ponto, a água recolhida no método de aeração forçada será menor, mas podemos utilizar o mesmo tipo de tanque, com as mesmas dimensões. Não sendo assim citado para base de comparação.

4.3.3 UTILIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Utilizando-se as ferramentas para análise de viabilidade econômica do investimento do projeto, chega-se aos resultados visualizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Estudo de viabilidade econômica do projeto de compostagem pelo método por aeração forçada utilizando placas solares

Investimento Inicial	R\$	3.391.639,73			
Taxa de Mínima de Atratividade (TMA)		10%			
VPL do Projeto	R\$	7.772.496,80			

Período (Ano)		Fluxo de Caixa		Valor Presente		VP Acumulado
0	-R\$	3.391.639,73	-R\$	3.391.639,73	-R\$	3.391.639,73
1	R\$	880.992,00	R\$	800.901,82	-R\$	2.590.737,91
2	R\$	971.293,68	R\$	802.722,05	-R\$	1.788.015,86
3	R\$	1.019.858,36	R\$	766.234,68	-R\$	1.021.781,18
4	R\$	1.070.851,28	R\$	731.405,83	-R\$	290.375,34
5	R\$	1.124.393,85	R\$	698.160,11	R\$	407.784,77
6	R\$	1.180.613,54	R\$	666.425,56	R\$	1.074.210,33
7	R\$	1.239.644,22	R\$	636.133,49	R\$	1.710.343,83
8	R\$	1.301.626,43	R\$	607.218,33	R\$	2.317.562,16
9	R\$	1.366.707,75	R\$	579.617,50	R\$	2.897.179,66
10	R\$	1.435.043,14	R\$	553.271,25	R\$	3.450.450,91
11	R\$	1.506.795,29	R\$	528.122,56	R\$	3.978.573,47
12	R\$	1.582.135,06	R\$	504.116,99	R\$	4.482.690,46
13	R\$	1.661.241,81	R\$	481.202,58	R\$	4.963.893,04
14	R\$	1.744.303,90	R\$	459.329,73	R\$	5.423.222,77
15	R\$	1.831.519,09	R\$	438.451,11	R\$	5.861.673,88
16	R\$	1.923.095,05	R\$	418.521,51	R\$	6.280.195,39
17	R\$	2.019.249,80	R\$	399.497,81	R\$	6.679.693,20
18	R\$	2.120.212,29	R\$	381.338,82	R\$	7.061.032,02
19	R\$	2.226.222,91	R\$	364.005,23	R\$	7.425.037,25
20	R\$	2.337.534,05	R\$	347.459,54	R\$	7.772.496,80

Taxa interna de retorno (TIR)	32%
Índice de Lucratividade (IL)	3,3
Payback (anos)	5,2

Fonte: Autor.

O estudo de análise de viabilidade econômica foi baseado em uma perspectiva ao longo de 20 anos, vida útil na média das placas solares, onde o fluxo de caixa calculado em cada ano, se refere ao salário dos 46 operadores que não serão necessários para o reviramento das leiras no método por aeração forçada, ajustando-se esses valores considerando um aumento salarial de 5% ao ano.

Conforme Tabela 4, pode-se perceber que o VPL > 0, isso significa que o investimento é economicamente viável, ou seja, faz sentido o investimento na instalação das placas solares no conjunto de compostagem por aeração forçada.

A TIR e o IL possuem valores bastantes expressivos, chegando à faixa de 32% de atratividade, com índice de lucratividade igual a 3,3. Por fim, vale se ressaltar

também que o investimento possui um retorno financeiro em 5,2 anos do investimento (*payback*).

4.4 ANÁLISE DOS MÉTODOS DE COMPOSTAGEM

4.4.1 ÁREA

Fazendo-se uma análise comparativa das áreas necessárias para compostagem utilizando o método *windrow* e instalação de aeração forçada chega-se à Tabela 5, como será necessário menor número de leiras de compostagem, é de se esperar que nesse tópico, que o método de compostagem por aeração forçada seja mais vantajoso. Utilizou-se como unidade funcional a área por tonelada de leira, no qual pode-se perceber que com o método *windrow* tem-se 59,9 m² necessárias por tonelada de composto orgânico, enquanto pelo método de aeração forçada temos 42,2 m² necessárias por tonelada de composto orgânico.

Tabela 5 – Análise comparativa entre os métodos por área demandada

Método	Leiras	Revolvimento	Área das Leiras (m ²)	Área por tonelada (m ² t ⁻¹)
Método <i>windrow</i>	18	Sim	9087,3	59,9
Aeração Forçada	13	Não	6397,0	42,2

Fonte: Autor.

4.4.2 GASTO ENERGÉTICO

De acordo com os resultados obtidos no memorial de cálculo, pode-se relacionar os gastos energéticos de cada método, levando em consideração que o gasto energético calculado pelo método *windrow* será proveniente do esforço dos operadores de compostagem no reviramento de cada leira, enquanto pelo método por aeração forçada, será proveniente do consumo energético demandado para o funcionamento dos motores de 15 cv de acordo com o dimensionamento, no qual a fonte dessa energia será fornecida pelas placas solares fotovoltaicas. Conforme listado na Tabela 6, percebe-se que o gasto energético será maior pelo método de

aeração forçada, isso é devido a grande quantidade de motores a serem instalados com potências elevadas.

Tabela 6 - Comparação de gasto energético entre os dois métodos

Método	Fonte	Gasto energético (kW mês ⁻¹)
Método <i>windrow</i>	Operadores de compostagem	2.668
Aeração Forçada	Placas solares	39.744

Fonte: Autor.

4.4.3 EMISSÃO DE GASES POLUENTES

Conforme estudo da seção sobre avaliação de impactos ambientais, foi mensurado que em ambos os métodos de compostagem possuem o potencial de emissão de 210,02 kg t⁻¹ de CO₂, porém como o método *windrow* precisa de 120 dias para o processo de compostagem, enquanto o método por aeração forçada necessita de 90 dias, pode-se dizer que o método por aeração forçada emite maior concentração na emissão de gás carbônico em menor quantidade de tempo (Tabela 6).

Percebe-se que apesar da grande quantidade de placas solares instaladas, o maior impacto na emissão de gases poluentes corresponde a quantidade de leiras de compostagem. Sendo assim, a concentração de gases de efeito estufa entre os dois métodos seria basicamente a mesma.

Tabela 6 - Comparação de emissão de gás carbônico na atmosfera

Método	Leiras de compostagem (kg t ⁻¹)	Emissão (kg mês ⁻¹)	Placas Solares (kg)
Método <i>windrow</i>	210,02	52,50	-
Aeração Forçada	210,02	70,00	0,014

Fonte: Autor.

4.4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA

Em relação a análise de viabilidade econômica, de acordo com a Tabela 2, tem-se que o valor de investimento para a compostagem pelo método *windrow* seria R\$ 363.492,00, lembrando-se que se faz necessário o contrato dos 50 funcionários,

colaborando com uma despesa mensal de R\$ 79.800,00. Para o método por aeração forçada com o apoio de painéis solares tem-se um valor expressivo de investimento inicial, de R\$ 3.391.639,73, onde 32,8% desse valor seria relativo à compra das placas fotovoltaicas e dos inversores. Portanto o gasto de investimento inicial do método por aeração forçada é muito maior que pelo método *windrow*.

Porém, utilizando-se as ferramentas de análise de viabilidade econômica, no qual foi considerado o fluxo de entrada para esses cálculos, o salário dos operadores de compostagem ajustados 5% de aumento salarial a cada ano, visto que não são necessários operadores para revirar as leiras no método por aeração forçada, chega-se em uma VPL > 0, com uma TIR de 32%, com período de *payback* de 5,2 anos, ou seja, é altamente recomendado o investimento de compostagem por aeração forçada utilizando placas solares.

5 CONCLUSÃO

O método por aeração forçada demanda menos área necessária para compostagem, não havendo necessidade de contratação muitos operadores a mais para o reviramento das leiras.

O investimento nos equipamentos necessários para realização do método por aeração forçada utilizando placas solares mostrou-se viável economicamente, com indicadores econômicos como VPL, IL, TIR e PB positivos.

Mediante a isso, a utilização de compostagem utilizando o método de aeração forçada utilizando placas fotovoltaicas é promissor em relação ao método *windrow*.

Como sugestão interessante, a comparação intermediária, com o uso de máquinas para o reviramento *windrow* pode ser realizado. Com o emergente conceito de economia circular, o aprofundamento nessa temática é muito bem-vindo em estudos futuros.

REFERÊNCIAS

- ABES. Atlas brasileiro de energia solar. p. 149 , 2017.978-85-17-00089-8.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 14040 : Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípio e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 2. ed.9788507015321.
- ALMEIDA, Pedro; SILVEIRA, Ana; MIGUEL, Antonio Ferreira. Applicability of the Forchheimer Equation to Forced-Aeration Windrow Composting: Variation of Airflow Characteristics with Humidity and Volatile Solids. **International Journal of Fluid Mechanics Research** v. 39, n. 2, p. 149–159 , 2012.
- AMLINGER, Florian; PEYR, Stefan; CUHLS, Carsten. Green house gas emissions from composting and mechanical biological treatment. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy** v. 26, n. 1, p. 47–60 , 1 fev. 2008.
- AMS. III. F. **Avoidance of methane emissions through controlled biological treatment of biomass**. United Nations: [s.n.], 4 nov. 2016. Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/BRT65K2ODSCGNLZIWQA7YFEMH04XJ9>>. Acesso em: 27 jun. 2023.
- ANGNES, Graciele. Emissões de gases no processo de compostagem., 2012.
- ANJOS, Luiz Antonio Dos; FERREIRA, João Alberto. A avaliação da carga fisiológica de trabalho na legislação brasileira deve ser revista! O caso da coleta de lixo domiciliar no Rio de Janeiro. **Cadernos de Saúde Pública** v. 16, n. 3, p. 785–790 , set. 2000.
- AZEVEDO, Mônica de Abreu. **Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1993.
- BECK-FRIIS, B. *et al.* Formation and Emission of N₂O and CH₄ from Compost Heaps of Organic Household Waster. **Environmental Monitoring and Assessment** v. 62, n. 3, p. 317–331 , 2000.
- Cabo Flexível*. Disponível em: <https://www.leroymerlin.com.br/cabo-flexivel--6mm-100metros-preto-750v-sil-fios_86839753>. Acesso em: 1 jun. 2023.
- CARDOSO, E. J. B. N; TSAI, S. M.; NEVES, P. C. M. **Microbiologia do Solo**. Piracicapa: USP, 1992. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Daniel-Bini/publication/311788702_Metabolismo_Microbiano/links/585a809908ae64cb3d4ac507/Metabolismo-Microbiano.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2023.
- COELHO, Luísa Isabel Guerreiro David. **Compostagem de resíduos agro-industriais: Monitorização do processo e avaliação da qualidade do composto**. Universidade do Algarve, Faro, 2007.

Compressor Radial. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1IWSP7CK8lwmxflQ34AFDwgl6Jp_xtFga/view>. Acesso em: 1 jun. 2023.

Cotovelo Galvanizado. Disponível em: <<https://www.lojaqualitytubos.com.br/tubo-galvanizado-a-fogo-2-p994000>>. Acesso em: 1 jun. 2023.

DA ROSA, Liciane Oliveira *et al.* VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO SETOR DE HORTIFRUTIGRANJEIRO PELO PROCESSO DE COMPOSTAGEM DOMÉSTICA. **Semioses** v. 13, n. 2, p. 1–12 , 10 jun. 2019.

DE. Vicente; LEITÃO. Paulo Miranda. **UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ-UFC CENTRO DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**. [S.l.: s.n.], 2008.

DESIDERI, U. *et al.* Comparative analysis of concentrating solar power and photovoltaic technologies: Technical and environmental evaluations. **Applied Energy** v. 102, p. 765–784 , 2013.

DIAS, César Luiz de Azevedo *et al.* Performance estimation of photovoltaic technologies in Brazil. **Renewable Energy** v. 114, p. 367–375 , dez. 2017.

DJØRUP, Søren; THELLUFSEN, Jakob Zinck; SORKNÆS, Peter. The electricity market in a renewable energy system. **Energy** v. 162, p. 148–157 , 1 nov. 2018.

DUARTE, Carlos Roberto *et al.* **Gasto energético, ingestão calórica e condições gerais de saúde de coletores de lixo de Florianópolis**. Florianópolis, 1998.

ELD JUNIOR, Willlam. Custo e estrutura de capital o comportamento das empresas brasileiras. , 1996.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022**. [S.l.]: EPE, 2022. Disponível em: <<http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/anuario/Fact%20Sheet%20-%20Anu%20Estat%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202022.pdf>>. Acesso em: 24 maio 2023.

Estrutura Metálica. Disponível em: <<https://www.estructuraco.com/preco-m2-estrutura-metalicatelhado/#:~:text=Informa%C3%A7%C3%B5es%20sobre%20pre%C3%A7o%20m2%20estrutura,00%20a%20R%24160%2C00>>. Acesso em: 1 jun. 2023.

FEAM. F. E. D. M. A. **Potencial de Energias Renováveis**. Belo Horizonte: FEAM, Fundação estadual do meio ambiente, 2014. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/EnergiaMudancasClimaticas/Publicacoes2014/pemc_potencial_er_vol_i_v1.0_15_04_2014.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2023.

FENG, Kuishuang *et al.* The energy and water nexus in Chinese electricity production: A hybrid life cycle analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 39, p. 342–355 , nov. 2014.

FIGUEIRA JÚNIOR, Edson. **Projeto industrial para aeração automática de leiras de compostagem orgânica**. Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

GOMES, Juliano da Cunha. Formação de multiplicadores para reciclagem de resíduos orgânicos por meio da compostagem em tempos de pandemia. **Revista ELO – Diálogos em Extensão** v. 10 , 26 abr. 2021.

INACIO, C. de T.; MILLER, P. R. M. Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos. , 2009.

INÁCIO. Caio de Teves. **Dinâmica de gases e emissões de metano em leiras de compostagem**. [S.l: s.n.], 2010.

Inversor Solar. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/inversor-solar-hibrido-on-off-grid-deye-sun-5k-sg01lp1-5000-48-220v.html>>. Acesso em: 1 jun. 2023.

JÄCKEL, Udo; THUMMES, Kathrin; KÄMPFER, Peter. Thermophilic methane production and oxidation in compost. **FEMS Microbiology Ecology** v. 52, n. 2, p. 175–184 , abr. 2005.

Luva Galvanizada. Disponível em: <<https://www.lojaqualitytubos.com.br/luva-galvanizada-f-f-2-p1000720>>. Acesso em: 1 jun. 2023.

MATOS, Antonio Teixeira. **Tratamento e Aproveitamento Agrícola de Resíduos Sólidos**. Viçosa: Editora UFV, 2014. 01 v. .9788572695039.

MATOS, Antonio T. De *et al.* DEMANDA DE POTÊNCIA DO VENTILADOR PARA AERAÇÃO DE MATERIAL EM COMPOSTAGEM. p. 542–551 , 2012.

MENDES, Natália Crespo. **Métodos e modelos de caracterização para avaliação de impacto do ciclo de vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MILLER, Frederick C; METTING, F Blaine. Composting as a process based on the control of ecologically selective factors. **Soil microbial ecology: applications in agricultural and environmental management**. New York: Marcel Dekker Inc., 1992. p. 515–544. 9780824787370.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA *et al.* **PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**. Brasília: [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/>>.9786588265154.

MONARO, Daniel Luis Garrido. **Avaliação do ciclo de vida da indústria de eletroeletrônicos portáteis: um estudo de caso do fim de vida do microcomputador**. Santa Bárbara d’Oeste, 2014.

NEOSOLAR. *Painel Solar Fotovoltaico 460W - Sunova SS-460-60-MDH*. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-460w-sunova-ss-460-60-mdh.html>>. Acesso em: 25 maio 2023.

Niple Galvanizado. , 2023. Disponível em: <<https://www.lojaqualitytubos.com.br/luva-galvanizada-f-f-2-p1000720>>. Acesso em: 1 jun. 2023.

PAIVA, Ed Carlo Rosa. Variáveis de projeto, operação de sistemas de leiras estáticas aeradas e qualidade do composto produzido com carcaças de aves mortas. , 2011.

PENG, Jinqing; LU, Lin; YANG, Hongxing. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 19, p. 255–274 , mar. 2013.

PEREIRA NETO, J. T. Compostagem: Fundamentos e Métodos. 1º Simpósio Sobre Compostagem: Ciência e Tecnologia. **FCA – GEMFER** , 18 ago. 2004.

PEREIRA NETO, J. T.; STENTIFORD, E. I.; MARA, D. D. Sistemas de compostagem por pilhas estáticas arejadas - uma alternativa de baixo custo ao tratamento e reciclagem do lixo 53 urbano e lamas de esgotos domésticos. . **Informação APESB** p. 3–19 , 1986.

QUESTED. Tom; FORBES. Hamish. **ACKNOWLEDGEMENTS WRAP**. Washington: [s.n.], 2021.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: LABSOLAR, 2004. .85-87583-04-2.

Salário de auxiliar de compostagem. Disponível em: <https://www.glassdoor.com.br/Sal%C3%A1rios/auxiliar-de-compostagem-sal%C3%A1rio-SRCH_KO0,23.htm>. Acesso em: 31 maio 2023.

SENA, Larissa Morais *et al.* Compostagem e vermicompostagem como alternativa para tratamento e de destinação de resíduos orgânicos. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável** v. 14, n. 2, p. 266–272 , 22 jul. 2019.

SILVA, Heitor Marques Francelino Da; ARAÚJO, Francisco José Costa. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação** v. 8, n. 3, p. 859–869 , 31 mar. 2022.

SILVA, NCL *et al.* Variação na pressão estática de ar insuflado em diferentes vazões específicas em colunas de material orgânico com diferentes estádios de degradação bioquímica. **SCIELO** , 2008. Acesso em: 19 abr. 2023.

SOLAR. **Global Market Outlook For Solar Power**. [S.l: s.n.], 2022.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues.*, 1993.

TEIXEIRA, Denis Leocádio. **Determinação do gradiente de pressão estática do ar para sistemas de compostagem por aeração forçada.** UFV, Viçosa, 2014. Disponível em: <<https://locus.ufv.br//handle/123456789/3672>>. Acesso em: 19 abr. 2023.

TIQUIA, S.M.; TAM, N.F.Y. Composting of spent pig litter in turned and forced-aerated piles. **Environmental Pollution** v. 99, n. 3, p. 329–337 , 5 jul. 1998.

Tubo Galvanizado. Disponível em: <<https://www.lojaqualitytubos.com.br/tubo-galvanizado-a-fogo-2-p994000>>. Acesso em: 1 jun. 2023.

V. ANDREOLI, Cleverson; SPERLING, Marcos Von; FERNANDES, Fernando. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** 2^a ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. 6 v. .978-85-423-0085-7.

VANDERGHEYNST, Jean S. *et al.* Effect of Process Management on the Emission of Organosulfur Compounds and Gaseous Antecedents from Composting Processes. **Environmental Science & Technology** v. 32, n. 23, p. 3713–3718 , 1 dez. 1998. Venda em área Rural. , 2023. Disponível em: <<https://www.espacoimobiliariovrb.com.br/314/imoveis/venda-area-rural-visconde-do-rio-branco-mg>>. Acesso em: 31 maio 2023.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Apêndice A

	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Semana 13	Semana 14	Semana 15	Semana 16
Resíduo 1	303,4	303,4	303,4	303,4	151,7	151,7	151,7	151,7								
Resíduo 2		303,4	303,4	303,4	303,4	151,7	151,7	151,7	151,7							
Resíduo 3			303,4	303,4	303,4	303,4	151,7	151,7	151,7	151,7						
Resíduo 4				303,4	303,4	303,4	303,4	151,7	151,7	151,7	151,7					
Resíduo 5					303,4	303,4	303,4	303,4	151,7	151,7	151,7	151,7				
Resíduo 6						303,4	303,4	303,4	303,4	151,7	151,7	151,7	151,7			
Resíduo 7							303,4	303,4	303,4	303,4	151,7	151,7	151,7	151,7		
Resíduo 8								303,4	303,4	303,4	303,4	151,7	151,7	151,7	151,7	
Resíduo 9									303,4	303,4	303,4	303,4	151,7	151,7	151,7	151,7
Resíduo 10										303,4	303,4	303,4	303,4	151,7	151,7	151,7
Resíduo 11											303,4	303,4	303,4	303,4	151,7	151,7
Resíduo 12												303,4	303,4	303,4	303,4	151,7
Resíduo 13													303,4	303,4	303,4	303,4
Resíduo 14														303,4	303,4	303,4
Resíduo 15															303,4	303,4
Resíduo 16																303,4

Quantidade de toneladas a serem reviradas	303,4	606,8	910,2	1213,6	1365,3	1517	1668,7	1820,4	1820,4	1820,4	1820,4	1820,4	1820,4	1820,4	1820,4	1820,4
Total de Operadores	7,585	15,17	22,755	30,34	34,1325	37,925	41,7175	45,51	45,51	45,51	45,51	45,51	45,51	45,51	45,51	45,51

Legenda

Cor	Reviramento a cada
Amarelo	3,5 dias
Laranja	7 dias
Verde	Sem reviramento

APÊNDICE B

Apêndice B

	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12	Semana 13
Resíduo 1	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4
Resíduo 2		2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4
Resíduo 3			2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4
Resíduo 4				2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4
Resíduo 5					2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4
Resíduo 6						2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4
Resíduo 7							2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4
Resíduo 8								2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4
Resíduo 9									2318,4	2318,4	2318,4	2318,4	2318,4
Resíduo 10										2318,4	2318,4	2318,4	2318,4
Resíduo 11											2318,4	2318,4	2318,4
Resíduo 12												2318,4	2318,4
Resíduo 13													2318,4
Consumo de energia elétrica (kW)	2318,4	4636,8	6955,2	9273,6	9273,6	9273,6	9273,6	9273,6	9273,6	9273,6	9273,6	9273,6	9273,6

Legenda

Cor	Fase
Amarelo	Termofílica
Verde	Maturação

