

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Diseño y construcción de una planta para la producción de compost caliente a partir de residuos
domésticos y agrícolas

Willie Martin Salazar Villamizar

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Diego Luis Franco Jacome

Ingeniero Mecánico, PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2022

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Tabla de contenido.

| | |
|--|----|
| Introducción | 13 |
| 1. Objetivos..... | 16 |
| 1.1. Objetivo General..... | 16 |
| 1.2. Objetivos Específicos..... | 16 |
| 2. Marco teórico | 17 |
| 2.1. Materia orgánica. | 17 |
| 2.1.1. Humus. | 18 |
| 2.2. Abono..... | 18 |
| 2.2.1. Abono orgánico | 18 |
| 2.3. Compost | 20 |
| 2.3.1. Tipos de compostaje..... | 20 |
| 2.3.2. Etapas del compostaje | 23 |
| 2.3.3. Materias primas de compostaje | 25 |
| 2.3.4. Parámetros que influyen en el compostaje..... | 26 |
| 2.3.5. Compostaje en vaso..... | 33 |
| 3. Método | 36 |
| 3.1. Diseño Mecánico. | 36 |
| 3.1.1. Dimensiones..... | 36 |
| 3.1.2. Potencia..... | 39 |
| 3.1.3. Posición angular de los apoyos. | 46 |
| 3.1.4. Posición longitudinal de los apoyos..... | 46 |
| 3.1.5. Espesor del tambor. | 54 |

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.1.6. | Diseño de paletas..... | 57 |
| 3.1.7. | Anillos de atiesamiento..... | 58 |
| 3.1.8. | Tapas..... | 59 |
| 3.1.9. | Selección de las ruedas..... | 60 |
| 3.1.10. | Selección del motorreductor..... | 66 |
| 3.1.11. | Diseño del eje..... | 69 |
| 3.1.12. | Selección de chumaceras..... | 77 |
| 3.1.13. | Diseño del bastidor..... | 78 |
| 3.1.14. | Tolva..... | 79 |
| 3.2. | Montaje Eléctrico..... | 79 |
| 3.3. | Manejo de variables..... | 80 |
| 3.3.1. | Temperatura..... | 80 |
| 3.3.2. | Aireación..... | 81 |
| 3.4. | Construcción..... | 82 |
| 3.5. | Método operacional..... | 94 |
| 3.5.1. | Selección y preparación de los residuos orgánicos..... | 94 |
| 3.5.2. | Proceso..... | 96 |
| 4. | Resultados..... | 101 |
| 4.1.1. | Curvas de temperatura..... | 101 |
| 4.1.2. | Rendimiento del proceso..... | 106 |
| 4.1.3. | Propiedades del compost..... | 108 |
| 4.1.4. | Costos y consumo energético..... | 111 |
| 5. | Conclusiones..... | 113 |

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

| | |
|---------------------------------|-----|
| 6. Recomendaciones. | 114 |
| Referencias bibliográficas..... | 115 |

Lista de Figuras.

| | |
|---|----|
| Figura 1 <i>Aspecto característico de compost maduro</i> | 22 |
| Figura 2 <i>Comportamiento de la temperatura y pH durante las fases del proceso de compostaje.</i> | 23 |
| Figura 3 <i>Perfil de temperatura característico de proceso de compostaje.</i> | 30 |
| Figura 4 <i>Compostador rotatorio horizontal.</i> | 34 |
| Figura 5 <i>Representación del diseño conceptual.</i> | 36 |
| Figura 6 <i>Compostador Omnivore baby bear.</i> | 38 |
| Figura 7 <i>Representación del movimiento del material dentro del tambor.</i> | 40 |
| Figura 8 <i>Diagrama esquemático del sistema cuando alcanza el ángulo de reposo.</i> | 40 |
| Figura 9 <i>Parámetros que definen un segmento circular</i> | 42 |
| Figura 10 <i>Distancia entre el centroide y el eje de giro para diferentes porcentajes de llenado.</i> .. | 43 |
| Figura 11 <i>Prototipo de compostador rotatorio.</i> | 44 |
| Figura 12 <i>Arreglo para medir el ángulo de reposo</i> | 45 |
| Figura 13 <i>Representación de la distribución angular de los apoyos</i> | 46 |
| Figura 14 <i>Distribución longitudinal de los elementos de máquina.</i> | 47 |
| Figura 15 <i>Diagrama de cuerpo libre del equipo.</i> | 47 |
| Figura 16 <i>Sección transversal en el plano xy con sistema coordenado inclinado.</i> | 48 |
| Figura 17 <i>Componentes del peso en cada plano</i> | 48 |
| Figura 18 <i>Vista del plano xy del diagrama de cuerpo libre.</i> | 49 |
| Figura 19 <i>Diagrama del tambor como una viga en el plano YZ.</i> | 51 |
| Figura 20 <i>Diagrama del tambor como una viga en el plano YZ.</i> | 51 |
| Figura 21 <i>Principio de las funciones de singularidad.</i> | 52 |

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

| | |
|---|----|
| Figura 22 <i>Funciones de singularidad cargas básicas.</i> | 52 |
| Figura 23 <i>Diagrama de momento flector optimo.</i> | 53 |
| Figura 24 <i>Condiciones para el MEF y mallado</i> | 55 |
| Figura 25 <i>Estudio de convergencia</i> | 56 |
| Figura 26 <i>Resultados del análisis por MEF.</i> | 56 |
| Figura 27 <i>Tipos de paletas y sus ángulos de elevación del material.</i> | 57 |
| Figura 28 <i>Vista de sección del tambor y paletas.</i> | 58 |
| Figura 29 <i>Detalle de la platina y anillos del tambor.</i> | 59 |
| Figura 30 <i>Tapas posterior y frontal.</i> | 59 |
| Figura 31 <i>Ruedas super carga.</i> | 60 |
| Figura 32 <i>Relación peso/potencia vs potencia en transmisiones de potencia.</i> | 61 |
| Figura 33 <i>Representación del principio de las ruedas de fricción.</i> | 62 |
| Figura 34 <i>Disposición de la transmisión.</i> | 66 |
| Figura 35 <i>Diagrama para coeficiente de condición de trabajo.</i> | 68 |
| Figura 36 <i>Caja reductora y dimensiones.</i> | 69 |
| Figura 37 <i>Representación del eje</i> | 70 |
| Figura 38 <i>Diagrama de cuerpo libre del eje</i> | 71 |
| Figura 39 <i>Concentrador de esfuerzos en eje con agujero pasante.</i> | 75 |
| Figura 40 <i>Dimensiones del eje.</i> | 76 |
| Figura 41 <i>Chumacera tipo puente</i> | 77 |
| Figura 42 <i>Representación del bastidor</i> | 78 |
| Figura 43 <i>Representación de la tolva</i> | 79 |
| Figura 44 <i>Arrancador Directo</i> | 80 |

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

| | |
|--|----|
| Figura 45 <i>Termómetro Análogo</i> | 81 |
| Figura 46 <i>Cilindrado de la lámina</i> | 82 |
| Figura 47 <i>Cuerpo del Tambor</i> | 82 |
| Figura 48 <i>Tambor con paletas</i> | 83 |
| Figura 49 <i>Tapa posterior</i> | 83 |
| Figura 50 <i>Anillo de platina y tambor</i> | 84 |
| Figura 51 <i>Anillo de tubo estructural</i> | 84 |
| Figura 52 <i>Tambor con anillos colocados</i> | 85 |
| Figura 53 <i>Estructura del bastidor</i> | 85 |
| Figura 54 <i>Bases para ruedas y chumaceras</i> | 86 |
| Figura 55 <i>Mecanizados del eje</i> | 86 |
| Figura 56 <i>Rueda de transmisión</i> | 87 |
| Figura 57 <i>Posicionamiento de componentes mecánicos</i> | 87 |
| Figura 58 <i>Transmisión de potencia</i> | 88 |
| Figura 59 <i>Anillos de platina</i> | 88 |
| Figura 60 <i>Tambor montado sobre bastidor</i> | 89 |
| Figura 61 <i>Tapa posterior ensamblada</i> | 89 |
| Figura 62 <i>Construcción de la tolva</i> | 90 |
| Figura 63 <i>Compostador ensamblado</i> | 90 |
| Figura 64 <i>Piezas con recubrimiento de cromato de zinc</i> | 91 |
| Figura 65 <i>Piezas con recubrimientos epóxicos</i> | 92 |
| Figura 66 <i>Sellos de espuma</i> | 92 |
| Figura 67 <i>Rueda que absorbe la carga axial</i> | 93 |

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

| | |
|--|-----|
| Figura 68 <i>Compostador terminado vista posterior.</i> | 93 |
| Figura 69 <i>Compostador terminado vista frontal.</i> | 94 |
| Figura 70 <i>Residuos orgánicos utilizados</i> | 95 |
| Figura 71 <i>Cargue del tambor y tambor cargado.</i> | 96 |
| Figura 72 <i>Marcas indicadoras y posición del termómetro en el tambor.</i> | 97 |
| Figura 73 <i>Termómetro bimetalico marca SunPass utilizado para medir la temperatura del sustrato.</i> | 98 |
| Figura 74 <i>Extracción del compost terminado</i> | 99 |
| Figura 75 <i>Representación del proceso de cono y cuarteo.</i> | 100 |
| Figura 76 <i>Curva de temperatura del compost del Lote 1 (C:N=36).</i> | 101 |
| Figura 77 <i>Curva de temperatura del compost del Lote 2 (C:N=35).</i> | 102 |
| Figura 78 <i>Curva de temperatura del compost del lote 3.</i> | 103 |
| Figura 79 <i>Comparación de las curvas de temperatura de todos los lotes.</i> | 104 |
| Figura 80 <i>Perfil de temperaturas de diferentes mezclas de compost.</i> | 106 |
| Figura 81 <i>Interior del tambor con aire saturado.</i> | 107 |
| Figura 82 <i>Evolución del aspecto del compost.</i> | 108 |

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Lista de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1 <i>Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades del suelo</i> | 19 |
| Tabla 2 <i>Relación carbono nitrógeno de algunos materiales compostables</i> | 27 |
| Tabla 3 <i>Lista de dispositivos compostadores comerciales y sus características</i> | 35 |
| Tabla 4 <i>Dimensiones de compostadores comerciales</i> | 38 |
| Tabla 5 <i>Selección del coeficiente de fricción</i> | 63 |
| Tabla 6 <i>Criterios de selección del factor de servicio</i> | 65 |
| Tabla 7 <i>Datos técnicos caja reductora 63</i> | 68 |
| Tabla 8 <i>Factores de corrección para fatiga</i> | 74 |
| Tabla 9 <i>Proporción de residuos en cada lote para compost</i> | 95 |
| Tabla 10 <i>Condiciones para eliminación de patógenos</i> | 105 |
| Tabla 11 <i>Datos sobre el rendimiento del proceso de compostaje</i> | 107 |
| Tabla 12 <i>Propuestas de calidad y resultados</i> | 109 |
| Tabla 13 <i>Costos asociados a la construcción del compostador</i> | 111 |

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Lista de Apéndices.

Apéndice A. Caracterización de la materia orgánica y del proceso de compostaje

Apéndice B. Medición de ángulo de reposo.

Apéndice C. Planos.

Apéndice D. Manual de Operación.

Apéndice E. Informe de resultados de propiedades fisicoquímicas.

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Resumen

Título: Diseño y construcción de una planta para la producción de compost caliente a partir de residuos domésticos y agrícolas*

Autor: Willie Martin Salazar Villamizar**

Palabras Clave: Compostaje, compostaje en vaso, compost caliente, residuos orgánicos.

Descripción: Como una propuesta de aprovechamiento de los residuos orgánicos y contribución a la calidad de las tierras de cultivo se diseñó y construyó una planta que permite la obtención de compost caliente que mediante sistemas mecánicos facilita la producción con un gasto mínimo de energía. El sistema consta principalmente de un tambor rotativo de 1 metro de diámetro y 2,4 metros de largo que permite tener un proceso con altas tasas de oxígeno para una rápida descomposición, zonas de carga (con tolva) y descarga (con compuerta), así como los sistemas de transmisión mecánica (usando motor eléctrico, caja reductora, ejes y ruedas de fricción) y de soporte del conjunto. La planta se probó usando un protocolo de operación creado para el manual de usuario y se realizó el seguimiento de la producción de tres lotes de compost con diferentes composiciones de materia orgánica. Se logró establecer que el rendimiento de la planta es de aproximadamente 300 kg de compost por cada 500 kg de residuos y que el producto obtenido cuenta con las características físicas (olor, color, textura y humedad (32,6%)) y químicas (carbono orgánico (15,1%), nitrógeno orgánico (1,2%) y nitrógeno total (1,4%)) de un mejorador orgánico de suelo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físcomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Diego Luis Franco Jácome. Ingeniero Mecánico PhD

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Abstract

Title: Design and construction of a plant to produce hot compost from household and agricultural waste.*

Author: Willie Martin Salazar Villamizar**

Key words: Composting, in vessel composting, hot composting, organic waste.

Description: As a proposal to take advantage of organic waste and contribute to the quality of farmland, a plant was designed and built to obtain hot compost that, using mechanical systems, facilitates production with a minimum expenditure of energy. The system consists mainly of a rotating drum of 1 meter in diameter and 2.4 meters long that allows a process with high oxygen rates for rapid decomposition, loading areas (with hopper) and unloading (with gate), as well as mechanical transmission systems (using electric motor, gearbox, axles, and friction wheels) and support of the set. The plant was tested using an operation protocol created for the user's manual and the production of three batches of compost with different compositions of organic matter was monitored. It was established that the plant yield is approximately 300 kg of compost per 500 kg of waste and that the product obtained has the physical (odor, color, texture, and humidity (32.6%)) and chemical (organic carbon (15.1%), organic nitrogen (1.2%) and total nitrogen (1.4%)) characteristics of an organic soil improver.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering, School of Mechanical Engineering. Director: Diego Luis Franco Jácome. PhD Mechanical Engineer.

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Introducción

La sostenibilidad de los procesos agrícolas y el mantenimiento e incremento de la fertilidad del suelo es uno de los retos actuales de la sociedad, por lo que mejorar y difundir tecnologías agrícolas en todas las escalas es necesario. En la 35ª conferencia regional de la organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO)¹ los estados miembros ratificaron que para avanzar hacia el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible es necesario impulsar una agricultura sustentable y que además de ser resiliente al cambio climático contribuya a erradicar el hambre y la pobreza rural.

Según la FAO un tercio de los alimentos producidos para el consumo humano se pierde o desaprovecha, lo que se traduce en unos 1300 millones de toneladas anuales a nivel mundial (Gustavsson et al., 2011). La pérdida de alimentos genera grandes problemas más allá de la obiedad, pues implica mal uso de la mano de obra, del agua, de la energía, la tierra y todos los recursos que se usaron en su producción.

Después de la segunda guerra mundial la concentración creciente de la población en zonas urbanas y el cambio en los modelos de producción resultó en un incremento significativo del uso de productos químicos plaguicidas y fertilizantes en la agricultura, práctica que impacta negativamente a mediano y largo plazo la calidad del suelo y, por lo tanto, de los productos cultivados en este (Cardona et al., 2016).

La provincia de García Rovira en Santander es una región que basa su economía en la agricultura, con más de 39 mil hectáreas sembradas y distribuidas en productos agroindustriales, tubérculos, cereales, frutales y flores (Cámara de comercio de Bucaramanga, 2018). Sin embargo, a causa de las malas prácticas o falta de capacitación técnica muchos de sus suelos han perdido las

¹ Food and Agricultural Organization.

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

características que les atribuían su capacidad productiva; en comparación con las demás provincias de Santander, García Rovira tiene la menor producción y diversificación agrícola, muestra de ello son los cultivos frutales como la granadilla que ocupan solo un 7,3% de la producción regional aun teniendo las condiciones climáticas adecuadas y el espacio para cultivarlas (Cámara de comercio de Bucaramanga, 2018). Muchas veces al intentar adoptar nuevos cultivos sobre suelos que han sido usados para la producción intensiva con fertilizantes químicos, insumos como cal y materia orgánica “cruda” (como la gallinaza sin tratar) dan como resultado producciones bajas con plantas que no están en óptimas condiciones.

La adición de materia orgánica segura al suelo (e.g. compost), complementada con el uso racional de fertilizantes químicos, es una alternativa sostenible que podría restaurar las propiedades del suelo. El compostaje es un proceso biológico natural en el cual microorganismos (*actinomicetos*) descomponen residuos orgánicos, transformándolos en un sustrato rico en nutrientes aprovechables por plantas y otros organismos, y que constituye una forma eficaz de dar uso a los desperdicios (Cogger et al., 2001).

El compostaje ya ha sido abordado como alternativa en la agricultura regional, sin embargo, la baja tecnificación ha generado que su uso no sea generalizado entre los campesinos, quienes manifiestan que el tiempo de compostaje y el trabajo físico implicado en el proceso muchas veces son injustificados. Esto se debe a que por dificultades en el mantenimiento de las condiciones de las pilas de compost (temperatura, humedad, contenido de carbono/nitrógeno y mayoritariamente volteo y aireación) la producción sea lenta, tenga bajo rendimiento o el producto no tenga las mejores propiedades.

El compostaje en vaso es un proceso en el que mediante dispositivos (usualmente un tambor rotativo) es posible acelerar el proceso de descomposición, alimentando el producto con

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

altas cantidades de oxígeno. Dependiendo del fabricante los equipos pueden variar en cuanto a materiales de construcción, tipos de accionamiento mecánico, capacidades de producción, grado de sofisticación y control. Sin embargo, todos estos dispositivos permiten obtener compost con un mínimo gasto de energía y de una forma fácil para el usuario operador (U.S. Department of Agriculture (USDA), 2013)

El presente proyecto busca construir un compostador mecánico de tambor rotativo que permita procesar 500 kg de residuos orgánicos vegetales y animales provenientes de actividades pecuarias y domésticas. Con lo anterior se busca obtener un producto adecuado para aplicar a las tierras de cultivo, que no requiera mucho esfuerzo o tiempo de parte del operario y haga un uso racional de la energía y los recursos que de otra forma serían desperdiciados, contribuyendo así al desarrollo del campo, especialmente en regiones donde aún prevalece la poca tecnificación de sus procesos.

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Construir una planta para la producción de compost a partir de residuos domésticos y agrícolas contribuyendo así al desarrollo de la agroindustria de García Rovira y promoviendo el aprovechamiento racional de la energía y la conservación de los recursos naturales en consecuencia con la misión de la escuela de ingeniería mecánica de la UIS.

1.2. Objetivos Específicos

Construir una planta en un área de 40 metros cuadrados que permita el compostaje de 500 kilogramos de materia orgánica (residuos domésticos, pecuarios y agrícolas) por mes basado en la acción de microorganismos termófilos. Para lo cual se deberá:

- Diseñar un compostador de tambor rotativo que garantice el volteo, la aireación y el monitoreo de la temperatura del sustrato.
- Establecer un protocolo de operación del proceso de producción para obtener compost caliente con características aptas para su uso.
- Determinar el rendimiento del compost producido mediante un balance de masa del proceso.
- Evaluar las características físicas: olor, color, textura y humedad ($< 60\%$); y químicas: contenido de carbono orgánico ($> 15\%$), nitrógeno orgánico ($> 2\%$) y nitrógeno total ($> 2,5\%$) del producto final obtenido.

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

2. Marco teórico

2.1. Materia orgánica.

Según Labrador Moreno et al (1993) se entiende por materia orgánica "la totalidad de los compuestos de origen orgánico que se superponen al suelo mineral -en los medios naturales- o se incorporan a él -en los medios cultivados-, y que, bajo la acción de factores edáficos, climáticos y biológicos, son sometidos a un constante proceso de transformación".

Entre la materia orgánica de origen vegetal se encuentran los residuos de cosecha que, en forma de hojas, tallos o raíces se integran al suelo y permiten conservar el equilibrio húmico del mismo de una forma natural y económica (García-Serrano Jiménez et al., 2010)

Los residuos animales más comunes como abonos orgánicos son subproductos de actividades pecuarias como el estiércol, el *lisser*, gallinaza entre otros. El estiércol es la mezcla entre los excrementos de los animales (sólidos y líquidos) y las materias vegetales en el suelo del establo; su poder húmico puede alcanzar el 10%, es decir de 100 kg de estiércoles 10 se convertirán en humus (García-Serrano Jiménez et al., 2010).

El estiércol semilíquido o "*lisser*" es una mezcla de deyecciones animales que se disuelven en las aguas de limpieza de las zonas de recogida y que a pesar de su potencial húmico reducido aporta nutrientes como el nitrógeno, potasio y fósforo (García-Serrano Jiménez et al., 2010).

Por su parte, la gallinaza, un producto constituido por excrementos de aves aporta diversos nutrientes además un 20% de materia orgánica y cantidades considerables de calcio, nitrógeno y materia seca. Existen otros productos animales, por ejemplo, la palomina (excremento de paloma) que aporta un contenido de materia orgánica de 30%. (García-Serrano Jiménez et al., 2010).

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

2.1.1. Humus.

El humus hace referencia a la porción de la materia orgánica del suelo que está humidificada y que posee las características de un coloide, incluyendo residuos orgánicos en etapas avanzadas de descomposición y productos de la síntesis de microorganismos transformados por vía biológica. Entre los componentes más específicos de humus (sustancias húmicas) están los ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, ácidos himatomelánicos y huminas. (Labrador Moreno et al., 1993).

2.2. Abono

El abono o fertilizante se define según el glosario de la Biblioteca Agrícola Nacional de EEUU (2013) como “Cualquier material orgánico o inorgánico de origen natural o sintético que se agrega al suelo para proporcionarle nutrientes, incluyendo nitrógeno, fósforo y potasio, necesarios para mantener el crecimiento de las plantas”.

La procedencia de los nutrientes permite clasificar los abonos en abonos orgánicos e inorgánicos. Los abonos inorgánicos o minerales son productos obtenidos industrialmente mediante tratamientos físicos o químicos y cuyos nutrientes constitutivos se presentan en forma mineral (Ministerio de la presidencia española, 2013).

Los abonos minerales aportan la mayoría de los nutrientes requeridos por los cultivos. Por su parte, los abonos orgánicos, aunque también aportan nutrientes al suelo actúan mejorando las propiedades fisicoquímicas del suelo y la actividad biológica (García-Serrano Jiménez et al., 2010).

2.2.1. Abono orgánico

El abono orgánico es el producto de la descomposición natural mediante microorganismos de la materia orgánica. El proceso de descomposición de los residuos orgánicos suele ser

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

controlado y se puede ser aerobio o anaerobio resultando en un material estable con un alto contenido de nitrógeno mineral y otros elementos nutritivos para las plantas (Ramos Agüero & Terry Alfonso, 2014). Los abonos orgánicos poseen ciertas propiedades físicas, químicas y biológicas que tienen efectos benéficos sobre el suelo, ver Tabla 1. (Cervantes Flores, 2010).

Tabla 1

Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades del suelo

| Propiedades del suelo | Efectos de la materia orgánica humificada. |
|--|---|
| FÍSICAS | Aumenta la capacidad calorífica. |
| | Suelos más calientes en primavera. |
| | Reduce las oscilaciones térmicas |
| | Agrega las partículas elementales. |
| | Aligera suelos arcillosos y cohesiona arenosos. |
| | Aumenta la estabilidad estructural. |
| | Aumenta la penetrabilidad hídrica y gaseosa. |
| | Facilita el drenaje y las labores. |
| | Reduce la erosión. |
| | Aumenta la capacidad de retención hídrica. |
| QUÍMICAS | Reduce la evaporación. |
| | Mejora el balance hídrico. |
| | Aumento del poder tampón. |
| | Regula el pH. |
| | Aumenta la capacidad de cambio catiónico. |
| | Mantiene los cationes en forma cambiante. |
| BIOLÓGICAS | Forma fosfohumatos. |
| | Forma quelatos. |
| | Mantiene las reservas de nitrógeno. |
| | Favorece la respiración radicular. |
| | Favorece la germinación de las semillas. |
| | Favorece el estado sanitario de organismos subterráneos. |
| | Regula la actividad microbiana. |
| | Fuente de energía para microorganismos heterótrofos. |
| | El CO ₂ desprendido favorece solubilización mineral. |
| | Contrarresta el efecto de algunas toxinas. |
| Modifica la actividad enzimática. | |
| Activa la rizogénesis. | |
| Mejora la nutrición mineral de los cultivos. | |

Nota: Tomado Labrador Moreno et al., 1993.

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

2.3. Compost

El compost o composta es definido por la FAO (Román et al., 2013) como la mezcla de materia orgánica que luego de su descomposición en condiciones aeróbicas se emplea para mejorar la estructura del suelo y proporcionar nutrientes. El proceso que permite producir compost se conoce como compostaje. No toda la materia orgánica descompuesta se puede considerar composta pues la utilización de materiales que no hayan cumplido su ciclo de compostaje puede traer diversas consecuencias como la fitotoxicidad por generación de amoníaco, el “hambre de nitrógeno”² por desequilibrio en la relación nitrógeno/carbono y la reducción del oxígeno radicular (Román et al., 2013).

2.3.1. Tipos de compostaje

Dependiendo de cómo se manipule el proceso de compostaje se pueden distinguir tres métodos principales para obtener el fertilizante: el compost frío o lento, el compost caliente y el vermicompost (Cogger et al., 2001; L’AGRET. Cultura de Terra, 2013).

En el compostaje frío que es el método convencional y que demanda un menor control de parámetros, basta con armar la pila en la que los microorganismos descompondrán los residuos con el mínimo volteo. Sin embargo, este es un proceso bastante largo (6 a 12 meses), poco eficaz para destruir semillas de malas hierbas y agentes patógenos, con poca uniformidad en el tamaño de partícula y que adicionalmente puede resultar en una pérdida considerable de volumen en el producto. (Cogger et al., 2001; L’AGRET. Cultura de Terra, 2013).

El compostaje caliente o rápido es un método que involucra la manipulación del proceso y que mediante el equilibrio entre alimento, aire y humedad favorece a los organismos termofílicos,

² El “hambre de nitrógeno” ocurre cuando se aplican materiales con demasiado carbono al suelo, esto hace que los microorganismos presentes en este consuman rápidamente las reservas de nitrógeno para poder degradar el carbono aportado. (Román et al., 2013)

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

matando semillas de malas hierbas y microorganismos patógenos, sin destruir los hongos formadores de micorrizas (*Mycorrhizae*) que son beneficiosos para la absorción de nutrientes a través de las raíces. El producto resultante del compostaje caliente se obtiene mucho más rápido (a partir de 18 días), tiene un tamaño uniforme y experimenta una menor pérdida de volumen respecto a las materias primas (Cogger et al., 2001).

El llamado vermi-compost o compost de lombrices es un proceso en el que lombrices (ayudadas por microorganismos) son las que degradan la materia orgánica; en este proceso compuestos insolubles son solubilizados quedando a disposición de la planta cuando el producto es aplicado, otros compuestos como la celulosa son degradados a formas más simples de carbono por las bacterias presentes en el aparato digestivo de la lombriz (Román et al., 2013)

2.3.1.1. Compost caliente. El compostaje caliente también llamado método de compostaje de Berkeley o compost rápido es un método de composta desarrollado por Robert D. Rabbe, un profesor de patología vegetal de la Universidad de California en Berkeley, en el que el producto obtenido presenta un mayor rendimiento que el método tradicional pues experimenta una mínima pérdida de volumen y es producido en menos de un mes (Atchley, 2013)

Un importante factor del proceso de compostaje caliente, que da origen a su nombre, es que la pila se mantiene durante una parte del proceso a altas temperaturas (entre 60 y 70°C) lo que favorece el desarrollo de los organismos termófilos. Para obtener un compost de rápida producción es necesario triturar la materia orgánica más grande, pues esto aumenta el área superficial con la que tienen contacto los microorganismos además de permitir una distribución más uniforme del aire y la humedad (Salmon, 2012).

Otro de los factores característicos del método de compostaje rápido y que lo distinguen del método convencional de compostaje, es la alta frecuencia del volteo de la pila. De esta manera

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

se evita un calentamiento excesivo ($> 71,1^{\circ}\text{C}$), y se garantiza una mejor aireación a la pila, contribuyendo así a mantener activos los microorganismos descomponedores termófilos (Raabe, 1991). Si la frecuencia del volteo disminuye, el proceso de compostaje se hará más largo, pues como resultado de la pérdida de calor en los alrededores de la pila solo el centro de esta se mantiene a temperatura óptima. Girar el material de afuera hacia adentro asegura que todo esté a la temperatura óptima en algún momento del proceso por lo que es conveniente tener dos contenedores (que además retengan el calor eficientemente) y así pasar la pila de uno a otro (Raabe, 1991).

La descomposición rápida puede ser detectada por la presencia de un olor característico, la presencia de hongos blancos y el cambio de color a un marrón oscuro similar a tierra de bosque ver Figura 1. El calor que se hace visible en forma de vapor de agua durante los volteos también es un excelente indicador del éxito del proceso (Raabe, 1991).

Figura 1

Aspecto característico de compost maduro



Nota: Tomado de «Guía de Compostaje», 2019.

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

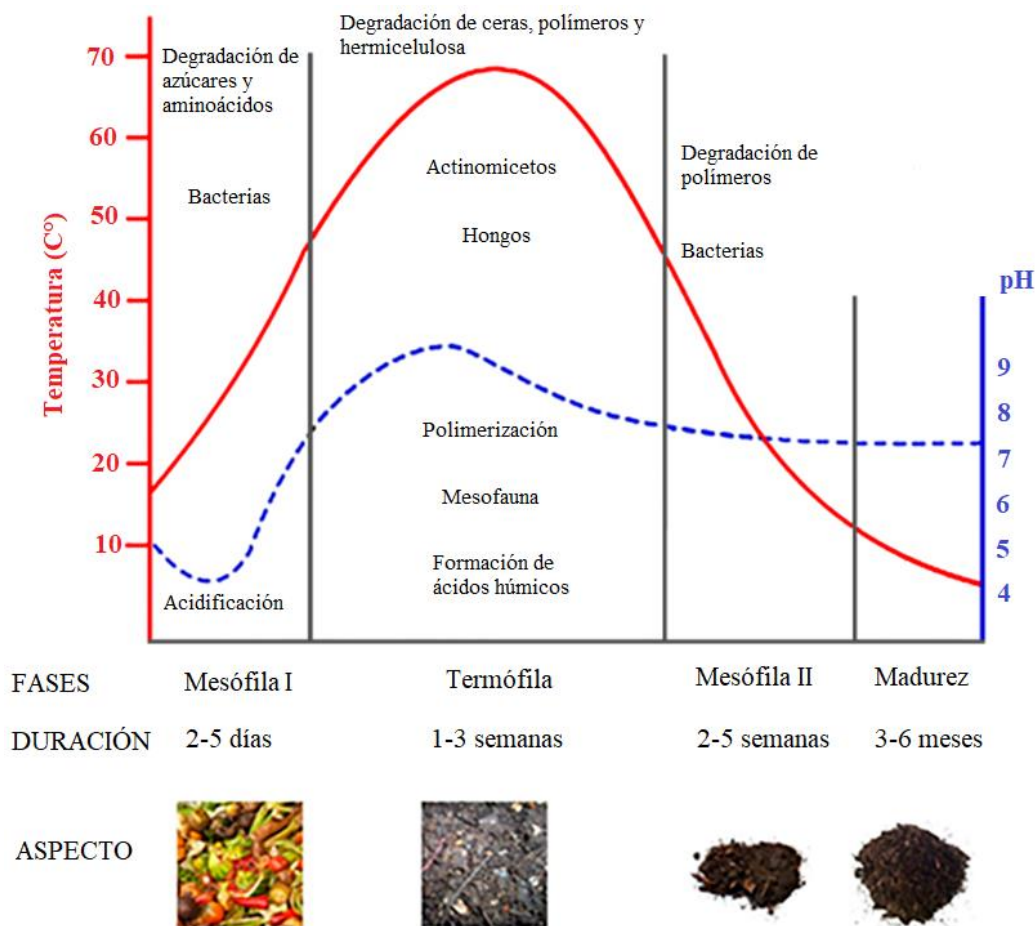
2.3.2. Etapas del compostaje

El proceso de compostaje se puede concebir como una serie de sucesos metabólicos complejos en las que los microorganismos aprovechan el nitrógeno y carbono para producir su propia biomasa generando un sustrato sólido en presencia de oxígeno. Al descomponer la materia orgánica los microorganismos generan calor medible (variación de la temperatura en el tiempo) permitiendo así distinguir 3 etapas (Román et al., 2013).

En la Figura 2 se muestra cómo se desarrolla el proceso de compostaje y las etapas que lo constituyen. Cada etapa caracterizada por comportamientos predecibles del pH y la temperatura.

Figura 2

Comportamiento de la temperatura y pH durante las fases del proceso de compostaje.



Nota: Adaptado de «Guía de Compostaje», 2019

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

2.3.2.1. Fase mesófila I. El proceso de compostaje empieza con la denominada fase mesófila (2 a 5 días), en esta, se parte de un material a temperatura ambiente que en cuestión de días o incluso horas alcanza una temperatura de 45°C, esto ocurre porque los microorganismos mesófilos (que se desarrollan entre los 20 y 45° C) utilizan las fuentes sencillas de nitrógeno y carbono como sustratos generando calor residual. (Román et al., 2013).

2.3.2.2. Fase termófila o de higienización. Cuando el material alcanza temperaturas superiores a 45° y los mesófilos son reemplazados por microorganismos termófilos capaces de soportar las nuevas condiciones, estos últimos degradan las fuentes de carbono complejo como la celulosa y la lignina (componentes principales de las paredes celulares vegetales). En la fase termófila aparecen bacterias productoras de esporas y actinobacterias capaces de descomponer las ceras, hemicelulosas y otras formas de carbono complejo a partir del momento en que el material alcanza los 60°C. La fase termófila también se denomina de higienización puesto que en esta fase se destruyen bacterias y contaminantes de origen fecal como *Escherichia coli* y *Salmonella* y se contribuye a neutralizar las esporas de hongos fitopatógenos y las semillas de maleza (Temperatura > 55°C). (Román et al., 2013).

2.3.2.3. Fase de enfriamiento o mesófila II. En esta fase, que puede tardar varias semanas y llega a confundirse con la fase de maduración, ya se han agotado las fuentes de carbono y las de nitrógeno, lo que ocasiona que la temperatura descienda hasta 40-45° reactivando los organismos mesófilos. Sin embargo, continua la degradación de polímeros como celulosa y aparecen variedad de hongos macroscópicos (Román et al., 2013).

2.3.2.4. Fase de maduración. La fase de maduración es un periodo de varios meses a la temperatura ambiente en que se dan una serie de reacciones secundarias sobre los compuestos

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

carbonados (condensación y polimerización) que termina con la formación de ácidos húmicos y fúlvicos (Román et al., 2013).

2.3.3. *Materias primas de compostaje*

La mayoría de los materiales orgánicos son compostables, sin embargo, existen ciertos materiales que no se recomienda usar y otros que incluso llegan a estar prohibidos por los entes regulatorios de cada país (Román et al., 2013).

Entre los materiales que se pueden compostar se encuentran:

- Restos de cosechas o del jardín, ramas de poda (troceadas), hojas de árboles y arbustos, heno, paja y césped o pasto (de preferencia en capas finas y previamente secado).
- Estiércol de ganado vacuno, ovino, caprino o porcino, y sus camas de corral.
- Restos orgánicos de cocina (cascaras de frutas y hortalizas), alimentos que hayan caducados, cáscaras de huevo (trituras), restos de café, té e infusiones y tubérculos estropeados, podridos o germinados.
- Aceites y grasas comestibles (muy espaciadas y en cantidades pequeñas).
- Virutas de serrín (capas finas).
- Restos de papel y cartón, servilletas y pañuelos de papel (no impresos ni coloreados, ni plastificados o mezclados con plástico).
- Cortes de cabello (no tinturado), residuos de esquilado de animales.

No se deben incluir materiales tóxicos, inertes contaminantes o nocivos, entre ellos:

- Químicos, sintéticos, solventes, hidrocarburos o pinturas.
- Materiales que no sean biodegradables como plástico, vidrio y metal.
- Aglomerados de madera ni su viruta o serrín.

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

- Tabaco, por su contenido de nicotina que es un biocida y otros múltiples tóxicos.
- Detergentes, clorados, antibióticos y residuos de medicinas.

Existen materiales orgánicos que, aunque son aptos para hacer parte del proceso de descomposición son potenciales propagadores de enfermedades por lo que tampoco son recomendables. Un ejemplo de ello son la carne, hueso y los despojos de mamíferos, que mediante la resolución 991 de 2001 emitida por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) fueron prohibidos en Colombia como materia prima y componentes de abonos orgánicos. (Instituto Colombiano Agropecuario, 2001).

2.3.4. Parámetros que influyen en el compostaje

Debido a que el compostaje es un proceso biológico realizado por microorganismos es necesario tener en cuenta los parámetros que afectan su crecimiento y reproducción. A pesar que externamente el proceso depende de innumerables variables, se pueden distinguir dos tipos principales de parámetros para los que existe un rango óptimo: los parámetros relativos a la naturaleza del sustrato y los de seguimiento (Bueno Márquez et al., 2008; Román et al., 2013).

2.3.4.1. Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato. Estos parámetros deben ser monitoreados especialmente al inicio del proceso pues varían según la naturaleza del material que se agregue a la mezcla para el compost. (Bueno Márquez et al., 2008; Román et al., 2013).

- Relación Carbono/Nitrógeno:

La clave para conseguir un abono de calidad en corto tiempo es lograr una relación carbono/nitrógeno de 30:1, esto porque las bacterias que producen el compost usan alrededor de 30 unidades de carbono (fuente de energía) por cada unidad de nitrógeno (sustrato para proteínas) (Atchley, 2013; L'AGRET. Cultura de Terra, 2013). Encontrar la dosificación correcta de materia orgánica puede ser una tarea difícil, una vez que las concentraciones de carbono y nitrógeno varían

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

según el tipo de residuo, ver Tabla 2. La dosificación ideal de materia orgánica se puede encontrar cuando se obtiene una elevación rápida de temperatura ($>40^{\circ}$) en los primeras 24 a 48 horas (Atchley, 2013; L'AGRET. Cultura de Terra, 2013).

El material verde o húmedo (recortes de césped, estiércol, alfalfa, poda vegetal, cascaras de frutas y vegetales, y hojas verdes) es considerado regularmente como aporte de nitrógeno mientras el material “marrón” o seco (serrín, paja y césped seco, cartón, ramas y otros materiales leñosos o fibrosos) es por su parte el aporte típico de carbono.(Atchley, 2013; L'AGRET. Cultura de Terra, 2013).

Tabla 2

Relación carbono nitrógeno de algunos materiales compostables

| Materiales Verdes | Relación C:N | Materiales Secos | Relación C:N |
|--------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| Poda de jardín | 30/1 | Astillas de Madera | 400/1 |
| Mala hierba | 30/1 | Cartón | 350/1 |
| Hierba verde | 25/1 | Serrín | 325/1 |
| Sobras vegetales | 25/1 | Periódico | 175/1 |
| Café molido | 20/1 | Agujas de pino | 80/1 |
| Residuos alimenticios | 20/1 | Tallos de Maíz | 75/1 |
| Pasto cortado | 20/1 | Paja | 75/1 |
| Algas | 19/1 | Hojas Secas | 60/1 |
| Estiércol de caballo | 18/1 | Cáscaras de maní | 35/1 |
| Estiércol de vaca | 16/1 | Cenizas de madera | 25/1 |
| Estiércol de pollo | 12/1 | | |
| Orina | 1/1 | | |

Nota: Tomado de Atchley, 2013; L'AGRET. Cultura de Terra, 2013

- Tamaño de la partícula:

El tamaño de las partículas está relacionado con la actividad microbiana, pues un tamaño de partícula más pequeño permite mejor acceso al sustrato debido a que aumenta el área específica.

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

La densidad del producto, y por ende la aireación de la pila o la retención de humedad, están estrechamente relacionados con el tamaño de la partícula (Bueno Márquez et al., 2008). Según la FAO (Román et al., 2013), el tamaño ideal de los materiales a compostar es entre 5-20 cm. El método de Berkeley para compost caliente sugiere materiales que tengan un tamaño entre 2 y 7 centímetros, los materiales blandos no requerirán ser triturados tan pequeños pues se pudren con facilidad, sin embargo, los materiales leñosos sí necesitan reducir su tamaño por lo que es recomendable pasarlos por una trituradora o molino (Raabe, 1991)

- Tamaño de la pila:

Existen diversos recipientes en los que se puede compostar, entre ellos se encuentran cajas o composteras abiertas o cerradas e incluso pilas sobre el suelo. En caso de ser compostaje en pilas, la altura de la misma afecta directamente al contenido de humedad, la aireación y la temperatura. Pilas pequeñas, hacen que se pierda rápidamente el calor generado por los microorganismos. El tamaño de una pila está dado por la cantidad de material a compostar y el área disponible para realizar el proceso. Normalmente, se hacen pilas de entre 1,5 y 2 metros de alto para facilitar las tareas de volteo, y de un ancho de entre 1,5 y 3 metros (Román et al., 2013). Al realizar compost caliente el tamaño de la pila es un factor a tener en cuenta para mantener la temperatura ideal de la misma. El método de Berkeley sugiere unas dimensiones de mínimo 90x90x90 centímetros pues si se hacen pilas de menos de 80 centímetros el proceso no ocurrirá tan rápido (Raabe, 1991).

- Nutrientes:

La composición del sustrato es su característica más importante, la utilidad como materia compostable de los residuos orgánicos está en función de cuáles y cuantos nutrientes posean. Dado que los microorganismos solo pueden asimilar y aprovechar compuestos simples las moléculas más complejas se rompen en unas más sencillas. Entre los macronutrientes principales de la materia

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

prima de un fertilizante destacan el carbono, el fósforo y el nitrógeno pues todos ellos son fundamentales para el desarrollo microbiano (Bueno Márquez et al., 2008).

- Materia orgánica:

Como principal factor para determinar la calidad agronómica del compost encontramos la cantidad de materia orgánica; durante el proceso de compostaje la materia orgánica tiende a disminuir debido a la mineralización y pérdida de carbono en forma de dióxido de carbono. La disminución de la materia orgánica puede llegar a representar hasta el 20% de la masa compostada y se producen en dos etapas. La primera etapa presenta un rápido descenso de los carbohidratos cuando largas cadenas carbonatadas se transforman en formas más simples que dan origen a compuestos húmicos. La segunda etapa está caracterizada por la descomposición de compuestos más resistentes como ligninas. (Esta transformación no finaliza durante el tiempo de compostaje) (Bueno Márquez et al., 2008).

2.3.4.3. Parámetros de seguimiento. Los parámetros que han de ser medidos y seguidos durante todo el proceso deben ser controlados para que sus valores se encuentren dentro de los rangos considerados correctos en cada parte del proceso (Bueno Márquez et al., 2008; Román et al., 2013).

- Temperatura:

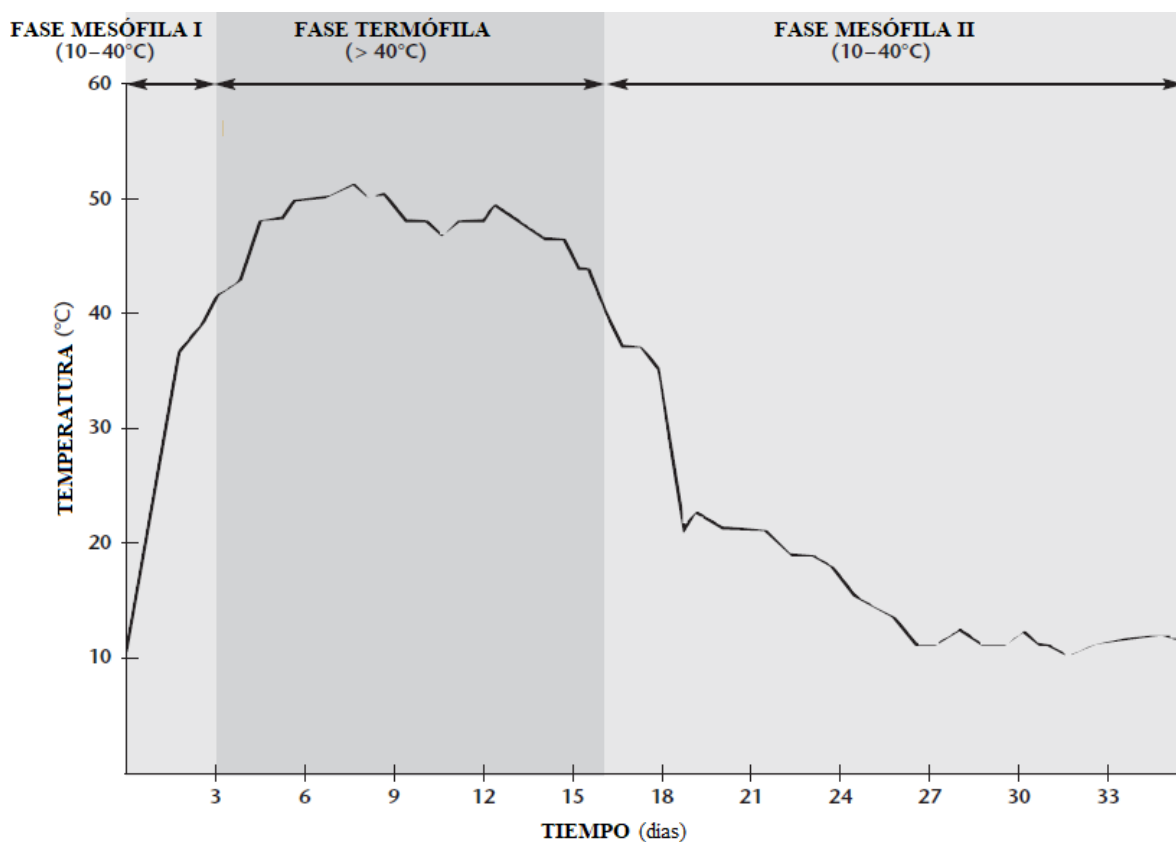
La temperatura es el mejor indicador de la actividad microbiana. El seguimiento de este parámetro representa muy bien el proceso de compostaje pues pequeñas variaciones en la temperatura tienen respuestas en la actividad biológica mayores que las provocadas por otras variables. (Bueno Márquez et al., 2008). En la Figura 3 se puede apreciar un perfil de temperatura característico de un proceso de compostaje termófilo.

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

El compostaje inicia a temperatura ambiente y puede subir rápidamente hasta los 65°C, esto ocurre sin necesidad de ninguna actividad antrópica (calentamiento externo). Aunque al madurar el compost alcanza nuevamente la temperatura ambiente, es deseable que la temperatura no descienda rápidamente, ya que a mayor temperatura alcanzada y mayor tiempo en el que esa temperatura se mantenga, habrá una mayor velocidad de descomposición y se obtendrá un producto más higiénico (Atchley, 2013; Román et al., 2013).

Figura 3

Perfil de temperatura característico de proceso de compostaje.



Nota: Adaptado de Trautmann & Krasny, 1997.

En una pila de compost caliente es necesario controlar la temperatura pues la fase termófila es la que propicia la rápida degradación de la materia y mantenerla entre los 60° y 70°C es

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

fundamental. (Raabe, 1991) Durante el compostaje no se esperan temperaturas que estén por debajo de 35°C ni por encima de 70°C. Temperaturas bajas pueden ser causadas por falta de materia, de humedad o una mala relación C:N, mientras que temperaturas altas pueden deberse a ventilación insuficiente (Román et al., 2013).

- Humedad:

La presencia de agua es imprescindible para los organismos que realizan la descomposición de la materia orgánica, ya que la usan como medio de transporte de nutrientes y elementos energéticos a través de su membrana celular (Román et al., 2013). La humedad óptima del compostaje se sitúa alrededor del 55%, aunque varía dependiendo del material y el tamaño de las partículas, así como del contenedor usado. Una disminución de la humedad por debajo de 45% reduce la actividad microbiana impidiendo que se completen las fases de degradación y obteniendo un producto biológicamente inestable, mientras que un aumento por encima del 60% del mismo parámetro provocaría que el agua sature los poros e impide una correcta oxigenación. Si se tienen sustratos compuestos por serrín, paja y hojas secas es necesario un mayor riego que si son materiales húmedos como residuos de cocina, hortalizas, frutas o cortes de césped (Román et al., 2013).

- pH:

El pH es un parámetro que depende de la materia orgánica a compostar y que debe regularse entre 4.5 y 8.5 a lo largo del proceso. Inicialmente se presenta una acidificación causada por la formación de ácidos orgánicos y posteriormente se alcaliniza cuando el amonio se convierte en amoniaco en la fase termófila. Al final del proceso los valores del pH deberían estabilizarse cercanos al neutro. La presencia y supervivencia de los organismos depende del, por ejemplo, la mayor actividad fúngica se produce con valores de pH entre de 5.5 a 8, mientras que entre 6 y 7.5

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

habrá una mayor actividad bacteriana. Niveles de pH menores o igual 4.5 se deben principalmente a exceso de ácidos orgánicos y superiores a 8.5 a exceso de nitrógeno (Román et al., 2013).

- Aireación:

El compostaje es un proceso aerobio por lo que la aireación es fundamental para permitir la respiración de los microorganismos que a su vez liberan dióxido de carbono; además airear evita que el material se compacte o presente excesos de humedad (encharcamiento). El requerimiento de oxígeno varía a lo largo del proceso y llega a registrar su mayor demanda en la fase termófila. En el método de compostaje caliente la fase termófila es la principal luego la aireación en forma de volteos de la pila es indispensable (cada 2 o 3 días). Una baja aireación reduce la saturación de oxígeno (que no debe estar por debajo del 5%), pues esto genera una baja evaporación de agua, una alta humedad y un ambiente anaerobio. Tampoco es recomendable una elevada aireación, pues causa excesiva saturación de oxígeno (por encima del 10%), un descenso de la temperatura y una rápida evaporación del agua lo que conlleva a una deshidratación de la mezcla y detenimiento del proceso biológico (Román et al., 2013).

Durante el compostaje la respiración de los microorganismos libera el CO₂ haciendo que la concentración varíe constantemente con la actividad microbiana y con la materia prima del compost. Se pueden llegar a liberar 2 o 3 kilos de CO₂ diarios por tonelada de compost, que representan un bajo impacto ambiental al ser asimilados nuevamente por las plantas para realizar fotosíntesis (Román et al., 2013).

La aireación como variable de operación es de alta relevancia pues incide en los costos de operación (por la actividad de volteo y suministro de aire), estando en un 32-46% de los costos totales; la medida de concentración del oxígeno requiere equipos costosos y especializados, aunque

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

esta también se puede realizar indirectamente con las medidas de temperatura y de humedad (Bueno Márquez et al., 2008).

Durante la etapa de maduración del compost no se debe aportar oxígeno adicional ya que esto podría causar que se consuman los compuestos húmicos que se han formado y que termine mineralizándose (Bueno Márquez et al., 2008).

2.3.5. *Compostaje en vaso.*

Cuando el compostaje se realiza en un recinto cerrado como un tambor de gran diámetro se llama compostaje en vaso; el abono se voltea, gira o airea de forma forzada, lo que acelera la descomposición por las elevadas tasas de oxígeno; esto genera compost de una forma más rápida que en pila o camas. Sin embargo, se requiere un tiempo de descomposición adicional (maduración) en pila estática lo que garantiza el mejor abono. (U.S. Department of Agriculture (USDA), 2013)

En el mercado se encuentra una amplia oferta de compostadores en vaso con diversos niveles de sofisticación, con diversas capacidades y sistemas que garantizan la ejecución y control del proceso de compostaje. El diseño más común consta de un tambor rotatorio horizontal sobre rodillos con paletas mezcladoras en su interior, ver Figura 4. Después de revisar la literatura se determinan algunas características principales de estos dispositivos, como lo son: tipo de producción, capacidad, accionamiento mecánico, mecanismo de aireación, equipamiento estándar y sistema de control, ver Tabla 3.

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Figura 4

Compostador rotatorio horizontal.



Nota: Tomado de Rotary Composters LLC, 2019.

PLANTA PRODUCTORA DE COMPOST DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Tabla 3*Lista de dispositivos compostadores comerciales y sus características.*

| Dispositivo | Producción | Capacidad | Accionamiento | Aireación | Equipamiento | Control |
|--------------------|-----------------------|--------------------------------|---|-----------------------------|--|--|
| Volcomp | Por lotes | 848-106877kg (lote) | Motor hidráulico y cadena o fricción. | Forzada con ventiladores | Termómetro, Sensor de humedad, PLC (opcional) | Manual o con autómatas programable |
| Rotorbuey | Continua | 90-250kg (día) | Motor eléctrico y reductor de engranajes | Natural pasiva | Termómetro | Manual |
| Rotoposter | Continua | 680-11000kg (semana) | Motor hidráulico y engranaje de trinquete | Forzada con ventiladores | Termómetro y PLC | Configuraciones varias con PLC (volteo, aire, descarga) |
| Omnivore | Por lotes Continua | 200kg (lote) 25-340kg (día) | Motor eléctrico, reductor y corona. | Natural pasiva | Termómetro | Manual o volteos con temporizador. |
| Biovator | Continua | 27kg-226kg (día) | Motor eléctrico, reductor y cadena. | Natural pasiva | 2 termómetros PLC (opcional) | Temporizador o control continuo con PLC |
| Ecodrum | Continua | 168-505kg (día) | Motor eléctrico, cadena y rodillos de fricción | Forzada con ventiladores | Sensor de temperatura PLC (opcional) | Manual o control de aire con PLC |

Nota: Adaptado de Basol technologies, 2016; Industrias Montecor, s. f.; Rotary Composters LLC, 2019; Omnivore Composter, 2021; Indiv, s. f.; Ecodrum, 2014; U.S. Department of Agriculture (USDA), 2013.

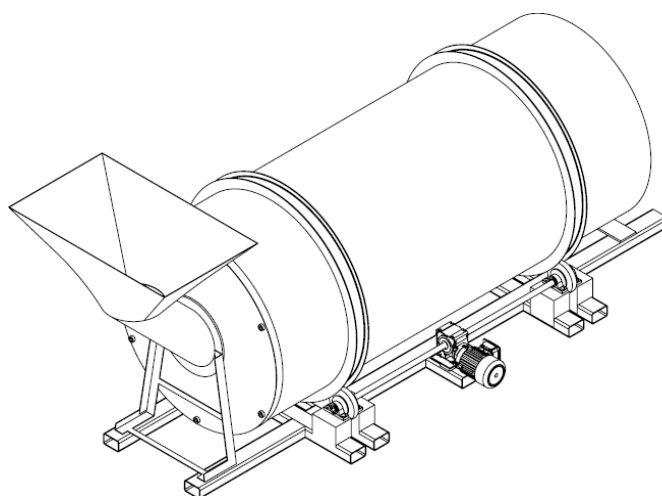
3. Método

3.1. Diseño Mecánico.

El diseño mecánico parte de observar los dispositivos compostadores comerciales (Tabla 3). En general constan de un tambor rotatorio horizontal con paletas mezcladoras en las paredes que se mueve sobre rodillos, siendo el tipo de accionamiento mecánico lo que los diferencia principalmente. Para este proyecto se toma un diseño conceptual de tambor horizontal accionado por motor eléctrico y transmisión por ruedas de fricción, ver Figura 5.

Figura 5

Representación del diseño conceptual.



3.1.1. Dimensiones.

Para definir las dimensiones del tambor cilíndrico hay que basarse en el requerimiento de capacidad. Como se estableció en los objetivos, el tambor debe recibir 500kg de residuos orgánicos. Por lo tanto, el volumen que ocuparán estos residuos lo relacionamos con la masa mediante la densidad bulk³ del material.

³ La densidad bulk es la relación entre la masa y el volumen macroscópico que ocupan las partículas de una muestra y los poros de aire (Blake, 1965).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad bulk del material [kg/m^3], m es la masa del material [kg] y V es el volumen ocupado por el material [m^3]

El volumen del equipo debe permitir operar con la densidad crítica. De las densidades obtenidas experimentalmente (ver Apéndice A) se tiene que la menor es algo más de $500\text{kg}/\text{m}^3$. Sin embargo, hay que considerar que este parámetro varía según la materia orgánica a procesar y se desea que la maquina opere con una gran cantidad de mezclas. Basados en estudios previos (Khater, 2015), se toma un valor de densidad de $420\text{ kg}/\text{m}^3$. Reemplazando en la Ecuación 1 se obtiene un volumen de $1,19\text{m}^3$.

Este volumen es el ocupado por la materia orgánica. Sin embargo, para que haya un correcto volteo y mezclado el equipo no puede estar lleno. La capacidad máxima en dispositivos comerciales varía entre 50 a 70%. La ficha técnica de Volcomp recomienda 60% como máximo volumen de carga (Basol technologies, 2016); en el manual de rotorBuey se trabaja con un llenado del 50% aproximadamente (Industrias Montecor, 2021); Rotoposter indica un 65% de llenado en sus indicaciones operativas (Rotary Composters LLC, 2019); Kalamdhad & Kazmi (2009) en sus ensayos con compostadores de tambor rotativo realiza un llenado del 70% y los dispositivos comerciales para compostaje domestico (compostador de Keter o Yimby Tumbler) recomiendan como tope un llenado de $\frac{3}{4}$ partes que equivale a un 75%.

Basado en lo anterior se escoge un 60% como volumen máximo de llenado, luego el volumen del tambor debería ser de $1,98\text{ m}^3$. Este volumen puede obtenerse con múltiples configuraciones de cilindros; las dimensiones de dispositivos similares sirven de referencia para definir un diámetro de tambor.

Los modelos más pequeños de Volcomp y el Omnivore Baby Bear (ver Figura 6) permiten la obtención de compost por lotes. Aunque Biovator tiene una producción continua, también tiene modelos pequeños. La Tabla 4 presenta las dimensiones de algunos equipos con capacidades similares a la requerida.

Figura 6

Compostador Omnivore baby bear.



Nota: Tomado de Omnivore Composter 2021.

Tabla 4

Dimensiones de compostadores comerciales

| Modelo | Diámetro (m) | Longitud (m) | Capacidad (kg) |
|--------------------|--------------|--------------|----------------|
| Volcomp 1030 | 1 | 3 | 848 (lote) |
| Omnivore baby bear | 1,21 | 1,52 | 200 (lote) |
| Biovator BIO308 | 0,9 | 2,45 | 25 (diarios) |

Nota: Adaptado de Basol technologies, 2016; Omnivore Composter 2021 y INDIV, Sf.

Basado en lo anterior se opta por un diámetro de 1 metro y se encuentra la longitud usando la fórmula del volumen de un cilindro, que da como resultado una longitud de 2,53m.

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} \quad (2)$$

Donde V es el volumen del cilindro [m^3], D es el diámetro del cilindro [m] y L es la longitud del cilindro [m]. Teniendo en cuenta que el material disponible para la construcción del tambor es lamina de acero ASTM A36 y que la presentación de esta es de 1,2x2,4 metros se cambia la longitud a 2,4 metros para poder construirlo en 2 mitades de 1,2 metros y que no haya desperdicio de material.

Usando la Ecuación 2 con 1 metro de diámetro y 2,4 metros de largo, se obtiene un volumen de $1,88\text{m}^3$. Un tambor con este volumen estaría operando a 63% si se llena con 500kg de mezcla para compost con la densidad ya definida. Esta capacidad se encuentra dentro de los límites comercialmente encontrados.

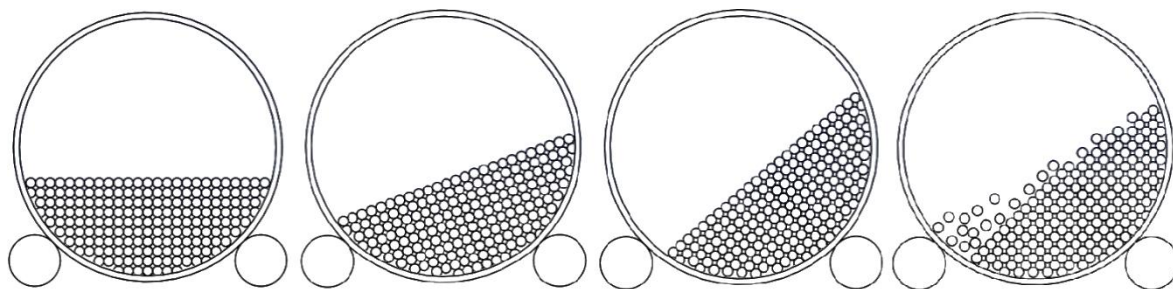
3.1.2. Potencia.

Uno de los puntos fundamentales es determinar la potencia necesaria para poder girar el tambor. A diferencia de otros dispositivos rotatorios la máxima demanda de potencia no está al arranque. Esto se debe a que el material tiene un movimiento característico entre la pared del tambor y las partículas del material.

X. Liu et al (2016) presentan un método simplificado para determinar la potencia en hornos rotatorios y que además fue verificado en hornos industriales de cemento. El método plantea que el tambor se mueve a una velocidad muy lenta (como en esta aplicación) y que el material depositado se mueve rígido como un solo “bulto” o “cama” junto con él. Este movimiento se mantiene hasta cierto ángulo de reposo donde el material se cae desplomándose y rodando, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Representación del movimiento del material dentro del tambor.

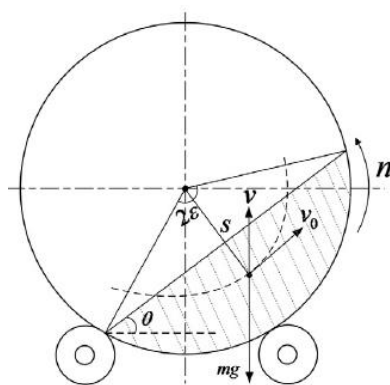


Nota: Material depositado (izq), el material sube y se mueve como un cuerpo rígido (centro izq), el material alcanza el ángulo de reposo (centro der), el material se desploma al superar dicho ángulo (der).

Como se considera que el material es homogéneo en toda su longitud la potencia se determina mediante un análisis del par de torsión necesario para levantar la cama del material a granel en una sección transversal. El par torsional será crítico cuando se alcance el ángulo de reposo y el material se desplome. En la Figura 8 se presenta un diagrama de cuerpo libre del sistema en condición crítica.

Figura 8

Diagrama esquemático del sistema cuando alcanza el ángulo de reposo.



Nota: La Figura representa como la masa de material se puede concentrar en su centroide y cuáles son los parámetros para determinar la potencia, tomado de Liu et al., 2016.

La potencia es calculada como el producto del par por la velocidad angular del tambor. Mediante relaciones geométricas y analíticas de los parámetros conocidos se obtiene una ecuación para la potencia definida como:

$$Pot = T \cdot \omega \quad (3)$$

$$T = m \cdot g \cdot \sin(\theta) \cdot S \quad (4)$$

$$\omega = \frac{n \cdot \pi}{30} \quad (5)$$

Donde:

Pot es la potencia necesaria para girar el tambor [W]

T es el torque para levantar a granel la cama de material [Nm]

ω es la velocidad angular del tambor [rad/s]

m es la masa de material [kg]

g es la gravedad [m/s^2]

θ es el ángulo de reposo al que se desploma el material [rad]

S es la distancia entre el eje de giro y el centroide del material [m]

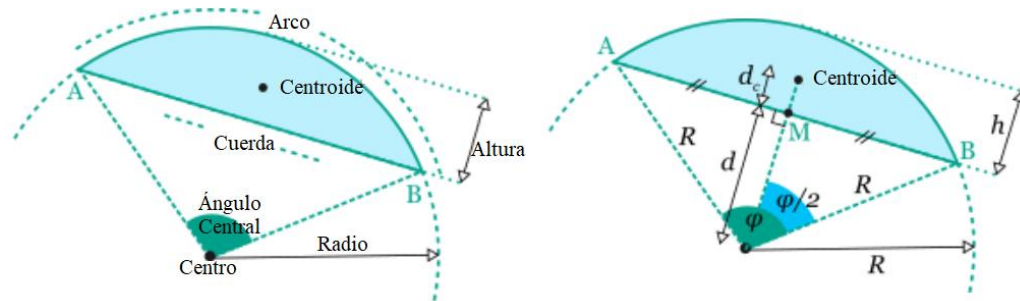
n es la velocidad de rotación [rpm]

La masa propuesta en los objetivos es de 500kg sin embargo se toma una masa de 600kg como criterio de diseño, esto para evitar un cálculo de potencia muy ajustado y tener una tolerancia a la hora de operar la máquina.

La distancia S entre el eje de giro y el centroide de la cama de material se obtiene de un análisis de un segmento circular (ver Figura 9).

Figura 9

Parámetros que definen un segmento circular



Nota: Adaptado de Geometric Properties of Circular Segment, 2016.

La distancia S será la suma de las distancias del centro del círculo a la cuerda del segmento (d) y de la cuerda al centroide (d_c). Esta distancia depende del radio del círculo (R) y del ángulo central (φ), ángulo que se obtiene del área del segmento. Las ecuaciones 6 y 7 permiten calcular la distancia S .

$$S = 4R \frac{\sin^3\left(\frac{\varphi}{2}\right)}{3(\varphi - \sin(\varphi))} \quad (6)$$

$$A_s = \frac{R^2}{2} (\varphi - \sin(\varphi)) \quad (7)$$

Donde:

S es la longitud centro/centroide [m]

R es el radio del círculo [m]

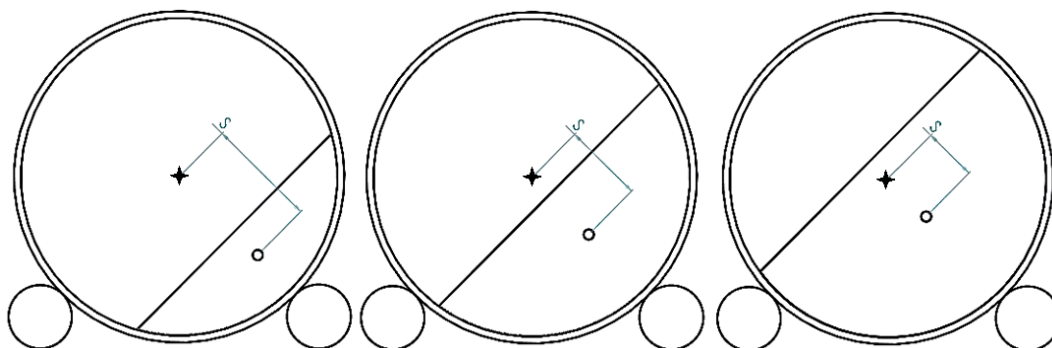
φ es el ángulo central [rad]

A_s es el área del segmento [m²]

Como lo evidencian las ecuaciones la distancia S variará dependiendo área transversal del segmento y por ende del porcentaje de llenado del tambor (ver Figura 10).

Figura 10

Distancia entre el centroide y el eje de giro para diferentes porcentajes de llenado.



Nota: Tambor con 20% de llenado (izq), con 40% de llenado (centro) y 60% de llenado (der)

Se observa que al disminuir el porcentaje de llenado aumenta la distancia S , lo que significa que cargas con la misma masa, pero diferente densidad tendrá un consumo de potencia diferente. Se opta como parámetro de diseño el menor porcentaje de llenado posible para la masa de 600kg. Según los datos experimentales y de la literatura (Khater, 2015) será con una densidad de 700kg/m^3 y da un volumen de $0,86\text{m}^3$. El volumen y área del segmento llenado se relacionan directamente con los del tambor según la Ecuación 8.

$$\frac{A_t}{A_s} = \frac{V_t}{V_s} \quad (8)$$

Donde los subíndices t son los totales del tambor y s los de segmento.

El volumen del tambor y el área transversal son conocidos y son de $1,88\text{m}^3$ y $0,785\text{m}^2$ respectivamente. Reemplazando los datos anteriores en la Ecuación 8 se obtiene el área del segmento y da $0,36\text{m}^2$.

Con el dato del área del segmento calculado se resuelve el sistema de Ecuaciones 6 y 7, y se obtiene un ángulo central φ de 3 radianes (172 grados) y una longitud S de 0,232 metros.

La velocidad de rotación (n) se establece teniendo en cuenta que debe ser lenta para ajustarse al método de cálculo de la potencia. X. Liu et al. (2016) lista 7 hornos rotatorios con

velocidades de rotación van desde las 0,18 hasta 3,57 rpm. El equipo utilizado por Kalamdhad et al. (2009) rota a 2 rpm y el compostador biovator gira a una velocidad de 0,05 rpm (U.S. Department of Agriculture (USDA), 2013). Se determina que un amplio rango de velocidades es válido y se escoge una de 3 rpm.

El ángulo de reposo (θ) que se forma entre la cama de material y el eje horizontal justo antes de desgranarse la carga es dependiente de muchos parámetros propios de cada aplicación. Los ángulos encontrados en varios hornos rotatorios (X. Liu et al., 2016) van desde 32° hasta 38°. X. Y. Liu et al. (2005) presenta ángulos de reposo en un rango de 23,3° hasta 53° y entre los materiales afines están pellets de fertilizante con 40°, carbón activado con 40° y fragmentos de fertilizante con 47°. Glancey & Hoffman (1994) determinaron algunas propiedades mecánicas de compost de residuos sólidos entre ellas el ángulo de reposo establecido entre 30° y 45°.

Se realizó un prototipo simplificado del sistema con el fin de obtener empíricamente un ángulo de reposo y verificar el comportamiento de las partículas al rotar (ver Figura 11).

Figura 11

Prototipo de compostador rotatorio.



El prototipo consta de un tambor de plástico de 200 litros reforzado con láminas de acero que ruedan sobre rodamientos; tiene una ventana con malla en la parte posterior y 2 más pequeñas en la parte frontal; todo está soportado en una pequeña estructura de madera y se acciona mediante un sistema de poleas, cuerda y un carrete movido por una manivela de bicicleta (inicialmente se movería directamente con las manos, pero demandaba gran esfuerzo físico).

Mediante un arreglo de regletas de madera alineados con la ventana posterior (ver Figura 12) y cálculos trigonométricos se obtuvo un ángulo de reposo promedio de $41,2^\circ$ y máximo de $44,1^\circ$ (más detalles en Apéndice B).

Figura 12

Arreglo para medir el ángulo de reposo



De acuerdo con la bibliografía y los datos tomados se escogen un ángulo de 50° o $0,873$ radianes para cubrir las condiciones más desfavorables.

Reemplazando todos los parámetros necesarios en las Ecuaciones 3,4 y 5 se obtiene una potencia de $328,6$ W o $0,44$ HP.

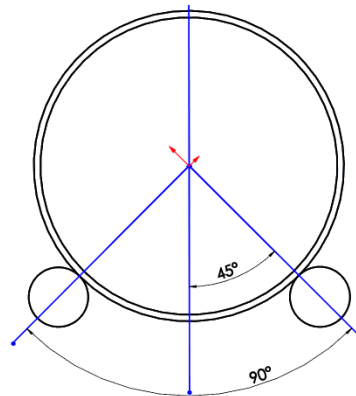
3.1.3. Posición angular de los apoyos.

Como se menciona en el concepto de diseño los apoyos son rodillos que permitan el giro del tambor. Estos se distribuyen en dos pares espaciados longitudinalmente y a su vez cada par debe tener la mejor posición angular entre ellos.

Para determinar la posición angular se parte del trabajo de Cook (1985) quien analiza los esfuerzos producidos por los apoyos de un tambor horizontal. El análisis se realizó numéricamente en una sección transversal y aplicando simetría respecto al eje vertical. Para diversos porcentajes de llenado y espesores de pared se encontró que el ángulo entre apoyos que minimiza los esfuerzos en cualquier situación es de 90° . Entonces, esta es la configuración escogida y se representa en la Figura 13.

Figura 13

Representación de la distribución angular de los apoyos

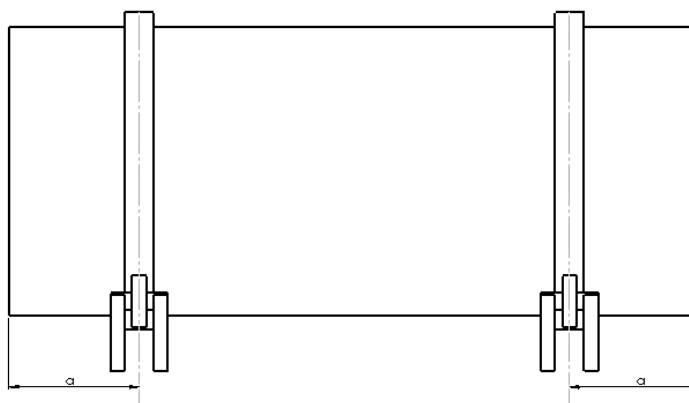


3.1.4. Posición longitudinal de los apoyos.

Para determinar la distribución longitudinal se parte del supuesto de que el tambor se está comportando con un gran eje y se busca disminuir los esfuerzos de flexión. La posición de los pares de apoyos se debe hacer simétrica teniendo en cuenta que todo el tambor recibe una carga uniforme, ver Figura 14.

Figura 14

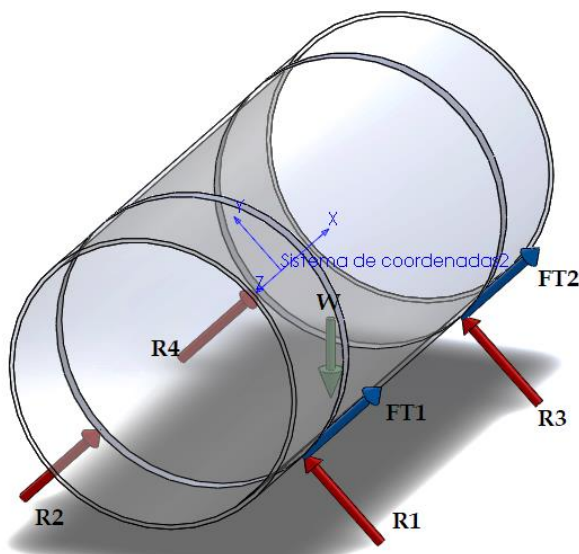
Distribución longitudinal de los elementos de máquina.



Para determinar la distancia a entre los apoyos y los extremos del tambor se debe minimizar el momento flector en el tambor, para lo que hay que determinar las fuerzas a las que está sometido mediante un diagrama de cuerpo libre y un análisis de equilibrio estático. El diagrama de cuerpo libre se construye teniendo en cuenta que los apoyos de rodillos tendrán una reacción radial al tambor, además que la transmisión de potencia al ser mediante rodillos de fricción hace que aparezcan fuerzas tangenciales en dos de los apoyos (ver Figura 15).

Figura 15

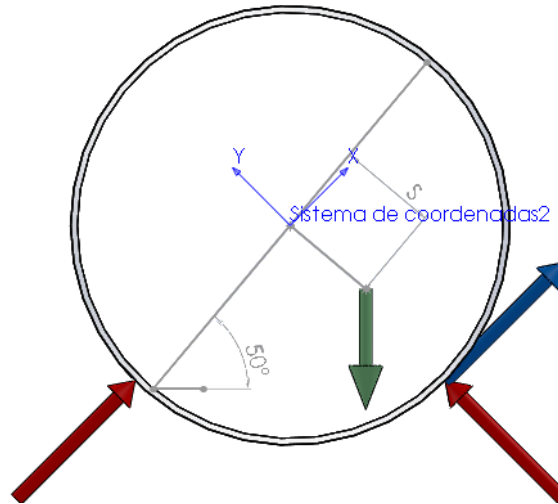
Diagrama de cuerpo libre del equipo.



Para facilitar el análisis el sistema coordenado se inclina 45° para hacer coincidir la línea de acción de los apoyos R_1 y R_3 con el eje Y, mientras que la de los apoyos R_2 , R_4 y las fuerzas tangenciales F_{T1} y F_{T2} con el eje X (ver Figura 16).

Figura 16

Sección transversal en el plano xy con sistema coordenado inclinado.

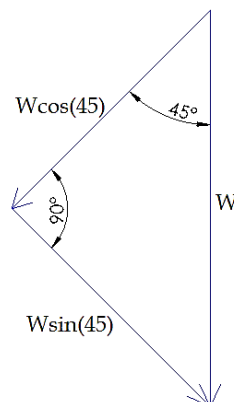


Nota: Los 50° representan la inclinación de la cama del material en el ángulo de reposo que es donde el torque será mayor mientras el sistema esta inclinado a 45° .

De esta manera el peso será la única fuerza con componentes en más de un plano y se descompone trigonométricamente como lo muestra la Figura 17.

Figura 17

Componentes del peso en cada plano



Se desarrolla el equilibrio estático empezando por la sumatoria de fuerzas en cada plano, considerando que el tambor se encuentra horizontal se desprecia la carga axial en el eje Z.

$$\sum F_z = 0 \quad (9)$$

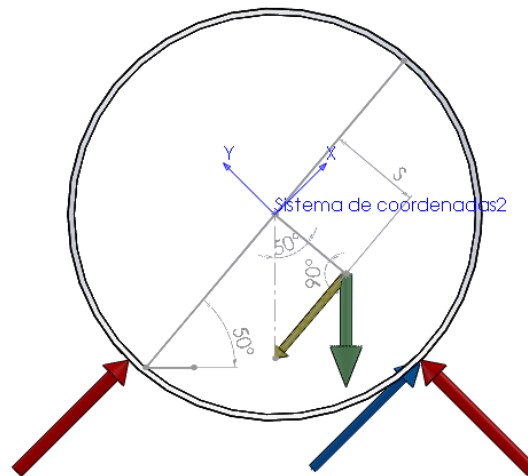
$$\sum F_y = 0 = R_1 + R_3 - W \cdot \sin(45^\circ) \quad (10)$$

$$\sum F_x = 0 = R_2 + R_4 + F_{T1} + F_{T2} - W \cdot \cos(45^\circ) \quad (11)$$

También se realiza la sumatoria de momentos alrededor del eje Z. Las fuerzas de los apoyos no ejercen momento sobre el eje pues su línea de acción lo atraviesa, luego las únicas fuerzas que actúan son la componente del peso que es perpendicular al segmento S y la fuerza tangencial, lo cual se puede ver en la Figura 18.

Figura 18

Vista del plano xy del diagrama de cuerpo libre.



La componente perpendicular del peso (flecha amarilla en la Figura 18) se define como $W \cdot \sin(50^\circ)$ y la sumatoria de momentos queda.

$$\sum M_z = 0 = (F_{T1} + F_{T2})R - W \cdot \sin(50^\circ)S \quad (12)$$

Donde R es el radio del tambor igual a 0,5m y S es la distancia del eje de giro al centroide del material y es 0,232m.

Por la simetría que tiene el arreglo y la uniformidad de la masa se deduce que las reacciones de lado izquierdo son iguales entre ellas, así como las de lado derecho. Por el mismo motivo el torque también está uniformemente distribuido y por ende las fuerzas tangenciales también son iguales entre ellas.

$$R_1 = R_3 \quad (13)$$

$$R_2 = R_4 \quad (14)$$

$$F_{T1} = F_{T2} \quad (15)$$

Solucionando el sistema de Ecuaciones (10-16) se obtienen los siguientes resultados.

$$W = 5886[N] \quad R_1 = R_3 = 2081[N] \quad R_2 = R_4 = 1035[N] \quad F_{T1} = F_{T2} = 1046[N]$$

Con los resultados se plantea el tambor como una viga en cada uno de los planos YZ y XZ, esto permitirá encontrar la posición que minimice el momento flector. En ambos planos se tienen vigas con una carga distribuida que es el peso y las cargas puntuales ejercidas por los apoyos y la transmisión. El peso se calcula como carga distribuida dividiéndolo entre la longitud.

$$w_0 = \frac{W \cdot \sin(45^\circ)}{L} = \frac{5886 \cdot \sin(45^\circ)}{2,4} = 1705,75 \left[\frac{N}{m} \right] \quad (16)$$

Las condiciones de carga de las “vigas” en cada plano se enseñan en las Figuras 19 y 20.

Figura 19

Diagrama del tambor como una viga en el plano YZ.

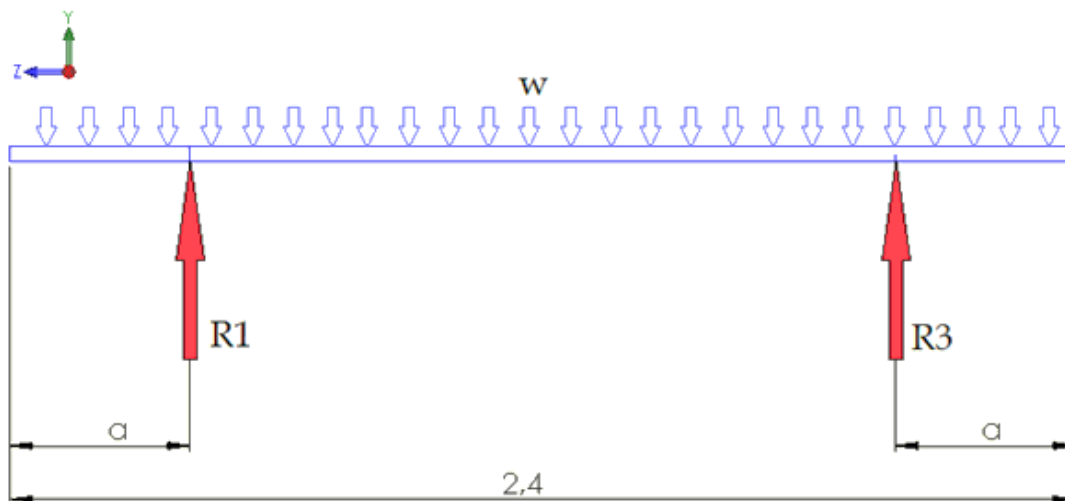
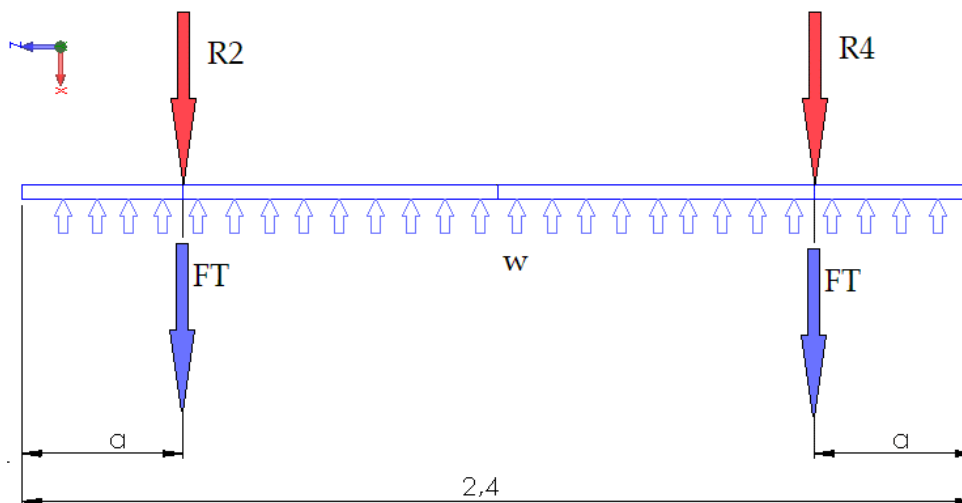
**Figura 20**

Diagrama del tambor como una viga en el plano YZ.



Con las condiciones de la viga en cada plano se deben obtener los diagramas de momento flector y con ellos se podrá encontrar el valor de la distancia a para los apoyos. Para generar funciones analíticas del momento flector se usan las funciones de singularidad (Beer, 2010). El principio de las funciones se presenta en la Figura 21.

Figura 21

Principio de las funciones de singularidad.

$$\langle x - a \rangle^n = \begin{cases} (x - a)^n & \text{cuando } x \geq a \\ 0 & \text{cuando } x < a \end{cases}$$

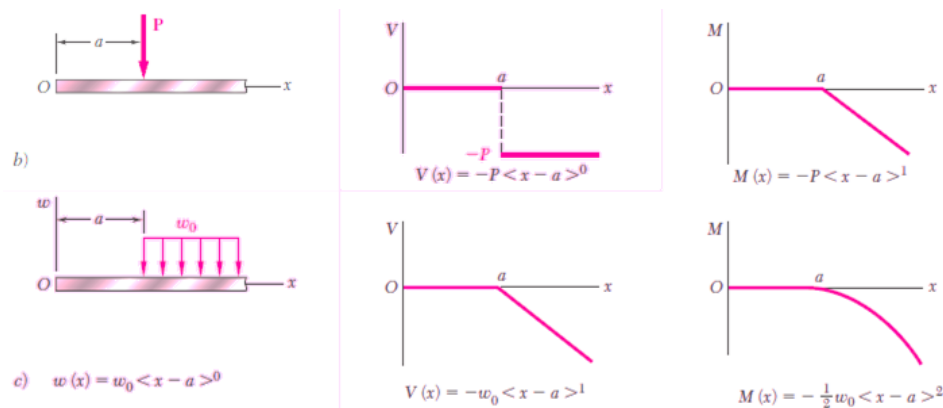
Nota: Adaptado de Beer (2010).

Estas funciones indican si las cargas tienen o no influencia dependiendo de la posición evaluada (x); a es la ubicación de la carga y n es un exponente que depende del tipo de carga.

Las cargas básicas se asocian a su función de singularidad y la suma de estas es la función de momento flector para cualquier punto. Para determinar la ecuación requerida se toman las funciones asociadas a los tipos de carga que se tienen: cargas puntuales y carga distribuida (ver Figura 22).

Figura 22

Funciones de singularidad cargas básicas.



Nota: Cargas (izq), función para cortante (cent) y función para flector (der). Tomado de Beer (2010)

La ubicación de los apoyos R_1 y R_2 y la fuerza tangencial F_{T1} tomada desde el origen es a y la de los apoyos R_3 y R_4 y la fuerza tangencial F_{T2} es de $2,4-a$; la carga distribuida es aplicada desde 0 en ambos planos.

Siendo así resolvemos las funciones de singularidad:

$$M_{yz} = \frac{1}{2}w_0 \langle x \rangle^2 - R_1 \langle x - a \rangle^1 - R_3 \langle x - (2,44 - a) \rangle^1 \quad (17)$$

$$M_{xz} = \frac{1}{2}w_0 \langle x \rangle^2 - R_2 \langle x - a \rangle^1 - F_{T1} \langle x - a \rangle^1 \quad (18)$$

$$-R_4 \langle x - (2,44 - a) \rangle^1 - F_{T2} \langle x - (2,44 - a) \rangle^1$$

Con los momentos en ambos planos se calcula un momento equivalente (que es el criterio final para ubicar los apoyos), como se trata de una sección circular este es una suma vectorial.

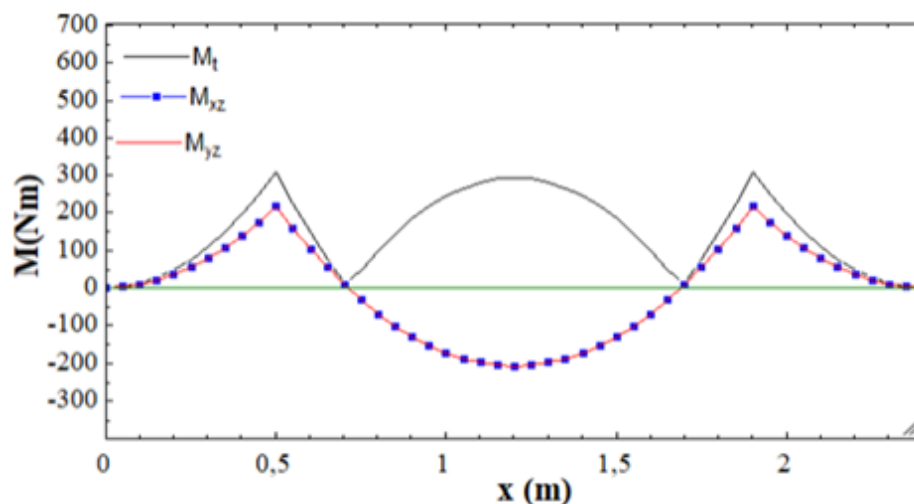
$$M_t = \sqrt{M_{xz}^2 + M_{yz}^2} \quad (19)$$

Las Ecuaciones 17,18 y 19 se programan en EES usando la función condicional *if* para las singularidades. Mediante un análisis paramétrico se verificaron los momentos flectores en función de x , al cual le fueron asignados valores entre 0 y 2,4.

Se evidencia que los momentos en ambos planos son iguales y que los máximos momentos estarán justo en posición del apoyo y en el centro de la viga. Por lo anterior se determina que al igualar los momentos en estos dos puntos ($x=a$ y $x=l/2$) se obtiene la configuración óptima, el resultado da que la distancia $a=0,5\text{m}$ y el diagrama se muestra en la Figura 23.

Figura 23

Diagrama de momento flector optimo.



También se determina que el momento flector máximo al que estará sometido el tambor está en la posición de los apoyos y es de 306,5Nm.

3.1.5. *Espesor del tambor.*

Para determinar el espesor se continúa con el planteamiento de que se trata de un gran eje hueco. Para esto la ASME⁴ propone la siguiente ecuación para calcular el diámetro externo (ANSI/ASME, 1985).

$$d_o^3 = \frac{16}{\pi \cdot S_s (1 - K^4)} \sqrt{\left[K_b \cdot M_b + \frac{\alpha \cdot F_\alpha (1 + K^2)}{8} \right]^2 + (K_t \cdot M_t)^2} \quad (20)$$

Donde:

M_t es el momento torsor calculado como 1046 Nm.

M_b es el momento flector que es 306,6 Nm.

F_α es la carga Axial que es 0 N en este caso.

d_o es el diámetro externo [m].

d_i es el diámetro interno que es de 1 m.

$K = d_i/d_o$.

K_b y K_t son factores combinados de choque y fatiga aplicado al momento flector y torsor (respectivamente), tomados ambos como 1,5 para un eje con carga aplicada gradualmente.

α es el factor de acción de columna que es cero por l nula carga axial.

S_s es el esfuerzo permisible [Pa] tomado como 55,17 MPa que es lo recomendado por ASME para aceros comerciales en ejes sin cuñero.

El resultado de la Ecuación 20 da un diámetro externo d_o de 1,00004m que es equivalente a tener un espesor de 0,02mm que es menor a cualquier calibre comercial.

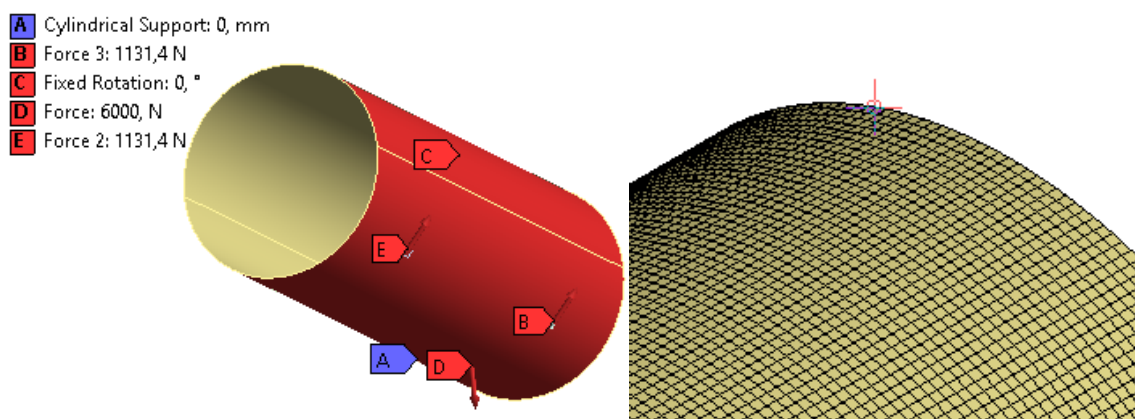
⁴ The American Society of Mechanical Engineers.

Adicionalmente se realizó un análisis estático estructural con Ansys Workbench por medio de elementos finitos. Para ello se agregaron los datos de ingeniería del acero ASTM A36 laminado en caliente, que es el material comercial más accesible. Las propiedades para láminas de calibres menores a 8 pulgadas son: densidad 7860kg/m^3 , módulo de Young de 200 GPa, límite de fluencia de 250 MPa, límite de rotura de 400 MPa y coeficiente de Poisson de 0,26. (Mundial, 2019)

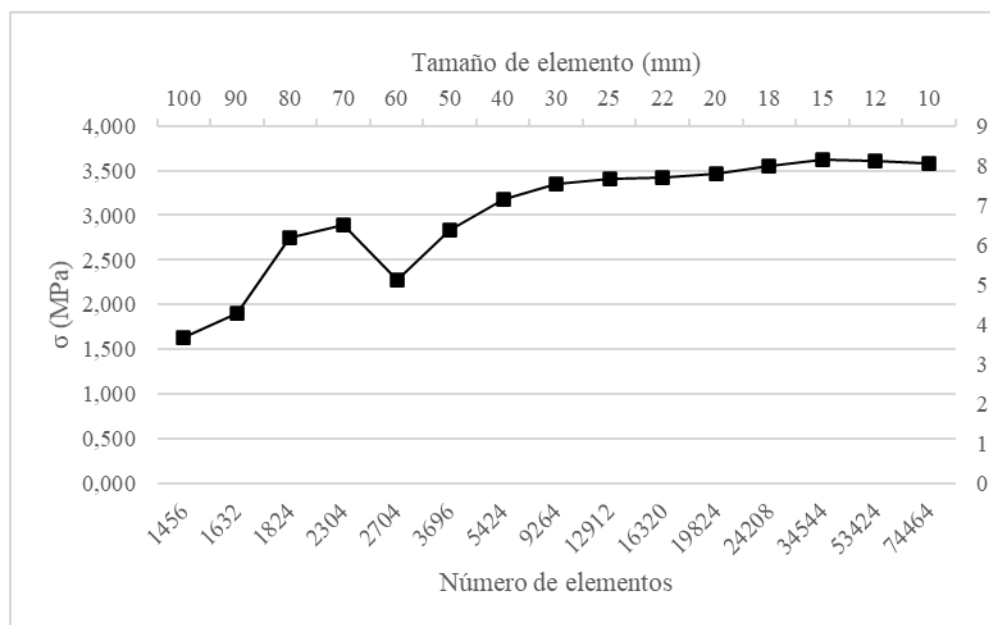
El tambor se modeló como un cascarón cilíndrico de 1m de diámetro, 2,4m de largo y 2mm de espesor. Se colocaron soportes tipo cilindro que impiden el desplazamiento radial en los puntos correspondientes de los apoyos (en áreas de 2 pulgadas de ancho y en un arco de 5°) y uno que impide la rotación a lo largo de todo el tambor. Como cargas externas se colocó la fuerza de 6000N producida por el peso del material distribuida en la cara interna, también las 2 fuerzas tangenciales en los puntos correspondientes a los rodillos con una magnitud de 1131N (ver Figura 24). El mallado se hizo con elementos cuadrados con un tamaño de 12mm pues después de un estudio de convergencia mostraba que disminuir más el tamaño no era necesario (ver Figura 25).

Figura 24

Condiciones para el MEF y mallado

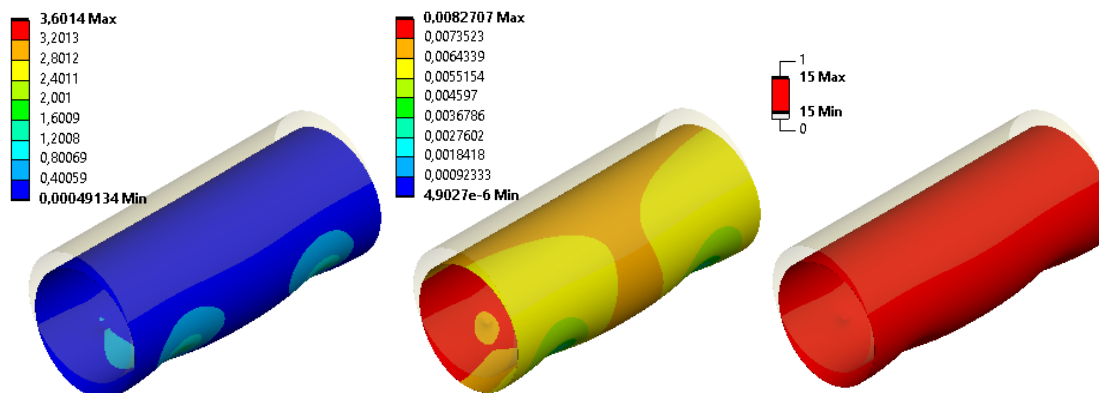


Nota: Cargas y soportes (izq), mallado (der).

Figura 25*Estudio de convergencia*

Nota: La Figura muestra el cambio del esfuerzo máximo cuando el tamaño del elemento disminuye

Como resultados se presentan en la Figura 26 el esfuerzo equivalente, el desplazamiento total y el factor de seguridad. De estos resultados se puede concluir que un tambor de 2mm de espesor cumple las condiciones de trabajo.

Figura 26*Resultados del análisis por MEF.*

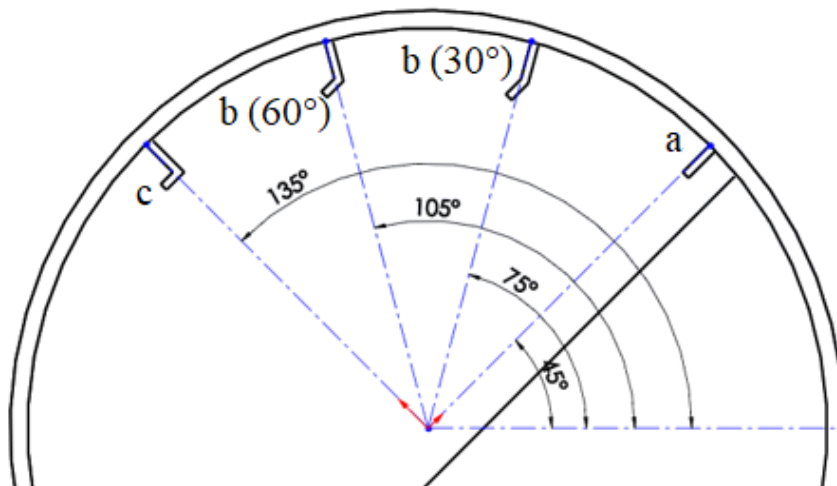
Nota: Esfuerzo equivalente MPa (izq), desplazamiento total mm (centro), factor de seguridad (der)

3.1.6. Diseño de paletas.

Para que el proceso tenga mejor aireación y el material no se compacte es necesario colocar una serie de paletas dentro del tambor. Estas paletas se fabricarán con lamina de un calibre similar al de la pared del tambor. Según Mujumdar (1995) entre las geometrías comunes están la paleta recta (tipo a), la paleta con ángulo (tipo b) y la paleta con ángulo recto (tipo c). Las paletas se diferencian principalmente en cuanto puede elevar el material, en el caso de la paleta recta elevarán el material únicamente hasta el ángulo de reposo, mientras que las paletas con ángulo lo harán hasta dicho ángulo más el ángulo de la paleta. La Figura 27 muestra la situación.

Figura 27

Tipos de paletas y sus ángulos de elevación del material.



Nota: La figura representa los ángulos a los que descargarían material 4 tipos de paletas si el ángulo de reposo es 45° (paleta tipo c, paleta tipo b a 60° y a 30° y paleta tipo a).

Se determina que la paleta tipo a no ganaría suficiente altura, mientras que la paleta tipo c lleva los materiales a un ángulo de rotación excesivo; por lo cual se opta por la paleta tipo b a 30° .

Las dimensiones de la paleta serán de 8 cm de ancho y 4 cm de labio, la longitud de la paleta será de 50cm distribuida cada 48cm a lo largo del tambor. Traslapar las paletas permite que el material que una paleta no puede elevar sea tomado por la siguiente.

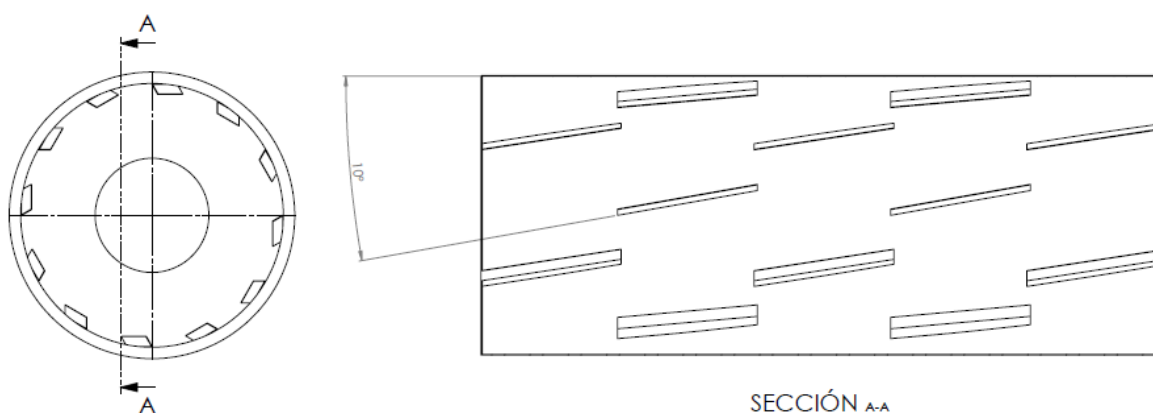
La paleta también se ubica inclinada un ángulo de 10° que permita distribuir mejor el material y facilitar descargar el equipo.

La distribución angular se toma basado en el Rotorbuey (Industrias Montecor, 2021) que tiene 6 paletas uniformemente espaciadas pero en este caso, cada fila de paletas será rotada 30° respecto a la anterior para obtener mejor mezclado.

De esta forma las paletas son 30 y la distribución se muestra en la Figura 28.

Figura 28

Vista de sección del tambor y paletas.

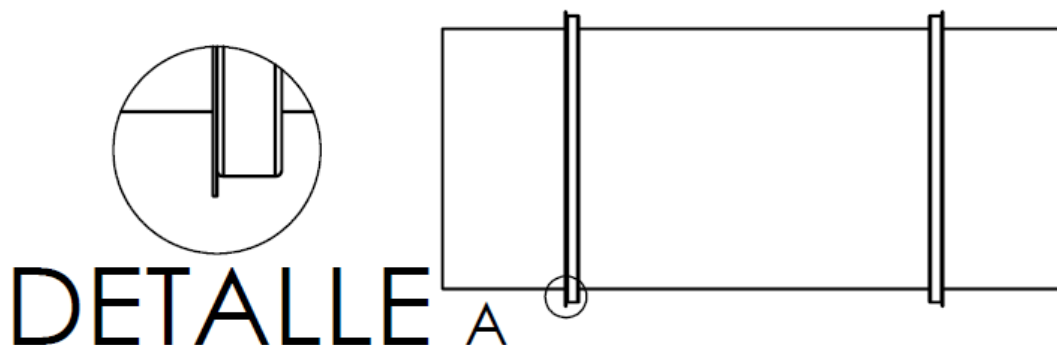


3.1.7. Anillos de atiesamiento.

Con el fin de dar mayor rigidez al equipo se colocan 2 anillos que también se utilizan como pista de rodadura para las ruedas de fricción. Los anillos además contribuyen a aumentar el espacio entre la pared del tambor y el sistema de tracción, esto garantiza un mayor espacio para colocar el motorreductor. Los anillos se fabrican de un tubo de sección cuadrada de 50x50mm de acero estructural de 3mm de espesor que es cilindrado en forma de anillo y se une al tambor mediante soldadura. Se usarán dos anillos de platina de 1 pulgada de ancho y 1/8 de pulgada de espesor como guía de rodadura soldadas a las caras laterales externas de cada anillo. (ver Figura 29)

Figura 29

Detalle de la platina y anillos del tambor.



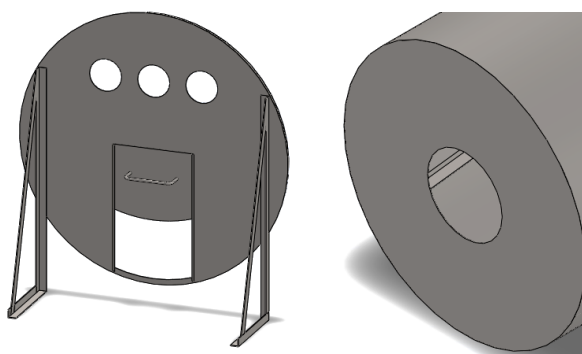
3.1.8. Tapas.

Las tapas también se fabrican con láminas ASTM A36. La tapa frontal tiene forma anular con diámetros externo e interno de 1 m y 0,4 m respectivamente. Esto forma la entrada del ducto de suministro al interior del tambor .

La tapa posterior no estará unida al tambor, sino que será fija al bastidor lo cual facilita el proceso de descarga, mediante la apertura o cierre de una compuerta manual. Esta tapa tiene un diámetro de 1 metro, 3 agujeros de 12cm para la ventilación y se encaja internamente con el tambor con una pestaña de acero que está soldada en su periferia. El espacio entre el tambor se sella con espuma y la tapa se fija al bastidor con una estructura de ángulos metálicos. (Ver Figura 30)

Figura 30

Tapas posterior y frontal.



3.1.9. Selección de las ruedas.

Las ruedas de apoyo se determinan con el peso total que es el peso de la carga que como criterio de diseño se estableció en 600 kg junto con como el peso del equipo, que calculado mediante el ensamblaje en SOLIDWORKS es de 174kg. El conjunto está ejerciendo una fuerza de 7593N sobre los apoyos. Utilizando las ecuaciones de la sumatoria de las fuerzas (10 y 11) se determina que cada rueda debe soportar una carga de 2685N o lo que es lo mismo 274kg. Teniendo en cuenta la oferta comercial local, se escogen las ruedas super carga con cubierta de poliuretano del catálogo de Indurruedas (2018) que tienen un diámetro de 4 pulgadas, ancho de 2 pulgadas y una capacidad de carga de 300kg, ver Figura 31.

Figura 31

Ruedas super carga.



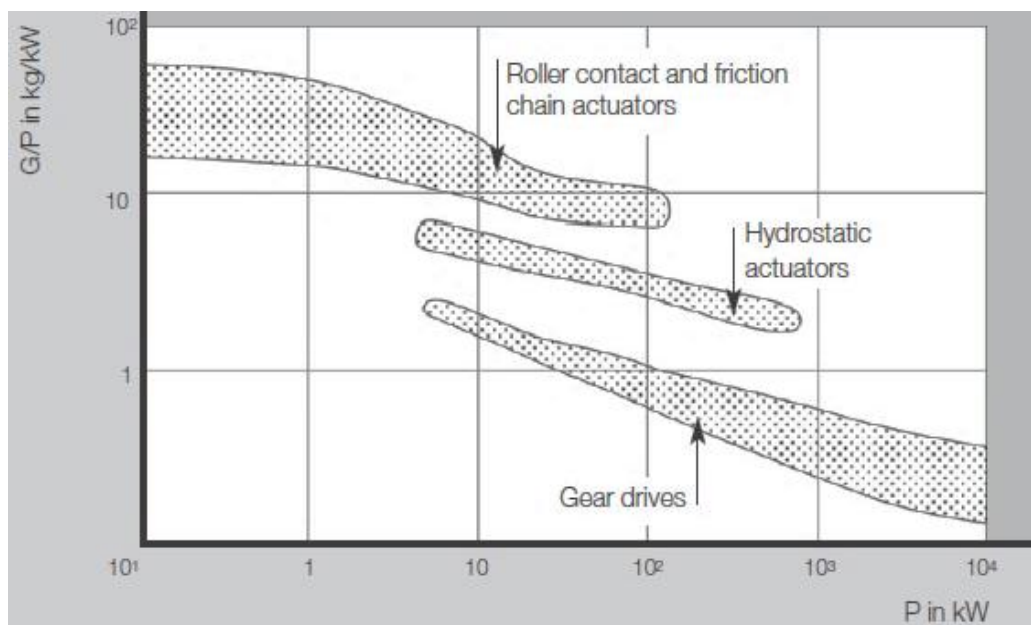
Nota: Tomado de Indurruedas, (2018)

Las ruedas de fricción se escogieron como mecanismo de transmisión basado en el catálogo de ruedas y anillos de fricción Continental Contintech, (2008) que sugiere que en un dispositivo de tambor rotatorio como un molino bolas esta transmisión es adecuada por su simpleza, bajo costo y libre de mantenimiento.

La Figura 32 muestra que en aplicaciones con altas relaciones peso/potencia y que transmiten poca potencia, las ruedas de fricción son adecuadas. En este caso la relación peso potencia es de más de 500 cuando está vacío y de más de 1000 cuando está cargado, además transmite menos de 1kw.

Figura 32

Relación peso/potencia vs potencia en transmisiones de potencia.



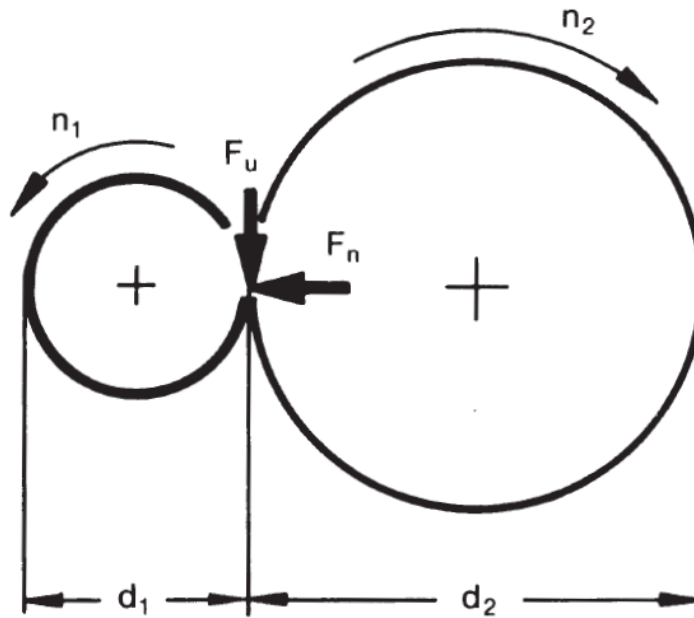
Nota: La Figura enseña las zonas de trabajo adecuadas para diversos sistemas de transmisión de potencia, basándose en el peso del equipo y la potencia que transmite. Tomado de Continental Contintech, 2008.

El principio de funcionamiento de la transmisión por fricción es que entre dos superficies rodando juntas aparecerá una fuerza contacto F_n que es normal a las 2 superficies y una fuerza circunferencial o tangencial transmisible F_u , ver Figura 33. El coeficiente de fricción μ es un valor numérico que relaciona estas dos fuerzas de la siguiente forma.

$$\mu = \frac{F_u}{F_n} \quad (21)$$

Figura 33

Representación del principio de las ruedas de fricción.



Nota: Tomado de Continental Contintech, 2008.

Para determinar la cantidad de ruedas motrices hay que comparar la fuerza transmisible requerida con la que las ruedas pueden ofrecer. La fuerza tangencial transmisible requerida se calcula utilizando la potencia necesaria para mover el tambor y la velocidad tangencial en la zona de contacto.

$$F_u = \frac{Pot}{v} \quad (22)$$

Donde:

F_u es la fuerza tangencial transmisible [N].

Pot es la potencia necesaria para girar el tambor [W].

v es la velocidad tangencial en la zona de contacto [m/s].

En el apartado de la potencia se calculó un requerimiento de 330 W y la velocidad de rotación del tambor se estableció como 3 rpm. Esta velocidad se relaciona con la velocidad tangencial de la siguiente forma.

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} \quad (23)$$

Donde:

d es el diámetro del tambor [m] y n es la velocidad de giro del tambor [rpm].

El diámetro efectivo del tambor donde se produce la rodadura está sobre los anillos y es de 1,1m. Reemplazando los valores en la Ecuación 23 se obtiene la velocidad de 0,173 m/s y reemplazándola en la Ecuación 22 se obtiene una fuerza F_u de 1910 N.

Con la fuerza tangencial conocida se calcula la fuerza de contacto F_n necesaria para lo cual se debe estimar el coeficiente de fricción. Para una combinación de materiales en las que uno de ellos es un elastómero se suele aplicar un coeficiente de 0,7 (Continental Contintech, 2008). Continental facilita también algunos criterios para el coeficiente de fricción, ver Tabla 5.

Tabla 5

Selección del coeficiente de fricción.

| Coeficiente de fricción μ | Condiciones ambientales | Superficie | Aplicaciones (ejemplos) |
|---|------------------------------------|---------------------|--|
| 0,9-0,7 | Seco | Altamente rugosa | De ingeniería de precisión a maquinaria de construcción |
| 0,7-0,5 | Húmedo | | |
| 0,7-0,5 | Seco | Medianamente rugosa | De ingeniería de precisión a maquinaria de construcción. |
| 0,5-0,3 | Húmedo | | |
| 0,5-0,3 | Seco | Lisa | Transmisión en condiciones desfavorables. |
| 0,3-0,1 | De húmedo a mojado | | |

Nota: Adaptado de Continental Contintech, 2008.

Tomando una superficie medianamente rugosa y teniendo en cuenta que el ambiente será seco se escoge 0,6 como coeficiente de fricción μ .

Reemplazando el coeficiente y la fuerza tangencial en la Ecuación 21 se tiene que la fuerza de contacto F_n es de 3183N.

Para determinar el número de ruedas hay que calcular la potencia efectiva que una rueda puede transmitir. La potencia efectiva es la que se transmite con la fuerza de contacto máximo que soporta la rueda y corregida con algunos factores. La potencia efectiva se define como:

$$P_{eff} = F_{max} \cdot \mu \cdot v \cdot \frac{C_1}{C_2} \quad (24)$$

Donde:

P_{eff} es potencia efectiva transmitida por la rueda [W].

F_{max} es fuerza de contacto máxima que soporta la rueda [N].

v es velocidad tangencial en la rueda.

μ es el coeficiente de fricción.

C_1 es el factor de contacto.

C_2 es el factor de servicio

El factor de contacto C_1 se usa para corregir la fuerza de contacto (pues el contacto es perfecto solo cuando la rodadura se da sobre una superficie plana o cuando el diámetro de la rueda conducida tienda a infinito) y se calcula usando:

$$C_1 = \frac{1}{\sqrt[3]{1 + \frac{d_1}{d_2}}} \quad (25)$$

Donde:

C_1 es el factor de contacto, d_1 es el diámetro de la rueda conductora y d_2 es el diámetro de la rueda conducida.

El diámetro de la rueda conducida es el de los anillos de 1,1m, mientras que el de la rueda conductora se toma de 4 pulgadas o 0,116m basado en las ruedas disponibles, se obtiene $C_I=0,964$.

El factor de servicio se determina según los parámetros de operación del equipo, como se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6

Criterios de selección del factor de servicio.

| Frecuencia de arranque. | Sin cargas de impacto | | | Con cargas de impacto y sobrecarga alta al arranque | | |
|-------------------------|------------------------------------|------------|-----------|---|------------|-----------|
| | Tiempo de operación diario (horas) | | | Tiempo de operación diario (horas) | | |
| | Hasta 10 | de 10 a 16 | Mas de 16 | Hasta 10 | de 10 a 16 | Mas de 16 |
| Operación continua | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,1 | 1,2 | 1,3 |
| Baja frecuencia | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,2 | 1,3 | 1,4 |
| Frecuencia moderada | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,6 |
| Alta frecuencia | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,8 |

Nota: Adaptado de Continental Contintech, 2008.

Teniendo en cuenta que el equipo no opera con cargas de impacto, que el volteo diario no excede las 10 horas y la frecuencia con la que el equipo se para es baja; se escoge un factor de servicio de 1,1.

Usando las ruedas super carga de 4 pulgadas que tienen una carga máxima de 300kg o 2943N y reemplazando lo demás valores en la Ecuación 24 se determina que la potencia efectiva transmisible es de 268,5 W. Comparando la potencia efectiva con la potencia requerida se obtiene el número de ruedas motrices Z.

$$Z = \frac{Pot}{P_{eff}} = \frac{330}{268,5} = 1,23 \quad (26)$$

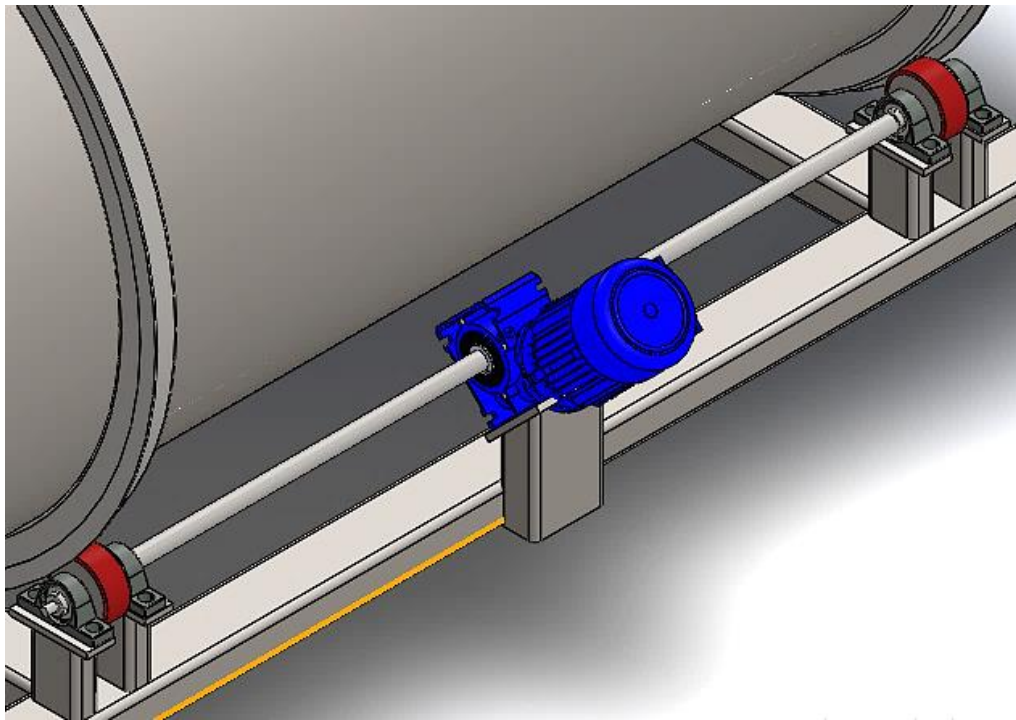
Se obtienen 2 ruedas motrices para la transmisión de potencia. Dividiendo la fuerza tangencial requerida entre las 2 ruedas, cada una debe transmitir 955N, que con el coeficiente de

fricción de 0,6 indica que cada rueda requiere una fuerza de contacto de 1592N. Este último valor es menor que la carga de 2685N que debe soportar cada rueda. Entonces, se determina que el equipo no requerirá sistemas adicionales para aumentar la fuerza de contacto.

El par de ruedas motrices debe estar del mismo lado para así poderlas conectar al motorreductor fácilmente mediante un eje. La disposición se puede ver en la Figura 34.

Figura 34

Disposición de la transmisión.



3.1.10. Selección del motorreductor

El motorreductor se escogió como fuente y transmisión de potencia por su accesibilidad y economía (a diferencia del motor hidráulico). La selección del motorreductor parte de los requerimientos de torque y velocidad.

El torque debe ser tal que cumpla con el requerimiento de fuerza tangencial transmisible en las ruedas de fricción y corregido por los factores de contacto y de servicio de estas. Este torque se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$T_{mr} = F_u \cdot d_1 \cdot \frac{C_2}{2C_1} \quad (27)$$

Donde:

T_{mr} es el torque requerido a la salida del motorreductor. [Nm]

F_u es la fuerza tangencial transmisible en las ruedas de fricción. [N]

d_1 es el diámetro de la rueda de fricción. [m]

C_2 es el factor de servicio de las ruedas.

C_1 es el factor de contacto en las ruedas.

Reemplazando los datos en la Ecuación 27 se obtiene un torque de salida de 135,5Nm.

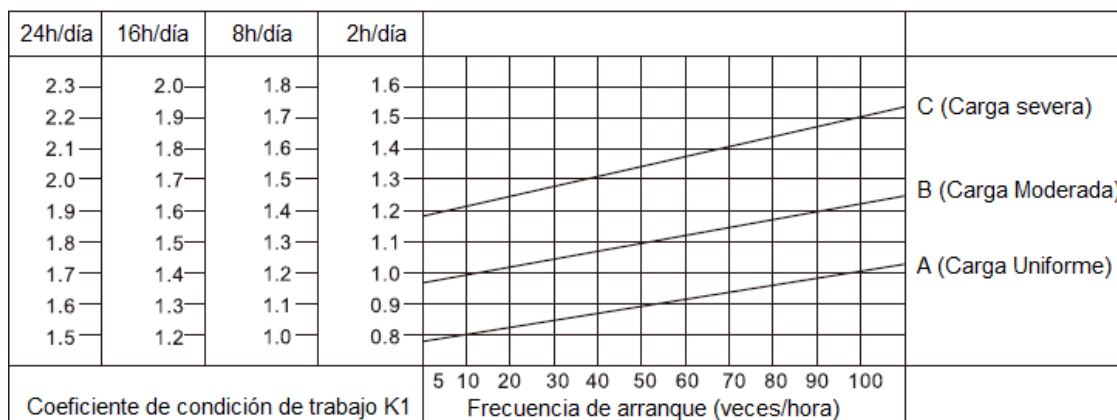
La velocidad de rotación a la salida del motorreductor se relaciona con la velocidad tangencial de las ruedas mediante el diámetro y es de 28,5 rpm.

Con los requerimientos conocidos se usa el catálogo de reductores JIE, Asia Drive (2018) para seleccionar un reductor tipo sinfín corona. Esto debido a que este reductor tiene 1 entrada y 2 salidas, lo que permite el montaje adecuado además de tener un costo menor a otros reductores.

Para seleccionar el reductor se deben establecer los coeficientes de condición trabajo K_1 y de temperatura K_2 . Para determinar el primero JIE facilita un diagrama, ver Figura 35.

Figura 35

Diagrama para coeficiente de condición de trabajo.



Nota: Adaptado de JIE, Asia Drive, 2018.

Basado en que el equipo opera menos de 2 horas al día, que tiene una carga uniforme y que el número de veces que arranca es menor a 5 veces por hora se selecciona un coeficiente K_1 de 0,8.

JIE indica que el coeficiente de temperatura K_2 es de 1 cuando la temperatura va de -10° a 30°C y de 1,1 a 1,2 si va de 30° a 40°C . Como el equipo opera a menos de 30°C el coeficiente K_2 toma como 1.

El torque requerido se corrige multiplicándolo por con los coeficientes K_1 y K_2 y con este se entra al catálogo, en este caso el torque será de 108,4 Nm. Utilizando los datos que el proveedor local de JIE aporta (para motores a 1800rpm) se busca el reductor adecuado para la aplicación; en este caso una caja de tamaño 63, ver Tabla 7.

Tabla 7

Datos técnicos caja reductora 63

| Caja reductora tamaño 63 (motor 4 polos, 1800rpm) | | | | |
|---|-----------------|-------------------------|-------------|--------------------|
| Relación | Velocidad (Rpm) | Potencia del motor (HP) | Torque (Nm) | Factor de Servicio |
| 10 | 180 | 2 | 71,1 | 1,2 |
| 15 | 120 | 2 | 103,2 | 0,9 |
| 20 | 90 | 2 | 134,4 | 0,8 |
| 30 | 60 | 1,5 | 138,8 | 1 |

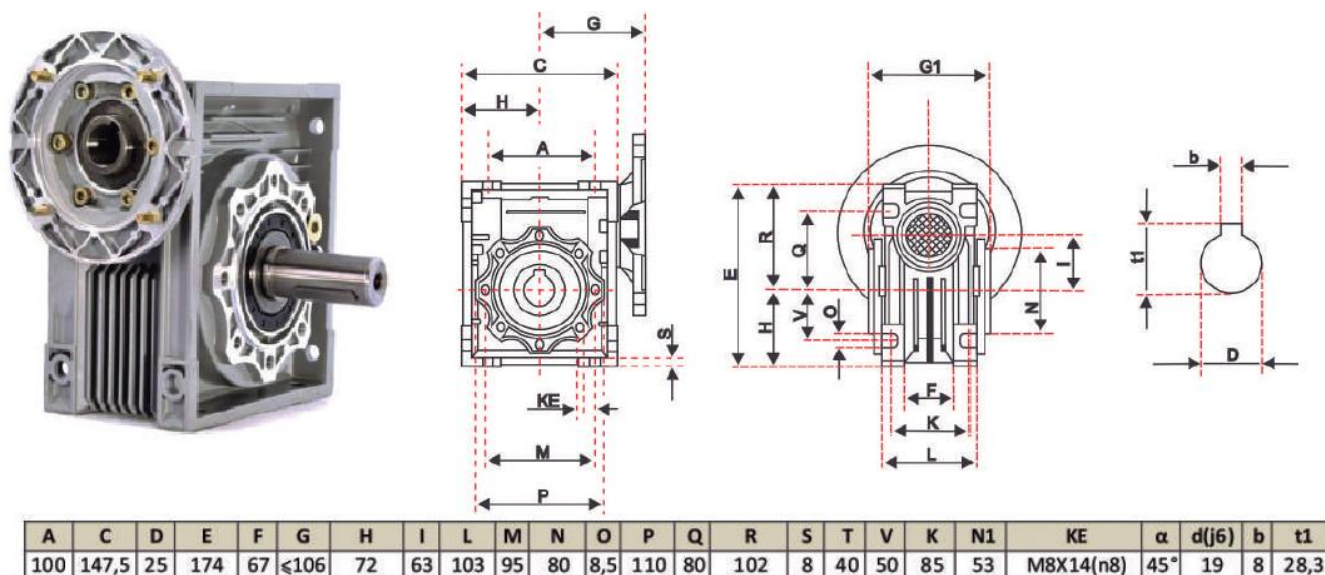
| | | | | |
|-----|------|---------------|-------|-----|
| 40 | 45 | 1,5 | 161,1 | 0,7 |
| 50 | 36 | 1 | 138,4 | 0,8 |
| 60 | 30 | $\frac{3}{4}$ | 117,7 | 0,9 |
| 80 | 22,5 | $\frac{1}{2}$ | 96,6 | 1,1 |
| 100 | 18 | $\frac{1}{2}$ | 108,8 | 0,9 |

Nota: Adaptado de Invereina, 2021.

Teniendo en cuenta el factor de servicio, el montaje de 1 HP con relación de 50 es el que cumple el torque, pues el torque disponible es 110,7 Nm (por el factor de servicio) y el requerido es 108,4 Nm. Se selecciona este último, ver Figura 36.

Figura 36

Caja reductora y dimensiones.



Nota: Cotas en mm, adaptado de Invereina, 2021.

3.1.11. Diseño del eje.

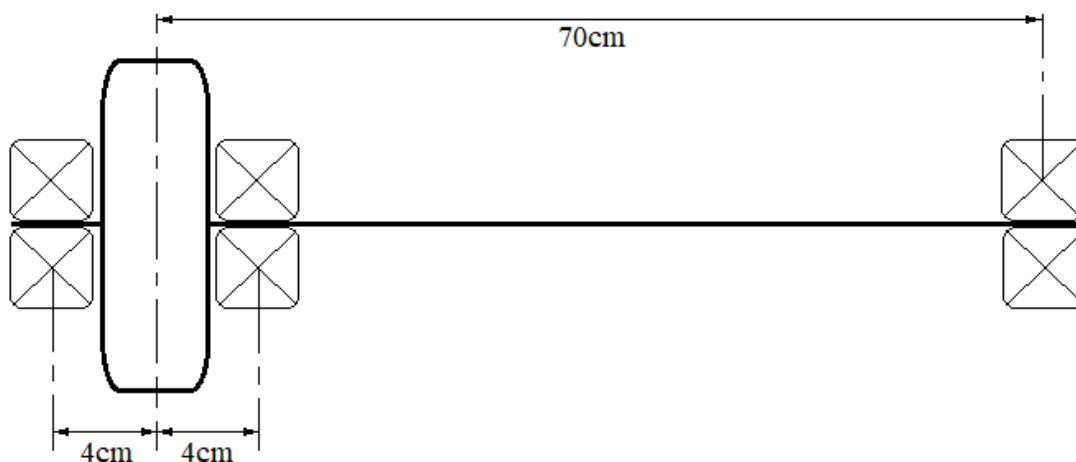
El eje es el elemento de máquina que transmitirá la potencia entre el motorreductor y las ruedas. Por las condiciones del montaje serán necesarios 2 ejes iguales en cada uno de los lados del motorreductor, el primer paso para diseñarlos es definir las cargas y los apoyos.

Las cargas principales estarán ubicadas donde el eje se acopla a la rueda de fricción. El ensamble llevará 1 chumacera a cada lado de la rueda a 4cm de su centro (pues es la menor

distancia que el montaje permite), esto con el fin de disminuir el momento flector en este punto. El eje se acopla al motorreductor entrando en un alojamiento hueco por lo que aquí habrá un tercer apoyo y la longitud del eje debe ser tal que conecte la rueda con el centro del reductor es decir 70cm. La Figura 37 representa el montaje.

Figura 37

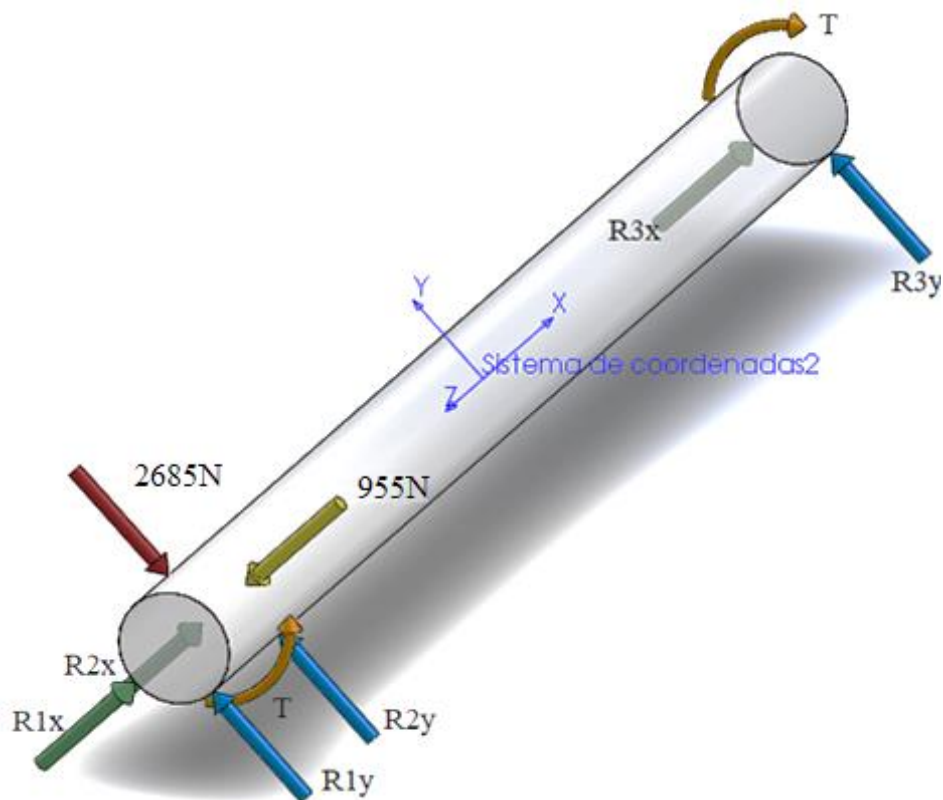
Representación del eje



Lo siguiente es la construcción del diagrama de cuerpo libre, para ello hay que tener en cuenta que la rueda de fricción recibe una fuerza radial de 2685 N y una tangencial de 955 N (como se mencionó en el apartado de las ruedas). Estas cargas deben ser trasladadas al eje por lo que la fuerza tangencial producirá un torque. Tanto las chumaceras como el alojamiento del reductor tendrán dos reacciones que para simplificar se tomarán en el mismo sistema coordenado que se planteó en el DCL del tambor (inclinado 45°), además en el reductor habrá un par reactivo. A pesar de que alguno de los apoyos reciba la carga axial esta se considerará despreciable. El diagrama de cuerpo libre se representa en la Figura 38.

Figura 38

Diagrama de cuerpo libre del eje



Debido a que el problema planteado es hiperestático, se utiliza el teorema de los tres momentos de o teorema de Clapeyron para vigas. El teorema plantea que los momentos flectores en vigas continuas satisfacen una relación matemática que depende del tipo de carga, del punto de aplicación y el tamaño de la viga. En el caso de este eje se puede tomar tanto el plano XZ como el YZ, como vigas continuas con tres apoyos y una carga puntual en el primer vano (espacio entre 2 apoyos) (Ortiz Berrocal, 2002). El planteamiento cumple con la siguiente relación:

$$2M_B(L_1 + L_2) = -\frac{3}{8}PL_1^2 \quad (28)$$

Donde:

M_B es el momento flector en el apoyo intermedio [Nm]

L_1 es la distancia entre el apoyo izquierdo e intermedio [m]

L_2 es la distancia entre el apoyo intermedio y el derecho [m]

P es la carga puntual aplicada en el primer vano [N]

Además, para este tipo de viga el momento flector máximo se encuentra en el punto de aplicación de la carga en el primer vano y se calcula directamente con una la expresión de la Ecuación 29. (Ortiz Berrocal, 2002).

$$M_{max} = \frac{M_B}{2} + P \frac{L_1}{4} \quad (29)$$

Los valores de las cargas P son conocidos en los dos planos y son 2685 N y 955 N para el plano YZ y XZ respectivamente. Además, los valores de L_1 y L_2 son los mismos en ambos planos y son 0,08m y 0,66m. Estos valores se reemplazan en las Ecuaciones 28 y 29 para obtener el momento flector en el apoyo intermedio en ambos planos.

$$M_{B(XZ)} = -1,55[Nm]$$

$$M_{max(XZ)} = 18,33[Nm]$$

$$M_{B(YZ)} = -4,35[Nm]$$

$$M_{max(YZ)} = 51,52[Nm]$$

El momento máximo neto al que se someterá el eje es el resultado de la suma vectorial de los momentos máximos en cada plano.

$$M_{max(N)} = \sqrt{18,33^2 + 51,52^2} = 54,68 [Nm]$$

Para determinar las reacciones también se cuentan con relaciones que se obtienen de un análisis sobre los apoyos como viga isostática y luego alterada por el momento flector intermedio (Ortiz Berrocal, 2002).

$$R_1 = \frac{P}{2} + \frac{M_B}{L_1} \quad (30)$$

$$R_2 = \frac{P}{2} - \frac{M_B}{L_1} - \frac{M_B}{L_2} \quad (31)$$

$$R_3 = \frac{M_B}{L_2} \quad (32)$$

Donde R_1 , R_2 y R_3 son las reacciones de los apoyos izquierdo, central y derecho respectivamente.[N]

Reemplazando los momentos flectores M_B de cada uno de los planos en las Ecuaciones 30, 31 y 32 se obtienen las reacciones en cada apoyo.

$$\begin{aligned} R_{1(x)} &= 458 \text{ [N]} & R_{1(y)} &= 1288 \text{ [N]} \\ R_{2(x)} &= 499 \text{ [N]} & R_{2(y)} &= 1404 \text{ [N]} \\ R_{3(x)} &= -2,4 \text{ [N]} & R_{3(y)} &= -6,6 \text{ [N]} \end{aligned}$$

Finalmente, el valor del torque T se determina teniendo en cuenta que este es el producto de la fuerza tangencia por el radio de la rueda (2 pulgadas) lo que da un torque de 48,5 Nm.

El cálculo del diámetro del eje se debe realizar utilizando teoría de fatiga, en este caso se toma la fórmula para el diámetro de un eje macizo establecida por la norma ASME. Esta ecuación se puede usar debido a que se tiene un momento flector completamente alternante (es decir con componente media cero) y un torque constante (sin componente alterna) (Norton, 2011).

$$d = \left\{ \frac{32N_f}{\pi} \left[\left(\frac{k_f M_a}{S_f} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{k_{fsm} T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (33)$$

Donde:

d es el diámetro del eje [m]

N_f es el factor de seguridad.

k_f es el concentrador dinámico para flexión.

M_a es el momento alterno [Nm]

S_f es la resistencia a la fatiga [Pa]

k_{fsm} es el concentrador dinámico para torsión

T_m torque [Nm]

S_y resistencia a la fluencia [Pa]

El material escogido para el eje es el acero AISI 4140, por sus buenas propiedades mecánicas y su disponibilidad en el mercado. Este acero posee una resistencia a la fluencia de 750MPa y una resistencia ultima a la tracción de 1000MPa.(ThyssenKrupp Steel, 2021)

Para determinar la resistencia a la fatiga S_f se tiene en cuenta que se calcula para aceros como la mitad de la resistencia ultima S_{ut} y corregida por algunos factores. (Norton, 2011)

$$S_f = 0,5C_c * C_s * C_{su} * C_t * C_{co} * S_{ut} \quad (34)$$

Donde:

C_c es el factor de carga, C_s el de tamaño, C_{su} el de superficie, C_t el de temperatura y C_{co} el de confiabilidad. S_f es la resistencia a la fatiga [Pa] y S_{ut} es la resistencia ultima [Pa]

La determinación de los factores se presenta en la Tabla 8

Tabla 8

Factores de corrección para fatiga.

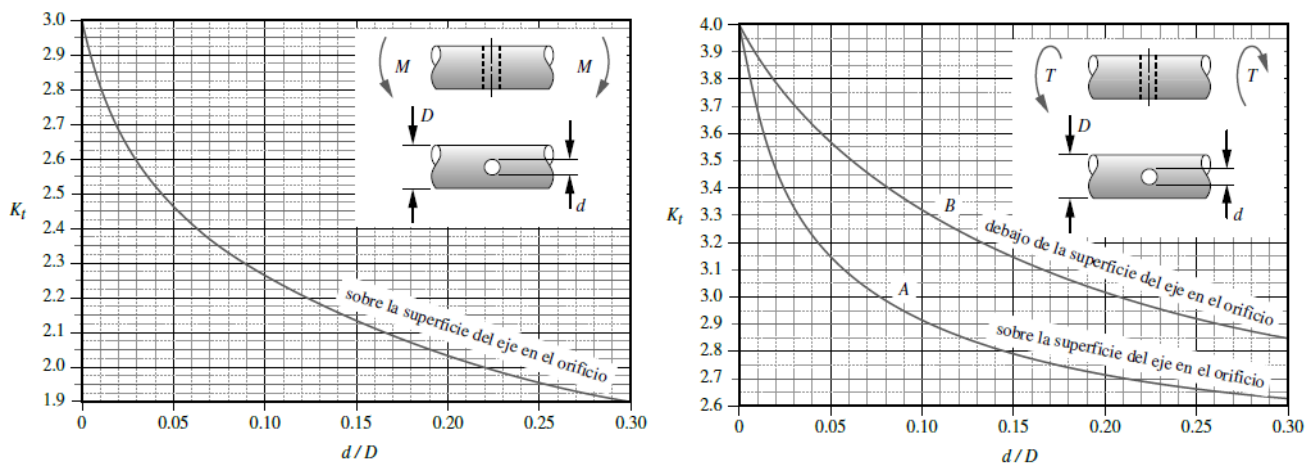
| Factor | Valor | Fuente |
|----------------------------------|--------------|---|
| Factor de carga C_c | 1 | Valor para cargas de flexión |
| Factor de tamaño C_s | 0,87 | Calculado para 25mm (agujero del reductor) |
| Factor de superficie C_{su} | 0,7 | Valor para acabado tipo maquinado |
| Factor de temperatura C_t | 1 | Valor para temperaturas <450°C |
| Factor de confiabilidad C_{co} | 0,7 | Calculado para una confiabilidad del 99,99% |

Nota: Todos los factores son calculados según las indicaciones de Norton (2011)

Reemplazando todos los factores en la Ecuación 34 se obtiene un S_f de 213,15Mpa. Para determinar los concentradores de esfuerzos hay que establecer qué tipo de concentrador existe en la zona del eje que se está evaluando. En este caso la rueda de fricción se fija mediante un pasador, luego el eje lleva un agujero pasante. Se determinan los concentradores para carga estática se relacionan con los concentradores dinámicos. Por la disponibilidad de los pasadores elásticos para fijar las ruedas al eje los agujeros son de 6mm lo que da una relación de diámetro de agujero y eje de 0,24. Con este dato se extraen los valores de concentradores de esfuerzo estático k_t de la Figura 39 y son de 1,98 y 2,67 para flexión y torsión respectivamente.

Figura 39

Concentrador de esfuerzos en eje con agujero pasante.



Nota: Valor del concentrador para flexión (izq) y torsión (der), tomado de Norton (2011.)

Los concentradores estáticos y dinámicos se relacionan de la siguiente forma:

$$q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1} \quad (35)$$

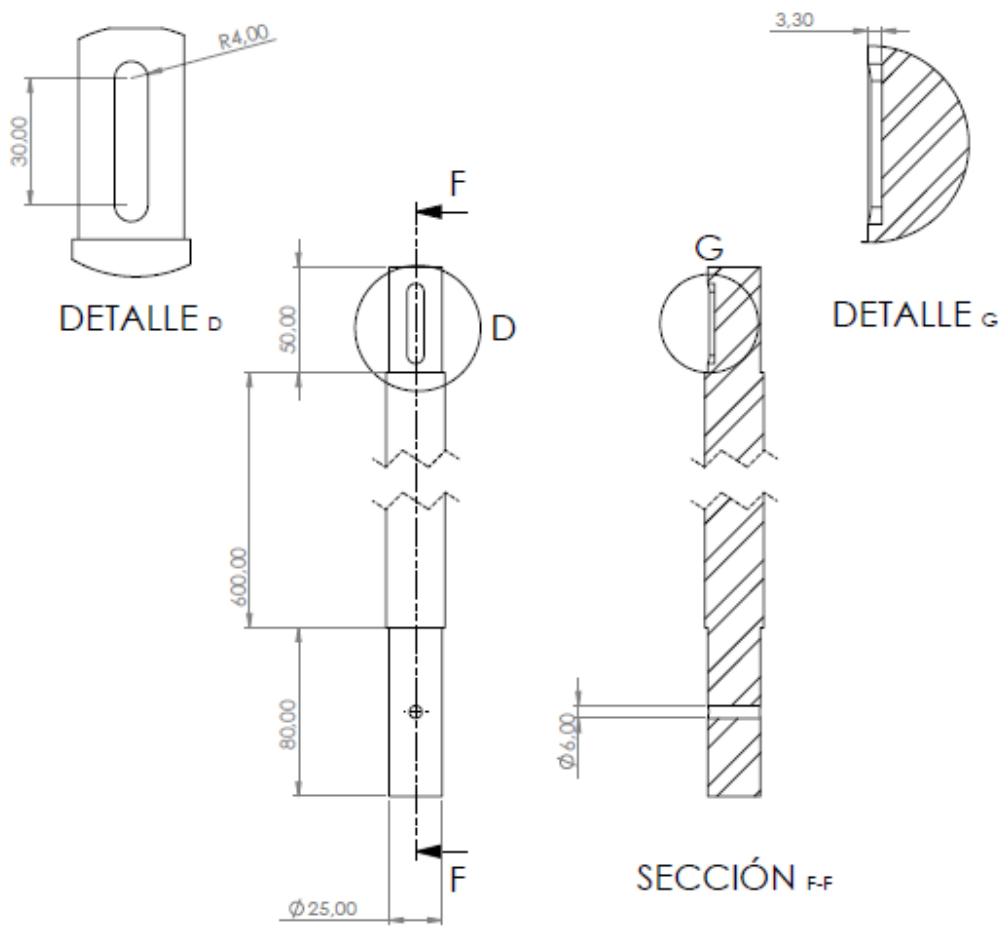
Donde q es la sensibilidad a la muesca del material, k_t el concentrador de esfuerzos estáticos y k_f el concentrador de esfuerzos a la fatiga o dinámico. El valor de q se toma para un acero con S_{ut} de 1000Mpa y radio de muesca 2mm. Según los diagramas de Norton (2011) q será 0,9.

Reemplazando los valores de k_t y q en la Ecuación 35 se obtienen los valores de los concentradores dinámicos para flexión k_f como 1,7 y torsión k_{fms} como 2,5.

Con todos los factores conocidos y sabiendo que en momento alterno M_a tiene un valor de 55Nm y el torque medio T_m un valor de 48,5Nm se reemplazan los valores en la Ecuación 33 con un diámetro de 0,025m y se obtiene un factor de seguridad N_s de 3,3 lo cual es un buen valor y se deja como diámetro de eje. El eje se maquina a partir de una barra de acero redonda de 28 mm (siguiente diámetro comercial) además lleva un cuñero para acoplarse al reductor. Las dimensiones del cuñero dependen de las cuñas del reductor y se presentan en la Figura 40.

Figura 40

Dimensiones del eje.



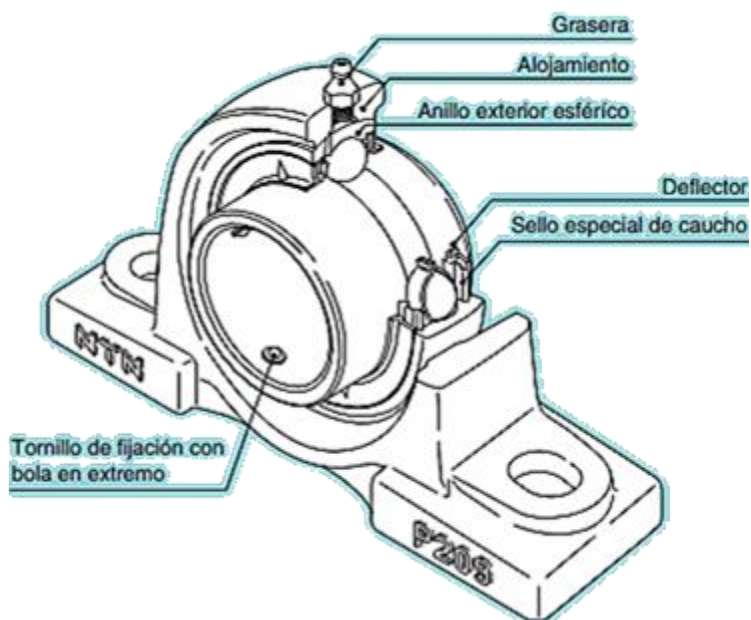
Nota: Cotas en mm.

3.1.12. Selección de chumaceras.

Para la selección de chumaceras se parte del tamaño del eje que es de 25mm, por lo que el alojamiento de la chumacera es de este tamaño. Haciendo una revisión en el catálogo de chumaceras de NTN (2003) se identifica el tipo de chumacera que cumpla con el requerimiento dimensional y posteriormente si soporta las cargas. Para soportar el eje la chumacera más común es el tipo puente de hierro fundido relubricante, ver Figura 41.

Figura 41

Chumacera tipo puente.



Nota: Tomado de NTN (2003)

El tamaño de 25 mm corresponde al modelo UCP205D1 y para determinar si soporta las cargas se tiene en cuenta que esta chumacera viene montada con un rodamiento UC205D. Los valores de carga dinámica y estática para este rodamiento según el catálogo son 14000N y 7850N respectivamente. La metodología indica que cuando la carga axial es muy pequeña, los valores de carga que soporta el rodamiento se comparan directamente con la carga radial a la que está sometido en la aplicación. En este caso este valor se calcula como una carga radial equivalente

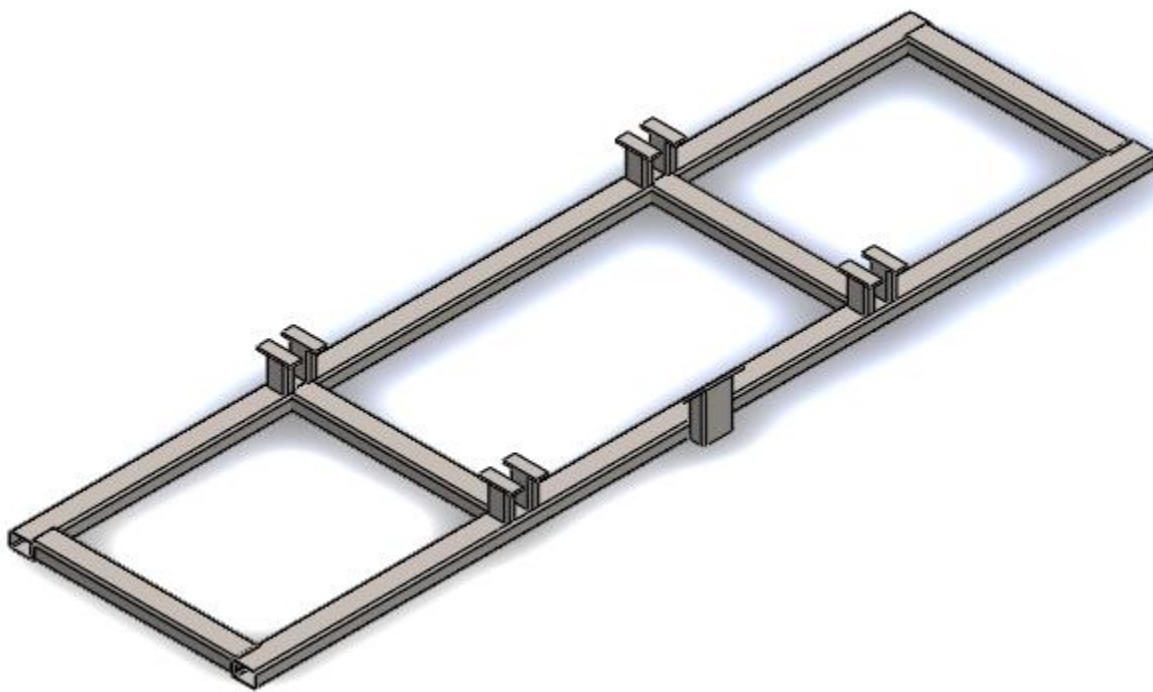
entre las reacciones a las que se someten las chumaceras en los dos planos y es una suma vectorial. Los datos obtenidos anteriormente muestran que el segundo apoyo es el que soporta mayor carga, con una carga equivalente de 1490N lo que indica que en cualquier condición las chumaceras cumplen el requerimiento.

3.1.13. Diseño del bastidor.

El bastidor se construye con tubos de acero estructural rectangulares de 4x8cm y 3mm de espesor, teniendo una forma base similar a la de una escalera. En las posiciones correspondientes se adecuan plataformas de platinas de acero de $\frac{1}{4}$ de pulgada perforadas para atornillar las ruedas de soporte, las chumaceras y el motorreductor. La elevación de las plataformas se logra sobre tubería y está dispuesta de tal forma que permita el ensamblaje de todos los elementos sin que haya obstrucción para su funcionamiento. Ver Figura 42.

Figura 42

Representación del bastidor

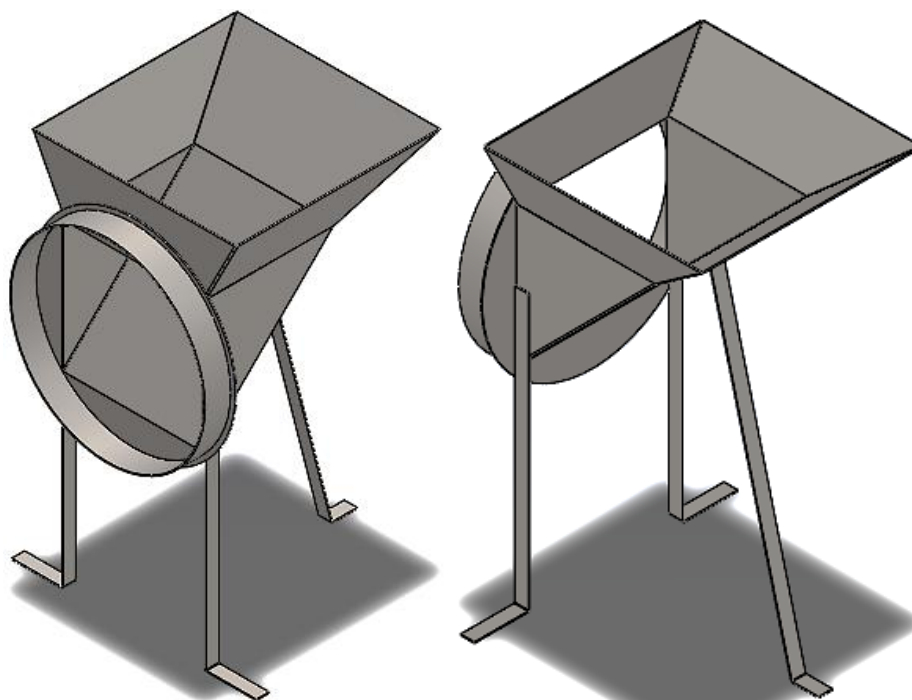


3.1.14. Tolva.

La tolva es el elemento que permite la alimentación del compostador de una forma cómoda. Esta se construye ensamblando y soldando láminas de acero de 2mm de modo que tenga una boca de alimentación de 40x40cm y se acople al agujero del compostador de forma similar a la tapa posterior. Ver Figura 43.

Figura 43

Representación de la tolva



3.2. Montaje Eléctrico.

El montaje eléctrico es muy sencillo y consiste en un arrancador directo para el motor. Debido a que el motor operará a 220 voltios, la corriente nominal indicada en la placa es de 5 amperios. Basado en lo anterior se selecciona un arrancador simple de la marca CHINT (Ver Figura 44) que es apto para corrientes de 5 a 8 amperios y que incluye un contactor, relé térmico y los interruptores de arranque y parada.

Figura 44*Arrancador Directo*

Nota: Tomado de Emin (2021)

Las conexiones entre el motor, el arrancador y el tomacorriente se realizan con cable calibre 14 encauchetado, que soporta hasta 15 amperios de corriente, así como las condiciones exteriores.

3.3. Manejo de variables.**3.3.1. Temperatura.**

La temperatura es la variable que mejor representa el proceso de compostaje, por lo que se debe tener un sistema de monitoreo eficaz de la misma. Para evitar conexiones electrónicas y alimentación eléctrica se escoge un termómetro análogo como sistema. El termómetro tiene un dial y aguja que marca la temperatura entre -10°C y 110°C que es un rango adecuado, una sonda de medición de 20cm de largo para asegurar un buen contacto con el material y una rosca tipo NPT para asegurarlo al tambor. Para roscar el termómetro al tambor se perfora la pared de este y se acopla una unión NPT tipo hembra en el agujero. El termómetro se muestra en la Figura 45.

Figura 45*Termómetro Análogo*

Nota: Tomado de Termometría Industrial CG (2021)

3.3.2. Aireación.

Para determinar si es o no necesario el uso de ventilación forzada se hace una revisión bibliográfica al respecto. Arslan et al. (2011) estudió la influencia de la tasa de aire en el compostaje, desde 0,37 a 0,99 litros de aire/min por kilogramo de materia orgánica y obtuvo los mejores resultados 0,62 litros/min por kilogramo. En el caso de este dispositivo si se carga con 500kg la tasa de aire sería de 310 litros/min y corresponde a un valor de flujo muy pequeño que no requiere ventilación forzada y se considera se satisface con los agujeros de ventilación únicamente.

3.4. Construcción

El proceso constructivo se realizó basado en los planos dimensionales y de ensamblaje (ver Apéndice C). La construcción inició con el corte y cilindrado de las láminas, ver Figura 46. Para construir el cuerpo del tambor se usaron 3 láminas A36 HR de 1,22x2,44m de 2mm y se construyó en 2 mitades posteriormente se unieron con soldadura, ver Figura 47.

Figura 46

Cilindrado de la lámina.



Figura 47

Cuerpo del Tambor



Las paletas se obtuvieron cortando y doblando el trozo sobrante de lámina, se distribuyeron según lo establecido y se soldaron al interior del tambor, ver Figura 48.

Figura 48

Tambor con paletas.



Para las tapas se usó una lámina similar de 1x2m. Las tapas y sus agujeros se cortaron con oxicorte y a la tapa posterior se le fabricó una compuerta con bisagras. Ver Figura 49.

Figura 49

Tapa posterior



Para garantizar la rigidez del tambor se adicionó un anillo en platina en la parte posterior, este junto con la tapa frontal le dieron la forma adecuada de cilindro, ver Figura 50.

Figura 50

Anillo de platina y tambor.



Los anillos que hacen de pista de rodadura se cilindraron de tubo estructural de 5x5cm y 3mm de espesor, posteriormente se unieron al tambor con soldadura. Ver Figuras 51 y 52.

Figura 51

Anillo de tubo estructural



Figura 52

Tambor con anillos colocados.



La Figura 53 muestra el bastidor fabricado en tubería estructural soldada. Tanto para las ruedas de soporte como para las chumaceras se fabricaron bases utilizando lámina de $\frac{1}{4}$ de pulgada y tubería cuadrada, ver Figura 54.

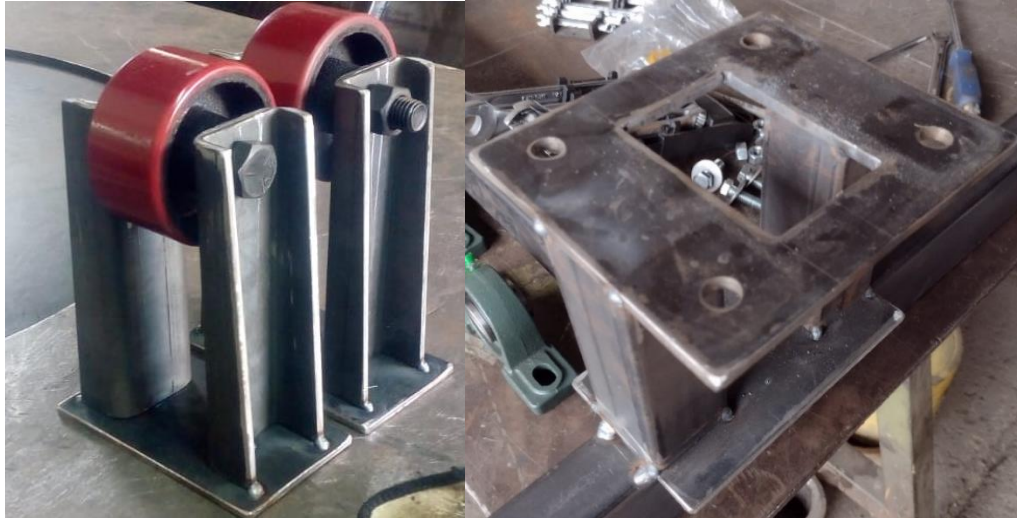
Figura 53

Estructura del bastidor



Figura 54

Bases para ruedas y chumaceras



Para poder terminar el bastidor fue necesario ubicar el motorreductor con la alineación correspondiente, por esto se fabricaron los ejes. Dos barras de acero AISI 4140 de 28mm fueron mecanizadas en sus extremos hasta 25mm, se le fabricó el cuñero respectivo y se perforaron para el pin elástico de 6mm, ver Figura 55.

Figura 55

Mecanizados del eje.



Las ruedas de transmisión se adaptaron para ser acopladas mediante el pin elástico al eje, por lo cual se unieron soldadas a un buje con el agujero pasante de 6mm perforado. Ver Figura 56.

Figura 56

Rueda de transmisión.



Las chumaceras, las ruedas y los ejes se montaron sobre el bastidor y con la caja del reductor se obtuvo el posicionamiento adecuado para obtener las medidas de la base del motorreductor y proceder a construirla, ver Figura 57.

Figura 57

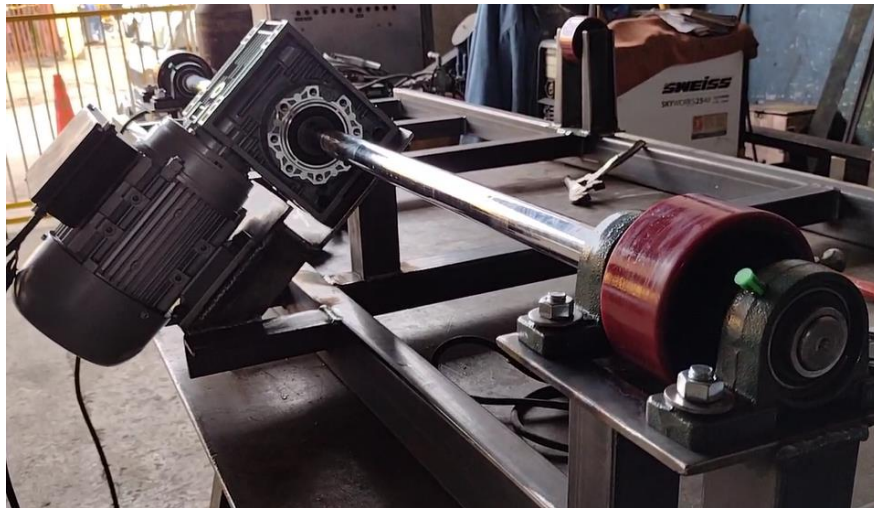
Posicionamiento de componentes mecánicos



Con las medidas adecuadas para el ensamble se construyó la base del motorreductor y se ensambló todo el conjunto de la transmisión como se muestra en la Figura 58.

Figura 58

Transmisión de potencia



Para guiar el del tambor sobre los soportes, se fabricaron dos anillos de platina de 1 pulgada de ancho como lo muestra la Figura 59. Estos anillos se soldaron a los extremos de los anillos de tubería como tope. El conjunto montado se puede ver en la Figura 60.

Figura 59

Anillos de platina.



Figura 60

Tambor montado sobre bastidor.



Lo siguiente fue el acople de la tapa posterior, para ello se le añadió una estructura de ángulos de acero que se atornillaron al bastidor según la disposición física, ver Figura 61.

Figura 61

Tapa posterior ensamblada



La tolva fue construida en lámina según las dimensiones necesaria para acoplarse a la entrada del tambor y se aseguró al bastidor mediante platinas de acero, ver Figura 62.

Figura 62

Construcción de la tolva.



Todos los componentes fueron ensamblados para verificar su correcto funcionamiento, como se muestra en la Figura 63.

Figura 63

Compostador ensamblado.



Se realizó la conexión eléctrica y se dispuso una placa para atornillar la caja del arrancador al bastidor. Se perforaron 5 agujeros de ½ pulgada en la parte inferior de tambor para labores de limpieza y drenaje de humedad que luego se taparon con tapones de caucho. Se probó el funcionamiento del sistema motriz y posteriormente se volvió a desensamblar el conjunto para aplicar recubrimientos. Tanto el bastidor como las paredes externas del tambor, tolva y tapas se pintaron con anticorrosivo cromato de zinc de color verde (Figura 64), mientras que las paredes internas se pintaron con recubrimientos epóxicos, primero con anticorrosivo gris y luego con barniz blanco (Figura 65). Estos recubrimientos se seleccionaron por su alta resistencia a la corrosión, desgaste y temperatura, así como buena adherencia.

Figura 64

Piezas con recubrimiento de cromato de zinc.



Figura 65

Piezas con recubrimientos epóxicos



El equipo se transportó al sitio final de operación en el municipio de Cerrito, Santander y se ensambló nuevamente para las pruebas. En el espacio entre las tapas y el tambor se dispuso un sello de espuma con adhesivo para evitar fugas de material en la operación (Figura 66).

Figura 66

Sellos de espuma



Al notar que el desplazamiento axial era excesivo y aumentaba el desgaste lateral de las ruedas, se decidió agregar una rueda vertical para mantener la alineación (Figura 67).

Figura 67

Rueda que absorbe la carga axial



Se completó el ensamble del equipo con la conexión eléctrica, el termómetro y quedando listo para la puesta en marcha. El aspecto final de equipo se muestra en las Figuras 68 y 69.

Figura 68

Compostador terminado vista posterior.



Figura 69

Compostador terminado vista frontal.



3.5. Método operacional.

Para evaluar el desempeño operacional del compostador, se realizó el seguimiento de la producción de tres lotes de materia orgánica procesada. A continuación, se presenta la metodología seguida en cada uno de los experimentos.

3.5.1. Selección y preparación de los residuos orgánicos.

Por la disponibilidad de la materia orgánica en la región de trabajo (Municipio del Cerrito, Santander) se contó principalmente con los siguientes residuos: estiércol ovino/caprino, restos de frutas y vegetales crudos, pasto, cascaras de maíz y aserrín. Los residuos procesados presentan gran heterogeneidad morfológica (ver Figura 70). En el caso de grandes residuos vegetales como las cáscaras de maíz fue necesaria una reducción manual del tamaño de partícula hasta alcanzar dimensiones menores a 7 cm (Raabe, 1991).

Figura 70*Residuos orgánicos utilizados*

Nota: Estiércol (Sup Izq); Pasto (Sup Der); Frutas, verduras y cáscaras de maíz (Inf Izq) y Aserrín (Inf Der)

Las proporciones de cada una de las materias crudas agregadas en cada lote se calcularon basadas en la relación C:N recomendada para la mezcla (este proceso se detalla en el Apéndice A). La Tabla 9 presenta las proporciones agregadas a cada lote, así como la relación C:N de cada componente y de toda la mezcla.

Tabla 9*Proporción de residuos en cada lote para compost.*

| Composición | Lote 1 | | Lote 2 | | Lote 3 | |
|-----------------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| | m (kg) | C:N | m (kg) | C:N | m (kg) | C:N |
| Estiércol | 265 | 22 | 230 | 22 | 240 | 22 |
| Pasto | - | - | - | - | 115 | 20 |
| Restos de frutas y verduras | 166 | 35 | 180 | 35 | 112 | 35 |
| Cáscaras de maíz | 36 | 70 | 38 | 70 | - | - |
| Aserrín | 15 | 200 | 10 | 200 | 20 | 200 |
| Total | 482 | 36 | 458 | 35 | 487 | 32 |

Nota: Valores C:N tomados de Atchley, 2013 y L'AGRET. Cultura de Terra, 2013

3.5.2. *Proceso.*

Luego de tener la correcta proporción de residuos, estos se fueron agregando al tambor a través de la tolva, teniendo en cuenta que la alimentación debía hacerse con el equipo encendido para distribuir bien el material en el interior del tambor (ver Figura 71).

Figura 71

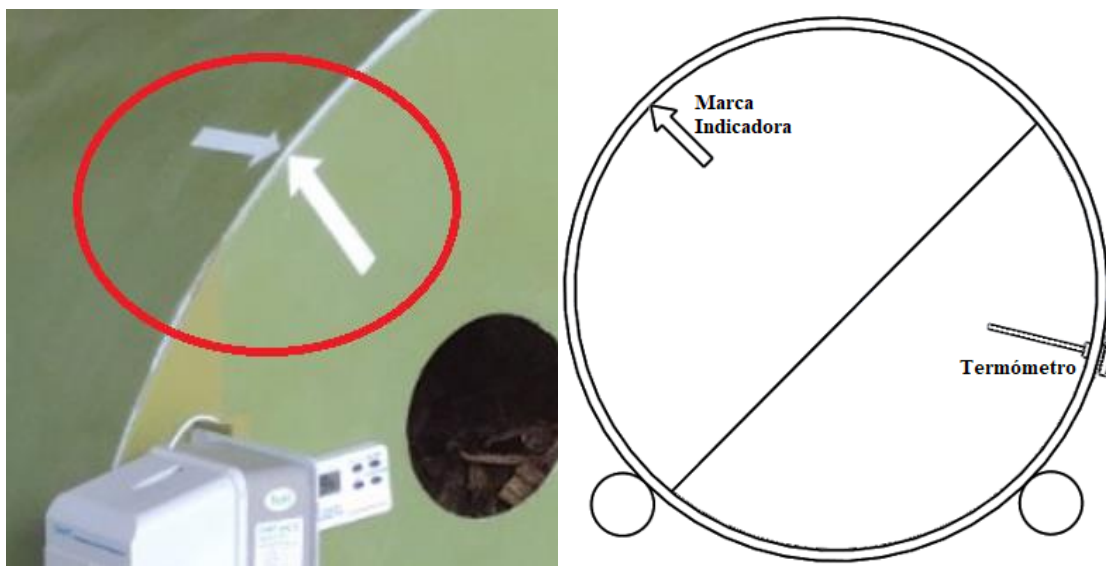
Cargue del tambor y tambor cargado.



Cuando el compostador estaba completamente cargado se continuó rotando por algunos minutos para lograr una mezcla homogénea de materia orgánica. Una vez finalizado el proceso de mezclado, el tambor debe ubicarse en una posición de referencia para permitir el monitoreo adecuado de la temperatura. Para esto se colocaron una marcas entre entre tambor y tapa posterior que indicaban la posición correcta en que la sonda del termómetro quedaba inmersa completamente en el sustrato (ver Figura 72).

Figura 72

Marcas indicadoras y posición del termómetro en el tambor.



Durante el proceso de compostaje se monitorearon la temperatura del sustrato y la ambiental, esto con el fin de identificar alguna relación entre ellas. Para el caso de los lotes 1 y 2 se tomaron datos tres veces al día (6am, 12m y 6pm), para el lote 3 se tomó una medida diaria a las 6pm (ver Figura 73).

La frecuencia de volteo se estableció cada 24 horas, basado en el estudio de Kalamdhad & Kazmi (2009a). Esta frecuencia de volteo permite alcanzar mejores resultados (mayor contenido de carbono, nitrógeno y fósforo) del proceso de compostaje en tambores rotativos.

Figura 73

Termómetro bimetálico marca SunPass utilizado para medir la temperatura del sustrato.

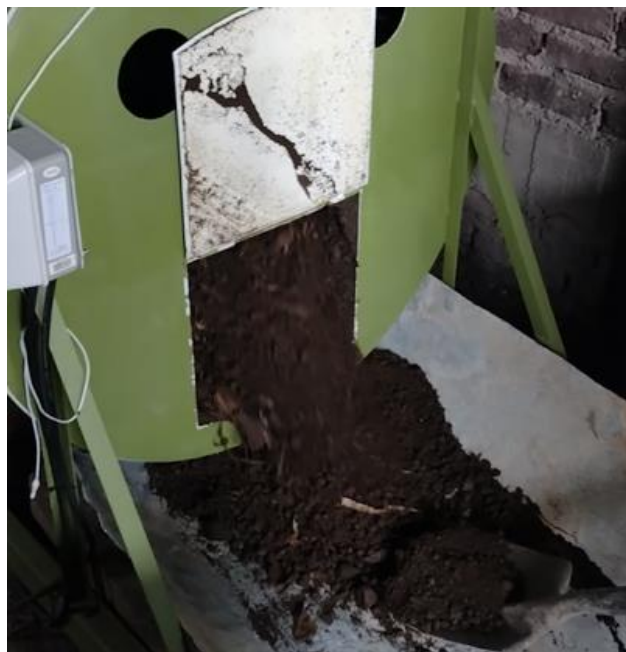


Cada vez que se realizó un volteo se encendió el equipo por aproximadamente 15 minutos para garantizar que el producto recibiera suficiente aire y las partículas se reubicaran. Al detener el equipo nuevamente, se verificaba la correcta posición de las marcas. El registro tanto de las temperaturas como de las horas de volteo se tomó en una bitácora.

El procesamiento continuó con cada uno de los lotes durante un tiempo de entre 13 y 16 días. El proceso de compostaje se detuvo una vez que el sustrato alcanzó el equilibrio térmico con el ambiente. Cuando se alcanza la estabilidad térmica con el ambiente el proceso entra en una etapa de maduración, en la cual debe restringirse el proceso de aireación para minimizar la mineralización de compuestos húmicos (Bueno Márquez et al., 2008). El producto se extrajo por la compuerta mediante la acción de la propia rotación y con la ayuda de una pala, ver Figura 74.

Figura 74

Extracción del compost terminado



Luego de extraer el producto de cada lote se midió la masa del mismo con el fin de determinar el rendimiento del proceso propuesto en los objetivos. Posteriormente el producto se almacenó para que terminara su fase de maduración.

El protocolo que se debe seguir para obtener compost utilizando el equipo se detalla en el manual de operación (Apéndice D)

Para determinar las propiedades del compost, en un primer momento se realizó un análisis cualitativo del producto final de los diferentes lotes enfocándose en características como: color, olor, textura y tamaño de las partículas. Posteriormente para determinar las propiedades cuantitativas físicas (humedad) y químicas (contenido elemental) fue necesario extraer una muestra del compost para que se le realizaran los estudios correspondientes. La muestra se tomó del Lote 2 pues presentaba el mejor aspecto (se pretendían tomar muestras de todos los lotes sin embargo los estudios para todas ellas resultaban muy costosos).

Ante la necesidad de que la muestra fuese lo más representativa posible se usó el método de cono y cuarteo, un método usado para tomar muestras de biocombustibles. El método consiste en colocar la muestra sobre una superficie limpia y palearla de tal forma que las partículas se deslicen en todas las direcciones y se mezclen uniformemente formando una pila cónica (este proceso se repite 3 veces). Una vez formado el tercer cono se aplana su superficie insertando repetidamente la pala para obtener un monton de espesor y diametro uniforme que luego ser reparte en cuatro porciones iguales. Dos de estos cuartos diagonalmente opuestos se descartan y el proceso se repite con el material restante tantas veces como sea necesario para obtener el tamaño de la submuestra deseado (ISO, 2015). En este caso, el proceso se realizó para obtener una muestra de 500 gramos aproximadamente (ver Figura 74)

Figura 75

Representación del proceso de cono y cuarteo.



La muestra fue enviada al Laboratorio Químico de Consultas Industriales de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander donde se determinó la humedad, el contenido de carbono orgánico, nitrógeno orgánico y nitrógeno total.

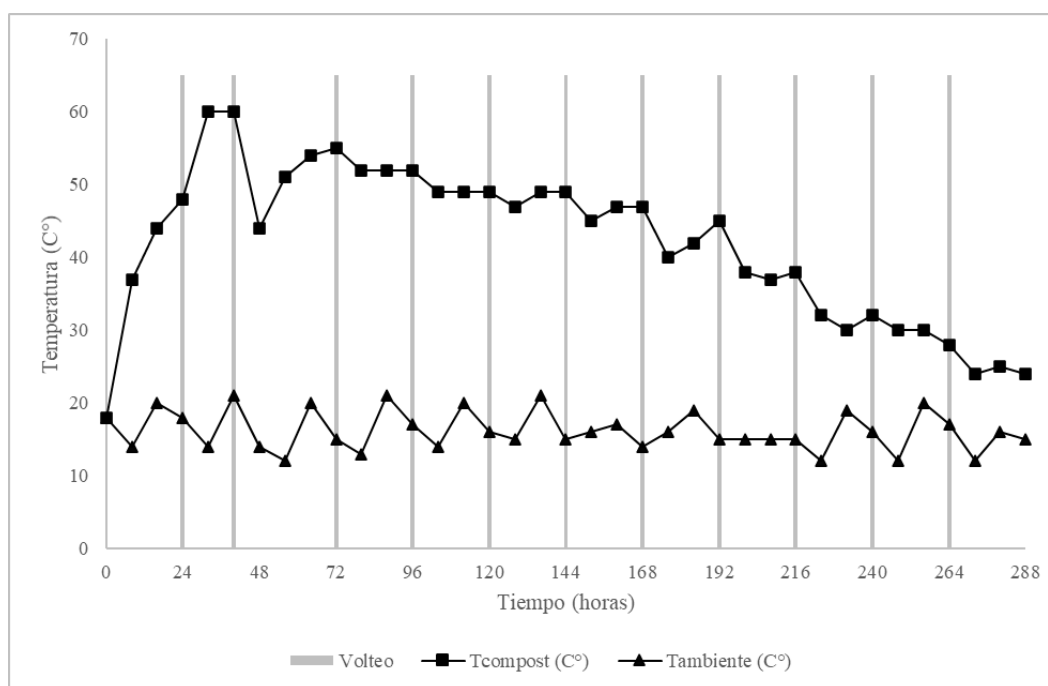
4. Resultados.

4.1.1. Curvas de temperatura.

Las Figuras 76 a 78 presentan los resultados del comportamiento de la temperatura a lo largo del proceso de compostaje con cada uno de los lotes analizados.

Figura 76

Curva de temperatura del compost del Lote 1 (C:N=36).

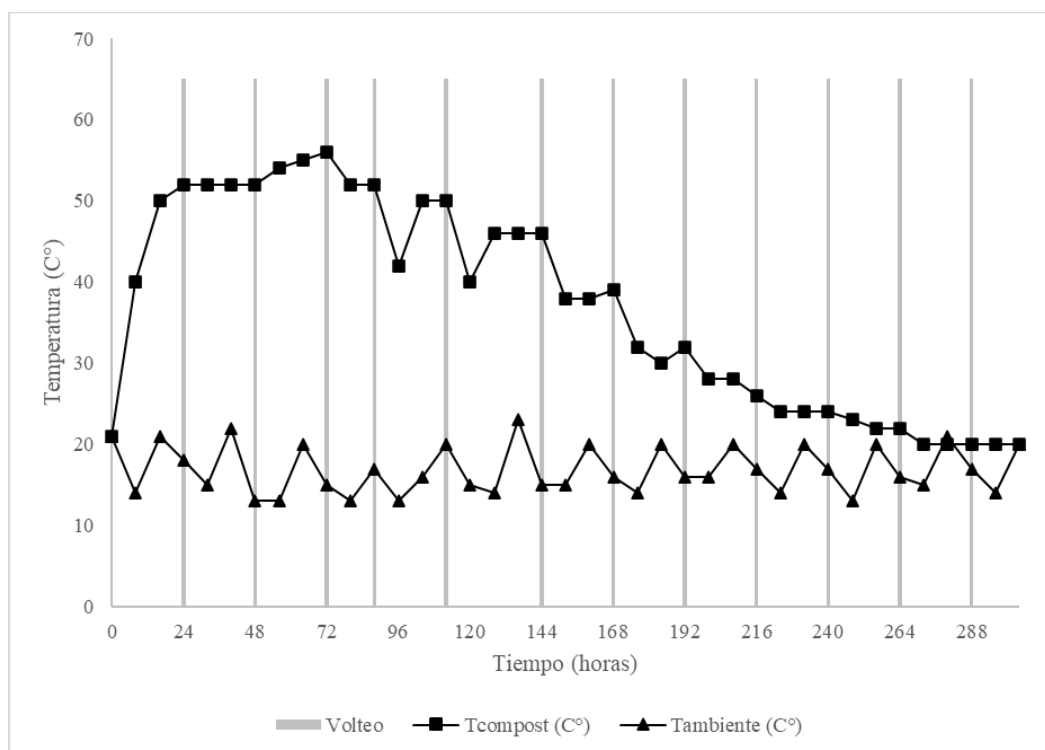


El comportamiento mostrado en la Figura 76 es el correspondiente al primer lote y presenta tanto las temperaturas del sustrato como la ambiental monitoreadas a lo largo de las horas. La temperatura del compost presenta un comportamiento ascendente durante las primeras 42 horas hasta alcanzar un máximo de 60°C; luego desciende hasta 45°C en la medida tomada a las 48 horas; posteriormente la temperatura vuelve a subir hasta 55°C para luego tener un descenso

gradual hasta estabilizarse alrededor de 25°C entre los días 11 y 12. La temperatura ambiente no presentó grandes variaciones y se mantuvo entre 13 y 21°C a lo largo de toda la medición. No se encontró una clara influencia entre las temperaturas del sustrato y la temperatura ambiente. También se muestran los datos de las horas de volteo en su mayoría realizadas cada 24 horas excepto en el día 2 donde el volteo se realizó 6 horas antes de lo previsto. Lo anterior estaría influenciando la siguiente medida de temperatura que presentó un descenso a las 48 horas pues voltear antes hizo que el calor se disipara y el producto no tuviera suficiente tiempo de calentamiento antes de la medición.

Figura 77

Curva de temperatura del compost del Lote 2 (C:N=35).

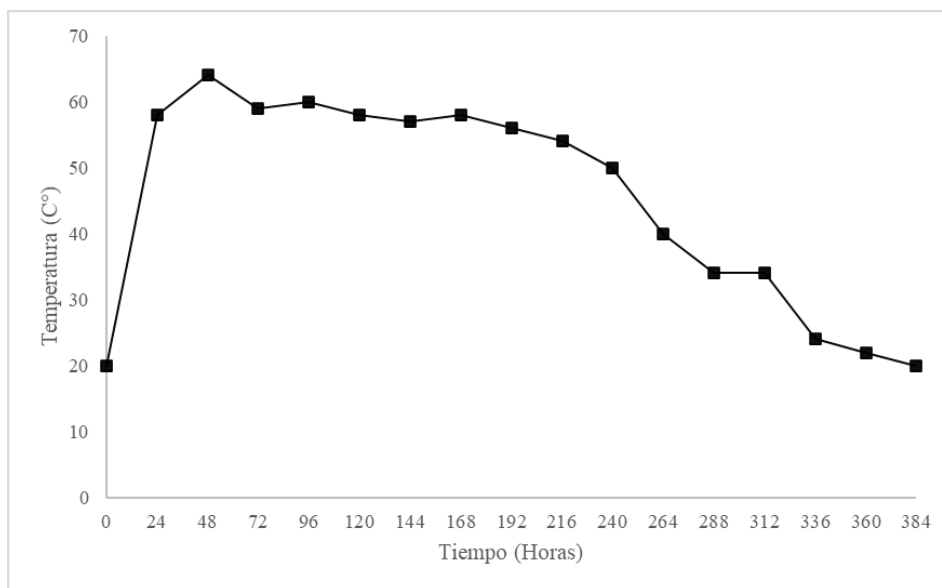


La Figura 77 corresponde a la curva del Lote 2. La temperatura del sustrato en este caso tiene un ascenso sostenido durante las primeras 72 horas y alcanza un máximo de 55°C. Después de este tiempo se presenta un descenso general de la temperatura que se produce gradualmente y

que se estabiliza alrededor de los 20°C a partir del día 11; exceptuando las medidas de las 96 y 120 horas donde hay un descenso repentino. Contrastando estas caídas de temperatura con las horas de volteo sucede una situación similar a la del Lote 1, pues voltear en un horario previo a la toma de temperatura reduce el tiempo de calentamiento. Para estas dos medidas mencionadas la hora de volteo se adelantó por cuestiones prácticas. La temperatura del ambiente se mantiene en un rango de 13 y 23°C y no presenta grandes cambios, así mismo, no se encuentra una clara relación entre este parámetro y la temperatura del sustrato.

Figura 78

Curva de temperatura del compost del lote 3.

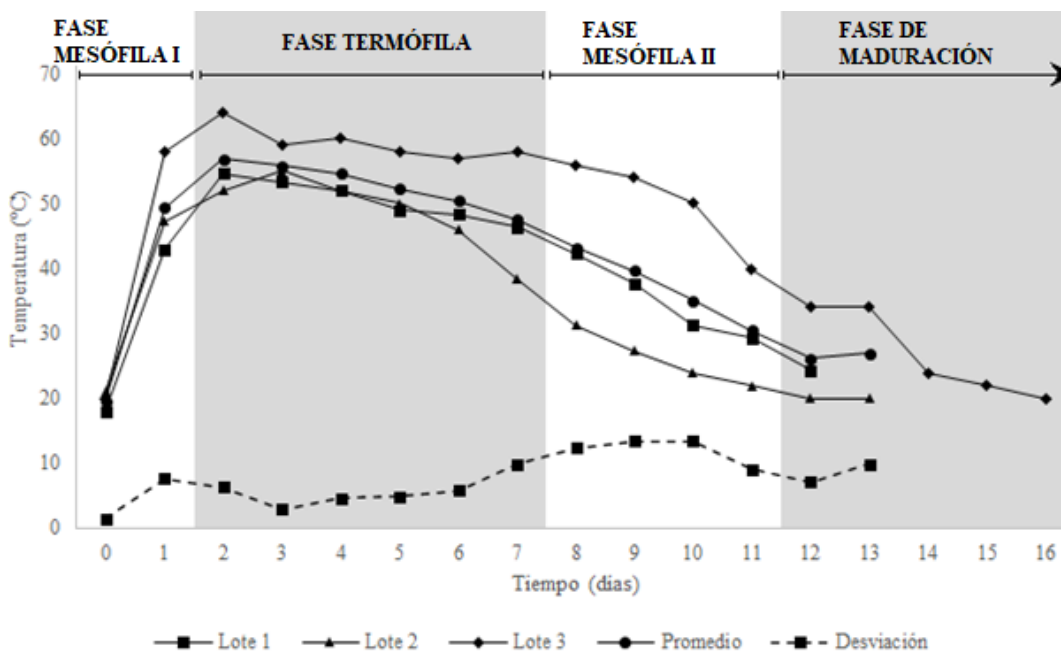


El comportamiento de la temperatura en el Lote 3 se enseña en la Figura 78, en este caso se tomó únicamente la temperatura del sustrato una vez al día. En este lote la temperatura asciende durante los dos primeros días hasta alcanzar su máximo de 64°C en la medida del día 2; entre los días 3 y 10 presenta un descenso de temperatura progresivo y que se mantiene arriba de 50°C; después del día 10 la temperatura cae más rápidamente hasta alcanzar una temperatura de 21°C y en el día 16, se considera que el producto está listo.

En la Figura 79 se presenta una comparación entre los datos obtenidos entre los 3 lotes.

Figura 79

Comparación de las curvas de temperatura de todos los lotes.



La comparación de las curvas de temperatura de los diferentes lotes enseñan un comportamiento característico. En el primer día la temperatura supera los 45°C lo que se podría identificar como fase mesófila I. La fase termófila en la que las temperaturas se mantienen por encima de 45°C difiere entre lotes, siendo el Lote 3 el que presenta la fase más larga con 9 días, mientras que el Lote 2 tiene la más corta con 5 días aproximadamente. Se considera que los tres lotes alcanzaron y mantuvieron temperaturas adecuadas para lograr las condiciones de eliminación de algunos de los patógenos comunmente presentes en la materia orgánica (ver Tabla 10).

Tabla 10*Condiciones para eliminación de patógenos.*

| Microorganismo | Temperatura (C°) | Tiempo de exposición |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| <i>Salmonella spp</i> | 55 | 1 hora |
| | 65 | 10-20 minutos |
| <i>Escherichia coli</i> | 55 | 1 hora |
| | 65 | 10-20 minutos |
| <i>Brucella abortus</i> | 55 | 1 hora |
| | 62 | 3 minutos |
| <i>Parvovirus bovino</i> | 55 | 1 hora |
| <i>Huevos de Ascaris lumbricoides</i> | 55 | 3 días |

Nota: Adaptado de Román et al. (2013)

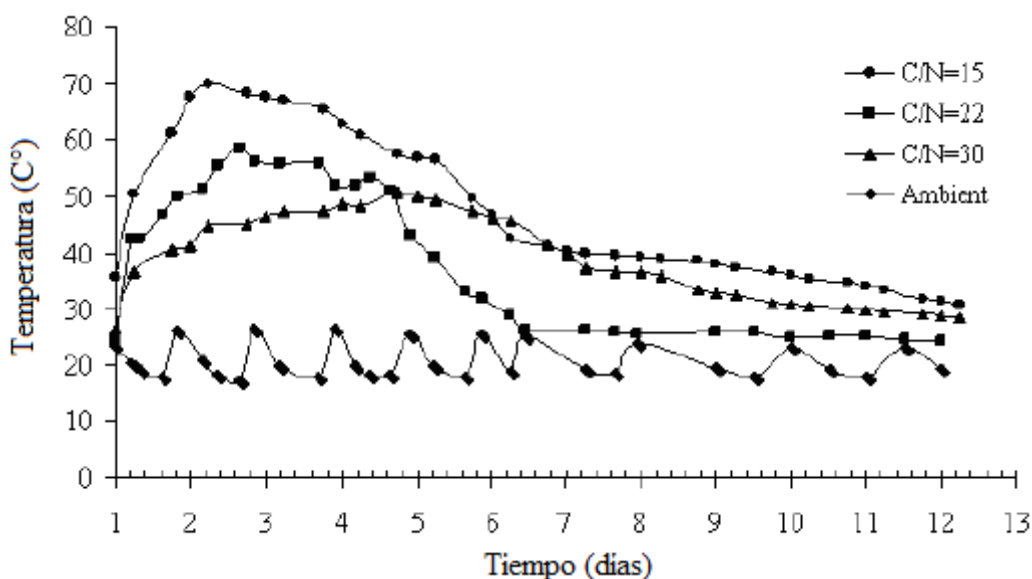
El descenso de la temperatura por debajo de los 45°C se puede identificar como la fase mesófila II y tuvo un comportamiento más progresivo en los Lotes 1 y 2, mientras que en el Lote 3 tuvo una caída más repentina. Cuando las temperaturas descienden por debajo de 25°C se considera la finalización de la fase mesófila II y el inicio de la maduración. El proceso de compostaje que incluye las fases mesófila I, termófila y mesófila II se realizó durante un periodo de 12 a 16 días. Una vez concluido este proceso el material se retira del compostador y se coloca en una pila estática para facilitar la maduración (mínimo 20 días).

La desviación estándar muestra la similitud de las curvas en los primeros 6 días con un valor entorno a los 5 grados. Del día 6 en adelante el comportamiento de los datos se vuelve más disperso y la desviación estándar llega a ser hasta de 14 grados. Esta diferencia entre los comportamientos que enseñan las curvas puede atribuirse a muchos factores que intervienen en el proceso, siendo destacable los diferentes valores de relación C:N utilizados en cada mezcla (36 en el Lote 1, 35 en el Lote 2 y 32 en el Lote 3). Se plantea que menores valores de C:N resulta en mayores temperaturas, durante periodos de tiempo más prolongados. El planteamiento anterior se puede comparar con los resultados obtenidos por Kalamdhad & Kazmi (2009b). En este trabajo las mezclas de materia orgánica que presentaron las menores relaciones C:N alcanzaron las mayores

temperaturas ($T=70C^{\circ}$), durante periodos de tiempo más extensos, ver Figura 80. Cabe aclarar que en este mismo estudio no se encontró una relación entre la calidad del compost y la magnitud de las temperaturas alcanzadas ni la duración de las mismas, pues el compost que estuvo más caliente fue a la vez el producto más inestable.

Figura 80

Perfil de temperaturas de diferentes mezclas de compost.



Nota: Adaptado de Kalamdhad & Kazmi (2009b)

4.1.2. Rendimiento del proceso.

El rendimiento del proceso se cuantificó a través de la pérdida de masa que experimentó la materia orgánica. Para ello se midió la masa de los residuos antes de ingresar al compostador y la del compost al ser extraído. Los resultados de este estudio se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11

Datos sobre el rendimiento del proceso de compostaje.

| Lote | m_{inicial} (kg) | m_{final}(kg) | Pérdida | Rendimiento |
|-------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | 482 | 318 | 164 | 66% |
| 2 | 458 | 278 | 180 | 61% |
| 3 | 487 | 280 | 207 | 57% |
| | | | Promedio | 61% |
| | | | Desviación | 4% |

Se obtuvo un rendimiento máximo de 66% y uno mínimo de 57%, con los lotes 1 y 3 respectivamente. En promedio se obtuvo un rendimiento del 61% y una desviación entre los resultados del 4% lo cual indica buena repetibilidad entre las pruebas. Con este rendimiento en el equipo se establece que por cada 10 kilogramos de residuos orgánicos suministrados se pueden llegar a obtener 6 kilogramos de compost aproximadamente.

La pérdida de masa experimentada se puede atribuir a diferentes factores como: la pequeña fracción del producto que queda adherida al tambor, la pérdida de agua que experimentan los residuos o la volatilización de algunos componentes en forma de gases a lo largo del proceso. Una atmosfera saturada de vapor de agua y gas es muestra de lo anterior, ver Figura 81.

Figura 81

Interior del tambor con aire saturado.



4.1.3. *Propiedades del compost.*

Un análisis sensorial (visual, textura, olor) del producto obtenido en cada uno de los lotes presenta una convergencia.

El aspecto del sustrato a lo largo del proceso presentó ciertos cambios característicos como la disminución del tamaño de las partículas (a excepción de los materiales más duros o secos) y la adquisición de un color marrón uniforme que volvió indistinguibles los componentes iniciales. La Figura 82 muestra la evolución del aspecto de los residuos en tres momentos diferentes.

Figura 82

Evolución del aspecto del compost.



Nota: Compost día 1 (Izq), compost día 7 (Cen) y compost con 1 mes de maduración (Der).

Las partículas del producto presentaban una granulometría más o menos uniforme, con una textura similar a la de la tierra y que no se compactaban, lo cual es favorable para mejorar la porosidad del suelo.

Se pudo percibir un olor característico en el producto terminado comparable con el de la tierra con mucha materia orgánica que se encuentra bajo los árboles en los bosques y en general similar a lo que se describe en la literatura (Raabe, 1991).

Las propiedades del compost resultante del Lote 2 (C:N=35) son presentadas en la Tabla 12 (Informe de resultados en el Apéndice E).

Tabla 12*Propuestas de calidad y resultados.*

| Criterio | Propuestas ECOFI | | Compost obtenido |
|--------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| | Fertilizante orgánico sólido | Mejorador orgánico de suelo | |
| Humedad | ≤60% | ≤60% | 32,64% |
| Carbono Orgánico | ≥15% | ≥10% | 15,1% |
| Nitrógeno Orgánico | ≥2% | Sin valor mínimo | 1,194% |
| Nitrógeno Total | ≥2,5% | <2,5% | 1,384% |

Nota: Criterios adaptado de ECOFI (2014).

Para evaluar la calidad del compost se comparan sus propiedades con las recomendadas en la literatura. El Consorcio Europeo de la Industria de Fertilizantes Orgánicos (ECOFI) indica que los fertilizantes orgánicos son productos que tienen como función principal la de aportar nutrientes en forma orgánica de origen animal o vegetal. Para que el producto sea considerado un fertilizante orgánico debe tener al menos un contenido de carbono orgánico del 15% y cumplir con uno de los siguientes criterios: contenido de nitrógeno mayor a 2,5% o contenido de óxido de fósforo mayor a 2% o contenido de potasio soluble en agua mayor a 2% (ECOFI, 2014). Por otro lado, los mejoradores orgánicos de suelo tienen como función mantener o aumentar la materia orgánica del suelo, por lo que deben tener un contenido de carbono orgánico (de origen vegetal o animal) superior al 10% (ECOFI, 2014). Una comparación entre estas propuestas de calidad de ECOFI para fertilizantes y mejoradores orgánicos junto con los resultados obtenidos con la muestra de compost se presentan en la Tabla 12.

Según los resultados obtenidos la humedad se encuentra dentro los criterios estándar, lo que significa que el aporte de materia seca al suelo es significativo, así mismo facilita la aplicación del producto. El contenido de carbono orgánico cumple los criterios tanto para fertilizantes como

para mejoradores orgánicos, sin embargo, el contenido de nutrientes medido en forma de nitrógeno no alcanza el umbral mínimo para un fertilizante orgánico. Se podría considerar finalmente que el compost obtenido tiene las características de un mejorador orgánico de suelo con un buen contenido de carbono, pero con un aporte de nitrógeno inferior al requerido para ser considerado fertilizante orgánico. En la práctica significa que el producto satisface las necesidades del usuario, que son la de restituir las propiedades biológicas del terreno de cultivo mientras se aprovechan los residuos orgánicos del medio. Es posible que el contenido de nutrientes no haya estado dentro de lo esperado por diversas causas, entre ellas la procedencia de los residuos usados, la carencia de los nutrientes en los mismos o la volatilización de los compuestos formados durante el tiempo de maduración y manipulación de las muestras. Para mejorar el contenido de nutrientes del compost se sugiere emplear estiércoles animales con un mayor contenido de nitrógeno.

4.1.4. Costos y consumo energético.

Los costos de construcción del compostador se muestran en la Tabla 13, en donde se clasifican según los costos de materiales y los costos de mano de obra y fabricación.

Tabla 13

Costos asociados a la construcción del compostador.

| Materiales | | Mano de obra y procesos | |
|--------------------------------|--------------|-------------------------|---------------------|
| ITEM | PRECIO | ITEM | PRECIO |
| Varillas AISI 4140 | \$ 124.000 | Mecanizado cuñeros | \$ 30.000 |
| Chumaceras | \$ 64.000 | Cortes de lámina | \$ 40.000 |
| Bujes | \$ 10.000 | Cilindrado de platina | \$ 40.000 |
| Tubo cuadrado 50x50mm | \$ 232.000 | Trabajos en torno | \$ 100.000 |
| Rueda de Nylon 3,5pulg | \$ 40.000 | Oxicortes | \$ 20.000 |
| Rodillos Cónicos | \$ 10.000 | Jefe de construcción | \$ 2.500.000 |
| Rodamiento de bolas | \$ 7.000 | | |
| Termómetro | \$ 55.000 | | |
| Recubrimientos cromato de Zinc | \$ 60.000 | | |
| Ángulos 1,5pulg | \$ 43.000 | | |
| Platinas base 1/4pulg | \$ 80.000 | | |
| Componentes eléctricos | \$ 200.000 | | |
| Tornillería | \$ 20.000 | | |
| Pasadores elásticos | \$ 8.000 | | |
| Platinas 3/8pulg | \$ 50.000 | | |
| Laminas HR 2mm | \$ 1.105.000 | | |
| Ruedas supercarga | \$ 125.000 | | |
| Platinas 1/8pulg | \$ 42.000 | | |
| Tubos rectangulares 80x40mm | \$ 170.000 | | |
| Láminas de tolva | \$ 70.000 | | |
| Recubrimiento epóxico | \$ 120.000 | | |
| Retales de acero adicionales | \$ 115.000 | | |
| Motorreductor | \$ 1.080.000 | | |
| TOTAL | | | \$ 6.560.000 |

El valor total del equipo fue de 6.560.000 pesos colombianos, valor que se puede comparar con el de los dispositivos disponibles en el mercado. Según el Departamento de Agricultura Estadounidense (USDA, 2013) el modelo más pequeño del compostador Biovator cuesta alrededor de 20.000 dólares americanos equivalentes a casi 80.000.000 de pesos colombianos,

mientras que los modelos de otras marcas como Ecodrum y Rotoposter superan los 50.000 dólares (cerca de 200.000.000 millones de pesos). La información anterior muestra que el equipo se construyó por una fracción del precio de una alternativa comercial, que a pesar de ser menos sofisticado permite obtener un producto de calidad que satisface las necesidades del usuario.

El consumo energético se obtiene teniendo en cuenta que la potencia nominal del motor es 750W (aunque este consumo no será máximo todo el tiempo) y que el motor cuenta con una eficiencia energética del 70% (Invereina, 2021) lo que indicaría una potencia eléctrica de consumo de 1,072kW. Para estimar el consumo energético por lote de compost producido se estima que las tareas de carga y descarga toman 30 minutos cada una, que el proceso tiene una duración de 15 días aproximadamente y que diariamente el tambor se voltea por 10 minutos. El tiempo de accionamiento del motor por lote de compost sería de 3,5 horas y que multiplicado por la potencia eléctrica da 3,75kWh. Tomando una pérdida de masa durante el proceso del 40%, significa que de un lote de 500kg de residuos se obtienen 300kg de compost y por ende el consumo energético específico sería de 0,0125kWh por kilogramo de compost.

Finalmente, si se toma el costo de la energía para un nivel de tensión I en el sector industrial establecido por la Electrificadora de Santander (ESSA) como 763,5 pesos por kWh, se obtiene un costo específico de 9,54 pesos por kilogramo de compost. El costo de producción resulta bastante bajo en comparación con los datos obtenidos de otros equipos comerciales y que están entre 0,022 a 0,05 dólares por libra de producto o equivalentemente entre 190 a 435 pesos por kilogramo (U.S. Department of Agriculture (USDA), 2013).

5. Conclusiones.

Se diseñó, construyó y puso en marcha una planta para la producción de compost a partir de residuos orgánicos domésticos y pecuarios con una capacidad de procesamiento de 500 kilogramos de residuos. Consta de un tambor rotativo con paletas mezcladoras; tolva y ducto de alimentación; compuerta de descarga; agujeros de alimentación de aire; sistema de accionamiento mecánico conformado por motorreductor, ejes y ruedas de fricción; sistema de soporte del conjunto; sistema de control de volteo y sistema de monitoreo de temperatura del sustrato.

Se realizaron pruebas con el equipo haciendo seguimiento a la producción de 3 lotes de compost obteniendo resultados dentro de lo esperado al comparar las curvas de temperatura con las de la literatura consultada. Se encontró que los lotes atravesaron todas las fases descritas para el proceso de compostaje y también se evidenció que en todos lotes se alcanzaron temperaturas mayores a 55°C con lo cual se cumple la condición de eliminación patógenos.

Durante cada prueba se realizó un balance de masa del proceso para establecer la pérdida que experimentaba el producto y se obtuvo un rendimiento promedio de 61% con una desviación de 4%. Esto indica que para la capacidad del compostador que es de 500kg de residuos se estarían obteniendo 300kg de compost aproximadamente.

A través de los datos obtenidos de la literatura y mediante la experiencia se estableció un protocolo de operación del compostador con el objetivo de obtener un producto que cumpla con los requisitos para ser denominado mejorador del suelo (ver protocolo en el Apéndice D).

Las propiedades físicoquímicas del compost obtenido mostraron una homogeneidad en su análisis sensorial (color, olor y textura) y que es concordante con lo encontrado en la literatura. De igual manera, los resultados de laboratorio realizados en el compost obtenido del Lote 2, mostraron que este contenía una humedad del 32,6%, un contenido de carbono orgánico de 15,1%,

un contenido de nitrógeno total de 1,4% y un contenido de nitrógeno orgánico de 1,2%. Estas propiedades indicarían que el compost obtenido es un buen mejorador orgánico de suelo.

Se realizó un análisis de consumo energético y de costos de producción del compost y se encontró que cada kilogramo de compost producido tiene un consumo de 0,0125kW.h/kg y un costo de 9,54\$/kg.

6. Recomendaciones.

A pesar de que en durante el proceso se realizó la dosificación de residuos midiendo su masa se recomienda que durante la operación se realice a través de volúmenes, esto por ser un variable que se mide *in situ* más fácilmente. Para esto el manual de operación facilita algunos ejemplos de dosificación mediante volúmenes.

Se recomienda como futura mejora agregar un sistema de trituración de los residuos, para garantizar que el material tenga un menor tamaño de partícula. Esto contribuye a una mayor degradación de los residuos y por consiguiente a una mayor cantidad de compost resultante.

Dependiendo de las necesidades del suelo del usuario se recomienda agregar residuos con un mayor contenido de nitrógeno como ciertos estiércoles específicos o incluso algún suplemento de otros elementos que sean accesibles como roca fosfórica o cal. Esto permitiría obtener un producto más rico en nutrientes.

Referencias bibliográficas.

- ANSI/ASME. (1985). *Design of transmission shafting*. The American Society of Mechanical Engineers.
- Arslan, E. I., Ünlü, A., & Topal, M. (2011). Determination of the Effect of Aeration Rate on Composting of Vegetable-Fruit Wastes. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 39(11), 1014-1021. <https://doi.org/10.1002/clen.201000537>
- Atchley, K. (2013). *Hot Composting with the Berkeley Method*. 8.
- Basol technologies. (2016). *Compostaje industrial por sistema de vaso*.
- Beer, F. P. (2010). *Mecanica de Materiales* (Quinta). McGraw-Hill.
- Biblioteca Agrícola Nacional. (2013). *National Agricultural Library | USDA*. <https://www.nal.usda.gov/tesauro-y-glosario-de-la-biblioteca-agricola-nacional>
- Blake, G. R. (1965). Bulk Density. *University of Minnesota*.
- Bueno Márquez, P., Díaz Blanco, M. J., & Cabrera Capitán, F. (2008). Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje. En *Compostaje* (p. 16).
- Cámara de comercio de Bucaramanga. (2018). *Actividad Agrícola Provincias de Santander*. Cámara de comercio de Bucaramanga.
- Cardona, W. A., Benavides, M. M. B., & Montoya, W. C. (2016). Efecto de fertilizantes químicos y orgánicos sobre la agregación de un suelo cultivado con *Musa acuminata* AA. *Acta Agronómica*, 65(2), 144-148. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n2.44493>
- Cervantes Flores, M. Á. (2010). *Abonos Orgánicos*. https://infoagro.com/abonos/abonos_organicos.htm
- Cogger, C. G., Sullivan, D. M., & Kropf, J. A. (2001). *¿Cómo hacer y usar el compost? EC 1544-S*, 12.

- Continental Contintech. (2008). *ROTAFRIX® Friction Wheels, Friction Rings and Guide Pulleys*.
- Cook, R. D. (1985). Behavior of cylindrical tanks whose axes are horizontal. *Thin-Walled Structures*, 3(4), 365-372. [https://doi.org/10.1016/0263-8231\(85\)90012-6](https://doi.org/10.1016/0263-8231(85)90012-6)
- Ecodrum. (2014). *Ecodrum Composting Simplified*. <http://www.ecodrumcomposter.com/>
- ECOFI. (2014). *Responses and Proposals for Quality and Safety Criteria for Organic Fertilizers, Organic Soil Improvers and Organo-Mineral Fertilizers*. 8. <https://ec.europa.eu/transparency/regexpert/index.cfm?do=groupDetail.groupDetailDoc&id=13861&no=42>
- Emin. (2021). *ARRANCADOR DIRECTO DE 7 A 10A CHINT*. <https://www.emin.com.co/producto/arrancador-director-de-7-10a-chint/>
- García-Serrano Jiménez, P., España, & Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Centro de Publicaciones.
- Geometric properties of circular segment*. (2016, octubre 14). Calcesource. <https://calcesource.com/geom-circularsegment.html>
- Glancey, J. L., & Hoffman, S. C. (1994). Physical properties of solid waste materials. *American Society of Agricultural Engineering, Atlanta, Georgia., Paper no. 94-1592*.
- Guía de Compostaje. (2019, junio 19). *PUNTOCOMPOST*. <https://puntocompost.wordpress.com/productos/>
- Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2011). Perdidas y desperdicio de alimentos en el mundo. *Interpack*, 42.
- Indiv. (s. f.). *Compostador de materia orgánica: Transformando problemas en oportunidades*.

- Indurruedas. (2018). Ruedas y rodachines. *Indurruedas*. <https://indurruedas.co/categoria-producto/ruedas-y-rodachinas/>
- Industrias Montecor. (2021). *ROTORBUEY*. <http://www.industriasmontecor.com/compostaje.php>
- Instituto Colombiano Agropecuario. (2001). *Resolución No 00991 del 2001*. <https://www.ica.gov.co/getattachment/b4470e63-f79a-4dca-8490-5a161d77caa0/991.aspx>
- Invereina. (2021). *Motores y reductores*.
- ISO. (2015). *ISO 14870 Solid biofuels-Sample preparation*. ISO.
- JIE, Asia Drive. (2018). *JRST, WP worm gears*. JIE drive technology Co.Ltd. jie.com.cn
- Kalamdhad, A. S., & Kazmi, A. A. (2009a). Effects of turning frequency on compost stability and some chemical characteristics in a rotary drum composter. *Chemosphere*, 74(10), 1327-1334. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.058>
- Kalamdhad, A. S., & Kazmi, A. A. (2009b). Rotary drum composting of different organic waste mixtures. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 27(2), 129-137. <https://doi.org/10.1177/0734242X08091865>
- Kalamdhad, A. S., Singh, Y. K., Ali, M., Khwairakpam, M., & Kazmi, A. A. (2009). Rotary drum composting of vegetable waste and tree leaves. *Bioresource Technology*, 100(24), 6442-6450. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.030>
- Khater, E. S. G. (2015). Some Physical and Chemical Properties of Compost. *International Journal of Waste Resources*, 05(01). <https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000172>
- Labrador Moreno, J., Guiberteu Cabanillas, A., López Benitez, L., & Reyes Pablos, J. L. (1993). *La materia orgánica en los sistemas agrícolas. Manejo y utilización*. Saljen. SA.

L'AGRET. Cultura de Terra. (2013, junio 5). Cómo hacer tu propio abono (composta) en 18 días.

L'AGRET. Cultura de Terra. <https://lagretnet.wordpress.com/2013/06/05/como-hacer-tu-propio-abono-composta-en-18-dias/>

Liu, X., Xu, X., Wu, W., Herz, F., & Specht, E. (2016). A simplified model to calculate the power draw for material movement in industrial rotary kilns. *Powder Technology*, 301, 1294-1298. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.005>

Liu, X. Y., Specht, E., & Mellmann, J. (2005). Experimental study of the lower and upper angles of repose of granular materials in rotating drums. *Powder Technology*, 154(2-3), 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.04.040>

Ministerio de la presidencia española. (2013). *Boletín oficial del Estado-Real Decreto 506/2013.*

Mujumdar, A. S. (1995). *Handbook of Industrial Drying* (2.^a ed.). Marcel Dekker.

Mundial, M. (2019, noviembre 27). *Acero ASTM A36, Acero A36 Propiedades, Ficha Tecnica, Dureza, Densidad Estructural PDF.* Material Mundial Grados. <https://www.materialmundial.com/acero-astm-a36-propiedades-ficha-tecnica-estructural/>

Norton, R. L. (2011). *Diseño de máquinas* (Cuarta). Pearson Education.

NTN. (2003). *Chumaceras.* NTN Corporation.

Omnivore Composter. (2021). *Omnivore Composter.* <https://omnivorecomposter.com/>

Ortiz Berrocal, L. (2002). *Resistencia de Materiales.* McGraw-Hill.

Raabe, R. D. (1991). *The rapid composting method.* https://vric.ucdavis.edu/pdf/compost_rapidcompost.pdf

Ramos Agüero, D., & Terry Alfonso, E. (2014). *GENERALIDADES DE LOS ABONOS ORGÁNICOS: IMPORTANCIA DEL BOCASHI COMO ALTERNATIVA NUTRICIONAL PARA SUELOS Y PLANTA.* 35(4), 9.

- Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor*.
<http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- Rotary Composters LLC. (2019). *The Rotoposter*. <https://www.rotarycomposters.com/new-page-3>
- Salmon, M. (2012). *Composting: The Berkeley method*.
<http://murramarangcommunitygarden.weebly.com/uploads/1/1/4/7/11473899/composting20berkeley20method.pdf>
- Termometría Industrial CG. (2021). *Termómetro Punzón Análogo*. Termometría Industrial CG.
<https://termometriacg.com/termometros/3/termometro-punzon-analogo>
- ThyssenKrupp Steel. (2021). *AISI 4140*. ThyssenKrupp aceros y servicios S.A.
- Trautmann, N. M., & Krasny, M. E. (1997). *Composting in the Classroom: Scientific Inquiry for High School Students*. Cornell University.
- U.S. Department of Agriculture (USDA). (2013). *In-vessel Composters for Livestock Mortality Management*.