

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño de un equipo compostador mecánico portátil con sistema de
aireación para la obtención de abonos orgánicos en casa.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Luis Fernando Baque Medina

David Eduardo Solórzano Tapia

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

Este último trabajo académico se lo dedico a la Escuela Superior Politécnica del Litoral, por haberme apoyado para continuar con mis estudios, y así, junto con mi inmensurable esfuerzo, conseguir este logro a pesar de que prácticamente todo fue adversidad.

Luis Fernando Baque Medina.

Este documento se lo dedico a mis padres que con su esfuerzo, amor, apoyo y constancia me permitieron salir adelante.

David Eduardo Solórzano Tapia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis pocos y verdaderos amigos que siempre estuvieron ahí para darme una mano de manera desinteresada, fueron un gran ejemplo y motivación.

"La vida cambia rápidamente de un momento a otro".

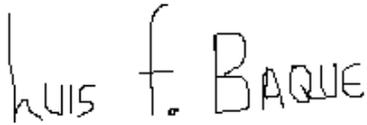
Luis Fernando Baque Medina.

Agradezco a todos los involucrados en el desarrollo de este proyecto, mi profesor tutor, profesores de la FIMCP, mi madre y mis amigos por la guía y apoyo brindado durante mi etapa de desarrollo como profesional.

David Eduardo Solórzano Tapia.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Luis Fernando Baque Medina* y *David Eduardo Solórzano Tapia* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Luis Fernando Baque Medina



David Eduardo Solórzano Tapia

EVALUADORES

.....
Ph.D Miguel Quilambaqui Jara

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Ph. D Miguel Quilambaqui Jara

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La generación descontrolada de residuos orgánicos y su mala gestión causan muchos problemas de distinta índole, ya sea sociales, ambientales o económicos. Se pretende devolver los nutrientes que aún posee dicha materia orgánica al suelo, fomentar la aplicación del compostaje en las familias, mediante un sistema mecánico portátil que permita crear abono sólido de calidad en casa. Para ello se evaluaron alternativas de diseño, estableciéndose un sistema compuesto principalmente por un tanque horizontal montado en una base rígida, capaz de almacenar la materia orgánica y descomponerla con ayuda de dispositivos térmicos como resistencias eléctricas, y un sistema de aireación mediante un ventilador interno. Adicionalmente se diseñó un sistema de potencia y control con el cual el sistema se alimentaría energéticamente, llevando a cabo el proceso de compostaje de manera controlada, diseñando también un sistema de paletas y eje, que proveían el movimiento de la materia y revolvimiento. Lo anterior se hizo posible con ayuda de software de diseño CAD y simulación 3D, con los cuales se validó el diseño. Finalmente se pudo evaluar el desempeño del equipo y realizar un análisis de los costos que demandaba su construcción y adquisición. De esta manera se obtiene un modelo particularmente potencial que cumple a cabalidad los requerimientos establecidos, en cual se genera una cantidad muy considerable de abono sólido orgánico en relación con la energía neta consumida. De la misma manera el sistema de aireación y parámetros de temperatura, desarrollan de manera correcta el proceso de descomposición, ya que existe una debida alternabilidad de las variables involucradas en el proceso durante el tiempo preestablecido o estimado, todo esto en conjunto con el sistema de control diseñado.

Palabras clave: compostaje, aireación, orgánico, compostador, abono.

ABSTRACT

The uncontrolled generation of organic waste and its mismanagement cause many problems of different kinds, be they social, environmental, or economic. It is intended to return the nutrients that this organic matter still has to the soil, promote the application of composting in families, through a portable mechanical system that allows creating solid quality compost at home. To do this, design alternatives were evaluated, establishing a system composed mainly of a horizontal tank mounted on a rigid base, capable of storing organic matter and decomposing it with the help of thermal devices such as electrical resistances, and an aeration system using an internal fan. Additionally, a power and control system were designed with which the system would feed itself energetically, carrying out the composting process in a controlled manner, also designing a system of pallets and shaft, which provided the movement of matter and stirring. This was made possible with the help of CAD design software and 3D simulation, with which the design was validated. Finally, it was possible to evaluate the performance of the equipment and carry out an analysis of the costs required for its construction and acquisition. In this way, a particularly potential model is obtained that fully meets the established requirements, in which a very considerable amount of solid organic fertilizer is generated in relation to the net energy consumed. In the same way, the aeration system and temperature parameters develop the decomposition process correctly, since there is a due alternation of the variables involved in the process during the pre-established or estimated time, all this in conjunction with the system of designed control.

Keywords: *composting, aeration, organic, composter, compost.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VII
SIMBOLOGÍA	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XVI
ÍNDICE DE PLANOS	XVIII
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Definición del Problema	2
1.2 Justificación del proyecto.....	3
1.2.1 Población objetivo	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 Marco teórico	5
1.4.1 La basura orgánica en el Ecuador.....	5
1.4.2 Tipos de abonos.....	5
1.4.3 Abonos sólidos	6
1.4.4 Proceso de compostaje.....	7
1.4.5 Etapas del proceso de compostaje	8
1.4.6 Variables en el proceso de compostaje.....	9
1.4.7 Aireación forzada en el proceso de compostaje.....	14

1.4.8	Componentes principales de un sistema de compostaje	15
1.4.9	Método Berkeley	15
1.4.10	Sistemas de compostaje	17
1.4.11	Descripción bioquímica del proceso.....	20
1.4.12	Modelo cinético y térmico del proceso	27
1.4.13	Modos de transferencia de calor	34
1.4.14	Balance de energía	41
1.4.15	Esfuerzos en estructuras o bases metálicas.....	42
1.4.16	Dimensionamiento y esfuerzos en el diseño de ejes.....	46
1.4.17	Potencia y torque en sistemas rotatorios	52
CAPÍTULO 2.....		54
2.	Metodología	54
2.1	Descripción del problema	54
2.2	Especificaciones de diseño.....	55
2.3	Análisis de soluciones.....	55
2.3.1	Propuestas de diseño.....	57
2.3.2	Matriz de decisión	59
2.3.3	Selección de alternativa	61
2.4	Diseño conceptual	61
2.5	Normas y códigos que aplicar.....	62
2.6	Diseño de detallado	63
2.6.1	Cálculo de masa y volumen de pila.....	65
2.6.2	Cálculo de parámetros físico-químicos	66
2.6.3	Cálculos del sistema de aireación.....	68
2.6.4	Agua de humidificación	69
2.6.5	Análisis térmico y cálculo de energía requerida	70

2.6.6	Diseño de estructura o base	77
2.6.7	Diseño del contenedor o tanque	80
2.6.8	Diseño del conjunto eje-paletas	82
2.6.9	Cálculo de paletas.....	85
2.6.10	Torque y potencia.....	87
2.6.11	Diseño del eje motriz.....	88
2.6.12	Cálculo de rodamientos.....	90
2.6.13	Cálculo de dimensiones de tapa del contenedor y acoples.....	91
2.6.14	Cálculo de tornillos.....	94
2.6.15	Cálculo del sistema de potencia.....	95
2.6.16	Sistema de humidificación.....	96
CAPÍTULO 3.....		98
3.	Resultados y análisis	98
3.1	Resultados de parámetros del compostaje.....	98
3.2	Resultados de parámetros físico-químicos	100
3.3	Resultados de parámetros de aireación y humidificación.....	101
3.4	Resultados de cálculos térmicos	101
3.5	Resultados de diseño del contenedor o tanque.....	102
3.6	Resultados de simulación de esfuerzos en el tanque.....	103
3.7	Resultados de diseño de paletas.....	105
3.8	Resultados de diseño del eje.....	106
3.9	Resultados de simulación de esfuerzos en sistema eje-paletas.....	107
3.10	Resultados de diseño de estructura o base.....	111
3.11	Resultados de simulación de esfuerzos en la estructura.....	112
3.12	Resultados del cálculo del sistema de potencia	115
3.13	Resultados del sistema de control.....	116

3.14	Selección de componentes y equipos.....	118
3.14.1	Sistema de potencia.....	118
3.14.2	Rodamientos.....	119
3.14.3	Resistencias eléctricas de calefacción.....	120
3.14.4	Tornillos.....	121
3.14.5	Ventilador.....	123
3.14.6	Humidificador.....	124
3.14.7	Sistema de humidificación.....	126
3.14.8	Sensor de temperatura DS18B20.....	128
3.14.9	Sensor de humedad YL-69.....	129
3.14.10	Arduino UNO.....	130
3.15	Análisis de costos.....	131
3.15.1	Listado de materiales.....	131
3.15.2	Costo de materiales.....	133
3.15.3	Costo de construcción.....	135
3.16	Mantenimiento del sistema.....	136
3.16.1	Planes de mantenimiento.....	136
3.16.2	Costos de mantenimiento.....	138
3.16.3	Evaluación del desempeño del sistema.....	138
3.17	Comparación con un equipo de compost del mercado local.....	144
CAPÍTULO 4.....		147
4.	Conclusiones Y Recomendaciones.....	147
4.1	Conclusiones.....	147
4.2	Recomendaciones.....	148

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
ASTM	American Society for Testing and Materials
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
INEC	Instituto Nacional Estadísticas y Censo
PNGIDS	Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos sólidos
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
SVB	Sólidos volátiles biodegradables
ANSI	Instituto Nacional Estadounidense de Estándares
AWS	Sociedad Americana de Soldadura
RSO	Residuos sólidos orgánicos
AISC	American Institute of Steel Construction

SIMBOLOGÍA

pH	Potencial de hidrógeno
N	Nitrógeno
C	Carbono
°C	Celsius
mm	Milímetro
cm	Centímetro
m	Metro
m ²	Metro cuadrado
Kg	Kilogramo
%HR	Porcentaje de humedad relativa
S_n	Masa de cada sustrato
OI	Material orgánico seco
II	Material inorgánico seco
H ₂ O_I	Agua presente en los componentes
H ₂ O_E	Agua añadida
AE	Aire añadido
OF	Material orgánico seco
IF	Material inorgánico seco
H ₂ O_F	Agua de componentes
H ₂ O_S	Agua evaporada
CO ₂ _S	Anhídrido carbónico
NH ₃ _S	Amoniacó
N_S	Nitrógeno (y componentes de aire)
n_{moles}	Número de moles
M	Masa molar
ρ	Densidad
\dot{m}	Flujo másico
V	Volumen

\dot{V}	Flujo volumétrico
A	Área
v	Velocidad
ρ	Densidad
W	Peso
g	Aceleración de la gravedad
N	Newton
γ	Peso específico
K_h	Coefficiente degradación
MO_i	Concentración de materia orgánica inicial
MO_f	Concentración de materia orgánica final
T_D	Tasa de disipación de calor
T_G	Tasa de generación de calor
\emptyset	Entalpia de reacción de degradación
K	Tasa específica de reacción
k	Conductividad térmica
T	Temperatura
ΔT	Diferencia de temperatura
L	Longitud
D	Diámetro
%ST	Porcentaje de los sólidos
q_r	Calor producto de la reacción
q_a	Calor eliminado por acción del flujo de aire
q_w	Calor necesario para evaporar el agua
q_p	Pérdida de calor por conducción
C_{pm}	Calor específico de la madera
C_{ps}	Calor específico del material biosólido
C_{pw}	Calor específico del agua
\dot{q}	Tasa de transferencia de calor
h	Constante de conductividad térmica del material
T_w	Temperatura superficial

T_{∞}	Temperatura ambiente
Ra_L	Número de Rayleigh
ν	Viscosidad cinemática
β	Coefficiente volumétrico de expansión térmica
α	Difusividad térmica
\bar{h}	Coefficiente de transferencia promedio
Nu_x	Número de Nusselt local
\bar{Nu}	Número de Nusselt promedio
Re	Número de Reynolds
Pr	Número de Prandtl
E_{ent}	Energía que entra al sistema
E_{sal}	Energía que sale del sistema
ΔE_{sis}	Cambio en la energía del sistema
ΔU	Cambio de la energía interna del sistema
C_v	Calor específico a volumen constante
q_f	Calor para fusionar
q_v	Calor para vaporizar
L_f	Calor latente de fusión
L_v	Calor latente de vaporización
σ	Esfuerzo
P	Carga aplicada
Pa	Pascal
MPa	Mega Pascal
E	Módulo de Young del material.
S_r	Razón de esbeltez
I	Segundo momento de área de la sección transversal
l_{ef}	Longitud efectiva
P_{cr}	Carga crítica
S_y	Esfuerzo de fluencia a la compresión del material
SF	Factor de seguridad

$P_{permisible}$	Carga permisible
S_e	Resistencia a la fatiga
k_a	Factor de superficie
S_{ut}	Resistencia última del material.
k_b	Factor de tamaño
k_c	Factor de carga
k_d	Factor de temperatura
S_T	Resistencia a la tensión a la temperatura de operación
S_{RT}	Resistencia a la tensión a la temperatura ambiente
k_e	Factor de confiabilidad
k_f	Factor de efectos varios
S_e'	Límite de resistencia a la fatiga
M_m	Momento flexionante medio
M_a	Momento flexiónante alternante
T_m	Par de torsión medio
T_a	Par de torsión alternante
k_f	Factor de concentración del esfuerzo por fatiga de flexión
k_{fs}	Factor de concentración del esfuerzo por fatiga de torsión
n_y	Factor de seguridad contra la fluencia del material
P_{ot}	Potencia
HP	Horse Power
ω	Velocidad angular
A_p	Apotema
h	Altura
Hz	Hertz
$Kgfm$	Kilogramo fuerza metro
V	Voltaje
A	Amperio

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Huertos domésticos.....	4
Figura 1.2 Variación de la temperatura en las fases del compost.....	11
Figura 1.3 Comparación del compostaje en frío y compostaje en caliente	17
Figura 1.4 a) Pila estática, b) Pila con volteo mecánico.....	18
Figura 1.5 Contenedores para compostaje cerrado.....	19
Figura 1.6 Bioreactor para compostaje.....	20
Figura 1.7 Esquema de los tipos de sistemas de compostaje y su relación.	20
Figura 1.8 Proceso químico del compostaje	21
Figura 1.9 Esquema de los elementos de entrada y salida en el compostaje.	22
Figura 1.10 Microorganismos presentes en cada etapa del proceso.....	27
Figura 1.11 Bacterias Gram negativas desarrolladas en el compostaje.	27
Figura 1.12 Generación de calor o energía en proceso de compostaje.....	28
Figura 1.13 Cilindro como sistema.....	31
Figura 1.14 Modelo de pila aireada para análisis.....	32
Figura 1.15 Convección forzada en cuerpo irregular (a) y en placa plana (b)	37
Figura 1.16 Flujo paralelo en placa plana	39
Figura 1.17 Flujo cruzado en sólidos.	40
Figura 1.18 Tipos de esfuerzos.....	43
Figura 1.19 Condiciones de extremos de la columna	45
Figura 1.20 Factores de longitud efectiva de la columna.....	45
Figura 1.21 Distintos tipos de árboles.....	47
Figura 1.22 Parámetros en el factor de la condición superficial de Marín.....	48
Figura 1.23 Efecto de la temperatura en la resistencia del acero.	49
Figura 1.24 Factor de confiabilidad.....	50
Figura 2.1 Propuesta de diseño n°1.....	57
Figura 2.2 Propuesta de diseño n°2.....	58
Figura 2.3 Propuesta de diseño n°3.....	59
Figura 2.4 Diseño conceptual o de forma del sistema.	62
Figura 2.5 AWS A5.1/A5.1M, Especificación para electrodos de acero al carbono...	63
Figura 2.6 Geometría del contenedor y volumen ocupado	66

Figura 2.7 Interacciones de energía en el sistema.	71
Figura 2.8 Modelamiento de la aireación sobre la materia.	72
Figura 2.9 Flujo cruzado en elemento.....	73
Figura 2.10 Pérdida de calor por conducción y convección.....	74
Figura 2.11 Convección en pare superior.	74
Figura 2.12 Primer diseño de base.....	77
Figura 2.13 Fuerzas actuantes sobre el eslabón de la base.....	77
Figura 2.14 Primer diseño del tanque.	80
Figura 2.15 Porcentaje volumétrico del contenido del tanque.....	81
Figura 2.16 Vista transversal del tanque.....	81
Figura 2.17 Primer diseño de eje con paletas.....	82
Figura 2.18 Sistema contenedor-eje-paletas.	83
Figura 2.19 Distribución angular de paletas.....	83
Figura 2.20 Fuerzas sobre paletas y geometría del sistema.	84
Figura 2.21 Modelamiento del eje, momento y cortante.	86
Figura 2.22 Geometría de paletas.	87
Figura 2.23 Modelo de carga para las varillas de las paletas.	87
Figura 2.24 Fuerzas que actúan sobre el eje.....	88
Figura 2.25 Dimensiones de rodamientos del eje.....	90
Figura 2.26 Dimensiones de rodamientos del contenedor.....	91
Figura 2.27 Conjunto tapa-contenedor, con acoples.	91
Figura 2.28 Ubicación de acople externo y el eje con su rodamiento.	92
Figura 2.29 Modelamiento de acoples.	92
Figura 2.30 Espesor de tapa de contenedor.....	93
Figura 2.31 Modelamiento para espesor de tapa del contenedor.....	93
Figura 2.32 Espesor de la cara vertical de la tapa.	94
Figura 2.33 Unión de tapa y cuerpo del contenedor mediante tornillos.	94
Figura 2.34 Ubicación de tornillos en cada cara octagonal del contenedor.	94
Figura 2.35 Sistema de humidificación.	96
Figura 2.36 Conexión del sistema de humidificación y tanque.	97
Figura 3.1 Contenedor simulado en software.	103
Figura 3.2 Deformación total del contenedor.	103

Figura 3.3 Esfuerzo equivalente en el contenedor.....	104
Figura 3.4 Factor de seguridad del contenedor.	104
Figura 3.5 Distribución de paletas dentro del contenedor.....	105
Figura 3.6 Sistema eje-paletas diseñado.....	107
Figura 3.7 Deformación total de las paletas.....	108
Figura 3.8 Esfuerzo equivalente en las paletas.	108
Figura 3.9 Factor de seguridad del contenedor.	109
Figura 3.10 Deformación total del eje.	110
Figura 3.11 Esfuerzo equivalente en las paletas.	110
Figura 3.12 Factor de seguridad del eje.	111
Figura 3.13 Modelo de estructura diseñada y simulada.....	112
Figura 3.14 Resultados de la deformación máxima de la estructura simulada.....	113
Figura 3.15 Resultados del esfuerzo máximo equivalente de la estructura.	113
Figura 3.16 Resultados del factor de seguridad de la estructura simulada.....	114
Figura 3.17 Sistema de control	116
Figura 3.18 Motor eléctrico seleccionado.	118
Figura 3.19 Rodamientos seleccionados.	120
Figura 3.20 Resistencia de calefacción.	120
Figura 3.21 Tornillos cabeza hexagonal con collar biselado.....	121
Figura 3.22 Tornillos cabeza hexagonal, parcialmente roscado.	122
Figura 3.23 Tornillos cabeza hexagonal con collar biselado.....	122
Figura 3.24 Tornillos cabeza hexagonal con collar biselado.....	123
Figura 3.25 Ventilador de caja seleccionado.	123
Figura 3.26 Humidificador de inmersión.	125
Figura 3.27 Tubo PVC	126
Figura 3.28 Accesorio de unión tipo TEE.....	126
Figura 3.29 Manguera con unión roscada tipo NPT.....	127
Figura 3.30 Acople con rosca	127
Figura 3.31 Ventilador pequeño tipo caja para humidificación.....	127
Figura 3.32 Sensor de temperatura DS18B20	128
Figura 3.33 Sensor de humedad YL-69	130
Figura 3.34 Arduino UNO	131

Figura 3.35 Variación de la temperatura estimada para el proceso.....	141
Figura 3.36 Variación de temperatura en pilas de compostaje tradicional.....	141
Figura 3.37 Compostera tradicional disponible en el mercado ecuatoriano.....	144
Figura 3.38 Comparación del compostador diseñado con uno del mercado local...	145
Figura 3.39 Compostaje en pilas.	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Relación de C:N de los materiales utilizados en compost.....	12
Tabla 1.2 Degradabilidad de elementos orgánicos.....	24
Tabla 1.3 Constantes para el cálculo del número Nu.	40
Tabla 1.4 Constantes para cálculo de Nu en cuerpos de sección no circular.....	41
Tabla 2.1 Alternativas de solución para distintas características técnicas.....	56
Tabla 2.2 Matriz de decisión.....	60
Tabla 2.3 Escala de calificación.....	61
Tabla 2.4 Resultados de la matriz de decisión	61
Tabla 2.5 Parámetros para compostaje acelerado basado en método Berkeley.	64
Tabla 2.6 Valores típicos de los parámetros del compostaje.....	64
Tabla 2.7 Porcentaje de sólidos volátiles y totales.....	67
Tabla 2.8 Peso atómico de elementos químicos.....	68
Tabla 2.9 Masa de CO ₂ requerida por gramo de sustrato.....	70
Tabla 3.1 Resultados de parámetros del compostaje.....	99
Tabla 3.2 Componentes de la mezcla con su respectiva masa.	99
Tabla 3.3 Resultados de oxígeno requerido por gramo de sustrato.	100
Tabla 3.4 Dióxido de carbono generado por gramo de sustrato.	100
Tabla 3.5 Resultados del sistema de aireación.....	101
Tabla 3.6 Resultados de cálculos térmicos.....	102
Tabla 3.7 Resultados del diseño del contenedor.	102
Tabla 3.8 Resultados de simulación de contenedor.	105
Tabla 3.9 Resultados del diseño de paletas.	106
Tabla 3.10 Resultados del diseño del eje motriz.....	107
Tabla 3.11 Resultados de simulación de las paletas.	109
Tabla 3.12 Resultados de simulación del eje.....	111
Tabla 3.13 Resultados del diseño de la estructura o base.	112
Tabla 3.14 Resultados de la simulación de la estructura de soporte.....	114
Tabla 3.15 Resultados del cálculo del sistema de potencia.....	115
Tabla 3.16 Características técnicas del motor.....	119
Tabla 3.17 Características técnicas de Rodamientos.....	119

Tabla 3.18 Características de las resistencias.....	120
Tabla 3.19 Características técnicas del ventilador.....	124
Tabla 3.20 Características técnicas del humidificador.....	125
Tabla 3.21 Características técnicas del ventilador pequeño.....	128
Tabla 3.22 Características técnicas del sensor de temperatura.....	129
Tabla 3.23 Características técnicas del sensor de humedad.....	130
Tabla 3.24 Características técnicas del Arduino UNO.....	131
Tabla 3.25 Costos de materiales.....	133
Tabla 3.26 Costo de construcción.....	135
Tabla 3.27 Costo de mantenimiento.....	138
Tabla 3.28 Modo de operación del sistema.....	139

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1	Equipo compostador mecánico
PLANO 2	Vista explosionada del equipo compostador mecánico
PLANO 3	Contenedor de materia orgánica
PLANO 4	Contenedor
PLANO 5	Tapa de contenedor
PLANO 6	Marco de encaje
PLANO 7	Anillo con malla metálica
PLANO 8	Acoples de resistencias
PLANO 9	Eje motriz
PLANO 10	Paletas mezcladoras
PLANO 11	Sistema de humidificación
PLANO 12	Contenedor de agua
PLANO 13	Caja de ventilador de humidificación
PLANO 14	Estructura de soporte
PLANO 15	Mesa de soporte
PLANO 16	Soporte 1 de contenedor
PLANO 17	Tubo de base
PLANO 18	Platina 2 de base

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Muchos de los residuos orgánicos originados de prácticas agrícolas, tales como podas de árboles, cosechas de frutas, cortes de pastos, estiércol, entre muchos otros, principalmente en zonas agropecuarias, son destinados a la quema o simplemente enterrados en el suelo o en otros casos botados en el suelo hasta su descomposición inapropiada (FAO 2013). Lo mismo ocurre en la mayoría de los hogares ecuatorianos, tanto urbanos como rurales, donde desperdicios domésticos son gestionado por los correspondientes sistemas de recolección de basura, para finalmente terminar en botaderos o rellenos sanitarios.

Unos de los métodos que permite aprovechar el valor de aquellos residuos, es el compostaje, el cual permite transformar de gran manera esos desperdicios hasta conseguir abono orgánico descompuesto mediante procesos aeróbicos y de gran calidad, que puede ser utilizado en huertos para agregar nutrientes a la tierra y mejorar su estructura (Portal Terminológico de la FAO, 2013).

Una entrevista de diario El Universo al ex asesor del Ministerio de Ambiente del Ecuador, en el 2021, revela afirmaciones muy impactantes. El experto indica que enterrar los desechos es una práctica muy antigua, de hace 240.000 años, y mientras en el país la continuamos realizando, en muchos países del mundo su potencial es aprovechado principalmente como energía o en forma de abono. Ya que la materia tardaría de 400 a 500 años en degradarse, y al final solo contaminan el suelo y agua.

Es así, que el desarrollo de sistemas mecánicos capaces de descomponer la materia orgánica de manera controlada se hace muy necesario. Es decir, un equipo eficiente y muy asequible para la población, capaz de producir un tipo de abono sólido de calidad. El cual pueda ser aprovechado principalmente por aquellas familias dedicadas a cultivar sus propios alimentos en sus huertos domésticos, ya sea por cuestiones económicas o actividad laboral, dado que la materia prima para llevar eso a cabo, es algo con lo que se cuenta de manera diaria, y en grandes cantidades, es decir, basura orgánica,

contribuyendo a su vez con el desarrollo sostenible y reducción de la contaminación del ambiente y suelo.

1.1 Definición del Problema

Los desechos sólidos se han convertido en un gran problema para todas las naciones, en los últimos años, es así, que un informe del Banco Mundial, en el 2018, denominado “*What a Waste 2.0*” (“Los desechos 2.0”, en español), demostró que aproximadamente en el mundo, se generan 2,010 millones de toneladas de desechos sólidos cada año, resaltando que un 33% de estos, provocan riesgos para el medio ambiente durante su gestión.

Apenas el 13,5% de los desechos del mundo se recicla, mientras que solo el 5,5% se composta, y una proyección indica un aumento del 70% de aquellos desechos en los próximos 30 años. De manera regional, solo en América Latina y el Caribe juntos se generan casi 231 millones de toneladas de desechos (Banco Mundial, 2018).

En el Ecuador, el Ministerio de Ambiente y Agua reconoce que este es uno de los grandes problemas que enfrentan los municipios, ya que la cantidad de desechos generados por las familias ecuatorianas es cercana a los 4.9 millones de toneladas por año, de los cuales un 58,47% es orgánico, mientras que el 41,53% es inorgánico (PNGIDS, 2019).

Es decir, en el país se generan más desechos orgánicos que otros tipos de desechos, sin embargo, estos no son aprovechados en su totalidad, ya que, según estadísticas del INEC, en el Ecuador, el 96% de los desperdicios son enterrados en botaderos o rellenos sanitarios, y apenas el 4% es reciclado. Por tal motivo, se hace necesaria una alternativa que permita la transformación de los desechos orgánicos, para recuperar su valor bioquímico mediante técnicas sustentables como el compostaje, capaz de ser aplicado por cualquier familia ecuatoriana, de manera económica y disminuyendo el impacto ambiental, dado que el simple hecho de reciclar no asegura el aprovechamiento de los residuos orgánicos.

1.2 Justificación del proyecto

Según FAO (2013), aprovechar los residuos orgánicos, de manera que estos regresen al suelo, generaría considerables beneficios ambientales como gran reducción de metano en los rellenos sanitarios de los municipios, nutrición y capacidad de retención de agua en el suelo y reducción del riesgo de erosión.

Permitiría el desarrollo sustentable de las familias ecuatorianas, al contar con un tipo de abono producido por ellos mismo y de gran calidad para sus propios huertos domésticos, pudiendo convertirse en una actividad escalable, y generadora de empleos.

Adicionalmente, con esto se combina la protección del medio ambiente con la producción agrícola sostenible, al aplicarse una de las técnicas más aceptadas en el mundo como lo es el compostaje, y con la cual se puede obtener beneficios a costos relativamente bajos, ya que la materia prima para el proceso solo serían residuos o basura doméstica.

Un sistema o equipo como el propuesto aquí, difícilmente es asequible o está disponible en el mercado local, por ende, tendría un impacto beneficioso en la población, al proveer un equipo de uso doméstico capaz de generar grandes beneficios para el ciudadano común.

Por otro lado, se fomenta e incentiva una cultura de reciclaje, pudiendo ayudar a establecer políticas o normas por parte de las ciudades con mayor población, tal como Guayaquil, donde, según el diario digital Primicias, se recolecta aproximadamente 4.000 toneladas de basura diariamente, y cada tonelada representa un valor de 32 USD para su procesamiento. De esta manera se crea una estrategia de reciclaje en la fuente inicial de emisión.

1.2.1 Población objetivo

El trabajo desarrollado en el presente proyecto está orientado tanto a las personas del área rural como urbana, específicamente aquella parte de la población dedicada a la actividad agrícola o cultivos a pequeña escala, enfatizando en las personas que trabajan huertos domésticos o familiares, que en su diario vivir generan una cantidad bastante

considerable de desechos orgánicos en sus hogares, producto de las actividades propias del hogar.

Así mismo, se recalca que las condiciones climáticas de operación o uso del equipo deben ser similares a las existentes al nivel del mar de la costa ecuatoriana, de ahí, que el sistema está exclusivamente diseñado para operar en dicha región del Ecuador, mas no en otros lugares donde las condiciones son completamente distintas, por cuestión de seguridad para el usuario y para el buen desempeño del equipo en general.



Figura 1.1 Huertos domésticos (Pixabay).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un compostador mecánico con sistema de aireación para la producción de abonos orgánicos en casa.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Constituir un modelo de compostador que permita la transformación de los residuos orgánicos en abono sólido de calidad en casa.
- Incorporar un sistema de aireación y movimiento mediante un mecanismo de paletas consistente con el proceso bioquímico.
- Establecer un sistema de temperatura y humedad dentro del compostador acorde a las respectivas etapas de descomposición.

1.4 Marco teórico

1.4.1 La basura orgánica en el Ecuador

Es considerado como basura orgánica todo desecho proveniente de materiales vegetales (hojas, frutos, raíces, ramas, etc.) o animales (carnes, huesos, pelos, etc.) que pasan por un proceso de descomposición mediante la ayuda de microorganismos.

En Ecuador se ha registrado que un ciudadano es capaz de producir aproximadamente 0,86 kilogramos de basura a diario, esta cifra podría parecer insignificante, pero, si dicha cifra se lo multiplica por la cantidad total de ciudadanos que habitan en el país, generan millones de desperdicios cuyo destino serán los rellenos sanitarios, las celdas emergentes o los botaderos a cielo abierto. Dichos botaderos se encuentran ubicados generalmente cerca de ríos que serán afectados por los líquidos contaminantes que desprende la basura, sin contar con la emisión de gases de efecto invernadero, como el metano, que afecta al medio ambiente.

El Ministerio de Ambiente y Agua reconoce que este es uno de los grandes problemas que enfrentan los municipios, ya que la cantidad de desechos generados por las familias ecuatorianas es cercana a los 4.9 millones de toneladas por año, de los cuales un 58,47% es orgánico, mientras que el 41,53% es inorgánico (PNGIDS, 2019).

Es decir, en el país se generan más desechos orgánicos que otros tipos de desechos, sin embargo, estos no son aprovechados en su totalidad, ya que, según estadísticas del INEC, en Ecuador, el 96% de los desperdicios son enterrados en botaderos o rellenos sanitarios, y apenas el 4% es reciclado.

1.4.2 Tipos de abonos

Varias generaciones anteriores, se ha utilizado en la agricultura el método de producir abonos orgánicos de manera natural mediante la descomposición de materiales vegetales y animales con la ayuda de microorganismos que habitan en el suelo como bacterias, lombrices, caracoles, hormigas, etc., para una mejor aportación de los nutrientes en el suelo y el desarrollo de productos agrícolas más sanos. Sin embargo, con el pasar del tiempo estos abonos han sido reemplazados con fertilizantes y algunos productos químicos.

Debido a la gran demanda en el mercado de la utilización de estos abonos, se requiere del desarrollo de nuevos métodos para una producción más sana y eficiente de abonos orgánicos con el fin de tener una orientación agroecológica y evitar el aumento de desechos al ambiente.

Entre los abonos orgánicos, la cual podemos encontrar en una mayor cantidad en fincas o campos, tenemos los abonos orgánicos sólidos (compost, compost mineralizado, lombricompost, bocashi) y abonos orgánicos líquidos (té de estiércol, madero negro, etc.), estos últimos se lo realiza mediante la descomposición de los materiales orgánicos con la ayuda de microorganismos disueltas en agua (INTA, 1993).

1.4.3 Abonos sólidos

Entre los abonos orgánicos sólidos más conocidos tenemos el compost, compost mineralizado y lombricompost, que se detalla a continuación cada uno de estos abonos.

1.4.3.1 Compost

Este tipo de abono se lo adquiere mediante la mezcla de varios desechos orgánicos tanto vegetal como animal y la descomposición de esta de manera aeróbica, quiere decir que se necesita la presencia de oxígeno para una mejor obtención de los nutrientes que aprovechará el suelo.

1.4.3.2 Compost mineralizado

El proceso de realizar este tipo de abono orgánico sólido es el mismo que del compost mencionado con anterioridad, con la diferencia que se añade carbón para una mejor oxigenación del compost y logre liberar con mayor facilidad los nutrientes al suelo, también se agrega harina de roca la cual contribuye en minerales necesarios para el crecimiento óptimo del cultivo como el zinc, cobre, hierro y calcio (INTA, 1993).

1.4.3.3 Lombricompost

Lombricompost, también conocido como lombricultura o humus de lombriz, es un proceso de descomposición de los desechos orgánicos cuyo componente principal para la producción del abono sólido es la lombriz. Estos pequeños animales son los encargados de alimentarse de los materiales presentes en el desecho orgánico,

mediante el proceso digestivo de la lombriz se obtiene el humus (orina y estiércol) la cual es rico en micro elementos necesarios para una mejor obtención de nutrientes al suelo.

La Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos (Emgirs) está encargada del proyecto de lombricultura, la cual implementa 1 200 000 lombrices para el desarrollo de humus en el relleno sanitario El Inga, ubicado en Quito. Este proceso tiene una duración aproximada de seis meses para la producción del abono y no solo ayuda a generar un compost de manera natural, sino que también prolonga la vida útil del relleno sanitario por la transformación de los desechos orgánicos en el mismo (Romero, 2017).

1.4.4 Proceso de compostaje

Como ya se ha hecho mención con anterioridad, para la realización de compostaje se utiliza materiales orgánicos la cual pasan por un proceso en descomposición de manera aeróbica, es decir con la presencia de oxígeno, aportando nutrientes y mejorando la composición del suelo. Estos desechos orgánicos generalmente la podemos observar en gran cantidad en los campos o fincas que se podrían aprovechar para la vasta producción de compost.

Según la FAO (2013) no todo desecho orgánico que pasa por un proceso de descomposición de forma aeróbica llega a dar como resultado un compost de calidad para el suelo, ya que debe pasar por diversas etapas para obtener un abono en buenas condiciones, sino dicho compost mal procesado ocasiona riesgos al suelo y a la planta. Estos riesgos son:

- **Fitotoxicidad:** es un peligro que afecta directamente a la planta y al medio ambiente, debido al desprendimiento de ácidos orgánicos en el suelo y de malos olores provocado por el amoniaco que genera los materiales en el abono que están aún en proceso de compostaje.

- Bloqueo biológico del nitrógeno: este riesgo es debido a la presencia de carbono en mayor cantidad y no hay un balance en relación con la cantidad de nitrógeno en el compost, dando origen al agotamiento de nitrógeno en el suelo
- Reducción de oxígeno radicular: este problema es debido al consumo del oxígeno que hay en el suelo provocado por los microorganismos que aún están realizando el proceso de descomposición para el compostaje.
- Exceso de amonio y nitratos en las plantas y contaminación de fuentes de agua: debido a un mal proceso de compostaje, la gran cantidad de nitrógeno que hay en el material se puede convertir en amonio que llega a contaminar las aguas superficiales del terreno y las plantas al nutrirse de esta sustancia provoca una mal formación de la cosecha y a su vez llega a afectar la salud humana al ingerir los productos en mal estado.

1.4.5 Etapas del proceso de compostaje

Durante el proceso de descomposición el compost debe pasar por cuatro etapas o fases para que se logre un equilibrio entre la relación del carbono (C) y el nitrógeno (N) y obtener un producto de calidad con los nutrientes óptimos para el suelo.

1.4.5.1 Fase Mesófila.

En esta primera fase con un lapso de corto tiempo entre dos y ocho días, el compost empieza a subir su temperatura desde una temperatura ambiente hasta llegar a los 45°C aproximadamente y la producción de ácidos orgánicos también aumenta, todo esto gracias a las actividades de los microorganismos por el consumo del carbono y nitrógeno presentes en los desechos orgánicos y también la descomposición de azúcares la cual hace que el pH baje hasta 4.0 (FAO,2013).

1.4.5.2 Fase Termófila o de Higienización.

Para esta siguiente fase con una duración de varios días o meses, el compost sobrepasa los 45°C dando origen a las bacterias termófila que reemplazarán a los

microorganismos de la fase mesófila, que se encargarán de descomponer los componentes complejos del carbono y el pH sube debido a la transformación del nitrógeno en amoníaco. En esta fase también es llamada higienización ya que las altas temperaturas a la que llega el compost logran eliminar las bacterias que se encuentran en el estiércol (FAO,2013).

1.4.5.3 Fase de Enfriamiento o Mesófila II.

Como su nombre lo indica, en esta fase la temperatura del compost baja hasta regresar a los 45°C por lo que aparece nuevamente el microorganismo mesófilo, ya que carece de las fuentes generadoras del calor que fueron el carbono y el nitrógeno. En esta etapa se podría decir que el pH del compost permanece alcalino y llega a durar este proceso por varias semanas, la cual se puede confundir con la siguiente etapa que es fase de maduración. En esta fase aparecen de manera visible algunos hongos (FAO, 2013).

1.4.5.4 Fase de Maduración.

“Es un período que demora meses a temperatura ambiente, durante los cuales se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos” (FAO, 2013).

1.4.6 Variables en el proceso de compostaje

Para lograr obtener un compost de calidad con los componentes necesario que logre nutrir al suelo, es necesario tener en consideración un control de todas las variables que logren afectar al proceso de compostaje y los microorganismos procedan a realizar las actividades de descomposición de la materia orgánica con normalidad. A estas variables o factores que influyen en el compost, se las puede clasificar en dos tipos de parámetros: de seguimiento y relativos a la naturaleza del sustrato.

Entre los parámetros de seguimiento tenemos como variables: la humedad, la temperatura, aireación, pH y dimensiones del compost, determinados de seguimiento ya que se debe llevar un control y medición con mayor regularidad de principio a fin, realizando cambios en caso de ser necesarios para que haya un buen equilibrio (Jeris,

1973). Los parámetros de naturaleza del sustrato tenemos: el tamaño de partícula, relación C: N y materia orgánica (Madejón y Cabrera, 2002).

1.4.6.1 Humedad

En el compost es indispensable la presencia de agua para una mayor viabilidad con el transporte de sustancias solubles, necesarias para las funciones de los microorganismos. Según menciona (Miyatake, 2006), el agua no debe llenar todos los espacios huecos del compost, ya que se trata de un proceso aeróbico y es necesario la presencia de oxígeno y demás gases producto de la descomposición en dicha masa.

Existe un rango porcentual de humedad para el proceso óptimo del compostaje, debajo del 30% de humedad produce que los microorganismos no se desarrollen adecuadamente dando una actividad de descomposición deficiente, por el contrario, con una presencia de humedad mayor a 70% hace que se desplace el oxígeno de los poros del compost provocando en ese momento una anaerobiosis. Por lo tanto, el rango porcentual aceptable de humedad varía entre los 50 y 70% (Bueno, 2008)

1.4.6.2 Temperatura

Esta variable es una de la más relevante en el proceso del compostaje, ya que permite determinar en qué tipo de fase se encuentra el compost mediante el aumento o disminución del calor generado por las actividades realizada por los microorganismos (Martínez, 2013).

El proceso empieza con una temperatura ambiente la cual, en la primera fase conocida también como fase mesófila, irá aumentando debido a la presencia de los microorganismos mesófilos hasta llegar a una temperatura alrededor de los 45°C. A medida que el calor va aumentando, desaparecen ciertas bacterias y los microorganismos termófilos son aquellos que quedan presente en la segunda fase alcanzando una temperatura aproximada a los 70°C. Una vez terminada la actividad de los termófilos, la temperatura disminuye paulatinamente por varios días hasta alcanzar un valor cercano a la del ambiente, terminando este proceso en la fase de maduración.

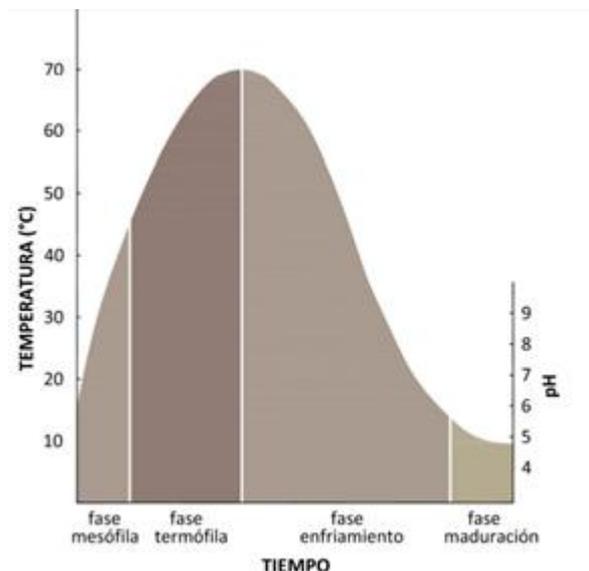


Figura 1.2 Variación de la temperatura en las fases del compost (Costa, 1991).

1.4.6.3 pH

En las fases del proceso de compostaje, se puede notar una variación del pH que no es tomado mucho en consideración; sin embargo, cuando hay un aumento de la acidez en el producto (pH muy bajo) indica que se está realizando un proceso anaeróbico y si el pH es elevado da como resultado un gran contenido de nitrógeno amoniacal y carbonatos solubles (Soliva & López, 2012).

Dichos cambios lo podemos notar en la fase mesófila debido a las actividades de los microorganismos, la cual producen un aumento de la acidez orgánica por la degradación de los azúcares dando un pH de 4.0, mientras que, en la siguiente fase por la presencia de los microorganismos termófila ayudan a la elevación de dicho pH. Suler (1977), menciona que una buena descomposición del compost genera un producto final con un pH entre 7 y 8.

1.4.6.4 Tamaño de partículas

Para tener un proceso de aireación adecuado, es necesario que las partículas no sean tan pequeñas para evitar la obstrucción de los canales para la oxigenación del material, ni tan grandes con el fin que se logre una óptima degradación.

De esta manera Gray & Biddlestone (1974), establecen un valor mínimo para el tamaño de partícula de 1,3 cm, óptimo para ser utilizado en un proceso de compostaje con aireación forzada, mientras que las partículas con un tamaño máximo de 7,6 cm son más usadas en los procesos de compost en hileras de volteo y otros métodos que se suministra oxígeno a la masa de manera natural.

Respecto a los materiales desechados de un huerto correspondiente a la madera, fibras de coco, mimbre de yute, etc., se recomienda que el tamaño ronde entre los 5 y 7 cm y con 1 cm de diámetro aproximadamente para el caso de las ramas individuales (Martínez, 2013)

1.4.6.5 Relación C: N

Al realizar una pila de compostaje hay que tener en consideración los desechos que se van a agregar a la masa, dependiendo de los materiales que se añadan, se obtendrá una relación de carbono y nitrógeno (C: N) adecuada para un proceso de compostaje más rápido y de alta calidad.

La relación C: N apropiado debe estar entre los valores de 25:1 a 30:1, si esta relación es mucho mayor al rango es debido a que existe una gran cantidad de carbono capaz de retardar el proceso de compostaje y, si el valor de relación es más inferior a los determinados es porque hay una cantidad excesiva de materiales con nitrógeno, provocando la liberación del mismo como amoníaco que produce los malos olores y un aumento de temperatura excesivo (Reinoso & Ruiz, 2008)

Tabla 1.1 Relación de C:N de los materiales utilizados en compost (PNUD-INIFAT, 2002).

Nivel alto de nitrógeno 1:1-24:1		C: N equilibrado 25:1-40:1		Nivel alto de carbono 41:1-1000:1	
Material	C:N	Material	C:N	Material	C:N
Purines frescos	5	Estiércol vacuno	25:1	Hierba recién cortada	43:1
Gallinaza pura	7:1	Hojas de frijol	27:1	Hojas de árbol	47:1

Estiércol porcino	10:1	Crotalaria	27:1	Paja de caña de azúcar	49:1
Desperdicios de cocina	14:1	Pulpa de café	29:1	Basura urbana fresca	61:1
Gallinaza camada	18:1	Estiércol ovino/caprino	32:1	Cascarilla de arroz	66:1
		Hojas de plátano	32:1	Paja de arroz	77:1
		Restos de hortalizas	37:1	Hierba seca (gramíneas)	81:1
		Hojas de café	38:1	Bagazo de caña de azúcar	104:1
		Restos de poda	44:1	Mazorca de maíz	117:1
				Paja de maíz	312:1
				aserrín	638:1

Cornel Waste Management Institute (1996) establece que la relación carbono-nitrógeno C/N de la mezcla depende del porcentaje de C y N de los componentes individuales, así también como el porcentaje de humedad y masa, se la calcula de la siguiente manera:

$$\frac{C}{N} = \frac{\sum S_n [C_n (100 - \%HR_n)]}{\sum S_n [N_n (100 - \%HR_n)]} \quad (1.1)$$

$$\frac{C}{N} = \frac{S_1 [C_1 (100 - \%HR_1)] + S_2 [C_2 (100 - \%HR_2)] + \dots}{S_1 [N_1 (100 - \%HR_1)] + S_2 [N_2 (100 - \%HR_2)] + \dots}$$

C/N → Es la relación carbono-nitrógeno de la mezcla (adimensional).

$S_n (kg)$ → Es la masa de cada sustrato.

$C_n (\%)$ → Es el porcentaje de carbono de cada sustrato.

$N_n (\%)$ → Es el porcentaje de nitrógeno de cada sustrato.

$\%HR_n$ → Es el porcentaje de humedad de cada sustrato.

Mientras que el porcentaje de humedad promedio de la mezcla es:

$$\%HR_m = \frac{\sum \%HR_n}{n} = \frac{\%HR_1 + \%HR_2 + \%HR_3 + \dots}{n} \quad (1.2)$$

La masa total de la mezcla para el compostaje se puede calcular como:

$$M_T = \sum S_n = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7 + S_8 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12} \quad (1.3)$$

1.4.6.6 Porcentaje de sólidos volátiles y sólidos totales

Los sólidos totales son identificados como aquellos que quedan en forma de residuos luego de haber calentado una muestra de alguna sustancia específica hasta secarla completamente, mientras que los sólidos volátiles se caracterizan por ser aquellos porcentajes de materia que se pierde al calcinar la muestra (Menéndez, 2017).

Los residuos que se **descomponen lentamente** tienen mayor valor de C/N, mientras que los que se **descomponen rápidamente** tienen C/N bajo (Deep Green Permaculture, 2015)

1.4.7 Aireación forzada en el proceso de compostaje

Para que los microorganismos puedan realizar sus actividades aeróbicas y se produzca la descomposición del material, es necesario la aireación del compost, es decir, que haya el abastecimiento de oxígeno en los espacios del producto. El rango de concentración de oxígeno que se debe tener presente está entre 15 a 20% con una variación de dióxido de carbono de 0,5 a 5%, si estos valores de oxígeno disminuyen a menos del 5% se produce una descomposición anaeróbica de la materia (Keener, 1993).

Al tratarse de una aireación forzada, se hace uso de ciertos mecanismos para una inyección de aire tomada del medio para un mejor control de oxígeno y de temperatura del compost. Este método se lo puede realizar de manera continua o en intervalos llevando un control del porcentaje de oxígeno necesario y los rangos de temperatura que debe tener dependiendo de la fase en la que se encuentre el proceso de compostaje.

1.4.8 Componentes principales de un sistema de compostaje

En base a Dibut (2009), los principales componentes para un sistema de compostaje son materiales orgánicos, siempre y cuando estos no se encuentren contaminados. Esta materia prima puede ser obtenida de:

- Restos de cosechas: Pueden ser utilizados directamente para compostarlo o como acolchado. Elementos ricos en nitrógeno como hojas caídas de árboles, abonos verdes, césped, frutos, etc. O los restos vegetales más adultos como troncos, ramas trituradas, malas hierbas, tallos, etc. que a pesar de ser menos ricos en nitrógeno son utilizados y aprovechados de igual manera.
- Restos urbanos: Estos son todos aquellos restos orgánicos que proceden de las cocinas en general, frutas y vegetales, restos de comida, alimentos caducados, restos de café, té, cáscaras de frutas, etc.
- Estiércol animal: Destacando el estiércol de vaca, aunque también son de interés la gallinaza, el estiércol de caballo y de oveja.
- Residuos de pelo: Al tener un alto contenido de nitrógeno, el uso más recomendado para este es el de compost orgánico.
- Restos de animales: Por su contenido proteico cuentan con un potencial energético alto, ayudando así a alcanzar altas temperaturas durante un tiempo prolongado, permitiendo la higienización del material. Siendo esto último uno de los requisitos más importantes en el proceso de compostaje.

1.4.9 Método Berkeley

Existe dos formas para realizar compostaje y una de ellas da un producto final con mejor calidad y en menor tiempo, la cual será de guía para el desarrollo del abono para este proyecto.

El primero que se conoce como compostaje en frío o también llamado compostaje regular, este método propone realizar una pila de desechos orgánicos y dejarlo que se descomponga naturalmente sin ninguna interacción del hombre, debido a esto, el proceso se vuelve muy lento que puede durar entre 6 a 12 meses.

Uno de los problemas de realizar el método de compostaje en frío es que a consecuencia de la baja temperatura del material orgánico (temperatura ambiente), este no llega a eliminar los patógenos de enfermedades, por lo que este abono sólido podría llegar a infectar las demás plantas en buen estado. Además, de ser un proceso parcialmente anaeróbico, el carbono y nitrógeno se disipa en el ambiente, provocando una reducción del 20% del volumen original del compost.

Por otro lado, está el método de compostaje en caliente, también llamado **método de Berkeley** es una técnica de compostaje rápida, eficiente y de alta temperatura que producirá compost de alta calidad en solo 18 días. Este proceso logra descomponer el material mucho mejor, eliminando los patógenos de enfermedad, dando al final un abono fino aproximadamente del mismo volumen que del material orgánico agregado. (Raabe, 2009)

El método en caliente de Berkeley requiere de ciertos requisitos para producir correctamente el abono sólido en los días propuesto, la cuales son:

- Temperatura: 55-65°C
- Balance carbono: nitrógeno: 25-30:1
- Tamaño de pila: 1x1 m de ancho y 1,5 m de alto.
- Remoción constante del compost

Para el proceso de compostaje mediante este método se lo puede resumir de la siguiente manera:

1. En el día 1 se realiza la mezcla de los materiales orgánicos necesarios para obtener un C: N balanceado, se humedece la pila y se lo deja reposar durante 3 días más.
2. A partir del día 5 en adelante, se tendrá que remover cada 2 días la pila hasta lograr que los materiales internos de la pila queden en el exterior y viceversa. Verifique que la humedad se mantenga constante.
3. En los días 6 al 9 llega a su punto máximo de temperatura que es aproximadamente 65°C, durante esos días hay que mantener dicha temperatura y luego de ello irá disminuyendo en los siguientes días.

4. A partir del día 10 se deberá remover el material cada 2 días y el día 18 ya estará listo el abono completo y listo para ser usado en las cosechas o huertos.

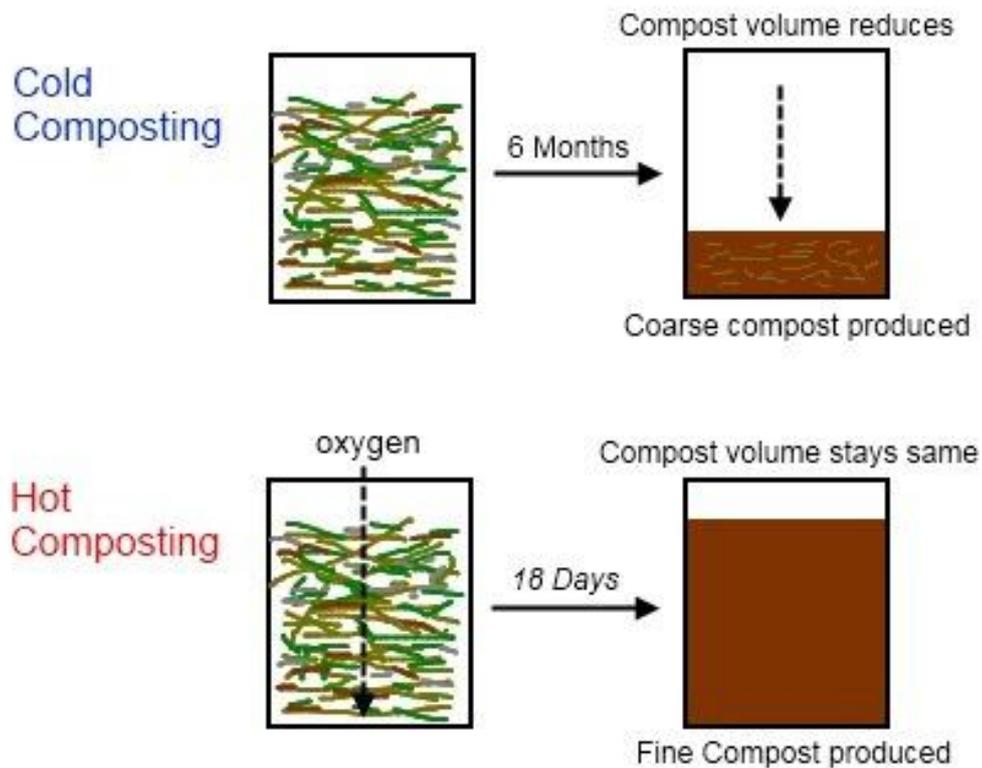


Figura 1.3 Comparación del compostaje en frío y compostaje en caliente (Raabe, 2009).

1.4.10 Sistemas de compostaje

A lo largo del tiempo se han desarrollado varios métodos para la producción de compost orgánico. Estos van desde procesos sencillos a pequeña escala, domésticos, y realizados de manera manual, hasta metodologías más complejas con gran cantidad de materia y uso de maquinaria especializada. En cualquier caso, los principios para obtener el compost son muy similares.

FAO (2013) categoriza o estudia dos sistemas generales para la generación de compost, estos son, los *sistemas abiertos* y los *sistemas cerrados*.

1.4.10.1 Sistemas de compostaje abiertos

Como su nombre lo indica, consiste en colocar la materia orgánica en el suelo o sobre una superficie al aire libre, dispuesta en pilas, que no son más que cúmulos de material en posiciones organizadas. Protegiéndola de factores climáticos con el uso de techos o carpas (Tortosa, 2015).

A su vez, en este grupo encontramos, las pilas estáticas y las pilas dinámicas.

Según Docampo (2013) el compostaje en **pilas estáticas** no demanda volteo alguno o aireación forzada de la materia orgánica, más bien pueden llevarse a cabo libremente mediante convección natural debido a características propias de los componentes. Lo contrario sucede en las **pilas dinámicas o con volteo**, que sí implican movimiento, el mismo que es generado con ayuda de palas manuales, tridentes, o cargadoras mecánicas.

Además, se puede trabajar con un sistema de **pilas estáticas con aireación forzada**, en el cual se inyecta aire a la materia mediante equipos especializados, aunque no se aplique movimiento.



Figura 1.4 a) Pila estática, b) Pila con volteo mecánico (Docampo, 2013).

Existen ventajas y desventajas en la aplicación de ambos métodos. Por ejemplo, una pila dinámica no está dotada por una aireación constante generalmente, sino solo de manera periódica, al contrario de las pilas estáticas que, si lo están, naturalmente por condiciones propias o de manera artificial. Aquella deficiencia de oxígeno retrasa el proceso y hace que el sistema sea menos eficiente; sin embargo, el volteo en las pilas dinámicas permite obtener uniformidad de la materia, y reducción de fragmentos,

además, hace que los microorganismos bacterianos logren incidir en otras regiones, redistribuyendo a la vez el agua y los nutrientes (Tortosa, 2015).

1.4.10.2 Sistemas de compostaje cerrados

Estos se llevan a cabo en recipientes o contenedores, de manera que se protege la materia orgánica de cuestiones climáticas, como lluvia, fuertes vientos, etc., pero también de agentes externos como roedores, aves, animales domésticos o de granja, entre otros. Además, permite la mezcla de los residuos para lograr uniformidad. A pesar de poseer dichas ventajas, en ocasiones se generan altas temperaturas en el interior del contenedor, lo cual es controlado agregando tierra en la superficie exterior como medio de enfriamiento o regulación. El compostaje en recipientes es el método más utilizado en los hogares. (FAO, 2013)

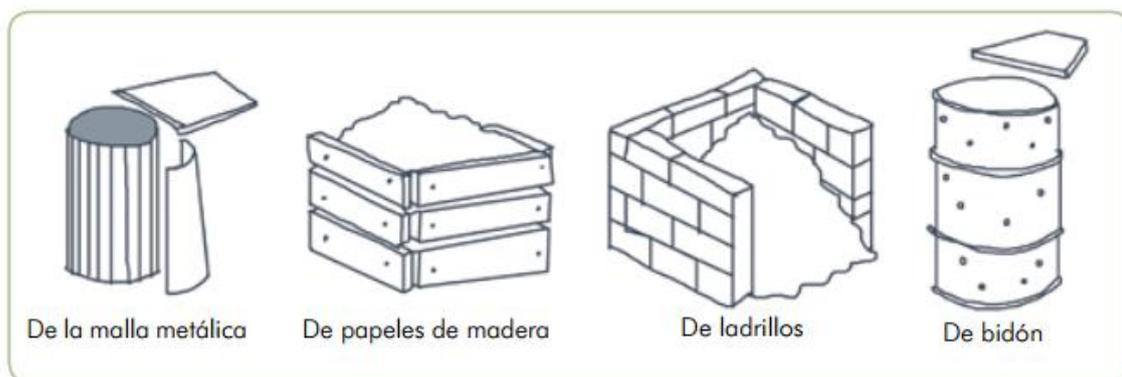


Figura 1.5 Contenedores para compostaje cerrado (FAO, 2013).

Esta clasificación también da lugar a otro sistema de compostaje muy conocido, denominado **compostaje en bioreactor**, que según Tortosa (2015) intenta mantener la biomasa dentro de un contenedor rígido cerrado, en el cual se ejecuta generalmente la primera etapa del proceso, la cual demanda mayor atención. El sistema puede operar de forma continua si se carga material a cada momento o de manera discontinua si el ingreso de materia se da luego de una respectiva descarga del bioreactor. A su vez, este puede ser estático o dinámico dependiendo de si hay movimiento del contenido.



Figura 1.6 Bioreactor para compostaje (Ison21, 2019).

Existen otros métodos o sistemas que no son más que variantes de los anteriores, tales como sistemas de pilas estáticas con aireación forzada o artificial, túneles cerrados estáticos o dinámicos y sistemas parcialmente abiertos como las trincheras. Los sistemas de compostaje se resumen en el siguiente esquema.

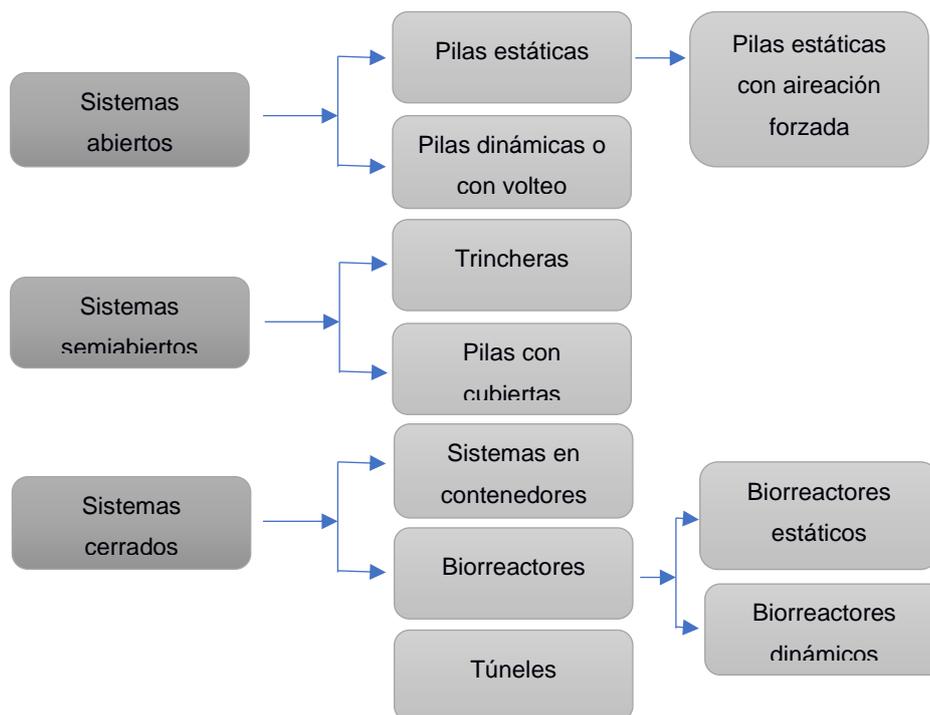


Figura 1.7 Esquema de los tipos de sistemas de compostaje y su relación (Fuente propia).

1.4.11 Descripción bioquímica del proceso

Para llevar a cabo el proceso de compostaje la materia orgánica debe sufrir varios cambios bioquímicos y físicos durante sus respectivas etapas. Esto da lugar a emisiones

de gases, cambios de temperatura, y reducción de masa o altura de la pila. De manera general los reactivos participantes así también como los productos del proceso se representan en la siguiente figura.

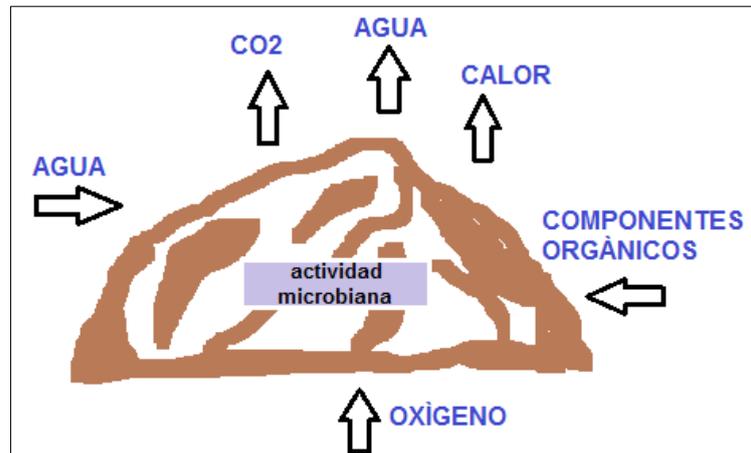


Figura 1.8 Proceso químico del compostaje (Fuente propia).

Se puede describir el proceso secuencialmente de la siguiente manera:

1. La materia orgánica pierde carbono en forma de anhídrido carbónico (CO₂), originando una pérdida de peso que puede llegar hasta un 2%.
2. Para lo anterior, primero se reducen los carbohidratos, de manera que se crean compuestos simples a partir de cadenas carbonatadas largas. Luego, aquellos compuestos simples forman los compuestos húmidos que son moléculas más complejas.
3. Juntamente con los puntos anteriores, se da la transformación de material más resistente como la lignina en compuestos húmidos nuevamente.
4. De esta manera los microorganismos aprovechan los compuestos generados para formar agua (H₂O) y CO₂ y la materia cambia a una tasa dependiente de las propiedades de los elementos individuales, factores como pH, humedad, aireación, y los tipos de organismos involucrados.

Todo el proceso puede ser representado en una ecuación genérica representativa en base a un balance de materia, Moreno y Moral (2007) establecen la siguiente.



Donde los reactivos en la ecuación corresponden a:

Material orgánico seco \rightarrow OI

Material inorgánico seco \rightarrow II

Agua presente en los componentes \rightarrow H₂O_I

Agua añadida \rightarrow H₂O_E

Aire añadido \rightarrow AE

Mientras que los productos de la ecuación hacen referencia a:

Material orgánico seco \rightarrow OF

Material inorgánico seco \rightarrow IF

Agua de componentes \rightarrow H₂O_F

Agua evaporada \rightarrow H₂O_S

Anhídrido carbónico \rightarrow CO₂_S

Amoniaco \rightarrow NH₃_S

Nitrógeno (y componentes de aire) \rightarrow N_S

De manera esquemática se tiene lo siguiente de una forma más completa y generalizada.

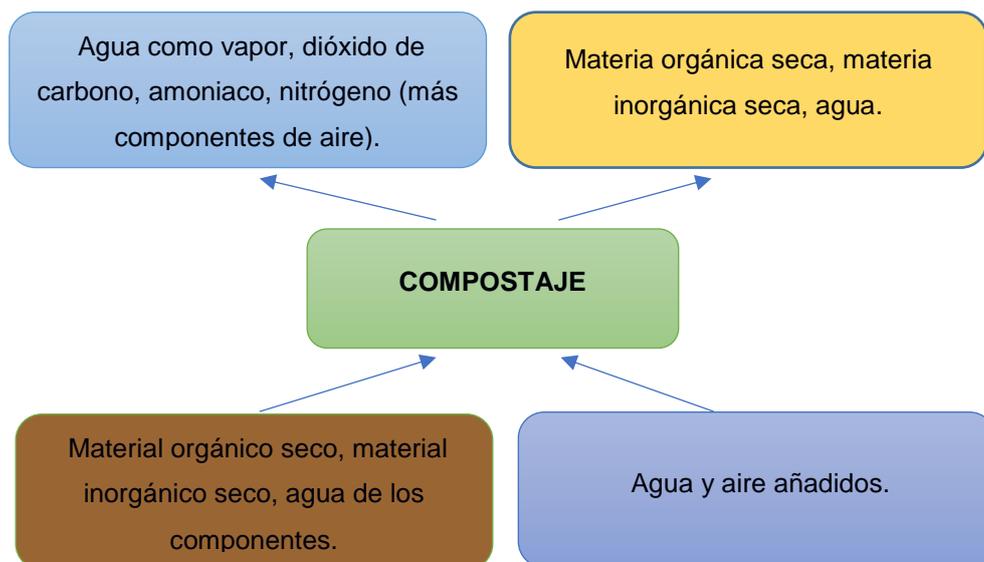
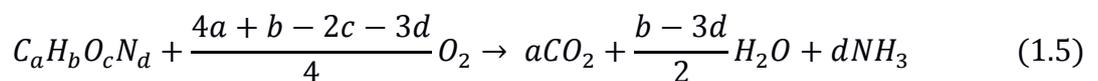


Figura 1.9 Esquema de los elementos de entrada y salida en el compostaje (Fuente propia).

Se puede calcular los elementos generados a partir de las composiciones de los elementos de entrada y de salida identificados en el esquema anterior. Mientras que el producto final de interés es el conjunto OF + IF, y para predecir la cantidad producida es necesario conocer la biodegradabilidad de los componentes orgánicos involucrados, que no es más que la capacidad de un elemento para degradarse. En la siguiente tabla se muestran algunos.

Por otro lado, Petric & Selimbašić (2008) establecen la siguiente ecuación química balanceada para describir el proceso:



Los valores de a, b, c y d representan el número de átomos de cada elemento del primer compuesto que corresponde a la biomasa ($C_a H_b O_c N_d$).

Aquellos números de átomos pueden ser determinados mediante relaciones químicas básicas conociendo el porcentaje de cada elemento químico (Daub y Seese, 2005).

$$\frac{\% \text{ elemento A}}{\text{peso atomico del elemento A}} = x_A ; \frac{\% \text{ elemento B}}{\text{peso atomico del elemento B}} = x_B ; \dots\dots\dots$$

$$\# \text{ de atomos de A} = \frac{x_A}{\text{menor } x} \quad (1.6)$$

A partir de allí se puede calcular la masa de algún compuesto generado mediante la ecuación: (Moran y Shapiro, 2004)

$$n_{\text{moles}} = \frac{m}{M} \rightarrow m = n_{\text{moles}} M \quad (1.7)$$

$n_{\text{moles}}(\text{mol}) \rightarrow$ Es el número de moles.

$M(\text{g/mol}) \rightarrow$ Es la masa molar.

$m(\text{g}) \rightarrow$ Es la masa del compuesto.

La densidad es el cociente entre la masa y el volumen de un cuerpo. En fluidos, también se puede calcular dividiendo el flujo másico entre el flujo volumétrico (White, 2004).

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \quad (1.8)$$

$\rho(kg/m^3)$ es densidad, $m(kg)$ y $\dot{m}(kg/s)$ es masa y flujo másico respectivamente, mientras que V y \dot{V} es volumen y flujo volumétrico respectivamente.

Así mismo, otra manera de calcular el flujo volumétrico través de un área según White (2004) es:

$$\dot{V} = Av \quad (1.9)$$

$A(m^2)$ es el área de por la que atraviesa el fluido y $v (m/s)$ es su velocidad.

Además, un determinado volumen o masa tiene un peso dado por:

$$W = \rho Vg = \gamma V \quad (1.10)$$

$W(N)$ es peso, $g(m/s^2)$ es la aceleración de la gravedad y $\gamma(N/m^3)$ es el peso específico del material.

Tabla 1.2 Degradabilidad de elementos orgánicos (Haug, 1993).

Elementos	% de degradabilidad
Proteínas	50
Lípidos	50
Ligninas	0
Azúcares	70
Hemicelulosas	70
Celulosas	70

Moreno y Moral (2007) definen un coeficiente degradación K_h para el proceso de compostaje de la siguiente manera:

$$K_h = \frac{[(MO_f - MO_i) * 100]}{MO_i(100 - MO_f)} \quad (1.11)$$

Donde MO_i es la concentración de materia orgánica al inicio del proceso y MO_f es la concentración al final.

1.4.11.1 Actividad microbiana

Un factor muy importante en el proceso es el sistema microbiano, ya que prácticamente de esto depende la degradación de la materia. Además, conocer cómo interactúan y se desarrollan los microorganismos bacterianos permitirá evitar la formación de gases contaminantes, malos olores, y formación de seres patógenos.

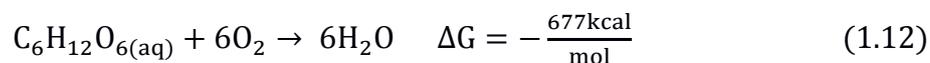
Según las funciones que logran realizar cada uno de los microorganismos durante el compostaje, tenemos los siguientes tipos:

- Microorganismos degradadores de la materia
- Microorganismos higienizantes
- Microorganismos degradadores de contaminantes
- Microorganismos generadores de patógenos y malos olores.

Se debe tratar de eliminar en alto grado la existencia de microorganismos generadores de patógenos, ya que pueden originar características negativas en el proceso y el producto final (compost).

De esta manera los microorganismos aprovechan los componentes de la materia orgánica y en presencia de oxígeno, se generan los respectivos procesos metabólicos por parte de cada uno de ellos para al final generar energía en forma de ATP (Trifosfato de Adenosina).

Moreno y Moral (2007) establecen la siguiente ecuación durante el proceso microbiano.



La incidencia de los microorganismos sobre la materia genera energía que es disipada en forma de calor, y con respecto a este efecto, para que el proceso se lleve a cabo de manera eficiente, es necesario cumplir ciertas condiciones.

1. El calor debe mantenerse en la materia o pila, esto aumenta la actividad microbiana y la degradación.
2. Los sustratos no deberían tener alto contenido de agua, ya que esto genera mayor disipación de la energía calorífica.
3. La disposición de la materia es importante, debe ser ubicada de tal manera que impida el escape de calor, con una altura de pila no muy elevada.

Con esto se logra que la temperatura aumente progresivamente hasta ocasionar la muerte de los microorganismos, dando paso a la etapa de enfriamiento. La variación de temperatura durante el compostaje da lugar a nuevas sucesiones de microorganismos que aportan su actividad metabólica en favor de la degradación, cambiando las propiedades de la materia favorablemente y eliminando patógenos.

1.4.11.2 Generación de patógenos

Los agentes patógenos transforman las actividades fisiológicas normales, y están involucrados en la infección de algún huésped o célula, se los considera como patógenos a los virus, bacterias y hongos. Estos generan compuestos indeseables, por ello deben ser controlados. (Henry J. y Heynke G., 1996)

Según Moreno y Moral (2007) los patógenos generan compuestos orgánicos volátiles y amoniacales, que son la causa de la presencia de malos olores durante el proceso de compost, perjudicando el mismo. El control o eliminación de estos agentes, puede darse de forma espontánea al tener algunas situaciones específicas descritas a continuación.

- Generación de altas temperaturas durante la fase termófila del proceso de compostaje, es decir, al inicio.
- Generación de compuestos fenólicos, los cuales son compuestos antimicrobianos.
- Aumento de procesos líticos por parte de los microorganismos.

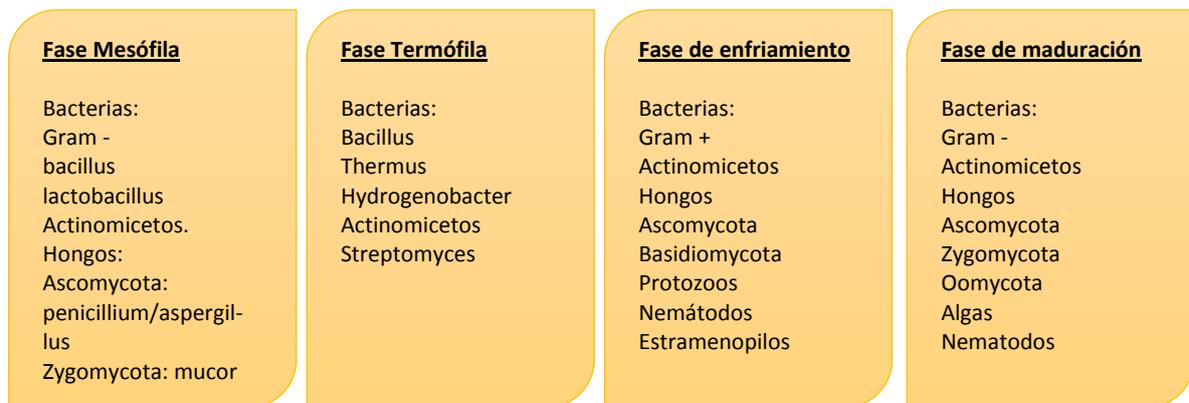


Figura 1.10 Microorganismos presentes en cada etapa del proceso (Moreno y Moral, 2007).

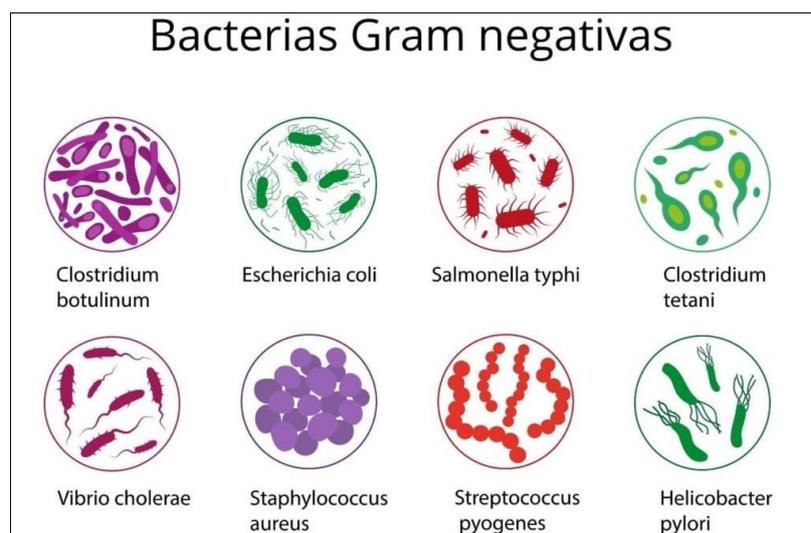


Figura 1.11 Bacterias Gram negativas desarrolladas en el compostaje (Lifeder, 2021).

1.4.12 Modelo cinético y térmico del proceso

Como se ya ha indicado en secciones previas, el proceso de compostaje tiene como característica principal la emisión de energía en forma de calor, sin importar el tipo de sistema que se esté aplicando, y como consecuencia, se obtiene un gradiente de temperatura.

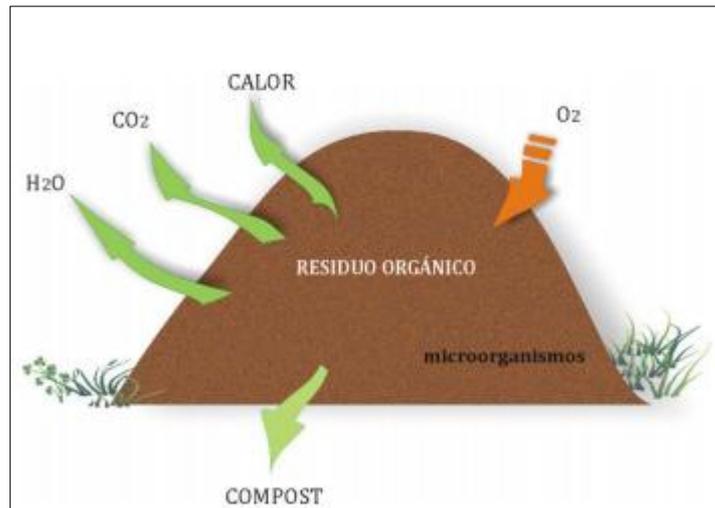


Figura 1.12 Generación de calor o energía en proceso de compostaje (Villar, 2017).

Dicha actividad térmica puede ser descrita o modelada a partir de un sistema creado en el laboratorio que simula una pila de desechos orgánicos bajo los respectivos factores de tratamiento. Esto es lo que establecieron Hogan et al. (1989) en su modelo físico del compostaje, obteniendo resultados satisfactorios en cuanto a similitud con el proceso real, experimento que fue replicado por Behrentz y Giraldo (2000), bajo las mismas bases teóricas, años más tarde.

Se establecen las características del modelo físico de estudio de la siguiente manera:

- La materia se halla dentro de un reactor, simulando una pila de material orgánico.
- El contenido no es mayor a 14 litros.
- Se aplica aireación forzada.
- El proceso es totalmente aeróbico.
- Las variables son: temperatura, humedad, productos generados, concentración de oxígeno y tamaño de partícula

Además, según Behrentz y Giraldo (2000), el proceso experimental posee un factor de escalamiento B que permite corregir la diferencia de dimensiones o proporciones geométricas entre el modelo y el prototipo real (una pila).

Se supone que la humedad no es un parámetro por considerar dentro de aquel factor de corrección, ya que es fácilmente replicable a distintas escalas. De la misma manera la concentración de oxígeno y productos generados no se verían afectados. Pero lo anterior no es verdad en la temperatura.

Se define una relación área-volumen de la siguiente manera:

$$\frac{A}{V} = \frac{T_D}{T_G} \quad (1.13)$$

$A(m)$ → es área

$V(\frac{m^3}{s})$ → es volumen

$T_D(\frac{J}{s})$ → es la tasa de disipación de calor.

y $T_G(\frac{J}{s})$ → es la tasa de generación de calor.

Ya que A/V aumenta a medida que un cuerpo reduce sus dimensiones, y varía al igual que T_D/T_G , dado que la disipación de calor se da a través de una superficie, mientras la generación de calor tiene como fuente a un volumen de materia.

De esta manera se puede entonces definir al factor de escalamiento adimensional B como la relación geométrica:

$$B = \frac{A}{V} = \frac{T_D}{T_G} \quad (1.14)$$

La tasa de generación de calor está definida como:

$$T_G = \emptyset KVS \quad (1.15)$$

$\emptyset(\frac{J}{mg.SVB})$ → es la entalpia de reacción de degradación.

$K(1/s)$ → es la tasa específica de reacción

$V(L)$ → es el volumen.

$S(\frac{mgSVB}{L})$ → es la concentración del sustrato.

Por otro lado, de Çengel (2007) sabemos que la conducción de calor $Q = T_D$ a través de una superficie se la calcula con:

$$Q = Sk(T_1 - T_2) = Sk\Delta T = T_D \quad (1.16)$$

S → es el factor de forma.

$k(\frac{J}{s.cm.^{\circ}C}) \rightarrow$ es conductividad térmica.

$\Delta T(^{\circ}C) \rightarrow$ es diferencia de temperatura.

Las ecuaciones anteriores se combinan para formar el factor de escalamiento de la siguiente manera.

$$B = \frac{T_D}{T_G} = \frac{Sk\Delta T}{\phi KVS} \quad (1.17)$$

Se debe cumplir que:

$$B_{\text{modelo}} = B_{\text{prototipo}} \quad (1.18)$$

$$\frac{S_m k_m \Delta T_m}{\phi_m K_m V_m S_m} = \frac{S_p k_p \Delta T_p}{\phi_p K_p V_p S_p} \quad (1.19)$$

Considerando que la entalpía de reacción, la tasa específica de reacción y la concentración de sustrato no depende de la geometría del modelo o prototipo, tenemos:

$$\frac{S_m k_m \Delta T_m}{V_m} = \frac{S_p k_p \Delta T_p}{V_p} \quad (1.20)$$

Por otro lado, según Çengel (2007) el factor de forma S de conducción de calor, solo depende de la configuración geométrica del sistema, y se define como:

$$S = \frac{A}{L} \quad (1.21)$$

A (m²) \rightarrow es el área por la cual atraviesa el calor,

L (m) \rightarrow es el espesor del cuerpo en dirección de la transferencia.

Para un sistema como el considerado aquí, es decir, un cilindro, el factor de forma está definido.

$$S_{cil} = \frac{2\pi L}{\ln(D_2/D_1)} \quad (1.22)$$

$L(m)$ → es la longitud del cilindro.

$D_2(m)$ → es el diámetro exterior.

$D_1(m)$ → es el diámetro interior.

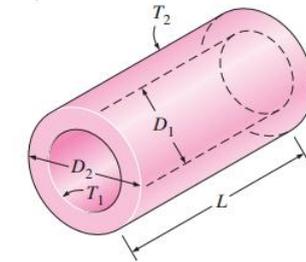


Figura 1.13 Cilindro como sistema (Çengel, 2006).

Se puede utilizar el modelo cinético de Haug (1993) para describir las interacciones energéticas durante el proceso de compost. Haug establece que el modelo representativo de una pila de compost basado en los sólidos volátiles biodegradables (SVB) es el siguiente.

$$\frac{dSVB}{dt} = (Kd_{L20} * SVB_L + Kd_{R20} * SVB_R) * F_1(T) * F_2(ST) * F_3(ST) \quad (1.23)$$

Donde $\frac{dSVB}{dt}$ es la tasa de consumo de SVB.

Kd_{L20} → es la constante de degradación de los SVB lentamente e igual a 0.001/día.

Kd_{R20} → es la constante de degradación de los SVB rápidamente e igual 0.075/día.

$SVB_L(g \text{ o } kg)$ → es la masa de SVB lentamente del sistema.

$SVB_R(g \text{ o } kg)$ → es la masa de SVB rápidamente del sistema.

Mientras que los términos de la forma $F(T)$ depende de otros parámetros involucrados en el proceso de compostaje.

$F_1(T)$ está relacionado a la temperatura y afecta a la tasa de consumo de los sólidos volátiles biodegradables.

$$F_1(T) = [1.0618^{T-20} - 1.39^{T-65}] \quad (1.24)$$

Donde $T(^{\circ}C)$ es temperatura. $F_1(T)$ toma valores entre 0 y 15 y no tiene dimensiones.

$F_2(ST)$ está relacionado con la humedad y solubilización de la materia, importantes para el desarrollo de los microorganismos.

$$F_2(ST) = \frac{1}{e^{[A_2(1-\frac{\%ST}{100})+B_2]} + 1} \quad (1.25)$$

Donde %ST es el porcentaje de los sólidos en el sistema, mientras que A_2 y B_2 toman los valores de -30 y 4, respectivamente.

$F_3(ST)$ no tiene dimensiones y toma valores entre 0 y 1.

Finalmente $F_3(ST)$ está relacionado con el oxígeno necesario para los microorganismos y a la vez con el tamaño de partícula, e indirectamente también se relaciona con la humedad.

$$F_3(ST) = \frac{1}{e^{[A_3(1-\frac{\%ST}{100})+B_3]} + 1} \quad (1.26)$$

Donde %ST es el porcentaje de los sólidos en el sistema, mientras que A_2 y B_2 toman los valores de -19 y 11.5, respectivamente.

$F_3(ST)$ no tiene dimensiones y toma valores entre 0 y 1.

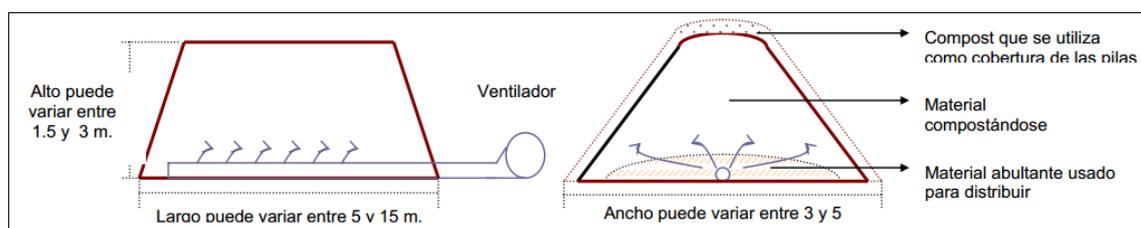


Figura 1.14 Modelo de pila aireada para análisis (Monsalve et al., 2000).

Monsalve et al. (2000) validan el modelo teórico anterior obteniendo resultados muy aproximados, estudiando las variables o parámetros involucrados en el proceso de compostaje de una pila en el campo. A continuación, se muestra la correlación de los datos de la tasa de consumo de oxígeno para ambos escenarios.

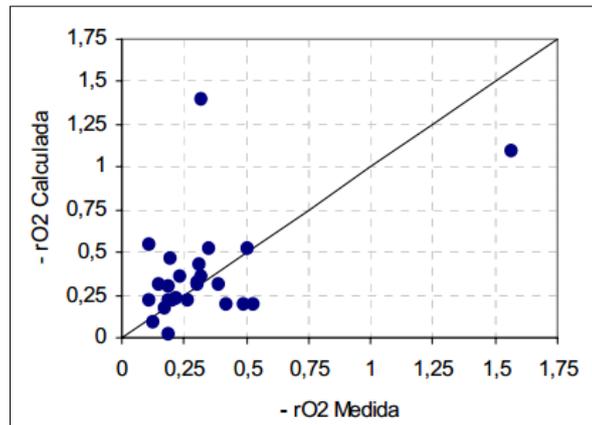


Figura 1.1 Correlación de resultados del modelo teórico y experimental (Monsalve et al., 2000).

Se obtiene un coeficiente de correlación de 0.51.

Por otro lado, Nagasaki (19879), establece un modelo energético para describir los efectos de la interacción de los microorganismos con la materia orgánica. Se plantea la siguiente ecuación en base a un balance de energía.

$$\Delta T = \frac{q_r - q_a - q_w - q_p}{C_{pm} * M + C_{ps} * S + C_{pw} * W} * \Delta t \quad (1.27)$$

- $\Delta T(^{\circ}C)$ → es el cambio de temperatura
- $\Delta t (h)$ → es tiempo.
- $q_r (Kcal/h)$ → es calor producto de la reacción y depende de la tasa de degradación de los sólidos volátiles.
- $q_a(Kcal/h)$ → es el calor eliminado por acción del flujo de aire, y depende de las temperaturas de entrada y salida de este.
- $q_w(Kcal/h)$ → es el calor necesario para evaporar el agua y depende de la entalpía de vaporización, masa de agua presente, y temperatura del sistema.
- $q_p(Kcal/h)$ → es la pérdida de calor por conducción desde el centro de la pila y depende de la temperatura de los alrededores (o ambiente) y la pila (volumen de control), así también como conductividad térmica del material a compostar.
- $C_{pm}(kcal/^{\circ}Ckg)$ → es el calor específico de la madera presente en la pila.
- $C_{ps}(kcal/^{\circ}Ckg)$ → es el calor específico del material biosólido presente en la pila.

- $C_{pw}(\text{kcal}/^\circ\text{Ckg})$ → es el calor específico del agua presente en la pila.
- $M(\text{kg})$ → es la masa de madera presenta en la pila.
- $S(\text{kg})$ → es la masa material biosólido presenta en la pila.
- $W(\text{kg})$ → es la masa de agua presenta en la pila o volumen de control.

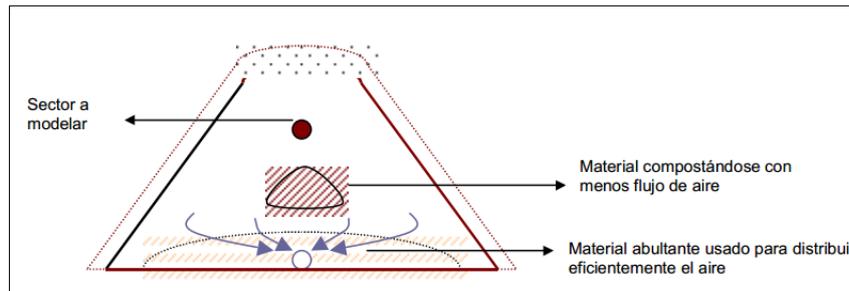


Figura 1.2 Modelo energético del compostaje (Monsalve et al., 2000).

De esta manera, previamente se puede calcular la tasa de variación de los sólidos volátiles biodegradables (SVB) mediante el modelo cinético presentado anteriormente.

1.4.13 Modos de transferencia de calor

Según Holman (2010) la **conducción** es la transferencia de calor a través de una superficie o cuerpo originada por un gradiente de temperatura. Se puede calcular la energía transferida en una dirección de la siguiente manera.

$$\dot{q} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.28)$$

Para la conducción a través de una pared plana puede aplicarse la ley de Fourier.

$$\dot{q} = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{x} \quad (1.29)$$

$\dot{q}(W)$ es la tasa de transferencia de calor, $k(W/mK)$ es la constante de conductividad térmica del material, $A(m^2)$ es el área de transferencia, T_2 y $T_1(^\circ\text{C})$ es la temperatura en el lado caliente y frío respectivamente, $x (m)$ es la longitud por la que se transfiere el calor.

En la **convección** un fluido es el encargado de transferir la energía desde un cuerpo a una tasa que depende de la velocidad del fluido. De esta manera se forma un gradiente de temperatura. Para describir tal interacción se utiliza la ley de enfriamiento de Newton.

$$\dot{q} = hA(T_w - T_\infty) \quad (1.30)$$

$\dot{q}(W)$ es la tasa de transferencia de calor, $h(W/m^2K)$ es la constante de conductividad térmica del material, $A(m^2)$ es el área de transferencia, T_w y $T_\infty(^{\circ}C)$ es la temperatura superficial del cuerpo y ambiente respectivamente.

Estos dos modos de transferencia de calor se generan durante el proceso de compostaje.

1.4.13.1 Convección libre

Este mecanismo de transferencia de calor o masa se da por presencia de gradientes de densidad en un fluido en contacto con la fuente de energía o el cuerpo al que se transfiere calor (Connor, 2019).

Para obtener la transferencia de calor se debe aplicar la ley de enfriamiento de Newton, primeramente, es necesario determinar previamente el coeficiente promedio de convección h .

Incropera (2007) establece correlaciones para el caso una superficie superior horizontal caliente o superficie inferior horizontal fría, estas son.

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}L}{k} = 0.54Ra_L^{1/4}; \quad 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 \quad (1.31)$$

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}L}{k} = 0.15Ra_L^{1/3}; \quad 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11} \quad (1.32)$$

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (1.33)$$

Ra_L es el número de Rayleigh, $g(m/s^2)$ es la aceleración de la gravedad, $\nu(m^2/s)$ es viscosidad cinemática, $\beta(K^{-1})$ es el coeficiente volumétrico de expansión térmica,

$\alpha(m^2/s)$ es la difusividad térmica, T_s y T_∞ es la temperatura superficial y del fluido alrededor respectivamente.

La longitud característica $L(m)$ en este caso está dada por:

$$L = \frac{A_s}{P} \quad (1.34)$$

$A_s (m^2)$ es el área superficial de transferencia y $P(m)$ es el perímetro de dicha superficie.

1.4.13.2 Convección forzada

La convección forzada implica una corriente de un fluido o aire a una velocidad considerable. Dicha corriente es generada mediante algún tipo de sistema mecánico, de ahí el término “forzado”, y es la encargada de extraer calor de un cuerpo. A diferencia de la convección natural, donde la extracción de calor se realiza en un ambiente con un fluido con velocidad casi despreciable. (Çengel, 2007)

De Incropera (2005) se sabe que la convección forzada genera desprendimiento de calor, y se debe calcular esa transferencia de calor por convección mediante la ecuación:

$$q = (T_s - T_\infty) \int_{A_s} h dA \quad (1.35)$$

Donde:

$q (W)$ → es la transferencia de calor por convección

$h (W/m^2K)$ → es el coeficiente local de transferencia de calor por convección.

$A_s(m^2)$ → es el área superficial del cuerpo.

$T_s(K)$ → es la temperatura superficial del cuerpo.

$T_\infty(K)$ → es la temperatura de la corriente de aire o fluido.

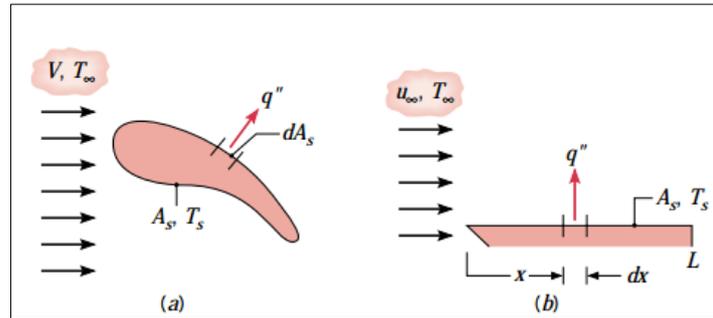


Figura 1.15 Convección forzada en cuerpo irregular (a) y en placa plana (b) (Incropera, 2005).

De lo anterior, un caso especial es el modelamiento de un cuerpo como si fuera una placa plana, de esta manera se puede hallar la transferencia de calor de manera más sencilla con la siguiente ecuación:

$$q = \bar{h}A_s(T_s - T_\infty) \quad (1.36)$$

Donde \bar{h} (W/m²K) es el coeficiente promedio de transferencia de calor por convección.

Un parámetro de importancia en las ecuaciones anteriores es el coeficiente de transferencia de calor por convección h . Este es un parámetro definido como la razón de la transferencia de calor por unidad de superficie y unidad de diferencia de temperatura (Çengel, 2007) y mide la efectividad con la que se da el proceso de transferencia.

Hacemos una notación especial en cuanto a este parámetro:

- $h \rightarrow$ Coeficiente de transferencia local, es decir depende variables como la temperatura y posición.
- $\bar{h} \rightarrow$ Coeficiente de transferencia promedio, su valor es independiente de la temperatura y es el mismo para toda la superficie.

Incropera (2005) indica que para el caso de flujo externo sobre una placa plana el coeficiente de convección externa promedio o local se relaciona con el número de Nusselt Nu de la siguiente manera:

$$Nu_x = \frac{h_x L}{k} \quad \overline{Nu} = \frac{\overline{h} L}{k} \quad (1.37)$$

h_x, h (W/m²K) → Coeficiente de convección local y promedio, respectivamente.

Nu_x, \overline{Nu} → Número de Nusselt local y promedio, respectivamente. Adimensional.

k (W/mK) → Conductividad térmica del fluido.

L (m) → Longitud de la placa.

Al mismo tiempo, Nu se relaciona con el número de Reynolds Re y el número de Prandtl Pr definidos como:

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad (1.38)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (1.39)$$

v (m/s) → Velocidad del fluido.

L (m) → Longitud característica.

ν (m²/s) → Viscosidad cinemática.

μ (kg/ms) → Viscosidad dinámica.

c_p (J/kg·K) → Capacidad calorífica.

k (W/mK) → Conductividad térmica del fluido.

Ambos números son adimensionales, y el número de Prandtl generalmente se lo encuentra tabulado.

Para el caso de una placa plana sometida a un flujo externo paralelo, puede hallarse el número de Nusselt mediante las siguientes correlaciones.

Flujo laminar ($Re \leq 5 \times 10^5$):

$$\overline{Nu} = 0.664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad ; \quad Pr \geq 0.6 \quad (1.40)$$

$$Nu_x = 0.565 (Re_x Pr)^{1/2} \quad ; \quad Pr \leq 0.05, Re_x Pr > 100 \quad (1.41)$$

Flujo turbulento ($Re > 5 \times 10^5$):

$$Nu_x = 0.0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3} \quad ; \quad 0.6 < Pr < 0.6 \quad (1.42)$$

Donde $\overline{Nu} = 2Nu_x$, y Re_x hace referencia al número de Reynolds calculado hasta cierta posición x de la placa.

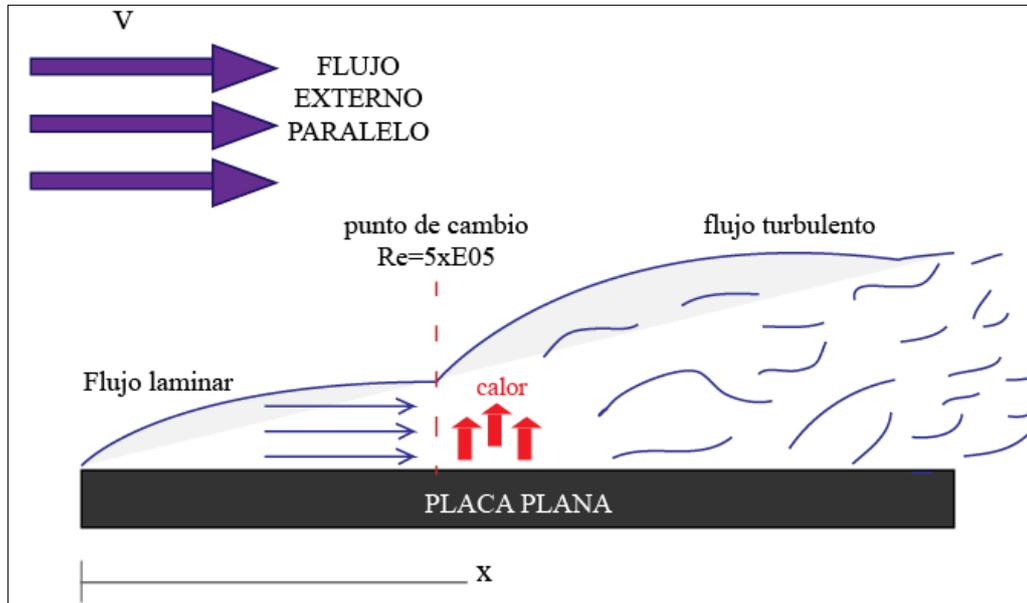


Figura 1.16 Flujo paralelo en placa plana (Elaboración propia).

Por otro lado, un cuerpo con geometría diferente a una placa también puede estar sometido a un flujo cruzado, es decir, un flujo en dirección transversal al cuerpo. Un caso de este tipo es un elemento cilíndrico que pierde calor a medida que un fluido hace contacto con su superficie. Se puede calcular el número de Nusselt mediante la correlación de Hilpert (1933).

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k} = CRe_D^m Pr^{1/3} \quad (1.43)$$

$D(m)$ → Diámetro del cilindro sólido.

Re_D → Número de Reynolds referente a un diámetro e igual $Re = vD/v$.

C y m → Son constantes que se obtienen según el número de Reynolds en la siguiente tabla.

Tabla 1.3 Constantes para el cálculo del número Nu (Incropera, 2005).

Número Re_D	Constante C	Constante m
0.4 – 4	0.989	0.330
4 – 40	0.911	0.385
40 – 4000	0.683	0.466
4000 – 40000	0.193	0.618
40000 – 400000	0.027	0.805

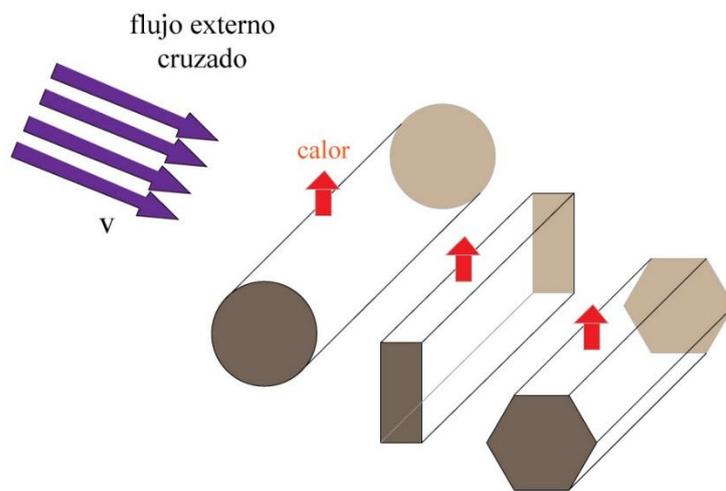
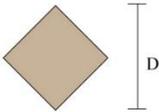
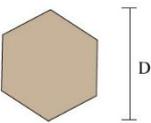
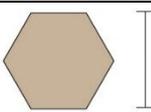
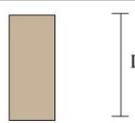


Figura 1.17 Flujo cruzado en sólidos (Elaboración propia).

La ecuación anterior no solo se aplica para cuerpos de sección circular, también puede ser utilizada en cuerpos con una sección regular fija como por ejemplo cuadrada, triangular, entre otras. De la siguiente tabla se puede obtener los parámetros necesarios para usar en la ecuación.

Tabla 1.4 Constantes para cálculo de Nu en cuerpos de sección no circular (Incropera, 2005).

Geometría	Número Re_D	Constante C	Constante m
	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.246	0.588
	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.102	0.675
	$5 \times 10^3 - 1.95 \times 10^4$	0.160	0.638
	$1.95 \times 10^4 - 10^5$	0.0385	0.782
	$5 \times 10^3 - 10^5$	0.153	0.638
	$4 \times 10^3 - 1.5 \times 10^4$	0.228	0.731

1.4.14 Balance de energía

La primera ley de la termodinámica establece que el cambio neto en la energía de un sistema es igual a la diferencia entre la energía entra y sale del mismo (Çengel, 2006). Matemáticamente:

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta E_{sis} \quad (1.44)$$

$E_{ent} (J)$ es la energía que entra al sistema, $E_{sal} (J)$ es la energía que sale del sistema y $\Delta E_{sis} (J)$ es el cambio en la energía del sistema.

La ecuación anterior también puede ser expresada como:

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} = \Delta \dot{E}_{sis}$$

Donde los términos \dot{E} representan energía por unidad de tiempo (J/s).

Para un sistema cerrado estacionario:

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} = \Delta \dot{E}_{sis} = \Delta U = mC_v \Delta T \quad (1.45)$$

$\Delta U (J)$ es el cambio de la energía interna del sistema, $m(kg)$ es la masa del sistema, $C_v(J/kg^\circ C)$ es el calor específico a volumen constante, y $\Delta T(^\circ C)$ es el cambio de temperatura del sistema.

Por otro lado, el calor necesario para causar un aumento temperatura en un cuerpo o masa está dado por:

$$q = \int_{T_1}^{T_2} mcdT \approx mc\Delta T \quad (1.46)$$

$c(J/kg^\circ C)$ es el calor específico a volumen o temperatura constantes según el proceso.

De acuerdo con (Bolívar, 2020) la energía requerida (o liberada) para fundir una unidad de masa se conoce como calor latente de fusión L_f , mientras que para vaporizarla es el calor latente de evaporación L_v .

$$q_f = mL_f \quad (1.47)$$

$$q_v = mL_v \quad (1.48)$$

q_f o $q_v(J)$ es el calor para fusionar o vaporizar una masa, L_f o $L_v(kJ/kg)$ es calor latente de fusión o vaporización y $m(kg)$ es la masa que cambia de estado.

1.4.15 Esfuerzos en estructuras o bases metálicas

Una estructura es un conjunto de elementos interconectados que se encargan de soportar las fuerzas que actúan sobre ellos. Estas fuerzas o cargas pueden ser fijas, es decir, sus valores no cambian sobre la estructura, también existen cargas variables cuyos valores cambian con el tiempo.

Un esfuerzo es la fuerza que logra soportar un elemento sobre una determinada área transversal. Estos esfuerzos se dividen en cinco categorías diferentes:

- Esfuerzo de tracción: es llamada esfuerzo de tracción o de tensión, cuando los elementos de la estructura son sometidos a dos fuerzas en sentido opuesto, provocando una deformación de alargamiento en el material.
- Esfuerzo de compresión: reconocido así debido a dos cargas aplicadas en un elemento estructural en sentido opuesto que tiende a comprimir el material.
- Esfuerzo de flexión: un esfuerzo es de flexión cuando las cargas que actúan sobre el elemento tienden a generar una curva en el material.
- Esfuerzo de torsión: cuando la estructura es sometida a carga opuesta, generando que el material se retuerza, este efecto físico es llamado esfuerzo de torsión.
- Esfuerzo de corte: es cuando dos cargas aplicadas sobre la estructura provocan en él un rasgado o corte del material.

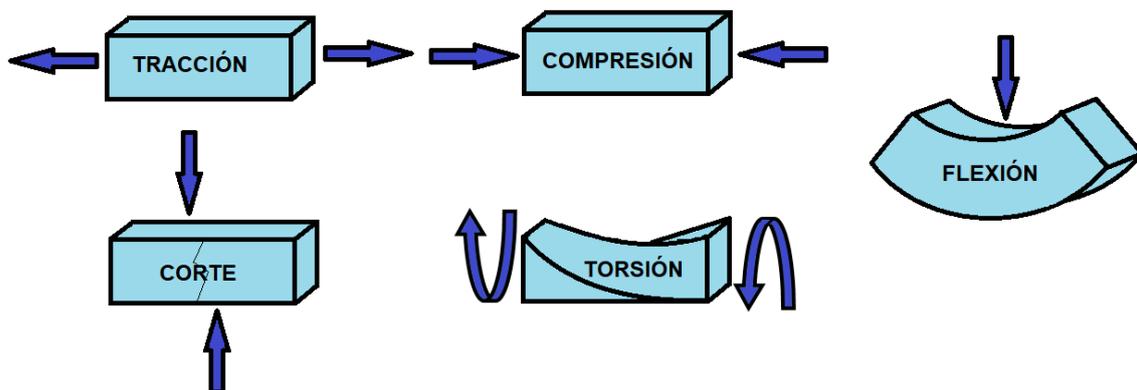


Figura 1.18 Tipos de esfuerzos (Elaboración propia).

Uno de los esfuerzos normales más sencillos de realizar el cálculo es cuando se trata de cargas axiales, fuerzas opuestas aplicadas a lo largo del eje del elemento cuya aplicación atraviesa el centroide del mismo (Norton, 2011). Ya sea el esfuerzo de tensión o de compresión σ se la puede calcular de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1.49)$$

Donde P es la carga que se aplica sobre el eslabón a analizar y A es el área de la sección transversal del elemento. Debido a estos tipos de esfuerzos, la longitud del

elemento se verá afectado por un ligero cambio en su dimensión, a este cambio se lo denomina como Δs y su cálculo será:

$$\Delta s = \frac{Pl}{AE} \quad (1.50)$$

Donde l es la longitud del elemento la cual está sometida a la carga P y E es el módulo de Young del material.

Cuando se trata de esfuerzo por compresión aplicado en columnas cortas, estos llegan a sufrir una falla por compresión, cuyo esfuerzo se lo calcula con la ecuación 1.49. En cambio, si la columna es de una longitud mediana o grande, este puede verse afectado por una falla de pandeo. Para determinar si una columna puede sufrir falla de compresión o pandeo, se utiliza un factor S_r llamado razón de esbeltez.

$$S_r = \frac{l}{k} \quad (1.51)$$

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (1.52)$$

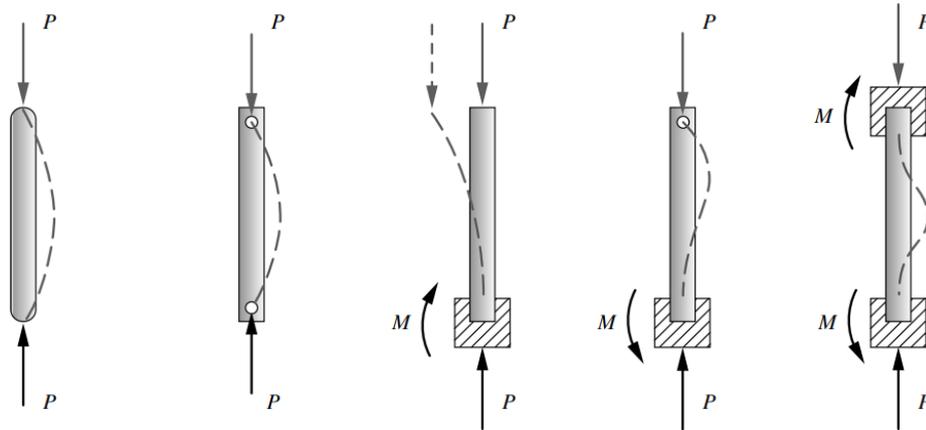
Donde:

k : radio de giro.

I : segundo momento de área de la sección transversal

Si la razón de esbeltez es menor a 10, se puede concluir que la columna es corta y se compara su resistencia a la fluencia del material con el esfuerzo de compresión calculado con la ecuación 1.49.

Por lo contrario, si se trata de una columna con una longitud grande, la razón de esbeltez S_r va a estar regida dependiendo de las condiciones de los extremos que se encuentre la columna.



(a) Redondeada-redondeada (b) Articulada-articulada (c) Empotrada-libre (d) Empotrada-articulada (e) Empotrada-empotrada

Figura 1.19 Condiciones de extremos de la columna (Norton, 2011).

$$S_r = \frac{l_{ef}}{k} \quad (1.53)$$

De esta manera se obtiene la ecuación 1.53 para el cálculo de la razón, que dependiendo del caso en el cual se encuentre la columna, se seleccionará de la figura 1.21 una longitud efectiva l_{ef} recomendada por la AISC (American Institute of Steel Construction).

Condiciones de extremo	Valores teóricos	Recomendados por la AISC*	Valores conservadores
Redondeada-redondeada	$l_{ef} = l$	$l_{ef} = l$	$l_{ef} = l$
Articulada-articulada	$l_{ef} = l$	$l_{ef} = l$	$l_{ef} = l$
Empotrada-libre	$l_{ef} = 2l$	$l_{ef} = 2.1l$	$l_{ef} = 2.4l$
Empotrada-articulada	$l_{ef} = 0.707l$	$l_{ef} = 0.80l$	$l_{ef} = l$
Empotrada-empotrada	$l_{ef} = 0.5l$	$l_{ef} = 0.65l$	$l_{ef} = l$

Figura 1.20 Factores de longitud efectiva de la columna (Norton, 2011).

Una vez determinado estos valores, se procede a realizar el valor de la carga crítica P_{cr} soportada por columnas grandes

$$P_{cr} = A \left[S_y - \frac{1}{E} \left(\frac{S_y S_r}{2\pi} \right)^2 \right] \quad (1.54)$$

Donde:

E : es el módulo de elasticidad.

S_y : esfuerzo de fluencia a la compresión del material

Finalmente se calcula la carga permisible requerida para soportar la columna sin que llegue a fallar por pandeo, dándole un factor de seguridad SF según los criterios que se desee implementar en la estructura.

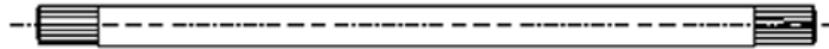
$$P_{permisible} = \frac{P_{cr}}{SF} \quad (1.55)$$

En caso de que la carga permisible sea menor a la carga que se ejercerá sobre la columna, se recomienda hacer un cambio en la forma del área de la columna, o aumentando el grosor de las paredes de la misma.

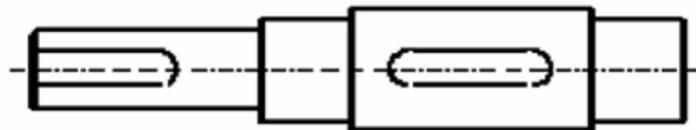
1.4.16 Dimensionamiento y esfuerzos en el diseño de ejes

Como sabemos, las flechas, ejes, o árboles son aquellos elementos rotatorios que se montan en las maquinarias con el objetivo de transmitir ya sea movimiento, potencia o par de torsión, todo dependiendo de la forma con que este se diseñe. Los ejes son comúnmente utilizados para soportar ruedas giratorias, poleas y demás elementos con características similares (Budynas & Nisbett, 2012).

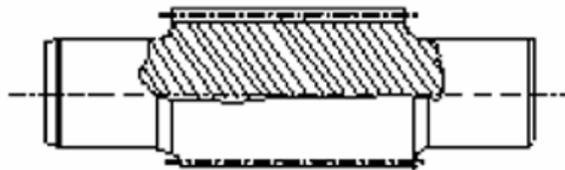
La diferencia de los elementos rotatorios conocido como árboles con los llamados ejes, es que los árboles tienen la capacidad de transmitir momentos torsores, debido a los elementos que se le añade como poleas, engranes, cojinetes, aletas, entre otros. Por la forma del eje geométrico del árbol se distinguen los árboles rectos y los árboles acodados (cigüeñales) como se observa en la figura 1.22 (Gonzalez Rey, 2006).



Árbol de sección constante



Árbol escalonado



Árbol con talladuras especiales

Figura 1.21 Distintos tipos de árboles (González Rey, 2006).

Para este caso de ejes o árboles, se toma como dato importante la rigidez propia del material, la cual va tener valores constantes dependiendo de la propiedad o el tratamiento de la materia con la que se diseña el elemento. A esta rigidez se la va a representar como módulo de elasticidad. Los aceros ANSI 1020-150 como el acero laminado en caliente, estirado en frío o de bajo carbono, son usados con mayor frecuencia para la creación de ejes (Budynas & Nisbett, 2012).

El límite de la resistencia a la fatiga de un elemento mecánico rotativo está dado por varios factores como: el material, la manufactura, el entorno y el diseño. La ecuación de Marín permite realizar un cálculo para cada uno de los factores que influyen en el límite de la resistencia a la fatiga. Esta ecuación está determinada de la siguiente forma:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e' \quad (1.56)$$

A continuación, se detalla cada uno de sus significados y las ecuaciones para calcular sus respectivos valores.

k_a : factor de superficie

$$k_a = aS_{ut}^b \quad (1.57)$$

Donde:

S_{ut} : es la resistencia última del material.

a y b cuyos valores se hayan en la siguiente tabla

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} kpsi	S_{ut} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Figura 1.22 Parámetros en el factor de la condición superficial de Marín (Budynas & Nisbett, 2012).

k_b : factor de tamaño

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ in} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ in} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (1.58)$$

Cuando se trata de una carga axial, el valor del factor de tamaño es $k_b = 1$

k_c : factor de carga

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión} \end{cases} \quad (1.59)$$

k_d : factor de temperatura

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (1.60)$$

Donde S_T es la resistencia a la tensión a la temperatura de operación y S_{RT} es la resistencia a la tensión a la temperatura ambiente, cuyo valor de la relación S_T/S_{RT} se puede observar en la figura 1.24

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

Figura 1.23 Efecto de la temperatura en la resistencia del acero (Budynas & Nisbett, 2012).

k_e : factor de confiabilidad

$$k_e = 1 - 0.08z_a \quad (1.61)$$

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Figura 1.24 Factor de confiabilidad (Budynas & Nisbett, 2012).

k_f : factor de efectos varios

Este tipo de factor se lo puede simplificar para casos en que el elemento no posea alguna muesca que vaya a provocar alguna sensibilidad en el material, en dicho momento el valor que toma el factor $k_f = 1$

S_e' : límite de resistencia a la fatiga

$$S_e' = \begin{cases} 0.5 S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (1.62)$$

Los esfuerzos de flexión, torsión o axiales pueden estar presentes tanto medios como alternantes. Para el análisis, es suficientemente simple combinar los diferentes tipos de esfuerzos en esfuerzos de Von Mises alternantes y medios.

$$\sigma_a = k_f \frac{M_a C}{I} \quad \sigma_m = k_f \frac{M_m C}{I} \quad (1.63)$$

$$\tau_a = k_{fs} \frac{T_a C}{J} \quad \tau_m = k_{fs} \frac{T_m C}{J} \quad (1.64)$$

Donde:

M_m y M_a : son los momentos flexionantes medio y alternante,

T_m y T_a : son los pares de torsión medio y alternante y

k_f y k_{fs} : son los factores de concentración del esfuerzo por fatiga de flexión y torsión.

En el caso que el eje posea una sección transversal sólida, entonces se puede realizar los reemplazos de c , I y J por términos geométricos del elemento, dejando las ecuaciones expresadas en base a su diámetro, dando como resultado lo siguiente:

$$\sigma_a = k_f \frac{32M_a}{\pi d^3} \quad \sigma_m = k_f \frac{32M_m}{\pi d^3} \quad (1.65)$$

$$\tau_a = k_{fs} \frac{16T_a}{\pi d^3} \quad \tau_m = k_{fs} \frac{16T_m}{\pi d^3} \quad (1.66)$$

En base a la teoría de falla por energía de distorsión, combinado con los esfuerzos de Von Mises para ejes giratorios y redondos sólidos, obtendremos la siguiente ecuación de criterio de falla por fatiga de la línea Goodman

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(k_f M_a)^2 + 3(k_{fs} T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(k_f M_m)^2 + 3(k_{fs} T_m)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (1.67)$$

Para casos de diseños se propone también resolver la ecuación para determinar el diámetro, despejando de la ecuación 1.68

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(k_f M_a)^2 + 3(k_{fs} T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(k_f M_m)^2 + 3(k_{fs} T_m)^2 \right]^{1/2} \right\} \right)^{1/3} \quad (1.68)$$

Donde:

S_e : es la resistencia a la fatiga y

S_{ut} : es la resistencia última del material.

n : factor de seguridad contra la fatiga

Los criterios de Gerber y Goodman modificado no protegen contra la fluencia, por lo que requieren una verificación adicional de este aspecto. Para tal propósito, se calcula el esfuerzo máximo de Von Mises.

$$\sigma'_{m\acute{a}x} = [(\sigma_m + \sigma_a)^2 + 3(\tau_m + \tau_a)^2]^{1/2}$$

$$\sigma'_{m\acute{a}x} = \left[\left(\frac{32k_f(M_m + M_a)}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16k_{fs}(T_m + T_a)}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.69)$$

Se puede simplificar las ecuaciones anteriormente mostradas, siempre y cuando en el elemento rotatorio los valores de los esfuerzos de flexión y de torsión sean constante, en cuyo caso M_m y T_a tendrán un valor de 0. De esta manera se obtiene las siguientes ecuaciones simplificadas.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(k_f M_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [3(k_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\} \quad (1.70)$$

$$\sigma'_{m\acute{a}x} = \left[\left(\frac{32k_f(M_a)}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16k_{fs}(T_m)}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.71)$$

Al final se compara este esfuerzo máximo con la resistencia a la fluencia, para la verificación del factor de seguridad contra la fluencia del material n_y

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma'_{m\acute{a}x}} \quad (1.72)$$

1.4.17 Potencia y torque en sistemas rotatorios

La mayoría de las personas relacionan la potencia ejercida por un motor con el torque o par motor; sin embargo, estos dos conceptos son muy distintos. El torque o también conocido como par motor, es representado por la fuerza que se ejerce en un punto del cuerpo ubicado a una distancia respectiva del eje. Por lo contrario, la potencia es la cantidad de trabajo realizado por el torque en un determinado tiempo y dependiendo del sistema de medición, se la representa en vatios (W) o caballo de fuerza (HP, por su nombre en inglés “horsepower”) (Granja Borja, 2019).

$$P_{ot} = T\omega \quad (1.73)$$

Donde P es la potencia requerida por el motor, T es el torque o par motor y ω es la velocidad angular a la que gira el eje del motor representada como rad/s, aunque también es frecuente encontrar la potencia en función de n que significa revoluciones por minuto a la que gira el motor, en tal caso la ecuación se la expresa de la siguiente manera.

$$P_{ot} = T \left(\frac{n}{\frac{60}{2\pi}} \right) \quad (1.74)$$

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este proyecto se comenzó describiendo cada uno de los requerimientos necesarios para el diseño o sistema. Posteriormente se evaluó varias alternativas que pretendían dar solución al problema planteado al mismo tiempo que cumplían los requerimientos de diseño. Así quedó establecido un sistema con particularidades o características apropiadas, por lo cual el siguiente paso fue desarrollar un boceto del mismo o diseño de forma, con la mayoría de sus elementos o dimensiones que funcionara como guía para el desarrollo del proyecto.

Se analizó físicamente el proceso de compostaje para poder modelar cada una de sus características y etapas en base a la teoría ya existente considerando principios como transferencia de calor, movimiento mecánico, energía y potencia, resistencia de materiales, entre otros. De esta manera se diseñó cada uno de los componentes o subsistemas considerando también las respectivas normas o estándares establecidos ya sea a nivel local o por organismos internacionales muy reconocidos en las respectivas áreas de la ingeniería. Así mismo se hizo necesaria una evaluación computacional del sistema en la cual se determinó la resistencia de los elementos principales y su correcto desempeño durante la operación.

Finalmente, de acuerdo con los cálculos se seleccionó los equipos necesarios indispensables para el sistema de potencia, aireación, así también como los materiales de construcción. Todo esto desembocó en la generación de los respectivos planos ingenieriles de los componentes con las dimensiones y materiales preestablecidos.

2.1 Descripción del problema

En Ecuador se generan más desechos orgánicos que otros tipos de desechos, que no son aprovechados en su totalidad, la mayoría de estos desperdicios son enterrados en botaderos o rellenos sanitarios, y apenas un pequeño porcentaje es reciclado, generando de esta manera daños al ambiente. Por tal motivo, se hace necesario un sistema que permita la transformación de los desechos orgánicos de manera eficiente

para recuperar su valor bioquímico mediante técnicas sustentables como el compostaje, y así producir un abono de calidad, capaz de ser aplicado por cualquier familia ecuatoriana en huertos domésticos, de manera económica y disminuyendo el impacto ambiental, dado que el simple hecho de reciclar no asegura el aprovechamiento de los residuos orgánicos.

2.2 Especificaciones de diseño

1. Dimensiones considerables, es decir, un tamaño mediano.
2. Bajo costo de construcción y/o adquisición.
3. Mínimo número de componentes.
4. Capacidad de 42 kg.
5. Sistema de aireación para oxigenar la materia en tiempos sincronizados.
6. Sistema térmico controlado que permita mantener una temperatura y humedad adecuada en el interior para mejorar el proceso de descomposición.
7. Altura máxima de aproximadamente 1- 1.30 m
8. Dotación de potencia mediante un motor eléctrico.
9. Desarmable en sus componentes principales para transporte.
10. Sistema portátil.
11. Resistente a factores climáticos.
12. Base o soporte para manipulación del equipo a cierta altura.
13. Alta seguridad en la operación.
14. Movimiento giratorio para revolvimiento o mezcla constante de la materia.

2.3 Análisis de soluciones

En primer lugar, se comienza listando una serie de características técnicas que son imprescindibles en el diseño final. Estas tendrán tres alternativas de solución que servirán como opciones para formar varios diseños del sistema, que al final también serán nuevamente evaluados en base los criterios o especificaciones de diseño.

Se considera lo siguiente:

Tabla 2.1 Alternativas de solución para distintas características técnicas (elaboración propia).

Características técnicas	alternativa 1	alternativa 2	alternativa 3
Sistema de compostaje	Abierto con volteo	Abierto dinámico	Abierto con aireación
Tipo de contenedor	Tanque cilíndrico	Tanque cilíndrico	Sección hexagonal
Orientación de contenedor	Horizontal	Vertical	Inclinado
Elemento de rotación	Tanque rotatorio	Eje con aspas	Eje y tanque
Base o soporte	Soportes en extremos en forma de triángulo	Base metálica circular de 4 patas	2 triangular más 4 patas
Sistema de potencia	Mediante un motor eléctrico	Mediante un motor eléctrico	Motor de combustión
Sistema de aireación	Mediante ventilador	Pequeños orificios en el tanque	Compresor de aire
Forma de Paletas	No incluye eje rotatorio, ni paletas	Aspa helicoidal	Paletas con cierto ángulo
Medio para aumentar temperatura	Resistencias eléctricas cerca del ventilador	Resistencias eléctricas alrededor del tanque	vapor
Medio para agregar humedad	Bomba de agua pequeña y canales agujereados	De forma manual por la compuerta de entrada	Bomba de agua
Sistema de control	Mediante tarjeta Arduino.	Switch (on/off) con Sensor de temperatura	Placa de control Porton

2.3.1 Propuestas de diseño

A partir de las alternativas tabuladas anteriormente se realizan combinaciones de alternativas para crear el sistema completo y así obtener varias configuraciones de diseño. A continuación, se describen.

Diseño 1: Un sistema basado en un tanque cilíndrico en disposición horizontal en el cual se halla la materia orgánica, dotado por un sistema de potencia mediante un motor eléctrico ubicado en un extremo del cilindro. El tanque gira constantemente provocando el volteo de la materia orgánica y a su vez un ventilador controlado, ubicado en uno de los extremos del tanque, genera el suministro de oxígeno necesario para el proceso de descomposición. Todo el conjunto se halla montado sobre una base metálica triangular apoyado en los extremos, esto permite que el tanque se encuentre a cierta altura con respecto al piso y se pueda hacer caer el abono sólido producido sobre un recipiente abriendo una compuerta en el tanque una vez que ha finalizado el proceso de compostaje.

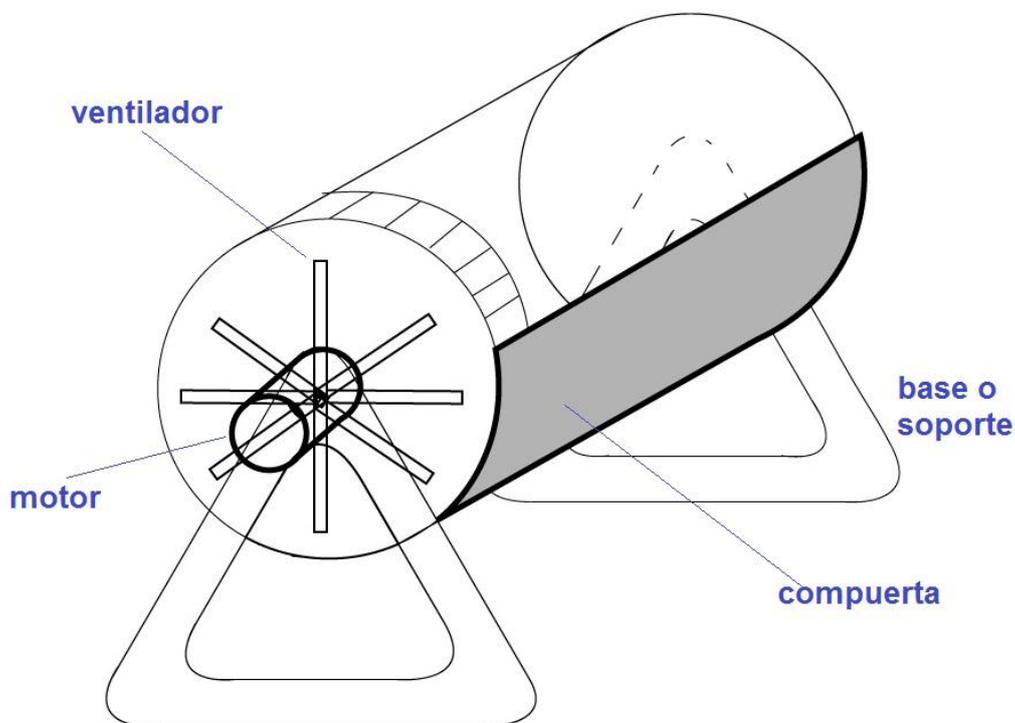


Figura 2.1 Propuesta de diseño n°1 (elaboración propia).

Diseño 2: Para este mecanismo de compostaje, el diseño se basó en un tanque de forma cilíndrica posicionado de manera vertical, la cual posee un sistema de ventilación colocado en la parte superior del tanque para forzar el ingreso de oxígeno a la materia, dicho ventilador está ensamblado a la compuerta que hace la función de la entrada de los desechos orgánicos a descomponer. En el interior del tanque consta de un eje con aspas que gira con la ayuda de la fuerza rotatoria del motor, el giro constante de las aspas permite que la masa no se compacte, haya una mejor distribución del oxígeno y facilite la extracción del compost. El motor se encuentra localizado en la parte inferior, conectado directamente al eje con aspas y soportado sobre la misma base metálica del tanque. Al finalizar todo el proceso de compostaje, se retira el eje con aspas por la parte superior y se procede a extraer el compost por la compuerta lateral del compostador.

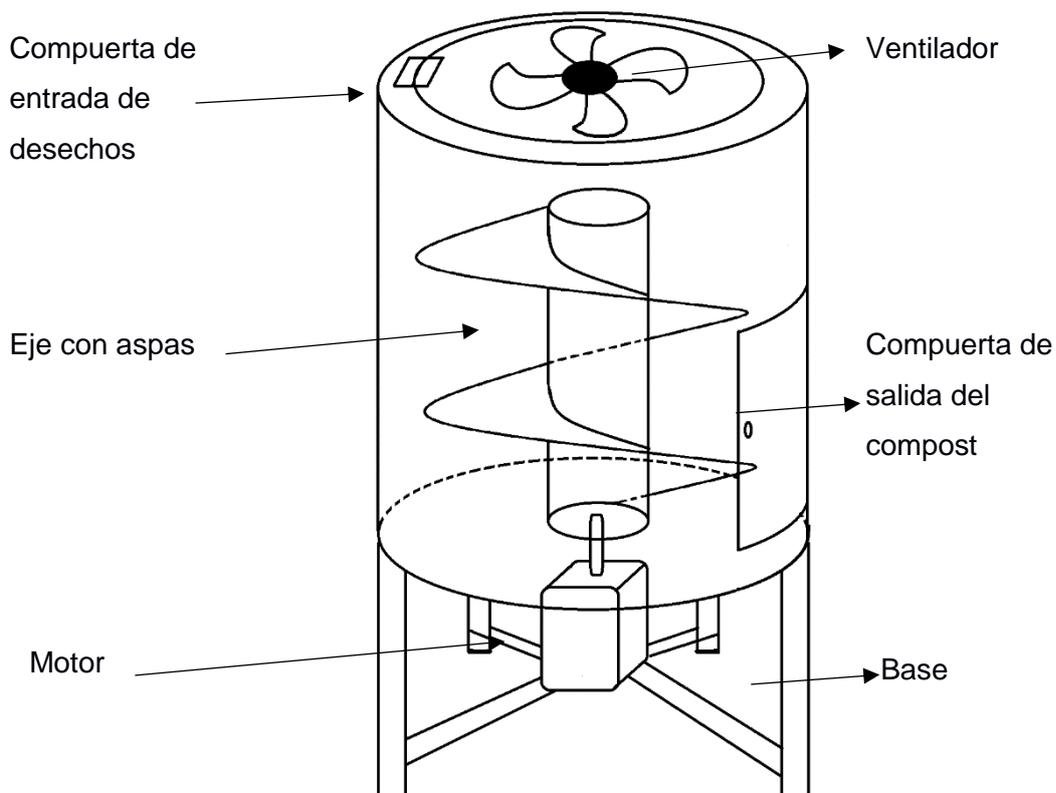


Figura 2.2 Propuesta de diseño n°2 (elaboración propia).

Diseño 3: Se tiene un sistema constituido principalmente por un contenedor con forma transversal hexagonal, en el cual se ha generado una compuerta en uno de sus lados (superficie gris). El tanque hexagonal puede rotar (manualmente) o mantenerse estático durante el proceso, ya que un eje con paletas curvas en su interior provocara el volteo de la materia. Mediante un ventilador acoplado en los extremos se genera la aireación. Todo el sistema es alimentado por un motor eléctrico y controlado por una tarjeta Arduino, especialmente la temperatura y humedad en el interior. El conjunto se halla soportado en una base triangular en sus extremos y al mismo tiempo cuatro columnas, montadas en ruedas acoplables para poder transportar el compostador mecánico.

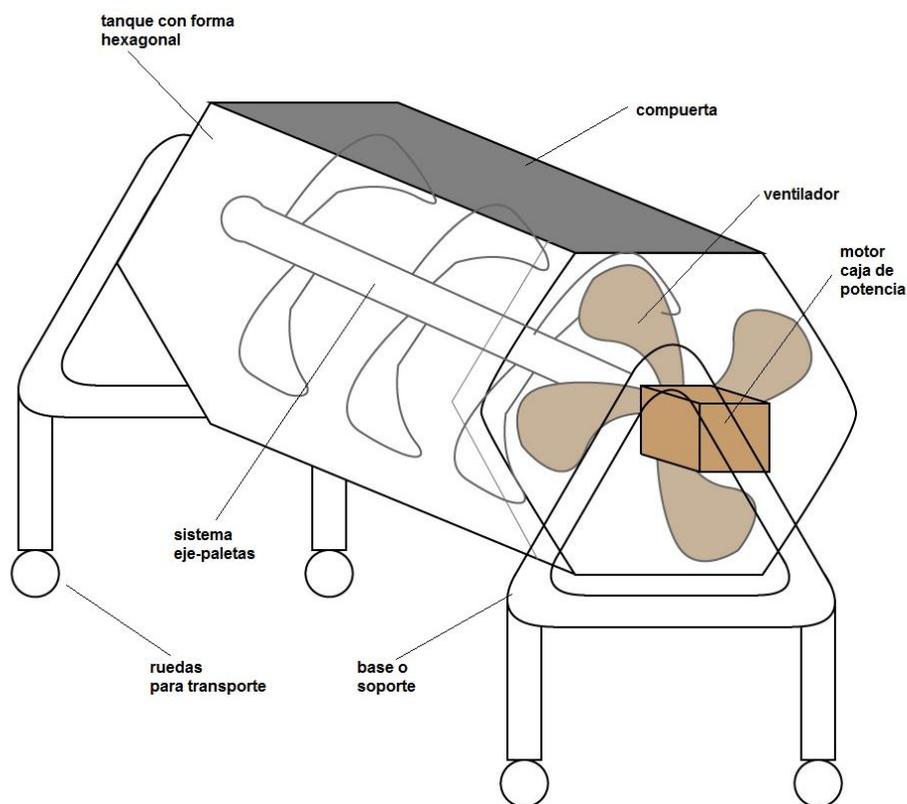


Figura 2.3 Propuesta de diseño n°3 (elaboración propia).

2.3.2 Matriz de decisión

Se obtuvo tres diseños potenciales con varias configuraciones, los mismos que deberán ser evaluados en base a criterios primordiales, estos son, los requerimientos o

especificaciones de diseño preestablecidos. Esto se consigue planteando una matriz de decisión e incorporando ponderaciones, de esta manera se realiza un análisis cuantitativo con la finalidad de tomar una decisión. A continuación, se describe la matriz junto con los respectivos criterios y calificación de cada opción de diseño planteado.

Tabla 2.2 Matriz de decisión (elaboración propia).

Criterios	Pond. G	DISEÑO 1		DISEÑO 2		DISEÑO 3	
		Calf.	Pond.	Calf.	Pond.	Calf.	Pond.
Fácil de transportar	5	4	20	4	20	4	20
Seguro de operar	7	4	28	4	28	5	35
Menor número de componentes	5	5	25	4	20	3	15
Eficiencia	10	3	30	3	30	5	50
Menor consumo de energía	8	3	24	3	24	4	32
Resistente a impactos	7	2	14	3	21	4	28
Facilidad de operar	7	4	28	4	28	5	35
Bajo costo de adquisición/construcción	7	5	35	4	28	4	28
Necesidad de poco esfuerzo humano	5	2	10	4	20	5	25
Mayor estabilidad	7	3	21	3	21	5	35
Desarmable en sus componentes principales	6	4	24	4	24	4	24
Portátil	9	5	45	3	27	4	36
Mejor volteo de materia orgánica	5	3	15	4	20	4	20
Amigable con el ambiente	4	4	16	4	16	4	16
Resistente a factores climáticos.	4	2	8	3	12	4	16
Fácil mantenimiento	4	5	20	4	16	4	16
Puntuación total:	100	363		355		431	
RANKING:		2		3		1	

Tabla 2.3 Escala de calificación (elaboración propia).

Escala de calificación	1	2	3	4	5
	Bajo		Medio		alto
Pond. G → ponderación global		Pond. → ponderación individual		Calf. → calificación	

2.3.3 Selección de alternativa

El análisis cuantitativo obtenido de la matriz de decisión nos lleva a descartar los dos primeros diseños para así optar por la realización de la tercera opción, es decir, el diseño 3, el cual ha obtenido el mayor puntaje calificativo, cumpliendo a cabalidad cada uno de los criterios o requerimientos de diseño necesitados e imprescindibles.

Tabla 2.4 Resultados de la matriz de decisión (elaboración propia).

Puntuación total:	100	363	355	431
RANKING:		2	3	1

2.4 Diseño conceptual

Se propone como diseño preliminar el modelo obtenido en la tercera configuración en la sección de propuestas de diseño. Por lo tanto, se tomará como guía para el cálculo de los respectivos parámetros y componentes.

Tal como se aprecia en la imagen, el sistema estaría constituido principalmente por un contenedor con forma transversal hexagonal, en el cual se ha generado una compuerta en uno de sus lados (superficie gris). El tanque hexagonal puede rotar (manualmente) o mantenerse estático durante el proceso, ya que un eje con paletas curvas en su interior provocará el volteo de la materia. Mediante un ventilador acoplado en los extremos se genera la aireación. Todo el sistema es alimentado por un motor eléctrico y controlado por una tarjeta Arduino, especialmente la temperatura y humedad en el interior. El conjunto se halla soportado en una base triangular en sus extremos y al mismo tiempo cuatro columnas, montadas en ruedas acoplables para poder transportar el compostador mecánico.

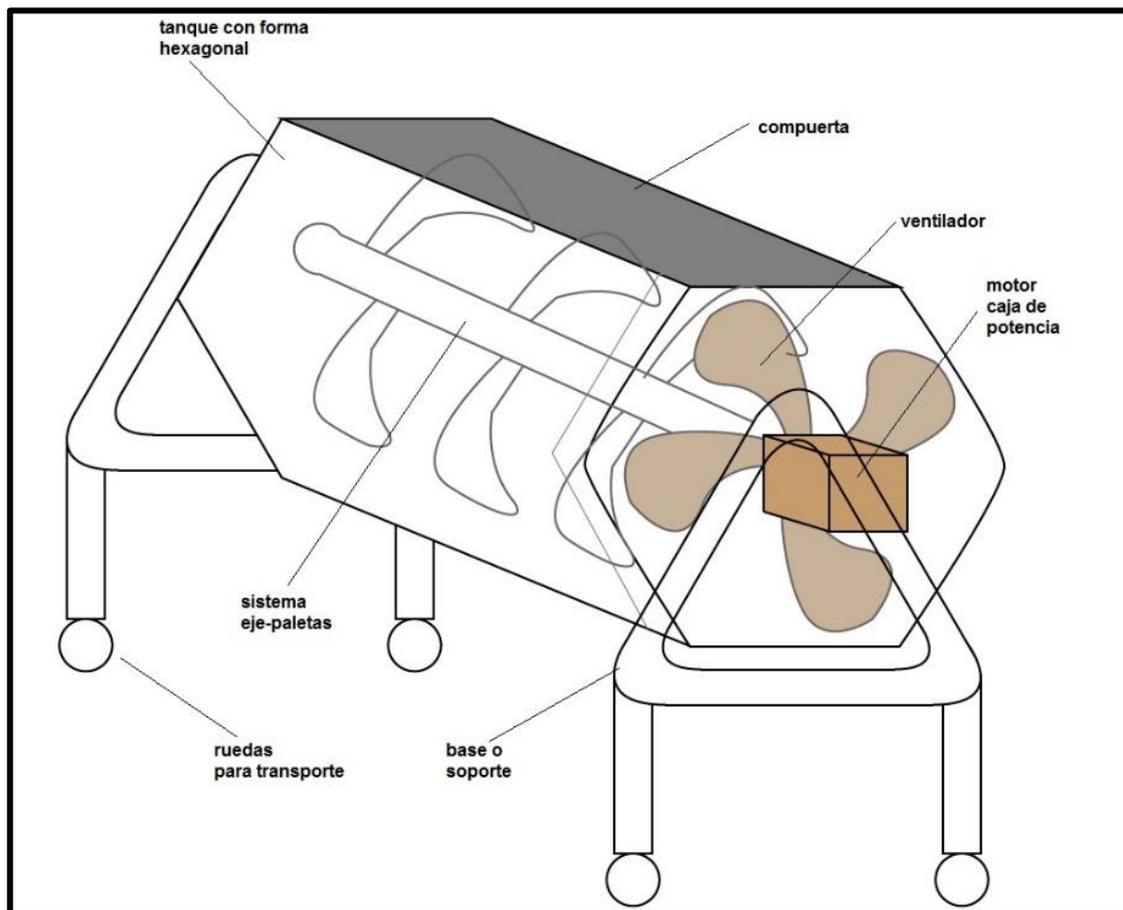


Figura 2.4 Diseño conceptual o de forma del sistema (elaboración propia).

2.5 Normas y códigos que aplicar

Todas las normas (códigos, especificaciones, prácticas recomendadas, métodos, clasificaciones y guías) de la Sociedad Americana de Soldadura (AWS) son normas de consenso voluntario desarrolladas según las reglas del Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI).

El código AWS D1.1/D1.1M:2020 cubre los requisitos de soldadura para cualquier tipo de estructura soldada realizada con aceros al carbono y de baja aleación utilizados comúnmente en la construcción. Las Secciones de la norma constituyen un conjunto de reglas para la regulación de la soldadura en la construcción de acero.

En conjunto con este código, también se utiliza información del código AWS A5.1/A5.1M, la cual muestra las especificaciones de los distintos tipos de electrodos a emplearse, dependiendo de la resistencia a la tracción y tensión que este debe soportar.

Clasificación de AWS		Resistencia a la tracción		Límite elástico con una desviación del 0,2%		Porcentaje de alargamiento en longitud de diámetro 4x
A5.1	A5.1M	A5.1 (ksi)	A5.1M (MPa)	A5.1 (ksi)	A5.1M (MPa)	
E6010	E4310	60	430	48	330	22
E6011	E4311	60	430	48	330	22
E6012	E4312	60	430	48	330	17
E6013	E4313	60	430	48	330	17
E6018	E4318	60	430	48	330	22
E6019	E4319	60	430	48	330	22
E6020	E4320	60	430	48	330	22
E6022	E4322	60	430	No especificado		No especificado
E6027	E4327	60	430	48	330	22
E7014	E4914	70	490	58	400	17
E7015	E4915	70	490	58	400	22
E7016	E4916	70	490	58	400	22
E7018	E4918	70	490	58	400	22
E7024	E4924	70	490	58	400	17 ^c
E7027	E4927	70	490	58	400	22
E7028	E4928	70	490	58	400	22
E7048	E4948	70	490	58	400	22
E7018M	E4918M	Nota al pie ^d	Nota al pie ^d	53–72 ^e	370–500 ^e	24

Figura 2.5 AWS A5.1/A5.1M, Especificación para electrodos de acero al carbono.

ANSI facilita el desarrollo de Estándares Nacionales Estadounidenses (ANS) al acreditar los procedimientos de las organizaciones de desarrollo de estándares (SDO) y aprobar sus documentos como Estándares Nacionales Estadounidenses (ANS). Este proceso sirve y protege el interés público, ya que los desarrolladores de estándares acreditados por ANSI - y el ANS que desarrollan - deben cumplir con los requisitos del Instituto de apertura, equilibrio, consenso y debido proceso y adherirse a la supervisión neutral de ANSI, asegurando que todas las partes interesadas tengan una oportunidad de participar en el desarrollo de una norma.

2.6 Diseño de detallado

A continuación, se describe los parámetros a considerar. En base al método de compostaje acelerado de Berkeley se pretende establecer las condiciones a las cuales

operará el equipo y tratará al mismo tiempo a los residuos sólidos orgánicos. Se debe cumplir con lo siguiente:

Tabla 2.5 Parámetros para compostaje acelerado basado en método Berkeley.

Condiciones para el sistema	
Relación C/N	25 – 30 : 1
Volumen de pila	>10 gal (1x1x1.5m)
Tamaño de partícula	5 – 30 cm (trituración)
Temperatura	55 – 65 °C
Humedad	50 – 60 %
volteo	De afuera hacia dentro
Frecuencia de volteo o aireación	4 días sin voltear, luego volteo cada 2 días hasta el día 14.

Además, la siguiente tabla muestra valores típicos de los parámetros en el compostaje tradicional, varios de estos también servirán como valores de referencia.

Tabla 2.6 Valores típicos de los parámetros del compostaje.

	Semana 1-2 (fase mesofílica)	Semana 3-4-5 (fase termofílica)	Semana 6-10 (fase enfriamiento)	Semana 11-12 (fase maduración)
Temperatura	15 – 40 °C	55 – 65 °C	15 – 40 °C	T ambiente
PH	4 – 6	8 – 9	7 – 8	6 – 8
Humedad	45% - 60%			30% - 40%
Densidad	150 – 250 kg/m ³	600 – 700 kg/m ³		
Tamaño de partícula	<25 cm	≈ 15 cm	< 1.6 cm	
Materia orgánica base seca	50 – 70 %	> 20%		

A continuación, se desarrolla todos los cálculos respectivos, tanto del desecho orgánico a colocar, los materiales que conforman cada uno de sus elementos del compostador mecánico en conjunto con las reacciones que actúan sobre este, y sus

demás componentes a utilizar. En las siguientes secciones se realiza un análisis mecánico y se plantea las ecuaciones a emplear para obtener el resultado deseado, mientras que, en la sección de APÉNDICES se encuentra detallado el desarrollo de las ecuaciones planteadas junto con sus respectivas figuras y tablas utilizadas.

2.6.1 Cálculo de masa y volumen de pila

2.6.1.1 Masa de residuos sólidos orgánicos (RSO) diarios

- Basura doméstica diaria según estadísticas INEC

$$B_h = 0.86 \text{ kg/día} \text{ (Por hogar).}$$

$$\text{Considerando } B_h = 1 \text{ kg/día}$$

Adicionalmente se considera:

- Desechos de jardín-agrícolas-excrementos

$$B_a = 1.5 \text{ kg/día} \text{ (Por hogar).}$$

Entonces la cantidad de residuos sólidos orgánicos diarios sería:

$$RSD = B_h + B_a = 1 \frac{\text{kg}}{\text{día}} + 1.5 \frac{\text{kg}}{\text{día}} = 2.5 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

Para una capacidad de 42 kg como se había establecido, el número de días de recolección esos de residuos es:

$$\# \text{ días de recolección} = \frac{42 \text{ kg}}{2.5 \frac{\text{kg}}{\text{día}}} \approx 17 \text{ días}$$

El usuario podrá compostar sus residuos de más de 2 semanas.

2.6.1.2 Dimensionamiento de pila

Se conoce la máxima capacidad del equipo o tanque, mediante una densidad promedio para los residuos sólidos orgánicos de 297 kg/m³ como lo establece Techobanoglobus (1994), se puede determinar el volumen.

$$\text{Capacidad} \rightarrow M_{RSO} = 42 \text{ kg}$$

$$\text{Densidad promedio de residuos} \rightarrow \rho_{RSO} = 297 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{RSO} = \frac{M_{RSO}}{V_{RSO}} \rightarrow V_{RSO} = \frac{M_{RSO}}{\rho_{RSO}} \rightarrow V_{RSO} = \frac{42 \text{ kg}}{297 \text{ kg/m}^3} \rightarrow V_{RSO} = 0.14 \text{ m}^3$$

Además $V_{RSO} = 0.14 \text{ m}^3 = 37 \text{ gal} > 10 \text{ gal}$, por lo tanto, se cumple la condición de volumen del método de Barkeley.

El tanque es de forma transversal octagonal y se establecerá que solo este lleno en sus $\frac{3}{4}$ partes de su volumen máximo, por seguridad y buen desarrollo del proceso.

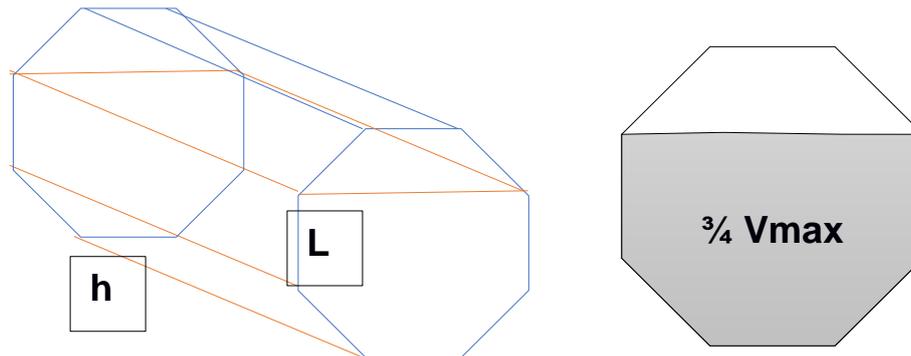


Figura 2.6 Geometría del contenedor y volumen ocupado (Elaboración propia).

Se debe hacer que: $\frac{3}{4}V_{max} = V_{RSO} = 0.14 \text{ m}^3$ para conocer las dimensiones del tanque y la pila. Para un cilindro octogonal se realizan los cálculos mostrados en el apéndice A.

Ahora se tiene las dimensiones del contenedor de la materia orgánica, solo falta calcular el espesor de pared e del mismo, esto se realizará en secciones posteriores.

2.6.2 Cálculo de parámetros físico-químicos

2.6.2.1 Cálculo de relación C/N y humedad de la mezcla

Para esta parte primero se especificará los sustratos a utilizar en la mezcla de compostaje.

Se ha considerado una cantidad de 12 residuos más comunes, separados en 3 categorías, residuos de comestibles, residuos de jardín-agrícolas y estiércol. Se muestran en la siguiente tabla junto con sus características.

Se toman porcentajes de masa para cada categoría de acuerdo con la masa total, es decir, 45 kg. Se da un mayor porcentaje de masa a los desechos originados de comestibles por ser un compostaje doméstico.

Utilizando Excel se realizan iteraciones, tablas 4.2, 4.3 y 4.4 en apéndice B, se realiza la suma de las masas de los sustratos la cual debe ser igual a la masa total (42 kg), se halla la relación carbono nitrógeno C/N de la mezcla y el porcentaje de humedad promedio de la mezcla.

2.6.2.2 Tasa de consumo de sólidos volátiles

Se calculará la tasa de masa volátil que se perderá durante el proceso para generar energía.

Se recopilan dos propiedades físico-químicas importantes para los residuos considerados, es decir, el porcentaje de sólidos volátiles (%SV) y el porcentaje de sólidos totales (%ST).

Tabla 2.7 Porcentaje de sólidos volátiles y totales.

Tipo de residuo sólido	%SV en peso	%ST en peso
Residuos de comida	94.3 %	7 – 5% (media=11%)
Residuos de jardín-agrícola	79.1%	50 – 90 % (media=70%)
Estiércol	79.3 %	15.3 %

Se utiliza la ecuación:

$$\frac{dSVB}{dt} = (Kd_{L20} * SVB_L + Kd_{R20} * SVB_R) * F_1(T) * F_2(ST) * F_3(ST)$$

$$Kd_{L20} = 0.001/dia ; Kd_{R20} = 0.075/dia$$

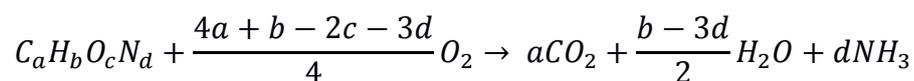
Para calcular la masa de sólidos volátiles biodegradables rápidamente SVB_R y lentamente SVB_L primero se debe clasificarlos.

Los residuos que se descomponen lentamente tienen mayor valor de C/N, mientras que los que se descomponen rápidamente tienen C/N bajo. Dichos datos se los puede apreciar en las tablas 4.5 y 4.6 del apéndice C y cuyos cálculos también se muestran en el mismo apéndice.

2.6.3 Cálculos del sistema de aireación

2.6.3.1 Tasa de aireación u oxigenación

Este cálculo se basa en la reacción química generada. Mediante un balance químico y la estequiometría del proceso se halla la proporción de masa de oxígeno requerida. La ecuación química que describe el proceso es:



Para ello se hace necesario conocer las características químicas de los sustratos, representado en la tabla 4.7 del apéndice D.

Los valores de a, b, c y d representan el número de átomos de cada elemento del primer compuesto que corresponde a la biomasa ($C_aH_bO_cN_d$).

Se conocen los porcentajes en peso de cada elemento químico en cada sustrato y el peso molecular de cada elemento, entonces se puede determinar los números de átomos.

Tabla 2.8 Peso atómico de elementos químicos.

Elemento químico	C	H	O	N
Peso atómico	12	1	16	14

$$\frac{\% \text{ elemento A}}{\text{peso atómico del elemento A}} = x_A ; \frac{\% \text{ elemento B}}{\text{peso atómico del elemento B}} = x_B ; \dots\dots\dots$$

$$\# \text{ de átomos de A} = \frac{x_A}{\text{menor } x}$$

La aireación debe ser aplicada durante periodos cortos de tiempo muy específicos Bustamante et al. (2008).

Se asume que se aplica aireación durante 30 minutos por día (5 minutos por cada 15, en 2 horas) durante 4 semanas correspondientes a la etapa termofílica.

$$\dot{V} = 288 \frac{m^3}{h} = 169 \text{ cfm}$$

2.6.4 Agua de humidificación

Es muy complicado determinar cómo variaría el contenido de humedad de la mezcla, ya que esta es afectada tanto por la temperatura como por la aireación. Sin embargo, se establecerá la masa de agua que se requiere para humidificación en base al porcentaje de humedad que indique la lectura de un sensor.

$m_{\text{agua hum}} \rightarrow \text{segun } \Delta\%HR \text{ de la mezcla}$

$$m_{\text{agua hum}} = \frac{M(\%HR_1 - \%HR_2)}{100 - \%HR_2}$$

M es la masa total de la mezcla, igual a 42 kg.

Se establece que la humedad se mantenga a $\%HR_1 = 50\%$ según lo propuesto por el método Berkeley.

Y estableciendo un límite mínimo de humedad de $\%HR_2 = 45\%$. Por debajo de este valor se deberá aplicar una masa de agua correspondiente a:

$$m_{\text{agua hum}} = \frac{(42 \text{ kg})(50 - 45)}{100 - 45} = 3.8 \text{ kg de agua}$$

Esto corresponde a un volumen de agua de $V_{\text{agua hum}} = 3.8 \text{ L}$, por lo cual se establecerá un tanque de 4 L.

Estableciendo un tiempo de humidificación de 2 horas, se obtiene la tasa a la que se debe agregar el líquido.

$$\dot{m}_{agua\ hum} = \frac{m_{agua\ hum}}{2h(3600s/1h)} = 5.0 \times 10^{-4} kg/s$$

En términos de volumen:

$$\dot{V}_{agua\ hum} = \frac{\dot{m}_{agua\ hum}}{\rho} = \frac{5.0 \times 10^{-4} kg/s}{1000 kg/m^3} = 5.0 \times 10^{-7} m^3/s = 0.5 ml/s$$

2.6.5 Análisis térmico y cálculo de energía requerida

2.6.5.1 Generación de CO₂

Siguiendo el mismo procedimiento de cálculo anterior, considerando que la masa molar del dióxido de carbono es $M_{CO_2} = 44 g/mol$, se puede obtener la generación de CO₂ por cada gramo de cada sustrato. Se obtiene lo siguiente.

Tabla 2.9 Masa de CO₂ requerida por gramo de sustrato.

	Sustrato	<i>g de CO₂/g de S</i>
S ₁	Residuos de frutas	0,59
S ₂	Residuos de tomates	0,16
S ₃	Residuos vegetales	0,24
S ₄	Basura (desperdicio de comida)	0,13
S ₅	Hierba general	6,03
S ₆	Paja general	2,05
S ₇	Maderas (astillas, virutas, etc.)	9,58
S ₈	Hojas sueltas y secas	0,92
S ₉	Recortes de arbustos	0,91
S ₁₀	Aserrín	15,13
S ₁₁	Estiércol de vaca	0,20
S ₁₂	Estiércol de ave de corral	0,27

Sumando se obtiene:

$$CO_2 = 0.59 \text{ g de } CO_2 / \text{g de } S_1 + 0.16 \text{ g de } CO_2 / \text{g de } S_2 + 0.24 \text{ g de } CO_2 / \text{g de } S_3 + \dots$$

$$CO_2_{GEN} = 1.52 \times 10^6 \text{ g} = 1521 \text{ kg de } CO_2$$

2.6.5.2 Temperatura y balance térmico

Se aplica el modelo energético de Nagasaki (1987) del compostaje. Para ello se identifican las interacciones de calor presentadas en el sistema. La ecuación se genera a partir del siguiente balance de energía. El sistema a analizar es el siguiente:

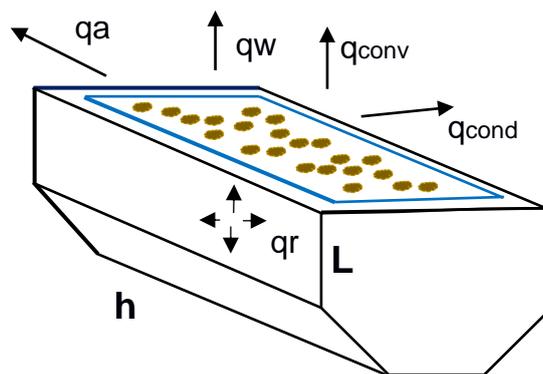


Figura 2.7 Interacciones de energía en el sistema (elaboración propia).

$$(C_{pm}M + C_{ps}S + C_{pw}W)\Delta T = q_r - (q_a - q_w - q_{conv} - q_{cond})$$

El calor generado q_r menos las pérdidas de calor por aireación, vaporización de agua, convección y conducción incrementará la energía de la mezcla compuesta por masa de madera, biomasa y agua (M, S y W) aumentando la temperatura en ΔT .

Dividiendo para el tiempo y haciendo $q_p = q_{conv} + q_{cond}$ se obtiene la ecuación de Nagasaki.

$$\Delta T = \frac{\dot{q}_r - \dot{q}_a - \dot{q}_w - \dot{q}_p}{C_{pm}M + C_{ps}S + C_{pw}W} \Delta t$$

Los términos $\dot{q} \left(\frac{kcal}{h} \right)$ son energía por unidad de tiempo. Se calculan a continuación.

A la ecuación se le debe agregar el calor perdido en el calentamiento del eje-paletas en el interior \dot{q}_{eje} y además la tasa de calor que hace falta agregar \dot{q}_{agr} para mantener el material a la temperatura adecuada.

$$\Delta T = \frac{(\dot{q}_r + \dot{q}_{agr}) - \dot{q}_a - \dot{q}_w - \dot{q}_p - \dot{q}_{eje}}{C_{pm}M + C_{ps}S + C_{pw}W} \Delta t$$

2.6.5.3 Tasa de energía de reacción \dot{q}_r

Esta es la energía generada por la materia en el proceso de compostaje, es de tipo química y proporcional a la generación de CO₂. La calculamos según Cooney (1968).

$$q_r = (0.11)CO_2GEN$$

Asumiendo que el proceso tendrá una duración de 30 días, se tiene:

$$\dot{q}_r = \frac{q_r}{\Delta t} = 2.64 \times 10^3 \text{ kcal/h}$$

2.6.5.4 Tasa de energía perdida por aireación \dot{q}_a

Para hallar esta pérdida de calor, se supone que los residuos están muy bien fragmentados y poseen formas prismáticas como se muestra en la figura.

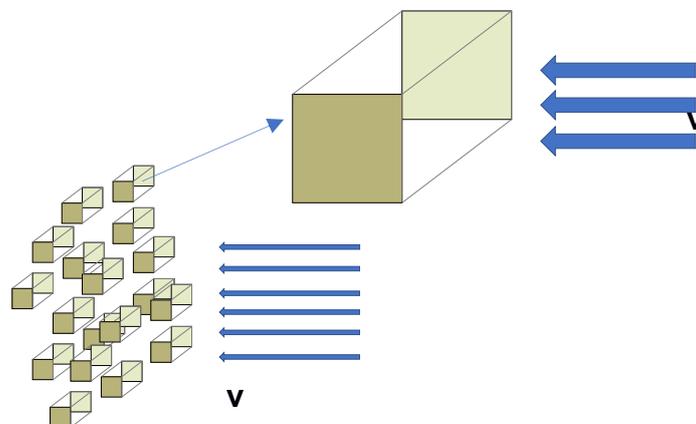


Figura 2.8 Modelamiento de la aireación sobre la materia (elaboración propia).

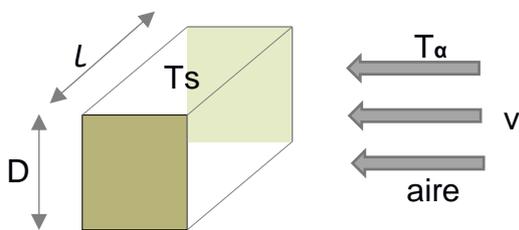
Considerando el tamaño de partícula establecido en el método Berkeley y modelando la pérdida de calor en un fragmento de residuo como un cilindro no circular en flujo cruzado.

Tamaño de partícula $\rightarrow l = 7\text{ cm}$ (dentro del rango: 5 - 30cm)

Se asume un espesor $\rightarrow D = 2\text{ cm}$

La temperatura superficial del elemento debería ser al menos $\rightarrow T_s = 50^\circ\text{C}$

Se asume aire a temperatura ambiente $\rightarrow T_\infty = 26^\circ\text{C}$.



Transferencia por de convección:

$$\dot{q}_a = \bar{h}A_s(T_s - T_\infty)$$

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k} = CRe_D^m Pr^{1/3}$$

Figura 2.9 Flujo cruzado en elemento (elaboración propia).

$$\dot{q} = 0.414\text{ W}$$

Ésta la es la pérdida de calor para un solo elemento, calculada en el apéndice E, estimando la pérdida para la cantidad de biomasa completa con el volumen que esta ocupa.

$$\dot{q}_a = 2070\text{ W} = 1.78 \times 10^3\text{ kcal/h}$$

2.6.5.5 Pérdida de calor por convección y conducción \dot{q}_p

- Conducción

Se da en las paredes que están en contacto con la biomasa, en total son 7 superficies. Se considera un espesor del tanque de $e = 7\text{ mm}$, temperatura exterior de $T_e = 26^\circ\text{C}$ y temperatura interior $T_i = 50^\circ\text{C}$.

$$\dot{q}_{cond} = \frac{kA_t}{e}(T_i - T_e)$$

La conductividad térmica k para el material del tanque (PCV) es 0.16 W/mK.

$$\dot{q}_{cond} = 946.7 \text{ W} = 814 \text{ kcal/h}$$

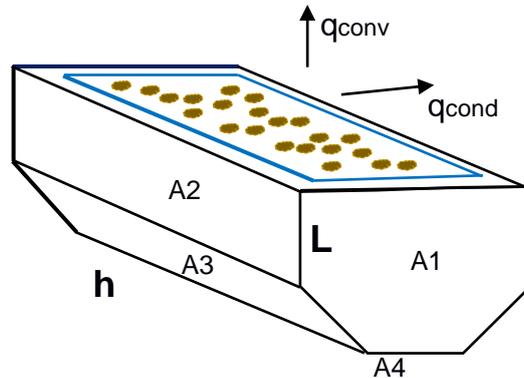
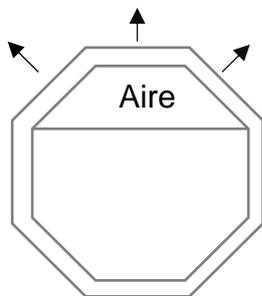


Figura 2.10 Pérdida de calor por conducción y convección (elaboración propia).

Existe otra pequeña pérdida de calor por conducción en las superficies superiores del contenedor, que están en contacto con el aire caliente sobre el material.



$$\dot{q}_s = \frac{k(3hl)}{e} (T_i - T_e)$$

Estableciendo que el aire en el interior está a $T_i = 30^\circ\text{C}$, mientras que la temperatura exterior a $T_e = 26$

$$\dot{q}_s = 49.3 \text{ W} = 42.4 \text{ kcal/h}$$

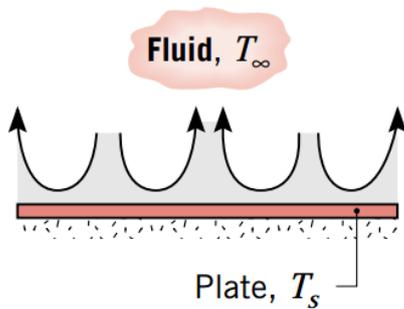
Figura 2.11 Convección en pared superior (elaboración propia).

De esta manera la pérdida total por conducción es

$$\dot{q}_{cond} = 814 \text{ kcal/h} + 42.4 \text{ kcal/h} = 856.4 \text{ kcal/h}$$

- Convección

Se pierde calor por convección natural en la superficie superior de todo el material. Se modelará la pérdida de calor similar a una placa o superficie plana horizontal con aire encima a una menor temperatura.



$$q_{conv} = \bar{h}A_s(T_s - T_\infty)$$

$$\bar{Nu}_D = \frac{\bar{h}L}{k} = 0.54Ra_L^{1/4}; \quad 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7$$

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha}$$

Figura 2.1 Modelamiento de convección (elaboración propia).

$$q_{conv} = 80.53 \text{ W} = 69.24 \text{ kcal/h}$$

Por lo tanto, el calor total perdido por conducción y convección es:

$$\dot{q}_p = \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{cond}$$

$$\dot{q}_p = 856.4 \text{ kcal/h} + 69.24 \text{ kcal/h} = 925.6 \text{ kcal/h}$$

2.6.5.6 Pérdida de calor por evaporación de agua \dot{q}_w

Para esta pérdida de energía se debe conocer la generación de agua durante el proceso. Mediante estequiometría se puede conocer ese valor al igual como se hizo para el cálculo de O₂ y CO₂.

Se obtiene lo siguiente:

$$H_2O \text{ generada} = 8.31 \text{ g de } H_2O/\text{g de mezcla}$$

Asumiendo que toda el agua generada se vaporiza a la misma tasa, el calor total para vaporizar el agua es:

$$\dot{q}_w = \dot{m}c_w\Delta T + \dot{m}L_v$$

El calor específico c_w y calor latente de vaporización L_v del agua es 1kcal/kgC° y 540 kcal/kg respectivamente.

$$\dot{q}_w = 0.053kcal/s = 190.8 kcal/h$$

2.6.5.7 Pérdida de calor en sistema eje-paletas \dot{q}_{eje}

Esta pérdida se la estima sabiendo que el eje atravesará por completo el tanque y será fabricado de acero AISI/SAE 1045. Se duplicará ese valor obtenido para considerar el calentamiento de las paletas.

$$q = m_{eje}c_{acero}\Delta T$$

Asumiendo que el eje se encuentra a $T_1 = 30^\circ\text{C}$ antes del activar el sistema de calentamiento y alcanza la misma temperatura que la biomasa.

$$q = 44.02 kJ$$

Se Asume que las paletas también consumen ese calor para aumentar su temperatura.

$$\rightarrow q = 2 * 44.02 kJ = 88.4 kJ$$

Para una operación de 2 horas cada día del sistema, la energía perdida sería:

$$\dot{q}_{eje} = \frac{88.4 kJ}{2h} = 12.3 \frac{J}{s} = 12.3 W = 10.57kcal/h$$

Con todas las transferencias de calor calculadas se puede determinar la energía que es necesario agregar.

$$(C_{pm}M + C_{ps}S + C_{pw}W) \frac{\Delta T}{\Delta t} = (\dot{q}_r + \dot{q}_{agr}) - \dot{q}_a - \dot{q}_w - \dot{q}_p - \dot{q}_{eje}$$

$$\dot{q}_{agr} = (C_{pm}M + C_{ps}S + C_{pw}W) \frac{\Delta T}{\Delta t} + \dot{q}_a + \dot{q}_w + \dot{q}_p + \dot{q}_{eje} - \dot{q}_r$$

$$\dot{q}_{agr} = 2608.3 kcal/h$$

$$\dot{q}_{agr} = 3.03 kW$$

2.6.6 Diseño de estructura o base



Figura 2.12 Primer diseño de base (elaboración propia).

Para el siguiente análisis de esfuerzos en la estructura de la base, se empieza resolviendo todas las cargas aplicadas sobre el eslabón que es propenso a fallos por un esfuerzo de compresión.

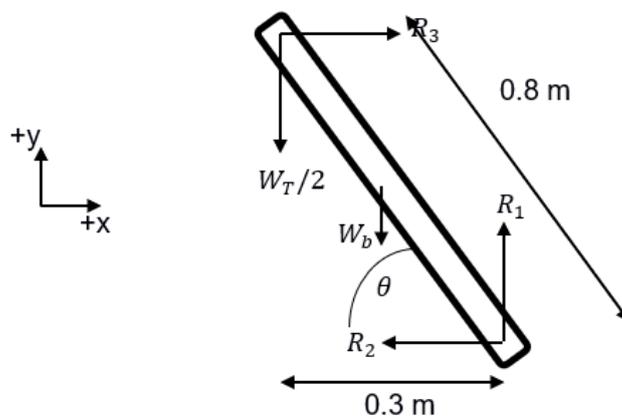


Figura 2.13 Fuerzas actuantes sobre el eslabón de la base (elaboración propia).

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{0.3}{0.8}\right) = 68^\circ$$

Pitágoras:

$$c = \sqrt{0.8^2 - 0.3^2} = 0.74 \text{ m}$$

El W_T es el resultado de la máxima reacción calculada sobre el eje en el punto de apoyo con la estructura de la base. En esta reacción se ve involucrado el peso total del tanque, las fuerzas ejercidas a lo largo del eje debido a las reacciones de las paletas en ella y el peso de los demás componentes que se usan para el funcionamiento del equipo.

Debido a que la estructura de la base se compone de dos eslabones en cada extremo del tanque, que se encarga de sostener y dar estabilidad al equipo, este $W_T = 325.6 \text{ N}$ se lo distribuye en dos partes iguales, de esta manera tenemos que sobre el eslabón actuará un $W_T/2 = 162.8 \text{ N}$

Por otro lado, se hizo la selección del material y las respectivas dimensiones estimadas de la estructura. En base a los productos comunes en el mercado y con un menor precio económico, se eligió la aleación de aluminio número 2011-T6, cuya densidad a 20°C es 2.70 kg/dm^3

Para hallar el valor de las reacciones en el eslabón, se realiza una sumatoria de todas las fuerzas verticales ejercidas sobre el eslabón en estado estático. Luego, se procede a realizar la sumatoria de los momentos, con sentido horario positivo, ejercidos en el parte superior donde se aplica el peso del sistema.

Finalmente, se realiza la suma de todas las fuerzas axiales sobre el elemento, dicha carga resultante P es la que provocará sobre el material un esfuerzo de compresión.

$$P = R_3 / \cos(68^\circ) + W_T / 2 \cos(22^\circ) + W_b / \cos(22^\circ)$$

$$P = 353.73 \text{ N}$$

Para determinar si una columna puede sufrir falla de compresión o pandeo, se utiliza un factor S_r llamado razón de esbeltez. Para ello debemos primero determinar el

área de un tubo hueco y su segundo momento, donde el diámetro exterior está representado como d_o y el diámetro interior como d_i .

$$A = \frac{\pi}{4}(d_o^2 - d_i^2) = 0.057 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$I = \frac{\pi}{64}(d_o^4 - d_i^4) = 4.2 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

Ahora se procede a determinar el radio de giro k

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}} = 8.57 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Con respecto a las condiciones extremos de la columna, se relacionó una que tenga más similitud al diseño de la estructura para la base, ese fue el caso de la opción d) empotrada-articulada. Dando una razón de esbeltez igual a:

$$S_r = \frac{0.8l}{k} = 74.68$$

Debido a que el valor de la razón fue mayor a 10, se concluye que la columna pertenece al tipo de columnas grandes. En base a este dato se realiza el siguiente cálculo de carga crítica. Como datos principales del material de aleación de aluminio, tenemos el módulo de elasticidad $E = 69.5 \times 10^3 \text{ MPa}$ y el esfuerzo a la fluencia $S_y = 169 \text{ MPa}$.

$$P_{cr} = A \left[S_y - \frac{1}{E} \left(\frac{S_y S_r}{2\pi} \right)^2 \right]$$

$$P_{cr} = 6.32 \times 10^3 \text{ N}$$

Para el factor de seguridad, generalmente se le asigna un valor promedio de 4, de esta manera, se procede a calcular la carga permisible que puede soportar el elemento.

$$P_{permisible} = \frac{P_{cr}}{SF}$$

$$P_{permisible} = 1580 N$$

Finalmente, se realiza una comparación de las dos cargas sobre el eslabón y la carga máxima que se ejerce sobre el eslabón de la estructura es mucho menor que la carga permisible que puede soportar el mismo, por lo tanto, se puede concluir que el eslabón de la estructura no fallará por pandeo por un esfuerzo de compresión.

$$P < P_{permisible}$$

$$353.73 N < 1580 N$$

2.6.7 Diseño del contenedor o tanque

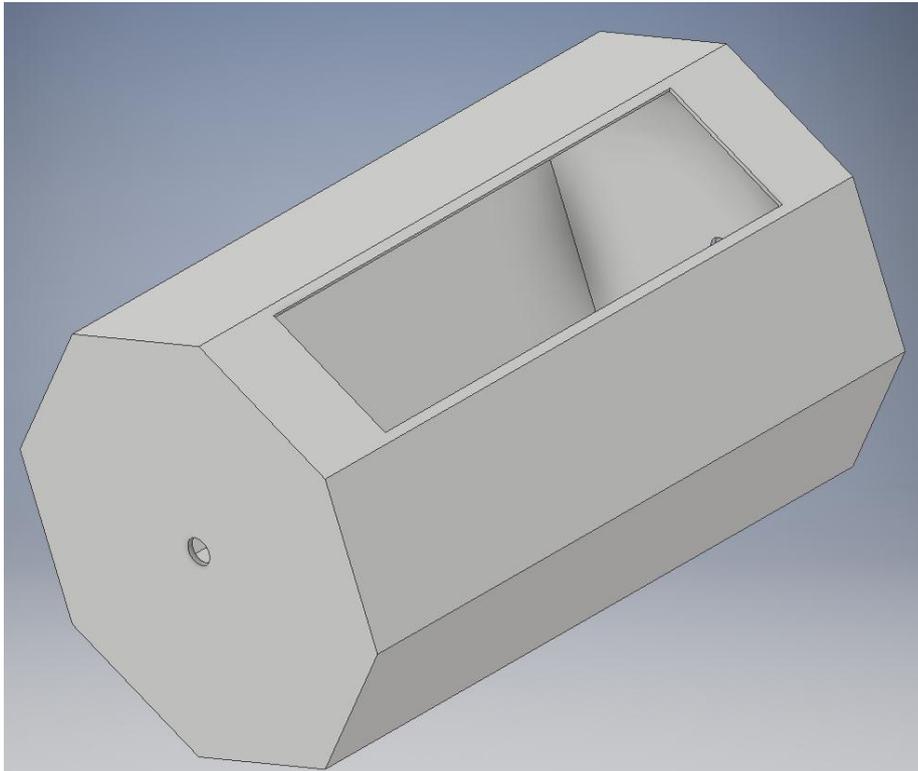


Figura 2.14 Primer diseño del tanque (elaboración propia).

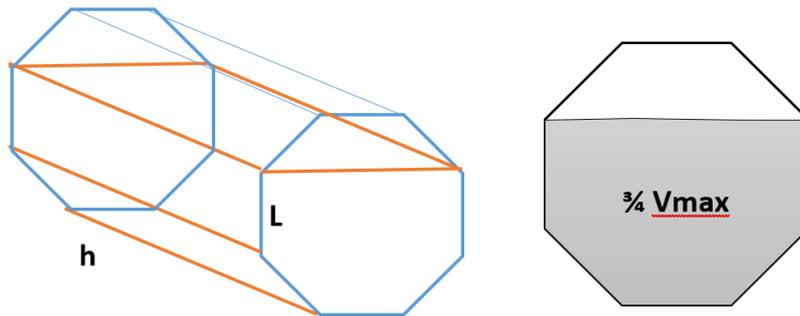


Figura 2.15 Porcentaje volumétrico del contenido del tanque (elaboración propia).

$$M_{RSO} = 42 \text{ Kg}$$

$$L = 0.214 \text{ m}$$

$$h = 0.84 \text{ m}$$

La presión experimentada por el tanque se la calcula como se muestra en el apéndice G

$$P = \frac{F}{A} = 382 \text{ Pa}$$

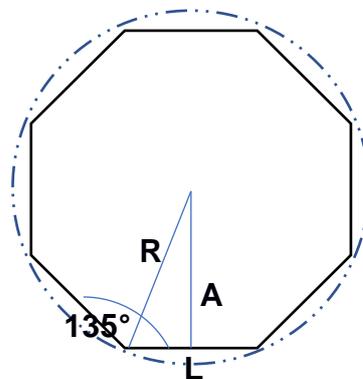


Figura 2.16 Vista transversal del tanque (elaboración propia).

$$R_i = 0.28 \text{ m}$$

$$D_i = 0.56 \text{ m}$$

Cuando se trata de recipientes de paredes delgadas, la cual el espesor de la pared no pasa más allá de la décima parte de su radio, se obtiene la siguiente ecuación de esfuerzo:

$$\sigma_{permisible} = \frac{P(D_i + t)}{2t}$$

Donde t es el espesor del tanque y el esfuerzo máximo permisible $\sigma_{permisible}$ se lo expresa en términos de la resistencia del material S y el factor de seguridad n , cuyo valor de este factor varía desde 1 hasta 10, siendo 1 el valor mínimo de seguridad ante la falla del elemento.

$$\sigma_{permisible} = \frac{S}{n}$$

$$\sigma_{permisible} = 13.75 \times 10^6$$

Realizando un despejo del espesor t de la ecuación de esfuerzo permisible para recipientes con paredes delgadas, se obtiene la siguiente ecuación:

$$t = \frac{PD_i}{2\sigma_{permisible} - P}$$

$$t = 0.007m$$

2.6.8 Diseño del conjunto eje-paletas

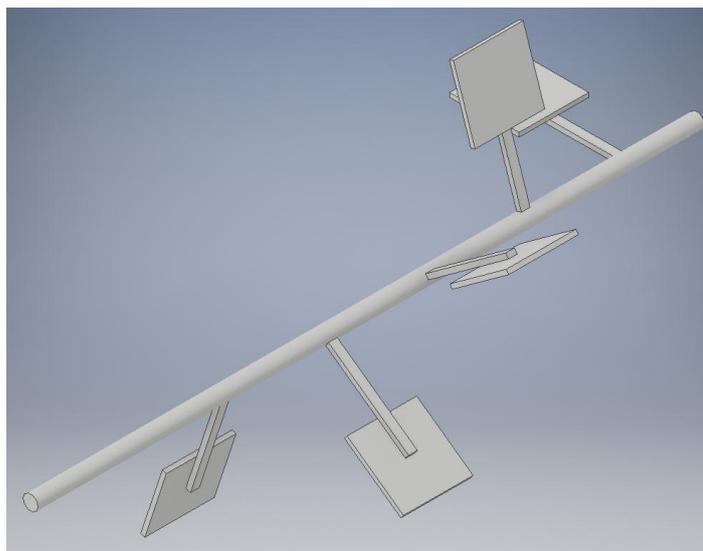


Figura 2.17 Primer diseño de eje con paletas (elaboración propia).

El eje en el cual podrá rotar el tanque, pero principalmente las paletas tendrán una longitud igual a la del tanque, considerando la reducción por espesor de pared.

Así mismo se implementarán cinco paletas distribuidas uniformemente en toda la longitud del eje. Dichas paletas presentan una forma cuadrada.

Las dimensiones en base al espacio disponible para el conjunto contenedor-eje-paletas se muestran a continuación.

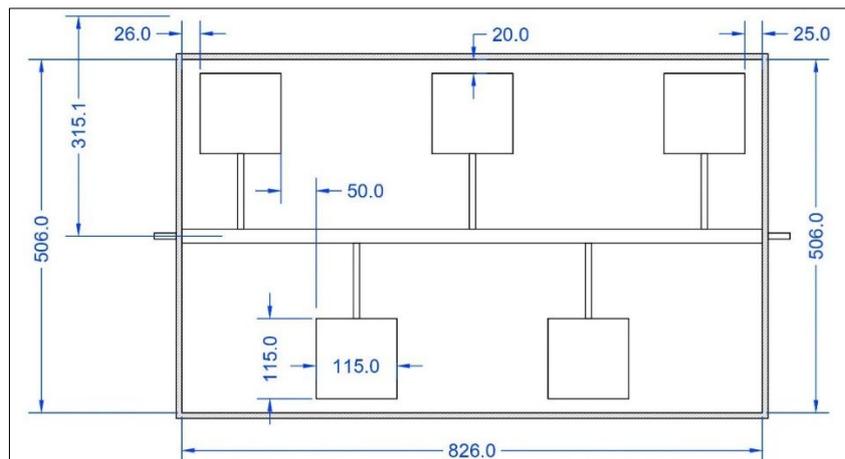


Figura 2.18 Sistema contenedor-eje-paletas (elaboración propia).

Las paletas también serán distribuidas uniformemente de manera angular.

$$\text{angulo de separacion } \phi = \frac{360^\circ}{5} = 72^\circ$$

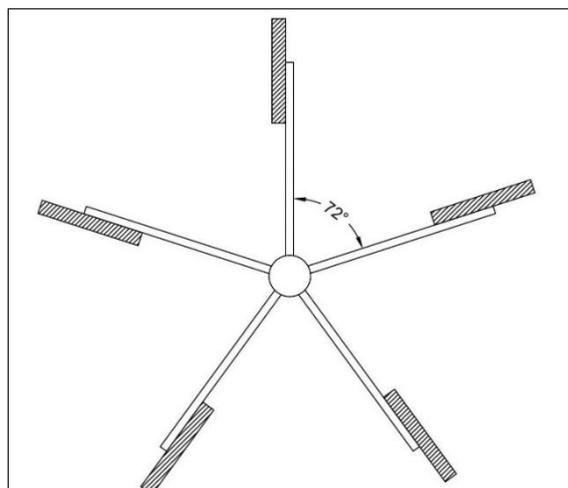


Figura 2.19 Distribución angular de paletas (elaboración propia).

Una vez establecida la geometría se calculan las fuerzas ejercidas por parte del material sobre las paletas y el eje para determinar un diámetro adecuado para este último.

La situación más crítica es cuando 4 de las 5 paletas se encuentra inmersas en el material, allí se ejercerá las máximas fuerzas sobre el eje.

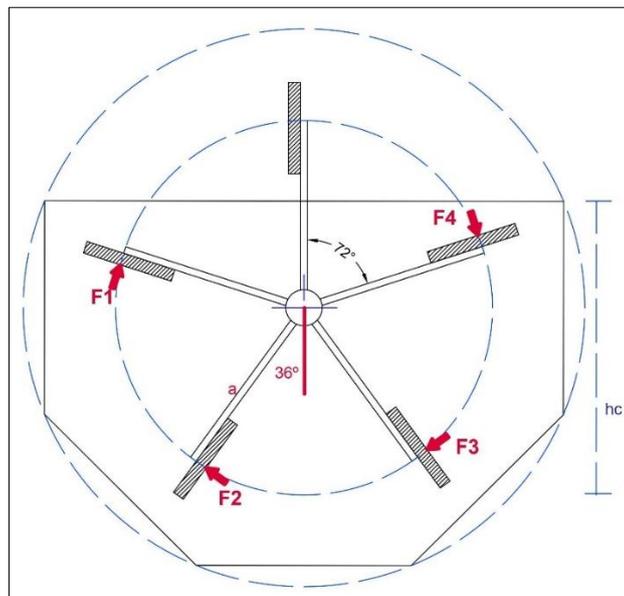


Figura 2.20 Fuerzas sobre paletas y geometría del sistema (elaboración propia).

La paleta 1 debe empujar el material en una longitud igual $3/5$ de la circunferencia que describen las paletas, para la paleta 2 será $2/5$ y para la paleta 3, $1/5$. La paleta que continúa estará saliendo del material y no habrá fuerza sobre esta, al igual que la paleta superior.

El volumen que debe desplazar cada paleta es:

$$P1: V_1 = \frac{3}{5}(2\pi r)A \quad ; \quad P2: V_2 = \frac{2}{5}(2\pi r)A \quad ; \quad P3: V_3 = \frac{1}{5}(2\pi r)A$$

A es el área las paletas cuadradas y r es el radio de la circunferencia que describen

La fuerza sobre cada una de estas paletas será la fuerza que aplican, e igual al peso del volumen que deben desplazar.

$$F = mg = \rho_{RSO}Vg = \gamma_{RSO}V$$

Consideraremos el valor máximo de peso específico de los residuos sólidos, este es: $\gamma_{RSO} = 480 \text{kgf}/\text{m}^3 = 4.7 \text{kN}/\text{m}^3$. Por lo tanto:

$$F_1 = \gamma_{RSO} V_1 = 41.12 \text{ N}$$

$$F_2 = \gamma_{RSO} V_2 = 27.4 \text{ N}$$

$$F_3 = \gamma_{RSO} V_3 = 13.7 \text{ N}$$

A estos valores le sumaremos una fuerza de presión sobre las paletas causada por el material debido a que están inmersas en el mismo. Se calcula de manera similar a una fuerza hidrostática en una superficie plana en el fondo.

$$F_p = \gamma_{RSO} h_c A = \gamma_{RSO} \left(a + \frac{L}{2} \right) A = 17.55 \text{ N}$$

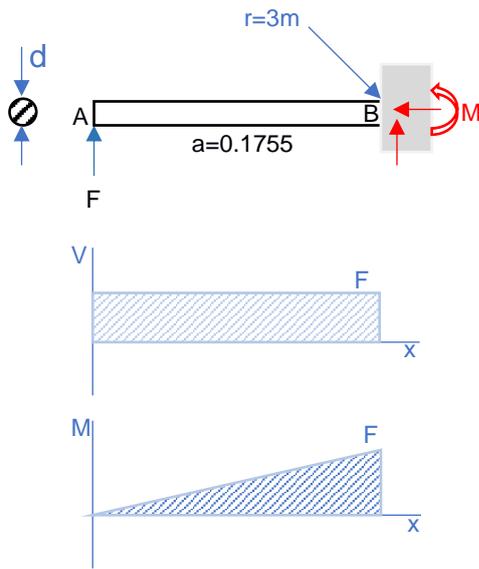
$$F_1 = 58.67 \text{ N}; \quad F_2 = 44.95 \text{ N}; \quad F_3 = 31.25 \text{ N}$$

2.6.9 Cálculo de paletas

Cada paleta estará conectada al eje principal mediante una varilla de sección redonda.

Se debe calcular el diámetro de dicha varilla correspondiente a cada paleta, el cual será el mismo para todas, ya que las varillas estarán sometidas a la misma carga y tendrán la misma longitud.

Se modela a continuación como una varilla empotrada sometida a una carga alternante cuyo máximo valor es $F_1 = 58.67 \text{ N}$ reduciéndose hasta 0. En el apéndice I se puede apreciar los cálculos correspondientes a esta sección.



$$M_{max} = F * a = 10.30 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} * c}{I}$$

En este caso I es la inercia de un círculo, y c es la distancia desde la mitad del eje hasta el punto crítico (punto inferior en la sección B).

$$\sigma_{max} = \frac{32M_{max}}{\pi d^3}$$

$$\sigma_{min} = 0$$

Figura 2.21 Modelamiento del eje, momento y cortante (elaboración propia).

- Análisis estático

Se diseñará de manera estática para obtener un diámetro que pueda ser usado para el análisis dinámico o por fatiga, en base a la teoría de falla estática de Von Mises:

$$n = \frac{S_y}{\sigma'}$$

- Análisis dinámico (por fatiga)

Se emplea el diámetro calculado en el análisis estático y verificamos que no fallará en fatiga, aplicando la teoría de Goodman:

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma_a'}{S_e} + \frac{\sigma_m'}{S_{ut}}$$

2.6.9.1 Forma y espesor de paletas

Se establecen paletas con un radio de curvatura de 234 mm, es decir, no muy pronunciado, pero muy importante para poder remover correctamente la materia.

A continuación, se calcula el espesor de paletas considerándola cuadrada y plana, ya que su curvatura no es muy considerable.

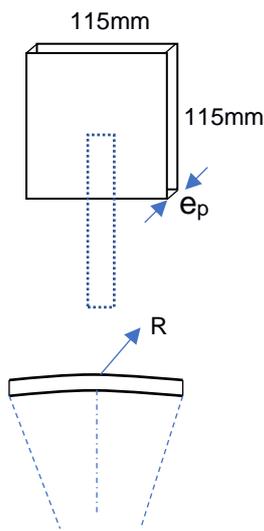


Figura 2.22 Geometría de paletas (elaboración propia).

Consideramos a la paleta como una viga empotrada.

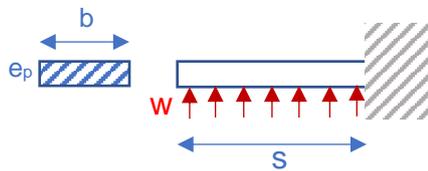


Figura 2.23 Modelo de carga para las varillas de las paletas (elaboración propia).

$$b = 115 \text{ mm}, s = 57.5 \text{ mm}$$

La carga distribuida w sobre la paleta es: $F/115\text{mm}$

$$F = 58.67 \text{ N} \rightarrow w = 58.67\text{N}/115\text{mm} = 0.51 \text{ N/mm.}$$

$$w = [0.51 - 0] \text{ N/mm}$$

Se obtiene un factor de seguridad bastante aceptable, por ende, el espesor $e_p = 3\text{mm}$.

2.6.10 Torque y potencia

El torque neto requerido en el eje es:

$$T = Fr$$

$$T = 23.67 \text{ Nm}$$

Estableciendo que el sistema eje-paletas gire a una velocidad de 20 RPM, la cual es una velocidad prudente y está dentro del rango recomendado para sistemas mezcladores.

Por lo tanto, la potencia necesaria para $N = 20 \text{ RPM}$ es:

$$P = \omega T = 49.57 \text{ W} = 0.067 \text{ hp}$$

Se toma el doble de este valor ya que motores de baja potencia es difícil encontrar en el mercado y son más caros. Entonces:

$$P_{motor} = 0.12 \text{ hp} = 1/8 \text{ hp}$$

2.6.11 Diseño del eje motriz

En un estado dinámico de rotación, el eje sufre un momento de flexión y de torsión debido a las reacciones en cada uno de los puntos de acople con las paletas distribuidas a lo largo del eje. Se analizan las fuerzas correspondientes en el sentido vertical, ya que, en este se tiene la mayor fuerza comparado con las demás ejercidas sobre las paletas, adicional a ello también se incluye la reacción debido al peso total del tanque en los puntos de contacto con el eje.

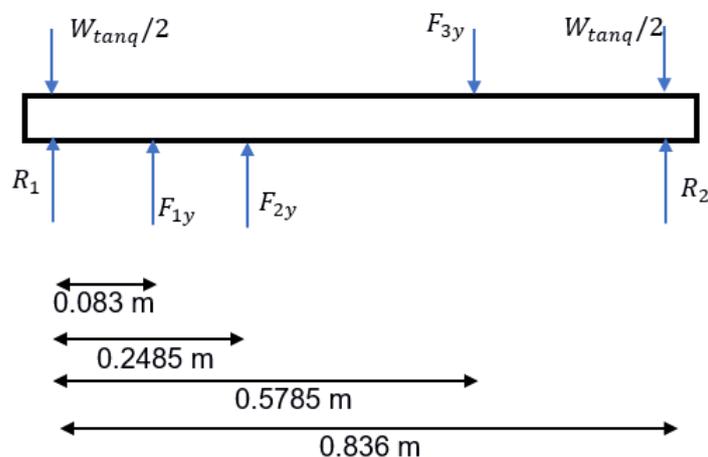


Figura 2.24 Fuerzas que actúan sobre el eje (elaboración propia).

Donde:

$$W_{tanq} = 620.34 \text{ N}$$

$$F_{1y} = 47.46 \text{ N}$$

$$F_{2y} = 26.42 \text{ N}$$

$$F_{3y} = 25.28 \text{ N}$$

Para hallar la una de las reacciones de apoyo de la base sobre el eje, en el apéndice H se realiza una sumatoria de momento con sentido anti horario positivo, en este caso se calcula R_2 . Realizando una sumatoria de fuerzas verticales, se obtiene la reacción R_1

A continuación, se realiza los cálculos de corte y momento para hallar el máximo momento flector sobre el eje.

Por lo tanto, se tiene que, a lo largo del eje debido a las fuerzas y reacciones que actúan sobre ella, el momento máximo de flexión está ubicado entre una distancia de 0.2485 m y 0.5785 m medido desde la reacción R_1 de apoyo sobre la base, cuyo valor del momento es de 5.448 Nm.

A continuación, se procede a calcular cada uno de los factores que influyen en la determinación del límite de la resistencia a la fatiga.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e'$$

Finalmente, se tiene la resistencia a la fatiga multiplicando todos los factores:

$$S_e = (0.61)(0.969)(1)(1.01)(0.814)(1.288)(282.5)$$

$$S_e = 191.01 \text{ MPa}$$

Para este caso que se requiere de diseñar un eje, se recomienda la siguiente fórmula más simplificada, para casos de valores de esfuerzo de flexión y torsión constante.

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(k_f M_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [3(k_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

$$d = 0.015 \text{ m}$$

Con un valor de factor de seguridad de 4, que es bastante aceptable, se tiene que el diámetro menor recomendado sea de 15 mm, el diámetro mayor es de 20 mm por cuestiones de diseño debido a las paletas que estarán soldadas en el eje.

2.6.12 Cálculo de rodamientos

Los cálculos realizados para la selección del rodamiento se encuentran en el apéndice J. En base a los resultados, se concluye que los rodamientos seleccionados son apropiados. Se utilizará un rodamiento en cada extremo del eje y del contenedor. Del catálogo se toman sus características, son las siguientes.

- Rodamientos de bolas para giro de eje motriz.

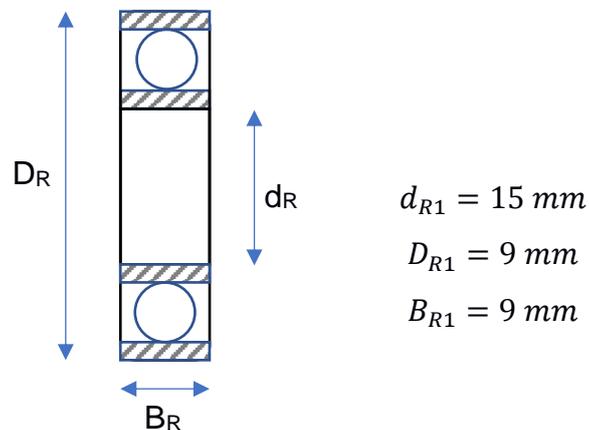


Figura 2.25 Dimensiones de rodamientos del eje (elaboración propia).

- Rodamientos de bolas para giro de contenedor.

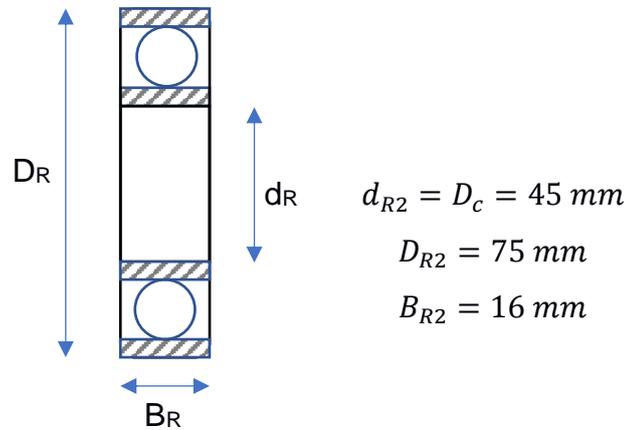


Figura 2.26 Dimensiones de rodamientos del contenedor (elaboración propia).

2.6.13 Cálculo de dimensiones de tapa del contenedor y acoples

- Acoples o extremos

El contenedor posee una tapa como se muestra en la figura 2.28, lo cual permite extraer todos los componentes en su interior y desensamblar el sistema.

El conjunto posee unos extremos o acoples que sobresalen del mismo, estos permitirán su rotación, pero principalmente son los componentes que se apoyaran en la base o estructura que soporta todo el equipo. Dichos acoples se encajarán dentro de rodamientos.

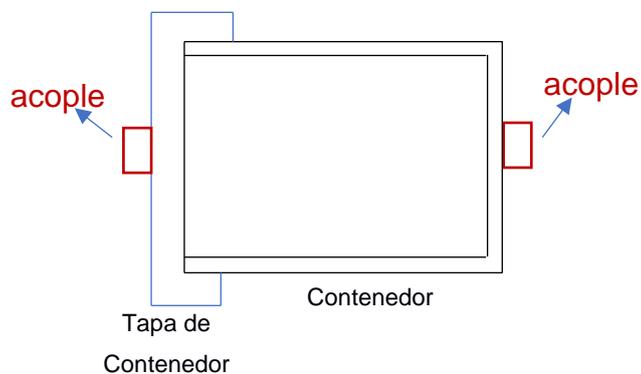


Figura 2.27 Conjunto tapa-contenedor, con acoples (elaboración propia).

Al mismo tiempo estos extremos contienen al eje y sus respectivos rodamientos en su interior, tal como muestra la figura 2.29. A continuación se determina las dimensiones de estos acoples circulares (área rayada) para asegurar que no fallen, ya que estarían soportando toda la carga.

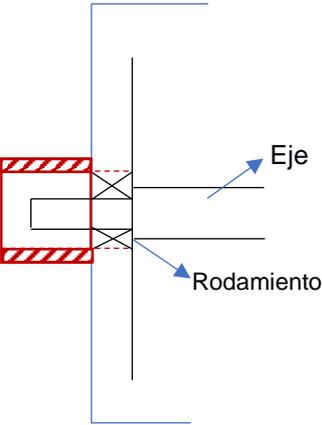


Figura 2.28 Ubicación de acople externo y el eje con su rodamiento (elaboración propia).

Se modela este componente como un tubo hueco empotrado en la tapa del tanque y se determina un valor para D_c con el cual no se produzca una falla en este elemento.

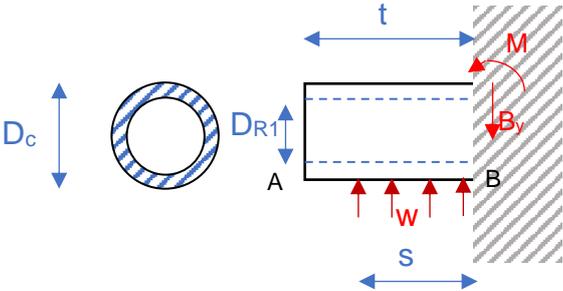


Figura 2.29 Modelamiento de acoples (elaboración propia).

Se aplica un análisis de falla estática, considerando el material como frágil. Previamente se sabe que $D_{R1} = 32mm$ y se toma $t = 30mm; s = 20m$.

Por lo tanto, con un diámetro de $D_c = 45mm$ no habrá problemas de falla.

Un análisis similar se realiza para la parte de la tapa del contenedor que soporta también toda la carga, y está hecha del mismo material. Se muestra en la figura 2.31 (área rayada), se debe determinar el espesor adecuado e_t .

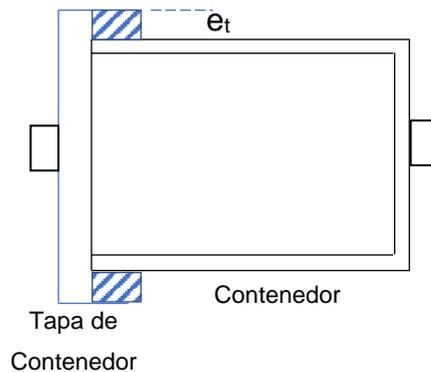
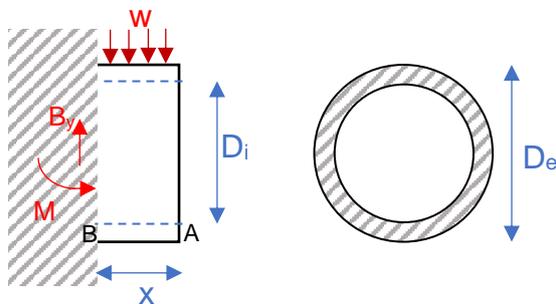


Figura 2.30 Espesor de tapa de contenedor (elaboración propia).

De la misma manera considerando esta sección como un tubo hueco empotrado.



$$D_i = 2A_p = 520 \text{ mm}$$

Consideramos:

$$x = 30 \text{ mm}$$

Además:

$$w = \frac{R_{te}}{30 \text{ mm}} = 16.28 \text{ N/mm}$$

Figura 2.31 Modelamiento para espesor de tapa del contenedor (elaboración propia).

Sección crítica \rightarrow B

Por lo tanto, con un diámetro de $D_e = 544 \text{ mm}$ no habrá problemas de falla, y el espesor de la tapa es 12 mm

$$e_t = \frac{D_e - D_i}{2} = \frac{544 - 520}{2} = 12 \text{ mm}$$

Por otro lado, el espesor de la tapa e_{ta} se lo puede considerar igual al espesor del contenedor, es decir, 8 mm.

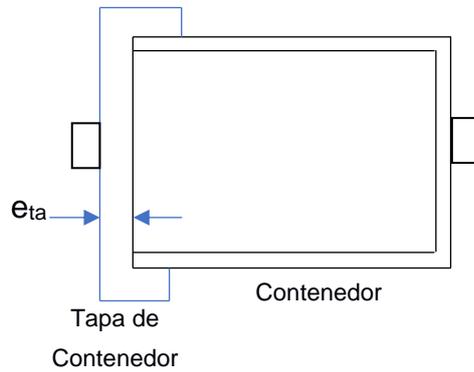


Figura 2.32 Espesor de la cara vertical de la tapa (elaboración propia).

2.6.14 Cálculo de tornillos

Estas juntas corresponden a la unión del contenedor con su tapa frontal. Los pernos o tornillos estarán ubicados sobre cada lado del octágono y se probará el uso de 2 tornillos por lado, tal como se muestra en la figura 2.40.

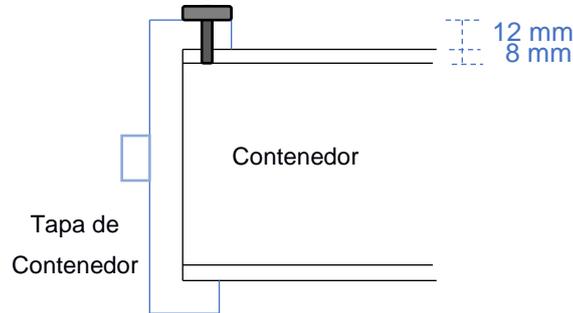


Figura 2.33 Unión de tapa y cuerpo del contenedor mediante tornillos (elaboración propia).

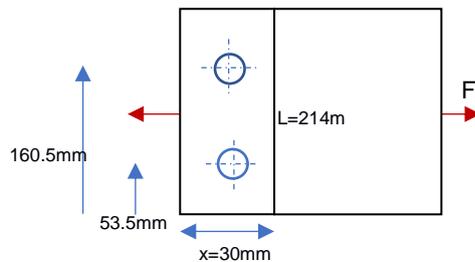


Figura 2.34 Ubicación de tornillos en cada cara octagonal del contenedor (elaboración propia).

Particularmente estos tornillos o pernos estarían sometidos solo a cortante, ya que las fuerzas verticales están soportadas por la tapa, la cual forma una especie de encaje, transmitiendo a su vez la carga a los apoyos de la base, lugar donde se acoplan los extremos del contenedor.

Teóricamente la fuerza F no debería existir, dado que sobre el sistema no actuarían fuerzas horizontales, pero debido a posibles vibraciones en esa dirección y consecuente un movimiento brusco, se decide asegurar esa unión mediante tornillos.

Considerando $F = R_{te} = 325.6 \text{ N}$ como la máxima carga que se puede dar.

Se implementa tornillos de cabeza hexagonal 3/8", grado 2, entonces mediante un análisis de falla estática, realizado en el apéndice L, no habrá problemas si se usa estos tornillos, y en las posiciones indicadas previamente.

2.6.15 Cálculo del sistema de potencia

De secciones previas tenemos:

El torque neto requerido en el eje es:

$$T = Fr$$

$$T = 23.67 \text{ Nm}$$

Para $n = 20 \text{ RPM}$ en el eje:

$$P = \omega T = 49.57 \text{ W} = 0.067 \text{ hp}$$

Se Toma el doble de este valor ya que motores eléctricos de baja potencia es difícil encontrar en el mercado y son más caros.

$$P_{motor} = 0.12 \text{ hp} = 1/8 \text{ hp}$$

Considerando que el motor tiene una velocidad de 1120 RPM, entonces debemos diseñar un sistema de reducción para obtener una velocidad de solo 20 RPM en el eje.

Se implementará un sistema de reducción con engranes.

Asumiendo que el torque el torque nominal de dicho motor es 0.765Nm, el torque que se obtendría en la salida del reductor (entrada del eje) sería:

$$T_1 * n_1 = T_2 * n_2$$

$$T_2 = \frac{T_1 * n_1}{n_2} = 17kNm$$

Esto es bastante aceptable.

2.6.16 Sistema de humidificación

Dicha humedad se agregará por medio de humidificadores sumergidos en un contenedor de agua que generarán vapor a una temperatura igual a la de ebullición del agua a presión atmosférica, o un poco mayor a aquella.

Esto requiere de un pequeño ventilador que provea un flujo de aire capaz de llevar la humedad correspondiente hacia el interior del contenedor de materia orgánica. Se establece el siguiente sistema.

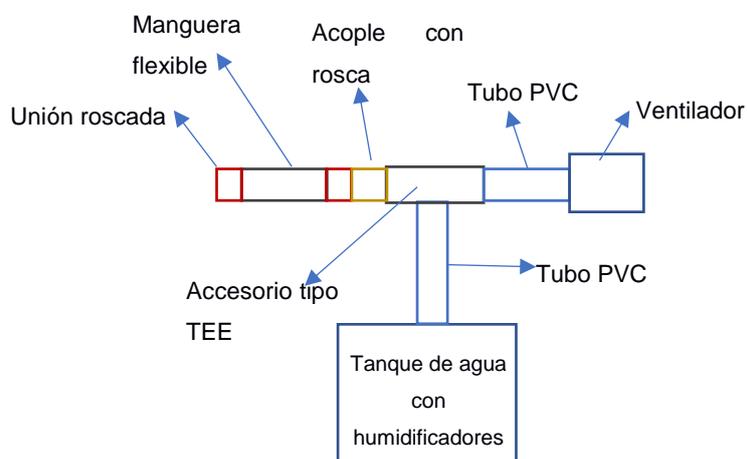


Figura 2.35 Sistema de humidificación (elaboración propia).

El vapor generado en el tanque de agua asciende por la única vía posible, y posteriormente es conducido por el flujo de aire.

Asumiendo que el aire obtendrá una humedad relativa de $\phi = 90\%$ y su temperatura aumenta $T = 100^\circ\text{C}$, se puede estimar la temperatura de rocío de este aire humidificado.

$\phi = 90\%$, $T = 100^\circ\text{C}$

$$P_v = \phi * P_g @ 100^\circ\text{C}$$

De la tabla de propiedades del agua saturada (apéndice N) se halla que la presión de saturación P_g a 100°C es 101.42kPa .

$$P_v = (0.90)(101.42\text{ kPa}) = 91.278\text{ kPa}$$

Por lo tanto, la temperatura de rocío es:

$$T_{pr} = T_{sat @ P_v}$$

De la tabla de propiedades del agua saturada $T_{sat @ P_v} = 95.5^\circ\text{C}$

Dado que la materia orgánica se encontrará aproximadamente a una temperatura de 60°C o menor, entonces:

$$T_{materia\ orgánica} \ll T_{pr}$$

Por lo cual al ingresar el aire humidificado al contenedor y hacer contacto con la materia orgánica, se producirá la condensación del agua generando la humidificación casi de manera instantánea.

No se consideran las pérdidas de calor o pérdidas de presión en tuberías, ya que este sistema es de pequeñas dimensiones, los componentes serán de pocos centímetros de longitud, de manera que el vapor llegue rápidamente al interior del contenedor.

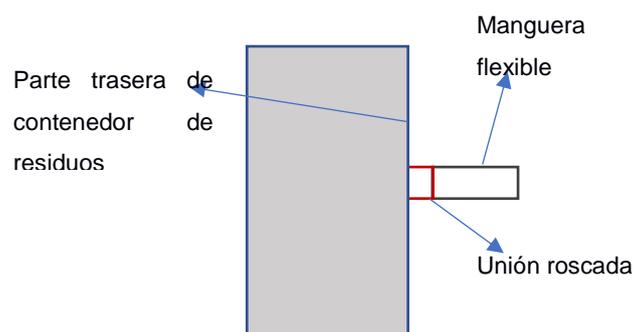


Figura 2.36 Conexión del sistema de humidificación y tanque (elaboración propia).

La unión roscada con manguera permitirá desconectar el sistema de humidificación del contenedor cuando este deba girar para retirar el material.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presenta los valores obtenidos a partir de los cálculos y modelos matemáticos desarrollados para cada subsistema. Se describe la notación de cada variable en la forma como pueden ser identificadas en la sección de cálculos.

Se incluye resultados obtenidos a partir de simulaciones físicas, en las cuales se pone en manifiesto la operación de los componentes o subsistemas en las condiciones más realistas posible, de manera que se verifique su correcto desempeño o existencia de alguna vulnerabilidad.

De esta manera, posteriormente se compara con los valores obtenidos manualmente o mediante la teoría, esperando una correcta concordancia, para así obtener un sistema definitivo, del cual se genere información importante como planos y guías de construcción, materiales, equipos, así también como planes de mantenimiento del sistema para una correcta operación y larga vida útil.

Finalmente se evalúa el desempeño del sistema, tanto técnica, como económicamente, con el fin de determinar sus ventajas, sobre algún sistema similar en existencia en el mercado.

3.1 Resultados de parámetros del compostaje

Los valores relacionados netamente al proceso de compostaje se muestran a continuación, los mismo que son producto de características previamente establecidas para el proceso.

Tabla 3.1 Resultados de parámetros del compostaje

Parámetro/descripción	Notación	Valor	Unidades
Masa de residuos sólidos diarios	RSD	2.5	kg/día
Número de días de recolección de residuos	# días	17	días
Masa o capacidad total	M_{RSO}	42.0	kg
Volumen de pila	V_{RSO}	0.14	m ³
Relación C/N de la mezcla	C/N	27.5	-
Humedad promedio de la mezcla	%HR _m	49.5	%
Masa que se descompone rápidamente	SVB _R	12.5	kg
Masa que se descompone lentamente	SVB _L	23.2	kg
Tasa de degradación de sólidos	dSVB/dt	0.898	Kg/día

Como se analizó en secciones previas, se establecieron los sustratos que serían parte de la mezcla de compost, y se realizó una asignación de masa, lo cual requirió hacer iteraciones, el resultado final es el siguiente:

Tabla 3.2 Componentes de la mezcla con su respectiva masa.

	Sustrato	Masa (kg)
40 % de la masa total		
S ₁	Residuos de frutas	3.5
S ₂	Residuos de tomates	3.5
S ₃	Residuos vegetales	4
S ₄	Basura (desperdicio de comida)	5.8
30.24 % de masa total		
S ₅	Hierba general	0.2
S ₆	Paja general	2
S ₇	Maderas (astillas, virutas, etc.)	3
S ₈	Hojas sueltas y secas	3
S ₉	Recortes de arbustos	3
S ₁₀	Aserrín	1.5
29.76 % de la masa total		
S ₁₁	Estiércol de vaca	6.5
S ₁₂	Estiércol de ave	6

3.2 Resultados de parámetros físico-químicos

Se determinó la masa de oxígeno requerido por cada gramo de sustrato, lo mismo se realizó con la generación de dióxido de carbono.

Tabla 3.3 Resultados de oxígeno requerido por gramo de sustrato.

	Sustrato	<i>g de O₂/g de S</i>
S ₁	Residuos de frutas	0.45
S ₂	Residuos de tomates	0.11
S ₃	Residuos vegetales	0.18
S ₄	Basura (desperdicio de comida)	0.11
S ₅	Hierba general	4.36
S ₆	Paja general	1.77
S ₇	Maderas (astillas, virutas, etc.)	7.01
S ₈	Hojas sueltas y secas	0.68
S ₉	Recortes de arbustos	0.67
S ₁₀	Aserrín	11.02
S ₁₁	Estiércol de vaca	0.01
S ₁₂	Estiércol de ave de corral	0.23

Tabla 3.4 Dióxido de carbono generado por gramo de sustrato.

	Sustrato	<i>g de CO₂/g de S</i>
S ₁	Residuos de frutas	0.59
S ₂	Residuos de tomates	0.16
S ₃	Residuos vegetales	0.24
S ₄	Basura (desperdicio de comida)	0.13
S ₅	Hierba general	6.03
S ₆	Paja general	2.05
S ₇	Maderas (astillas, virutas, etc.)	9.58
S ₈	Hojas sueltas y secas	0.92
S ₉	Recortes de arbustos	0.91
S ₁₀	Aserrín	15.13
S ₁₁	Estiércol de vaca	0.20
S ₁₂	Estiércol de ave de corral	0.27

3.3 Resultados de parámetros de aireación y humidificación.

Estos valores son obtenidos a partir de los resultados físico-químicos y permitirán seleccionar un ventilador adecuado a partir del flujo de aire requerido.

Tabla 3.5 Resultados del sistema de aireación.

Parámetro/descripción	Notación	Valor	Unidades
Oxígeno requerido por gramo de mezcla	O_2	26.57	gO ₂ /g mezcla
Oxigenación total requerida	O_2REQ	1110.0	kg O ₂
Masa de aire requerido	$aire_{REQ}$	4764.0	kg aire
Flujo de aire requerido	\dot{V}_{aire}	288.0	m ³ /h
Periodos de aireación	Δt	30.0	min/día
Masa de agua de humidificación requerido	$m_{agua\ hum}$	3.8	kg
Volumen de agua de humidificación requerido	$V_{agua\ hum}$	3.8	L
Tasa de masa de agua de humidificación	$\dot{m}_{agua\ hum}$	5.0×10^{-4}	kg/s
Flujo de agua de humidificación	$\dot{V}_{agua\ hum}$	5.0×10^{-7}	m ³ /s

3.4 Resultados de cálculos térmicos

Se tabulan los valores de pérdida de calor por los distintos modos de transferencia, para finalmente determinar el calor que se hace necesario agregar para alcanzar las condiciones establecidas previamente. Dicha energía calorífica se generará a partir de una o varias resistencias eléctricas en el interior del contenedor.

Tabla 3.6 Resultados de cálculos térmicos.

Parámetro/descripción	Notación	Valor	Unidades
CO ₂ generado por gramo de mezcla	CO ₂	36.21	g CO ₂ /g mezcla
CO ₂ total generado	CO ₂ GEN	1.52x10 ⁶	g CO ₂
Tasa de calor de reacción	\dot{q}_r	2.64x10 ³	kcal/h
Tasa de calor perdido por aireación	\dot{q}_a	1.78x10 ³	kcal/h
Tasa de calor perdido por conducción	\dot{q}_{cond}	856.4	kcal/h
Tasa de calor perdido por convección	\dot{q}_{conv}	69.24	kcal/h
Tasa de masa de agua generada	H ₂ O	8.64x10 ⁻⁵	kg/s
Calor perdido por evaporación de agua	\dot{q}_w	190.8	kcal/h
Pérdida de calor en sistema eje-paletas	\dot{q}_{eje}	10.57	kcal/h
Tasa de calor requerido para el sistema	\dot{q}_{agr}	2608.3	kcal/h
Potencia de elemento de calefacción	P _{cal}	3.03	kW

3.5 Resultados de diseño del contenedor o tanque

El contenedor tiene una sección transversal de forma octogonal, y consta a su vez de una tapa plana ubicada en su parte superior, y es por donde ingresará y extraerá el material orgánico.

Su geometría, así también como otras variables de importancia en su diseño se tabulan a continuación.

Tabla 3.7 Resultados del diseño del contenedor.

Parámetro/descripción	Notación	Valor	Unidades
Apotema	A_p	0.26	m
Longitud de lado del octágono	L	0.214	m
Longitud de contenedor	h	0.84	m
Volumen	V_{max}	49.4	gal
Espesor de pared	e	8	mm
Material	PVC rígido		
Resistencia a la fluencia del material	S_y	55	MPa
Presión del contenido	P	382	Pa

3.6 Resultados de simulación de esfuerzos en el tanque

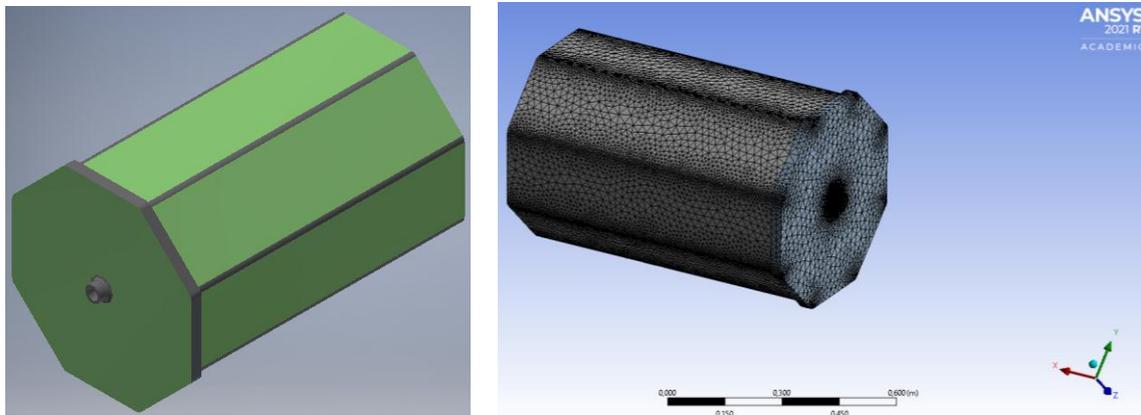


Figura 3.1 Contenedor simulado en software (elaboración propia).

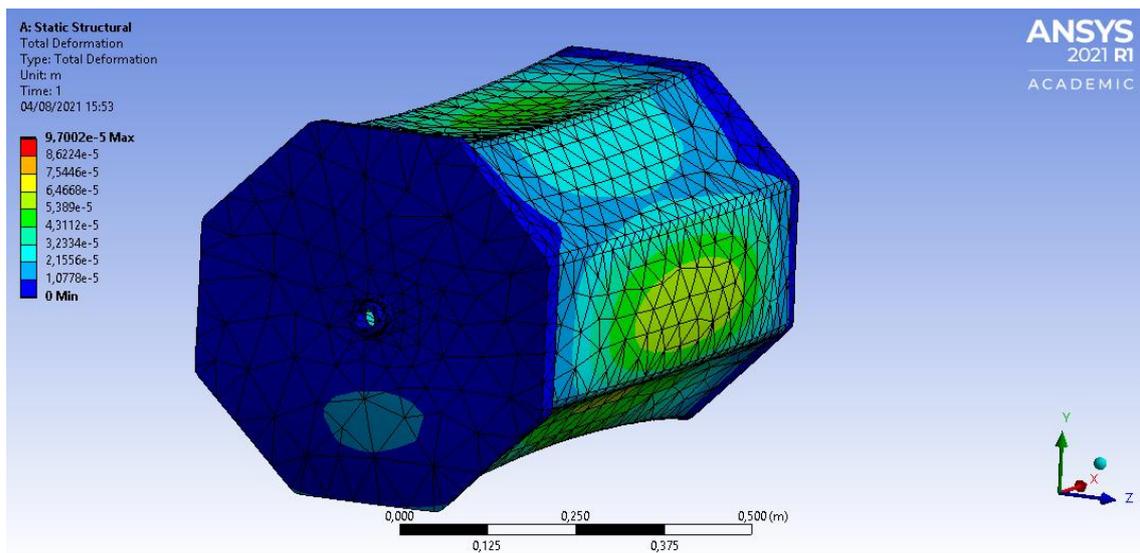


Figura 3.2 Deformación total del contenedor (elaboración propia).

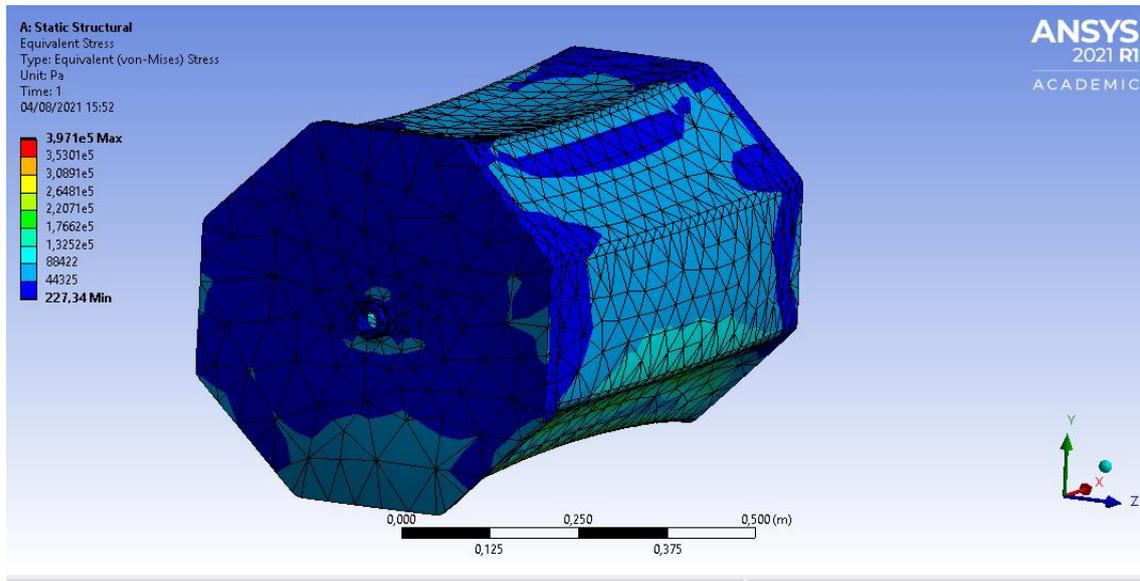


Figura 3.3 Esfuerzo equivalente en el contenedor (elaboración propia).

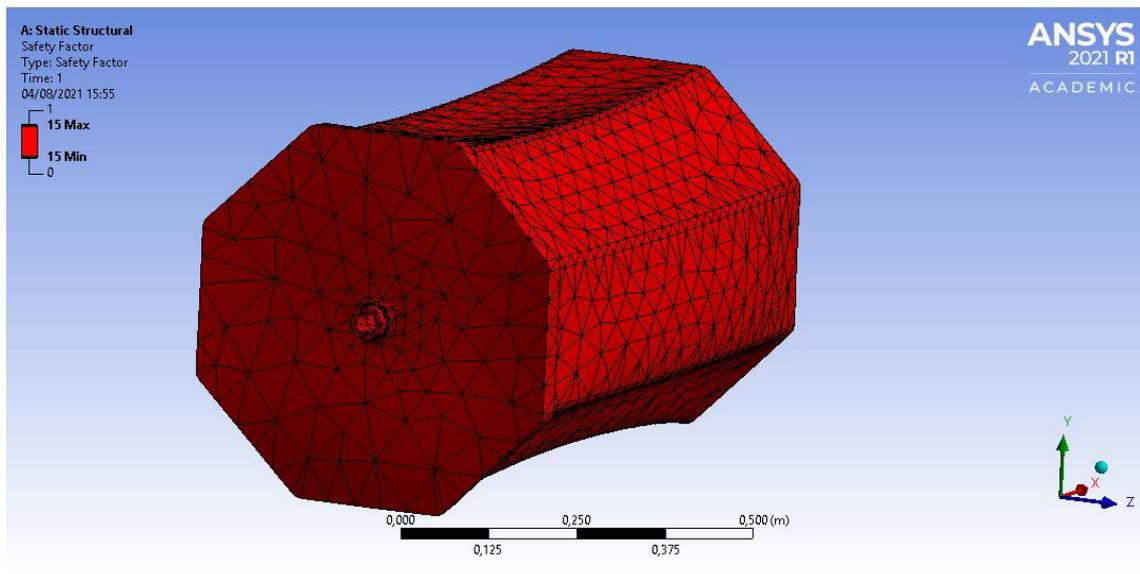


Figura 3.4 Factor de seguridad del contenedor (elaboración propia).

El mínimo factor de seguridad es 15 al igual que el máximo, lo cual es muy aceptable, pero Ansys asigna un color rojo por default al modelo, correspondiente al mínimo.

Adicionalmente también se evaluó el esfuerzo principal máximo y esfuerzo cortante máximo.

Tabla 3.8 Resultados de simulación de contenedor.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio	Unid.
Deformación total	0	9.7002×10^{-5}	2.1852×10^{-5}	m
Esfuerzo equivalente de Von Mises	227.34	3.971×10^5	63850	Pa
Esfuerzo principal máximo	-91454	3.3032×10^5	28197	Pa
Esfuerzo cortante máximo	131.24	2.2875×10^5	35537	Pa
Factor de seguridad	15	15	15	-

3.7 Resultados de diseño de paletas

A continuación, se muestra la distribución que se estableció para las paletas a lo largo del eje. Así mismo se muestran sus correspondientes dimensiones, distancias de separación entre estas, y distancias de separación **con respecto a los límites interiores del contenedor**.

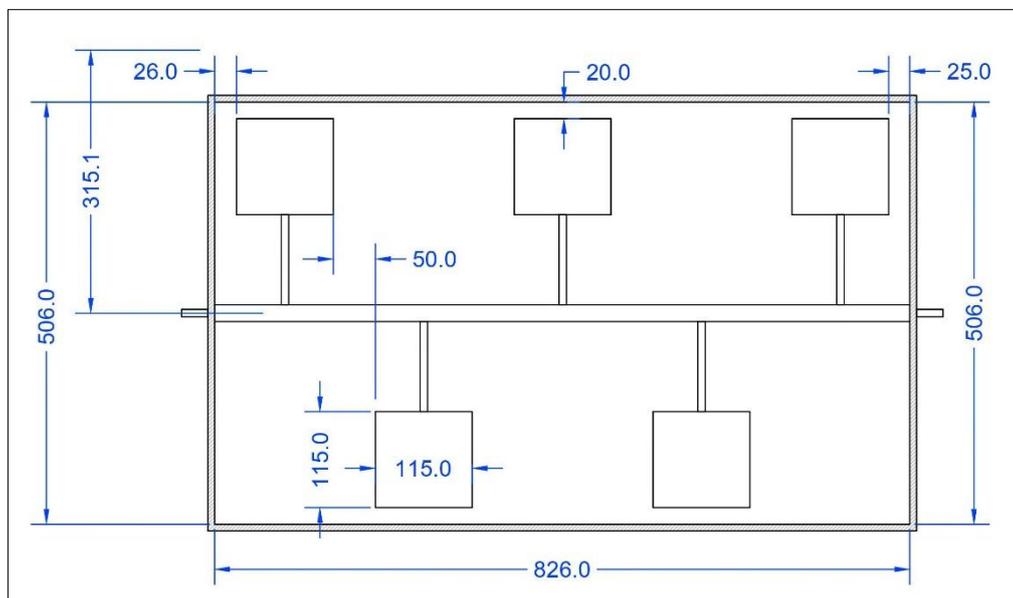


Figura 3.5 Distribución de paletas dentro del contenedor (Elaboración propia).

Denominamos “paleta” al componente que removerá el material en el interior del contenedor, mientras que al hablar de “varilla de unión” se hace referencia al componente que une la paleta cuadrada con el eje motriz principal. En este caso la varilla es de sección circular.

De esta manera el sistema de paletas estará integrado por esos dos componentes. A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.9 Resultados del diseño de paletas.

Parámetro/descripción	Notación	Valor	Unidades
Separación angular	ϕ	72	°
Largo y ancho de paleta	-	11.5x11.5	cm
Separación entre paletas	-	5.0	cm
Número de paletas	-	5	-
Fuerza sobre paleta 1	F_1	58.67	N
Fuerza sobre paleta 2	F_2	44.95	N
Fuerza sobre paleta 3	F_3	31.25	N
Material de paletas	Acero AISI/SAE 1045		
Longitud de varilla de unión	a	17.55	cm
Carga máxima sobre varillas de unión	F	58.67	N
Diámetro de varilla de unión	d	10.0	mm
Radio de unión de varilla y eje motriz	r	3.0	mm
Esfuerzo máximo en varillas de unión	σ_{max}	105.0	MPa
Esfuerzo alterno en varillas de unión	σ_a	52.5	MPa
Esfuerzo medio en varillas de unión	σ_m	52.5	MPa
Factor de seguridad en varillas de unión	n	2	-
Material de varillas de unión	Acero AISI/SAE 1045		

3.8 Resultados de diseño del eje

Se realizó el análisis de los siguientes parámetros para el diseño del eje, encargado de realizar el movimiento rotacional con ayuda de la potencia del motor conectada al eje. En este se encuentra acoplada las paletas, distribuida de manera uniforme a lo largo del diámetro mayor, encargadas de remover el contenido del tanque. Sobre el diámetro menor del eje, se encuentra el peso total del tanque y las debidas reacciones ejercidas por la base que soporta todo el sistema. En base a todas estas especificaciones, se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

Tabla 3.10 Resultados del diseño del eje motriz.

Parámetro/descripción	Notación	Valor	Unidades
Torque requerido	T	23.67	Nm
Revoluciones por minuto	N	20	RPM
Potencia en eje	P_{motor}	0.12	hp
Fuerza 1 en y sobre el eje	F_{1y}	47.46	N
Fuerza 2 en y sobre el eje	F_{2y}	26.42	N
Fuerza 3 en y sobre el eje	F_{3y}	25.28	N
Peso total del tanque	W_{Tc}	620.34	N
Momento flector máximo	M	5.448	Nm
Material del eje	Acero AISI/SAE 1045		
Resistencia a la fluencia del material	S_y	310	MPa
Resistencia última del material	S_{ut}	565	MPa
Diámetro menor	d	15	mm
Diámetro mayor	D	20	mm
Radio de muesca	r	2.5	mm
Factor de seguridad	n	4	-

3.9 Resultados de simulación de esfuerzos en sistema eje-paletas

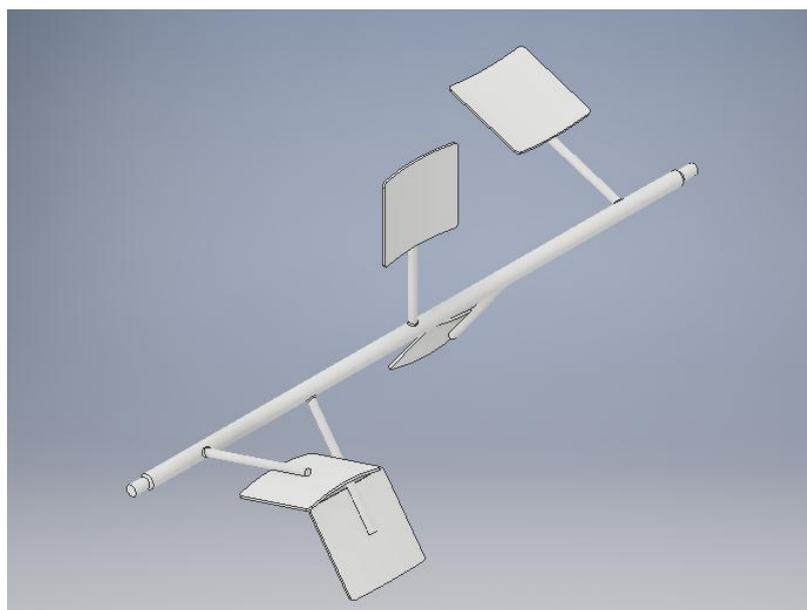


Figura 3.6 Sistema eje-paletas diseñado

Este sistema se simula por separado, es decir, se realiza un análisis para las paletas sometiéndola a la máxima fuerza que se da durante la operación, y otro análisis exclusivamente para el eje, aplicando todas las fuerzas sobre el mismo, las cuales fueron determinadas en el capítulo 2. Aplicando las debidas condiciones el resultado final es equivalente a simular el conjunto.

El resultado para las paletas es el siguiente:

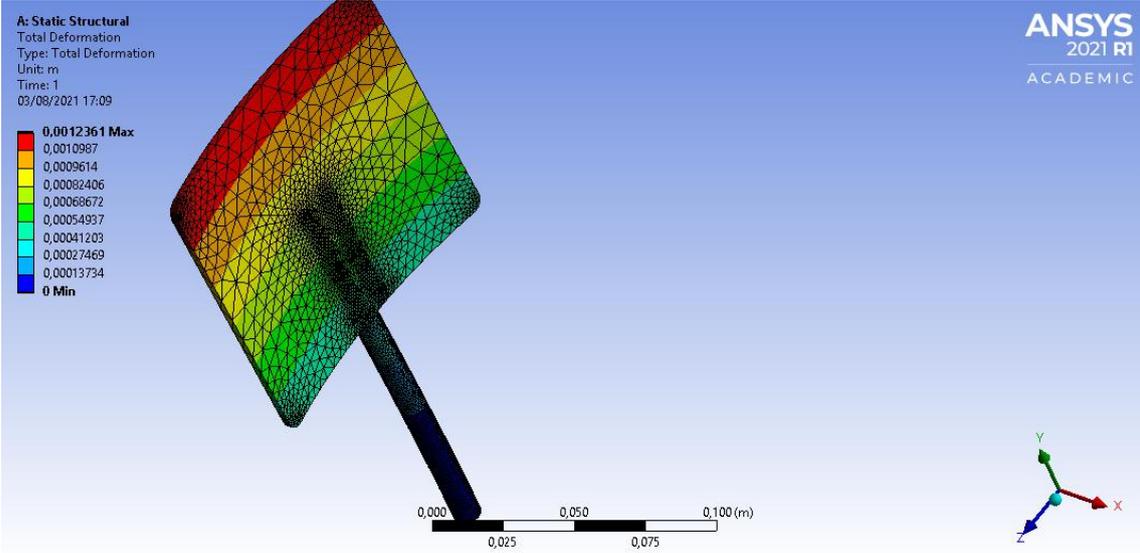


Figura 3.7 Deformación total de las paletas (elaboración propia).

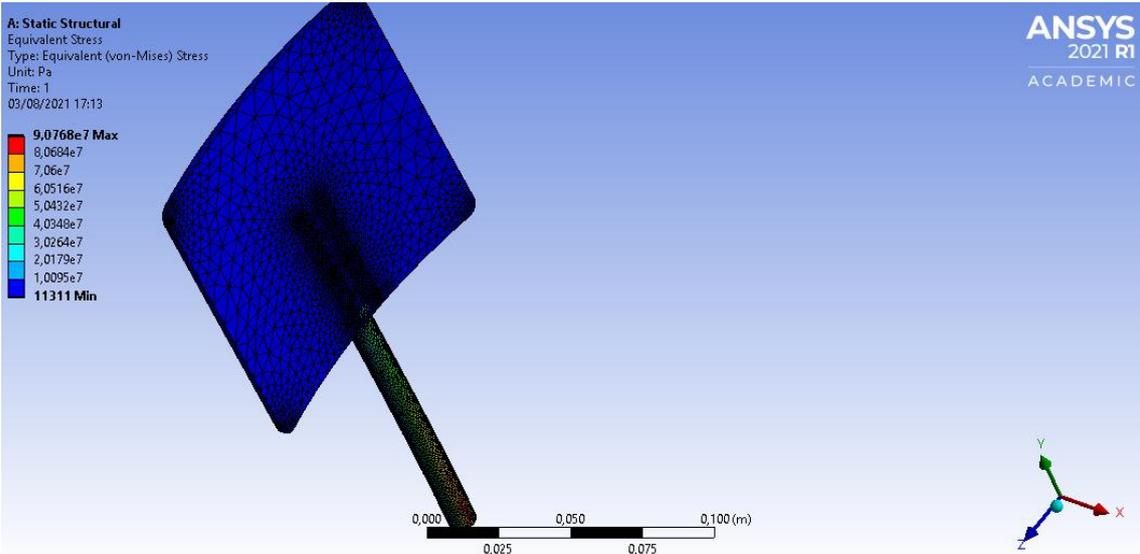


Figura 3.8 Esfuerzo equivalente en las paletas (elaboración propia).

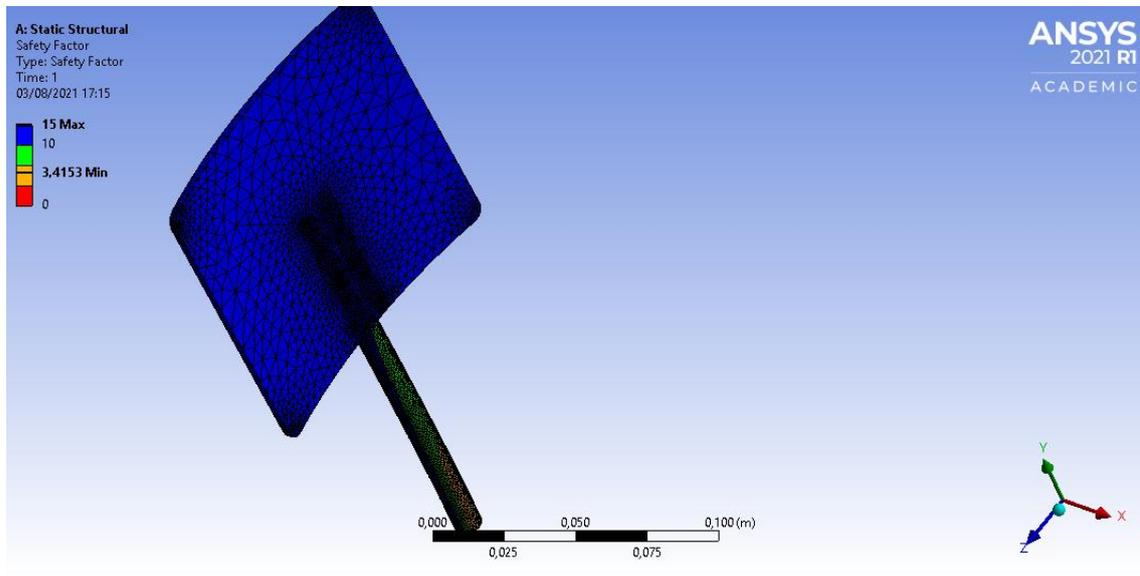


Figura 3.9 Factor de seguridad del contenedor (elaboración propia).

Adicionalmente también se evaluó el esfuerzo principal máximo y el esfuerzo cortante máximo.

Tabla 3.11 Resultados de simulación de las paletas.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio	Unid.
Deformación total	0	1.2361×10^{-3}	5.6125×10^{-3}	m
Esfuerzo equivalente de Von Mises	1.1311×10^4	9.0768×10^7	7.37×10^6	Pa
Esfuerzo principal máximo	-3.4057×10^7	1.06×10^8	3.5865×10^6	Pa
Esfuerzo cortante máximo	6.4400×10^3	4.6226×10^7	3.8347×10^6	Pa
Factor de seguridad	3.4153	15	14.315	-

El resultado al simular el eje se muestra a continuación.

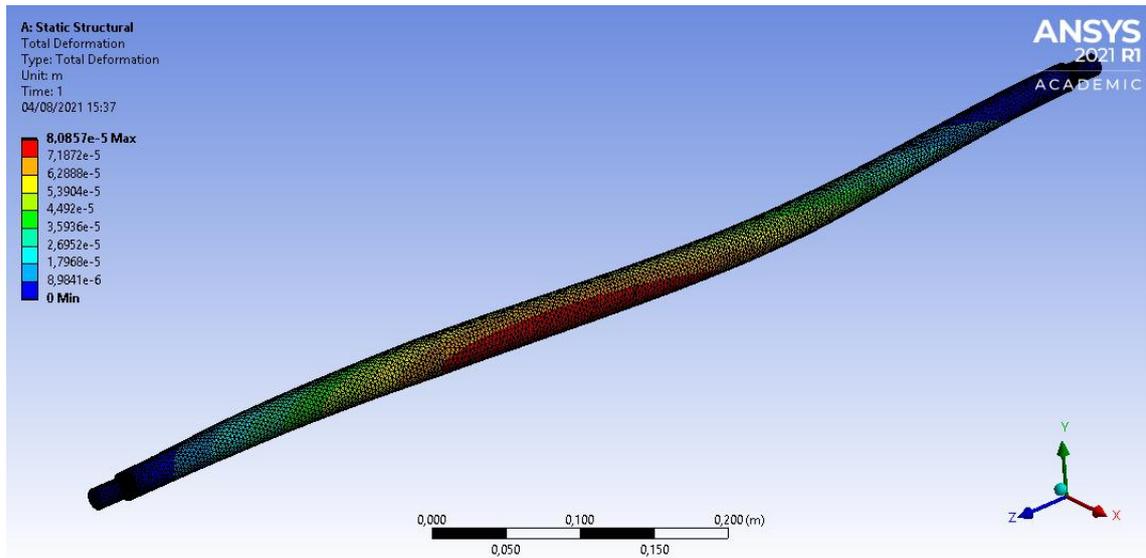


Figura 3.10 Deformación total del eje (elaboración propia).

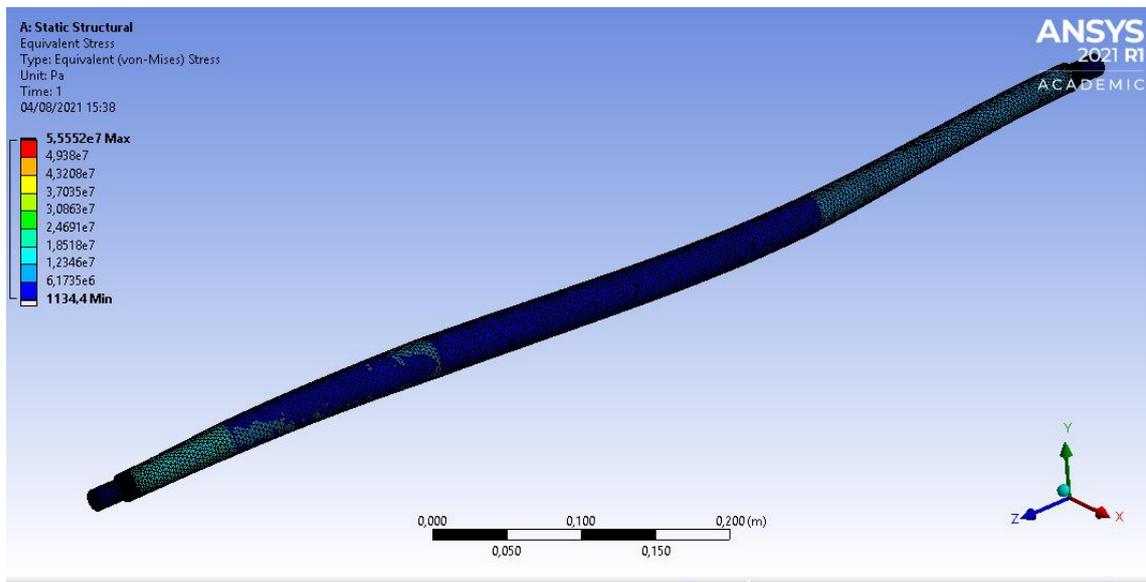


Figura 3.11 Esfuerzo equivalente en las paletas (elaboración propia).

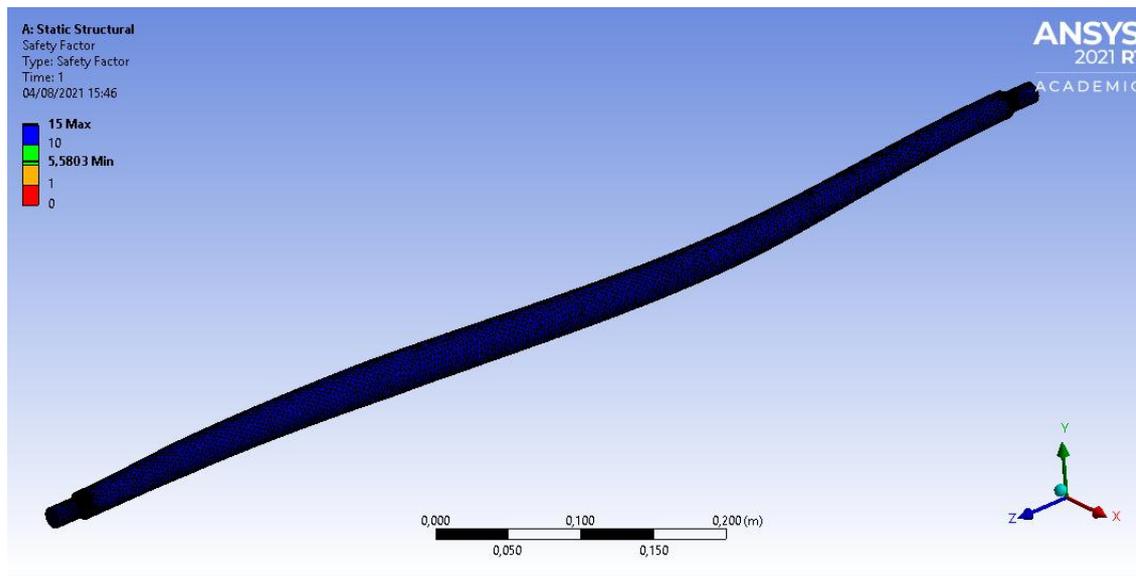


Figura 3.12 Factor de seguridad del eje (elaboración propia).

Adicionalmente también se evaluó el esfuerzo principal máximo y el esfuerzo cortante máximo.

Tabla 3.12 Resultados de simulación del eje.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio	Unid.
Deformación total	0	8.0857×10^{-5}	2.8474×10^{-5}	m
Esfuerzo equivalente de Von Mises	1134.4	5.5552×10^7	6.1544×10^6	Pa
Esfuerzo principal máximo	-3389.6	4.7229×10^7	3.5076×10^6	Pa
Esfuerzo cortante máximo	612.35	3.1348×10^7	3.5019×10^6	Pa
Factor de seguridad	5.5803	15	14.892	-

Cabe resaltar que las paletas estarán unidas al eje motriz mediante soldadura, formando un conjunto rígido con unión fija.

3.10 Resultados de diseño de estructura o base

En cada extremo del tanque, se encuentra la base, con forma tubular hueco, la cual soporta el peso total del tanque con el contenido, el eje y demás componentes que conforma la compostadora. La base ubicada en los extremos está compuesta por dos soportes, se tomó uno de ellos para realizar los respectivos cálculos y dar como resultado los siguientes parámetros:

Tabla 3.13 Resultados del diseño de la estructura o base.

Parámetro/descripción	Notación	Valor	Unidades
Carga axial	P	353.73	N
Ángulo de inclinación de la base	θ	68°	-
Material de la base	Aleación de aluminio N2011 T6		
densidad	ρ	2700	Kg/m ³
Diámetro exterior	d_o	25	mm
Espesor del tubo	e	1.5	mm
Módulo de elasticidad del material	E	69.5	GPa
Resistencia a la fluencia del material	S_y	169	MPa
Carga permisible	P_{perm}	1580	N
Factor de seguridad	n	4	-

3.11 Resultados de simulación de esfuerzos en la estructura

El diseño propuesto que servirá como soporte para el contenedor, así también como los diversos componentes que forman parte del sistema es el siguiente.

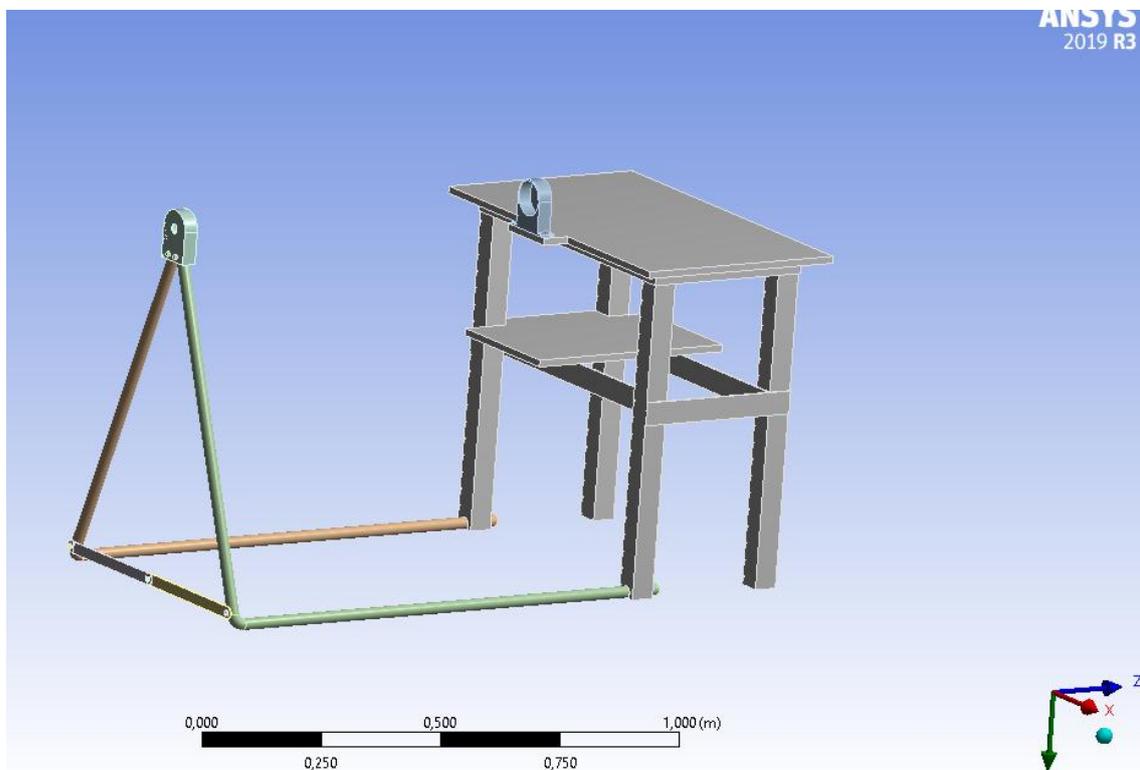


Figura 3.13 Modelo de estructura diseñada y simulada (elaboración propia).

Se aplicaron las debidas restricciones de movimiento y cargas sobre este modelo, correspondientes al peso de los elementos. Con todo ello, se procedió a realizar la simulación de la estructura y obtener resultados.

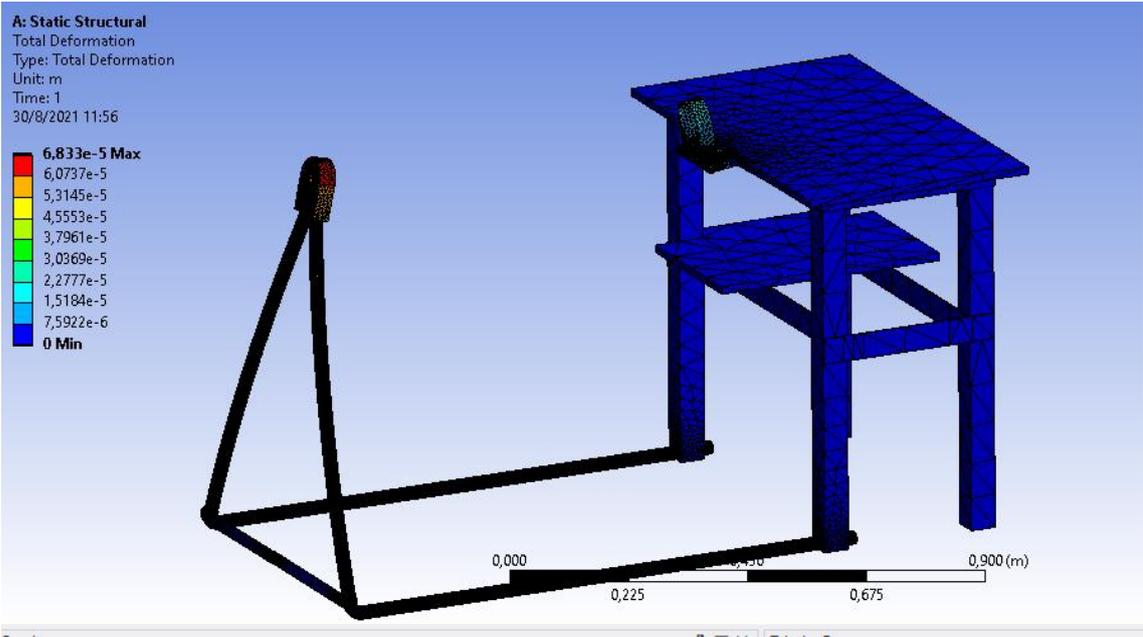


Figura 3.14 Resultados de la deformación máxima de la estructura simulada (elaboración propia).

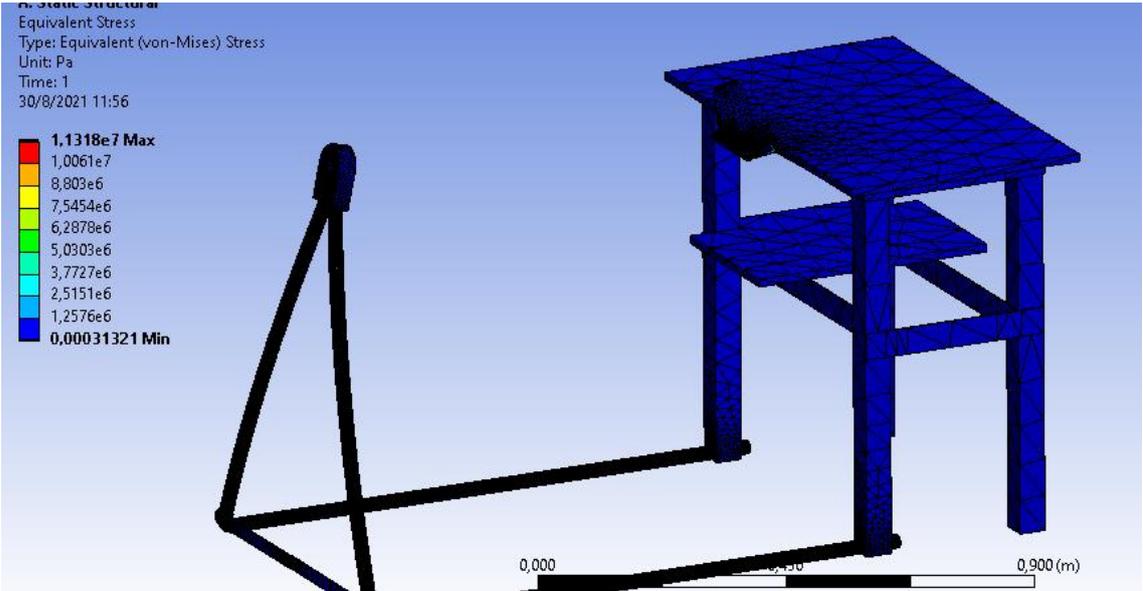


Figura 3.15 Resultados del esfuerzo máximo equivalente de la estructura (elaboración propia).

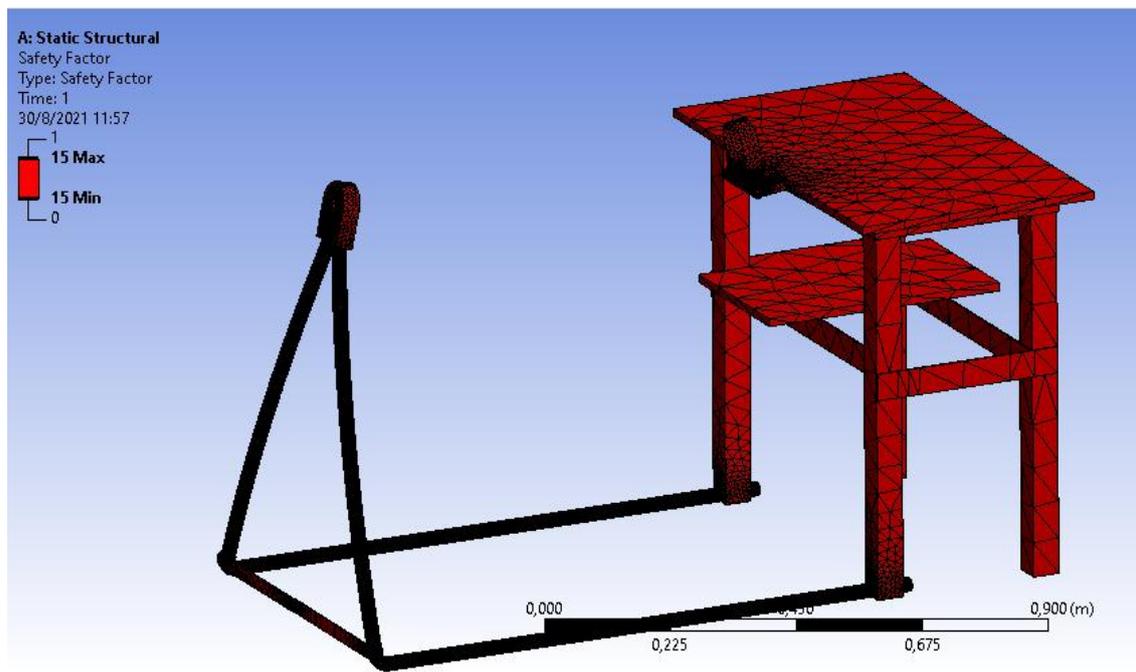


Figura 3.16 Resultados del factor de seguridad de la estructura simulada (elaboración propia).

El factor de seguridad es muy aceptable, a pesar de que el software muestra en color rojo el diseño por defecto, pero esto se debe a que el mínimo valor para este parámetro también es de 15.

A continuación, se tabula los valores de los parámetros mecánicos más significativos, cabe resaltar que también se evaluó el esfuerzo principal y cortante máximo.

Tabla 3.14 Resultados de la simulación de la estructura de soporte (elaboración propia).

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio	Unid.
Deformación total	0	6.833×10^5	1.3255×10^5	m
Esfuerzo equivalente de Von Mises	3.1321×10^4	1.1318×10^7	9.4936×10^5	Pa
Esfuerzo principal máximo	-1.7453×10^6	9.4176×10^6	88197	Pa
Esfuerzo cortante máximo	1.6667×10^4	6.5091×10^6	4.8957×10^5	Pa
Factor de seguridad	15	15	15	-

Como se puede observar los resultados obtenidos están dentro de los rangos permitidos para el diseño, es decir, tanto la deformación como esfuerzo en los elementos serán mínimos y no causarán una falla considerable en la estructura a causa de las cargas aplicadas.

3.12 Resultados del cálculo del sistema de potencia

El sistema de potencia lo compone el eje de transmisión, que es el que aplica energía a la materia orgánica para moverla, el motor eléctrico, el cual es la fuente que suministra la energía necesaria, pero también una caja de engranes, cuya función es reducir la velocidad rotacional de salida del motor, y esto es porque la velocidad del motor es de 1120 RPM, como se verá en la sección de selección de equipos y componentes, mientras que la velocidad requerida en el eje es de tan solo 20 RPM.

Por ello se calculó las características del tren de engranes que compondrán la caja reductora. Otra opción era implementar un reductor y acoplarlo al motor. Esto podría significar un mayor costo, y no hay garantías de que se pueda conseguir un equipo con las características requeridas. En este caso la relación de velocidad es de 56:1.

El torque de entrada en el eje es de aproximadamente 20.56 Nm, la caja de engranes permitirá al mismo tiempo aumentar dicho torque, en comparación con el valor que tiene en la salida del motor.

Tabla 3.15 Resultados del cálculo del sistema de potencia.

Parámetro/descripción	Notación	Valor	Unidades
Torque mínimo requerido en eje	T	20.56	Nm
Velocidad rotacional del eje	n	20	RPM
Potencia del motor	P_{motor}	0.12	hp
Velocidad del motor	N_{motor}	1120	RPM
Torque nominal del motor	T_{motor}	0,765	Nm
Torque de salida de caja reductora	T_{red}	17	kNm
Caja reductora			
Relación de transmisión	m_v	56:1	-

Número de etapas	$n. etapas$	4	-
Número de dientes de piñones	N_p	19	-
Número de dientes de engranes	N_g	52	-
Diámetro de paso de piñones	d_p	1.9	in
Diámetro de paso de engranes	d_g	5.2	in
Radio de paso de piñones	r_p	0.95	in
Radio de paso de engranes	r_g	2.6	in
Ángulo de presión de engranaje	ϕ	20	°
Paso diametral	P_d	10	dientes/in
Material de piñones y engranes	Acero AISI 1045		

3.13 Resultados del sistema de control

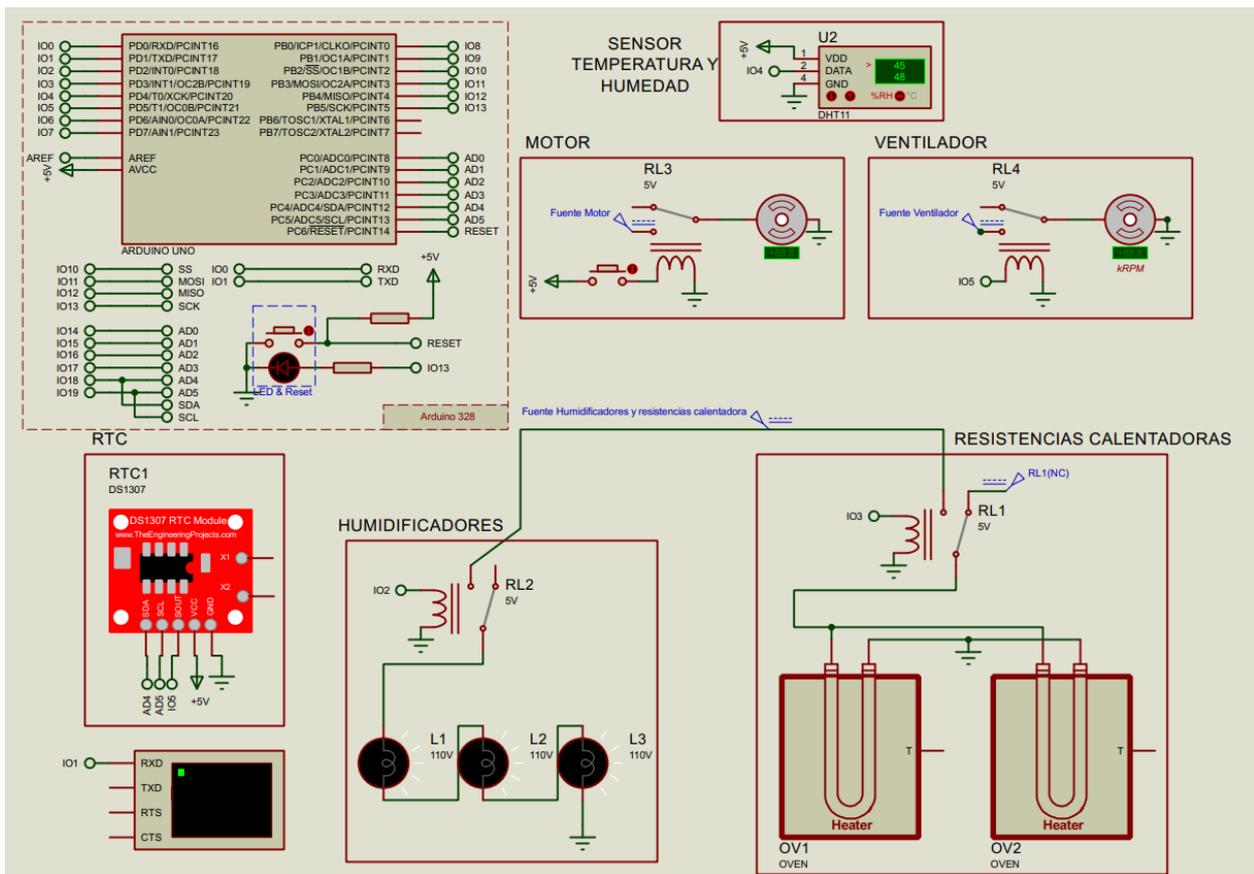


Figura 3.17 Sistema de control (elaboración propia).

Para el funcionamiento de todo el sistema del equipo compostador, se ha desarrollado el siguiente sistema de control para que trabaje bajo ciertas condiciones planteadas en base a todo el estudio que se ha realizado en este proyecto.

Es necesario recalcar que el sistema del equipo va a permanecer encendido durante la etapa termofílica, debido a que durante esta etapa se tienen que mantener ciertos rangos de temperatura, humedad y aireación que podrían variar con facilidad y afectaría en la calidad final del compost.

A continuación, se detalla cuáles son las condiciones en las que debe trabajar el sistema de control:

- Una vez accionado el botón de encendido del equipo, el motor que está acoplado al eje trabajará constantemente a una velocidad de 20 RPM durante todo el tiempo de duración de la etapa termofílica, hasta el momento que esta etapa termine y se accione el botón de apagado.
- Para la aireación del compost, el ventilador estará programado para que funcione durante 5 minutos, con un lapso de 15 minutos que estará apagado y nuevamente se encenderá automáticamente por otros 5 minutos más. Este ciclo se repetirá de inicio a fin de la etapa termofílica, proveyendo de esta manera oxígeno al compost y evitando que este pierda la humedad necesaria.
- Por otro lado, se tiene un sensor de humedad que estará conectado a un Arduino, la cual enviará una lectura digital del porcentaje de humedad que tiene el compostaje. En el Arduino está programado para que, en el momento que la lectura de la humedad sea inferior al 45% de humedad, este envíe una señal de acción y de forma automática encender 3 humidificadores.
- Por último, está el sensor de temperatura la cual se encuentra también conectado al Arduino. Este sensor está encargado de mandar la señal de la lectura de temperatura en el compost, si dicha temperatura disminuye de los 60°C, se accionarán 2 resistencia eléctricas para elevar la temperatura del compostaje.

En el apéndice P se puede apreciar los códigos correspondientes a la programación realizada para el funcionamiento detallado del sistema de control.

3.14 Selección de componentes y equipos.

3.14.1 Sistema de potencia

Los cálculos previos indican la necesidad de incorporar un motor de una potencia de 0.12 hp, y aunque en realidad la potencia obtenida es menor, se tendrá una ventaja económica considerable, ya que motores más pequeños de baja potencia son un poco más caros. Por otro lado, se requiere un torque mínimo de 23.67 Nm en el eje.

A partir de lo anterior se selecciona un motor del catálogo WEG, Monofásico de 60Hz - 0.12 hp, con condensador permanente, par nominal de 0.078 kgfm que se elevará a mucho más de lo requerido mediante la caja de engranes. Todas las dimensiones y características del motor se pueden apreciar en la sección de anexos.

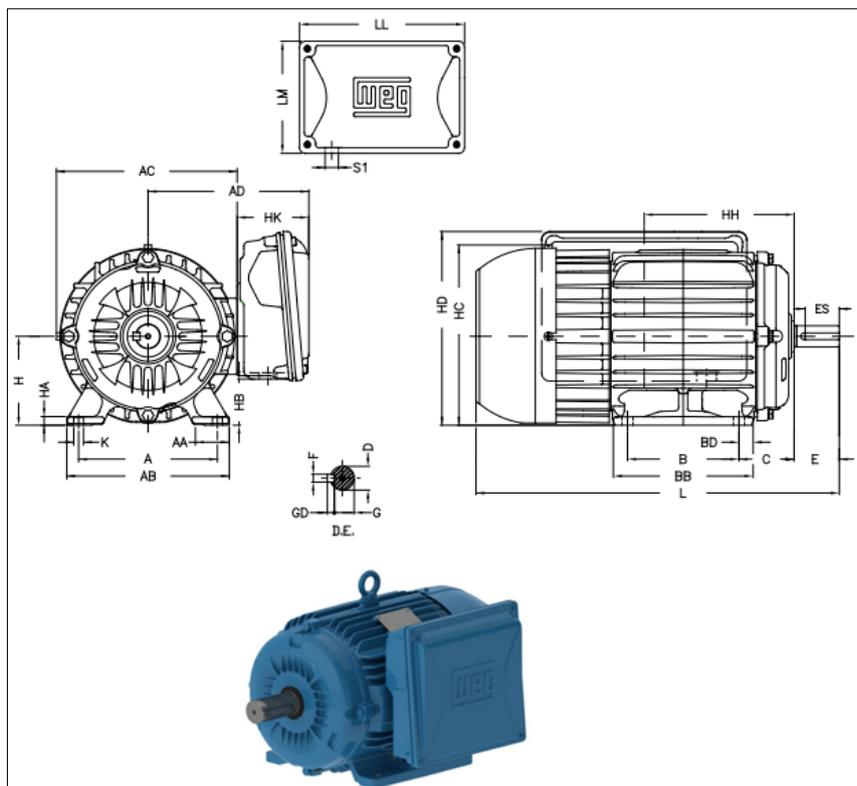


Figura 3.18 Motor eléctrico seleccionado (catálogo WEG).

Tabla 3.16 Características técnicas del motor.

Marca	WEG
Tipo	Monofásico con condensador permanente
Potencia	0.12 hp
Velocidad	1120 RPM
Frecuencia	60 Hz
Par nominal	0.078 kgfm
Diámetro de eje	11j6 mm
Corriente	0.92 A
Peso	9.5 kg

3.14.2 Rodamientos

Como ya se determinó en secciones previas, se necesitan dos tipos de rodamientos (6002-2RSL y 6009), un par por cada tipo, que se ubicarán en los extremos del contenedor, el primer par (menor diámetro) permitirán el giro del eje, mientras que el segundo (mayor diámetro) permitirán el giro del contenedor.

Los rodamientos se seleccionan del catálogo SKF, todas sus características y dimensiones se muestran en la sección de anexos.

Tabla 3.17 Características técnicas de Rodamientos.

	Rodamientos rígidos de bolas - 1 hilera	
Designación	Rodamientos 6002-2RSL	Rodamientos 6009
Cantidad	2	2
Diámetro interior	15 mm	45 mm
Diámetro exterior	32 mm	75 mm
Espesor	9 mm	16

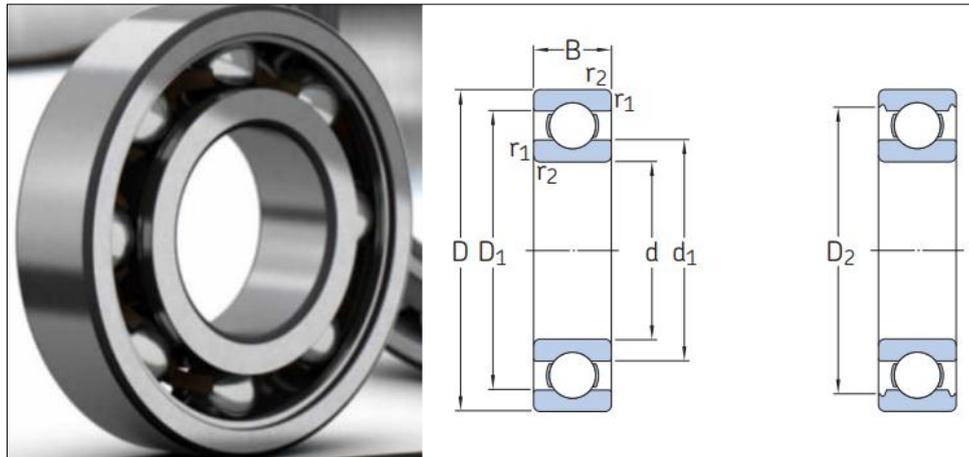


Figura 3.19 Rodamientos seleccionados (catálogo SKF).

3.14.3 Resistencias eléctricas de calefacción

Se necesita una energía calorífica de aproximadamente 3kW, esta debe ser la potencia de la resistencia eléctrica seleccionada, más para una mejor distribución del calor generado eléctricamente, se considera implementar 2 resistencias de 1.5kW y ubicarlas en el fondo del contenedor uniformemente espaciadas, inmersas en la materia orgánica.

Se puede encontrar resistencias de esta potencia en el catálogo CRN Tecnoart, también están disponibles en sitios web de comercio a nivel local.

Tabla 3.18 Características de las resistencias.

Modelo	CRN17-021 Forma 3U
Potencia	1500 W
Racor	1 ½"
Longitud L	180 mm
Peso	0.53 kg

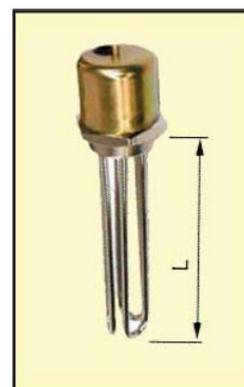


Figura 3.20 Resistencia de calefacción (Tecnoart).

Todas sus características y dimensiones se muestran en la sección de anexos.

3.14.4 Tornillos

De cálculos del capítulo 3, se emplean tornillos de cabeza hexagonal, grado 2, de 3/8" de diámetro, rosca completa de 16 hilos por pulgada y longitud de 1", es decir, su denominación es 3/8 – 16 – 1". Se necesitan 16 de estos componentes para el contenedor.

Estos tornillos son estandarizados y pueden encontrarse en ferreterías locales, sitios web de comercio en línea.

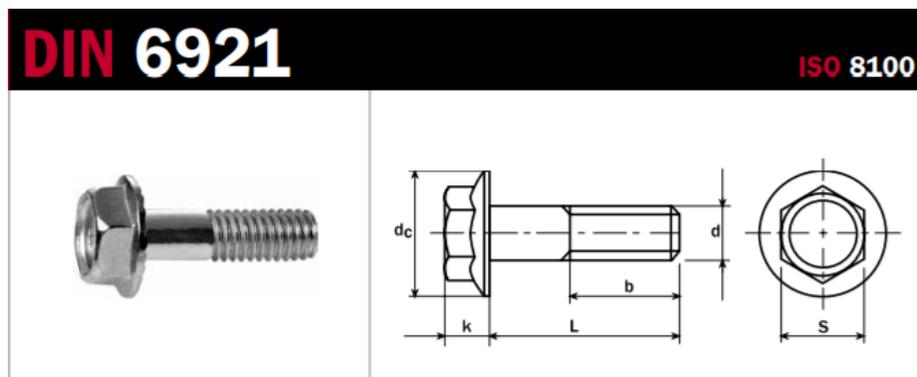


Figura 3.21 Tornillos cabeza hexagonal con collar biselado (Catálogo ISO).

Para la unión de los tubos para la base con el soporte del eje, se emplearán 4 pernos hexagonales con un diámetro de $d=6$ mm (M6) y una longitud de $L=35$ mm, en base a las normas ISO la medida recomendada de la longitud del hilo es de $b=18$ mm. Estos pernos estarán ubicados 2 en cada extremo de la estructura de la base.

De la misma manera, se tiene 4 tornillos hexagonales M6, pero con una longitud de $L=30$ mm, un tornillo para la sujeción de cada una de las platinas metálicas con la base.

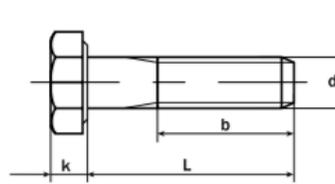
DIN 931**ISO 4014**

Figura 3.22 Tornillos cabeza hexagonal, parcialmente roscado (Catálogo ISO).

Con respecto a la unión de una platina con otra, se usará 1 tornillo hexagonal M6 con una longitud de $L=10\text{mm}$. En total se necesitará 2 tornillos, 1 por cada par de platinas.

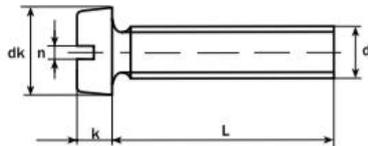
ISO 1207**DIN 84**

Figura 3.23 Tornillos cabeza hexagonal con collar biselado (Catálogo ISO).

Finalmente, todos los tornillos estarán acoplados con una misma medida de tuerca, debido a que todos los tornillos son de métrica M6, se requerirá de un total de 10 tuercas M6.

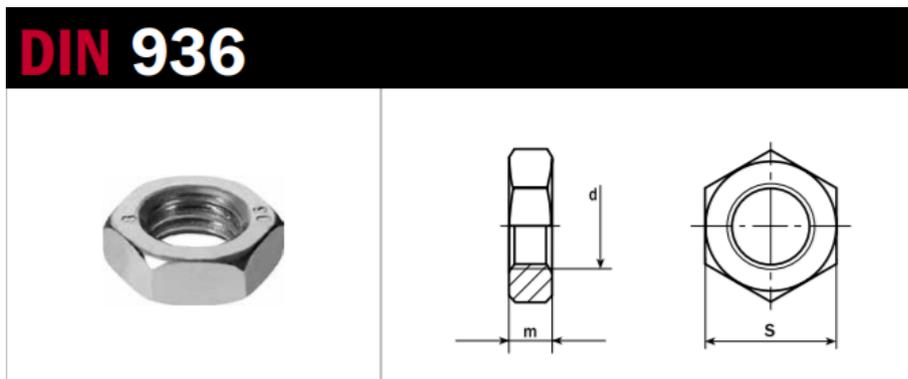


Figura 3.24 Tornillos cabeza hexagonal con collar biselado (Catálogo ISO).

3.14.5 Ventilador

Se necesita un flujo de aire mínimo de aproximadamente $280 \text{ m}^3/\text{h}$, equivalente a 165 cfm. También hay que considerar sus dimensiones, ya que el ventilador será colocado sobre la línea de eje del tanque en la parte posterior del mismo, por ello, la circunferencia que describen las aspas del ventilador no debe ser mayor a 20 cm, ya que este es el espacio disponible para poder ubicarlo.

Un ventilador tipo caja, es el más idóneo, ya que se caracteriza por ser muy portátil, fácilmente adaptable, y de poca anchura. En la web se puede hallar varios de este tipo de ventiladores, del cual se selecciona el mostrado en la figura 3.25, además se muestran sus características técnicas.

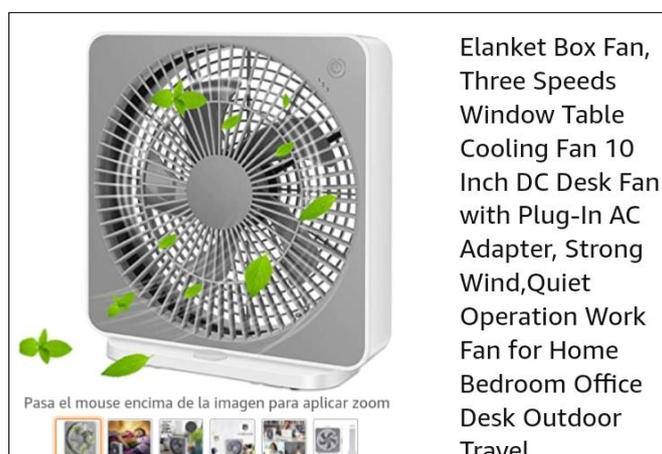


Figura 3.25 Ventilador de caja seleccionado (Amazon.com).

Tabla 3.19 Características técnicas del ventilador.

Marca	Elanket
Modelo	ZL2002Y
Tipo	Portátil, free standing
Voltaje	120 V – 60Hz
Potencia	30 W
Velocidad	3 velocidades
Peso	2.29 libras
Velocidad máxima de flujo	14.8 ft/s
Diámetro de aspas	8 in
Ruido	40 dB

Evaluamos el flujo máximo que puede proporcionar este ventilador.

$$Q = AV$$

$$d = 8 \text{ in} = 0.2032 \text{ m} \rightarrow A = \frac{\pi}{4} d^2 = 0.0324 \text{ m}^2$$

$$V = 14.8 \text{ ft/s} = 4.51 \text{ m/s}$$

$$\rightarrow Q = AV = (0.0324 \text{ m}^2) \left(4.51 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = 0.146 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 525.6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Por lo tanto, este ventilador puede proveer el flujo de aire necesario sin problemas.

3.14.6 Humidificador

Se determinó el flujo de masa de agua de que debe ser agregada a la materia orgánica en caso de perder humedad por debajo del 45%, este flujo es de aproximadamente 5×10^{-4} kg/s.

Para ello, se selecciona el dispositivo mostrado en la figura 3.26, este es un mini humidificador de inmersión que genera vapor de agua hasta una temperatura no tan superior a la temperatura de ebullición, es muy económico en comparación con equipos humidificadores más completos o bombas de agua, y fácilmente adaptable. A continuación, se listan sus características.



Pasa el mouse encima de la imagen para aplicar zoom

AGPtek Mini máquina humidificadora de aluminio para fuente de agua y estanque.
 Marca: AGPTEK
 ★★★★★ 1,028 calificaciones

Precio: **US\$ 13.99** + US\$ 74.08 de envío y depósito de derechos de importación a Ecuador
[Detalles](#)

- Esta Agptek niebla eléctrica puede añadir un efecto de niebla impresionante a su estanque, Rockery o tanque de agua para filtrar el mal olor con electro y tecnología ultrasónica.
- Ideal para fuentes de interior o exterior, agua, y uso de oficina.
- Perfecciona para usarlo en su

Figura 3.26 Humidificador de inmersión (Amazon.com).

Tabla 3.20 Características técnicas del humidificador.

Marca	AGPTEK
Tipo	De inmersión
Material	Aluminio
Generación de vapor	13.5 oz/h
Voltaje entrada	110-250 V, 50/60Hz Incluye adaptadores
Disco	0.5 in
Peso	3.2 onzas
Dimensiones	5.2x3.1x2.6 in
Longitud de cable	82.7 in
nivel del agua más alto que boquilla	2 – 2.1 in

Verificamos que el flujo de masa de agua sea el adecuado.

$$13.5 \text{ oz/h} \approx 1.6 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

el flujo requerido es 5.0×10^{-4}

si se utilizan 3 humidificadores :

$$3 * 1.6 \times 10^{-4} \text{ kg/s} = 4.8 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \approx 5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

Por lo tanto, el sistema humidificador estará compuesto por 3 de estos dispositivos inmersos en un tanque de agua de 4.0 L, como se había establecido en los cálculos del capítulo 2, de esta manera se conectará el tanque de agua con el contenedor de la materia orgánica para el vapor pueda dirigirse a hacia la misma. Los humidificadores serán activados solo cuando el porcentaje de humedad se vea reducido a niveles no aceptables.

3.14.7 Sistema de humidificación

Del catálogo de tubería de Plastigama, apreciado en el apéndice Ñ, se selecciona tubos de PVC de 50 mm de diámetro nominal, que servirán para realizar la conexión del sistema de humidificación. Del mismo catalogo se selecciona el accesorio de unión tipo TEE, de diámetro de 50 mm, compatible con el tubo antes mencionado.



Figura 3.27 Tubo PVC (Plastigama, 2020).

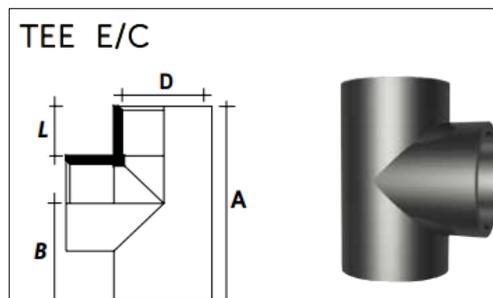


Figura 3.28 Accesorio de unión tipo TEE (Plastigama, 2020).

Por otro lado, se selecciona una manguera metálica flexible del catálogo Flexilatina, de 50 mm de diámetro con su respectiva unión roscada tipo NPT, BSP.

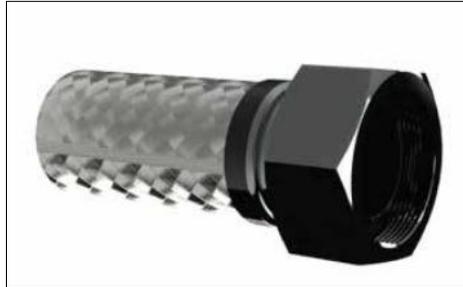


Figura 3.29 Manguera con unión roscada tipo NPT (Flexilatina, 2019).

El otro elemento de acople con rosca se puede encontrar en ferreterías locales, su diámetro exterior es de 50mm.



Figura 3.30 Acople con rosca (Amazon).

Se utilizará un ventilador de 69 m³/h, este se selecciona de la línea RS componentes, a continuación, se muestran sus características.



Figura 3.31 Ventilador pequeño tipo caja para humidificación (Traceparts, 2018).

Tabla 3.21 Características técnicas del ventilador pequeño.

Marca	RS components
Tipo	Caja, axial.
Flujo	69 m ³ /h
Potencia	2 W
Voltaje	12V dc
Dimensiones	80x80x25mm

3.14.8 Sensor de temperatura DS18B20

El DS18B20 es un tipo de sensor de temperatura comúnmente usado, capaz de recibir la señal de temperatura que está en contacto con la parte metálica del sensor y convertirlo en una señal digital.

Este componente será utilizado en el sistema para poder controlar el grado de temperatura que debe mantenerse el compost durante la etapa termofílica, debido a que, en dicho proceso la temperatura debe estar entre los 55-65°C



Figura 3.32 Sensor de temperatura DS18B20

Tabla 3.22 Características técnicas del sensor de temperatura.

Chip digital	DS18B20
Fuente de alimentación	3.0~5.5 V CC
Relación de resolución	9~12 bits
Rango de temperatura	-50~+125°C
Diámetro de la sonda	6~9 mm
Longitud de la sonda	10~1000 mm
Material de la sonda	Acero inoxidable
Conector	Molex, JST, DuPont, CWB, CJT, tipo U, etc.
Manga termorretráctil	Tubo de PVC; tubo de fibra de vidrio; tubo de teflón
Modo de conexión	Negro: GND, amarillo: DATA, rojo: VDD+

3.14.9 Sensor de humedad YL-69

Este tipo de sensor tiene la capacidad de detectar el nivel de humedad en el suelo, a través de la resistencia que se genera en ello. Esta resistencia varía dependiendo de la presencia de agua en el suelo, en el caso que esté muy seco el suelo, su resistencia será mayor debido a que no hay una alta conducción de corriente en el suelo por la falta de humedad, de lo contrario, si el suelo tiene una gran cantidad de agua, la resistencia es menor.

El sensor está conformado de dos partes, el YL-69 que son los dos terminales que va a estar en contacto con el suelo, para este caso será el compost, que se encarga de detectar la humedad y este estará conectado a una pequeña tarjeta electrónica conocida también como YL-38, la cual dispone de un LED que indica el encendido del sensor.

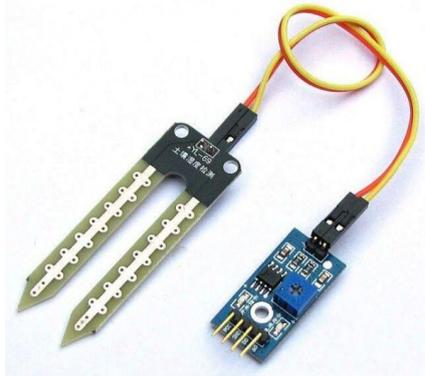


Figura 3.33 Sensor de humedad YL-69

Tabla 3.23 Características técnicas del sensor de humedad.

Chip digital	YL-69 y YL-38
Fuente de alimentación	3.3~5.0 V CC
Fuente de salida	0~4.2 V CC
Corriente	35 mA
Dimensión del sensor YL-69	6 x 2 cm
Dimensión de la tarjeta YL-38	4 x 1.5 cm
Orificios del sensor YL-69	∅3 mm
Orificios de la tarjeta YL-38	∅2 mm
Peso	7.0 g
Modo de conexión	Negro: GND, amarillo: señal de salida, rojo: V+

3.14.10 Arduino UNO

El Arduino es una placa electrónica que permite realizar una variedad de programación basados en software y hardware dependiendo del uso que se le quiera dar. En él se conectarán los sensores y los actuadores, es decir, esta placa va a recibir la señal del sensor de temperatura y el sensor de humedad, con la programación adecuada y las condiciones establecidas, mandará una señal a los actuadores que en este caso serán las resistencias eléctricas de calefacción y los humidificadores para que realicen sus debidos trabajos.

Esta placa está conformada por los siguientes elementos y características técnicas:

- Conexión USB
- Conector Jack de alimentación
- Terminales para conexión ICSP
- Botón de reinicio.

Tabla 3.24 Características técnicas del Arduino UNO

Microcontrolador	Microchip ATmega328P
Fuente de alimentación	7.0~20 V
Pines digitales	14 (6 de salida PWM)
Pines entrada analógica	6
Corriente CC para PIN de 3.3V	50 mA
Corriente CC para PIN de E/S	20 mA
Dimensiones	68.6 x 53.4 mm
Memoria flash	32 KB (0.5 KB para el gestor de arranque)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Peso	25 g
Velocidad de reloj	16 MHz



Figura 3.34 Arduino UNO

3.15 Análisis de costos

3.15.1 Listado de materiales

A continuación, se mencionarán todos los materiales que serán necesarios para la construcción del equipo compostador portátil. Cabe recalcar que las dimensiones y el

tipo de material seleccionado fueron considerados acorde a los estudios realizados en este proyecto, en base a todos los requerimientos y los resultados obtenidos en los cálculos del diseño, los materiales a utilizar son los siguientes:

Eje y paletas

- 1 varilla de acero AISI/SAE 1045 de 1.0 m de longitud y 20 mm de diámetro.
- 1 varilla de acero AISI/SAE 1045 de 1.0 m de longitud y 10 mm de diámetro.
- 5 planchas de acero AISI/SAE 1045 de 11.5 x 11.5 x 0.3 cm.
- 2 rodamientos 6002-2RSL con diámetro interior de 15 mm y diámetro exterior de 32 mm
- 6 varillas de soldadura 6011

Tanque

- 8 planchas de PVC de 21.4 x 84.0 x 0.8 cm
- 1 planchas de PVC octogonales de 26 cm de apotema, 21,14 cm de lado y 8 mm de espesor
- 1 planchas de PVC octogonales de 26.8 cm de apotema, 22,2 cm de lado y 8 mm de espesor
- 16 tornillos autorroscado de cabeza hexagonal 3/8 – 16 – 1”
- 2 rodamientos 6009 con diámetro interior de 45 mm y diámetro exterior de 75 mm

Estructura o base

- 2 tubos de aluminio N2011 T6 de 3 m de longitud con 25 mm de diámetro exterior y 1.5 mm de espesor
- 4 platinas de aluminio N2011 T6 de 30 x 2.5 x 0.3 cm
- 1 plancha de acero A36 de 40 x 26 x 0.3 cm
- 10 varillas de soldadura 6011
- 4 pernos hexagonales métrico M6 x 1 x 35
- 4 tornillos hexagonales métrico M6 x 1 x 30
- 2 tornillos ISO 1207 M6 x 10
- 10 tuercas ISO 4035 M6
- 4 ruedas

Sistema de humedad y temperatura

- 3 humidificadores
- 1 sensor de humedad YL-69
- 2 resistencias eléctricas para calefacción
- 1 sensor de temperatura DS18B20
- 1 Arduino UNO

Sistema de aireación y remoción del compost

- 1 motor eléctrico de 0.12 hp
- 4 piñones de 1.9 in de diámetro de paso
- 4 engranes de 5.2 in de diámetro de paso
- 1 ventilador de 8 in de diámetro de aspas

3.15.2 Costo de materiales

Para tener conocimiento de los valores monetarios del material que se requerirá para la elaboración del equipo compostador, se hicieron cotizaciones e investigaciones de precios en páginas web de locales comerciales. A continuación, se muestra una tabla con los valores para cada ítem que se usará en el diseño:

Tabla 3.25 Costos de materiales

CANTIDAD	DETALLE	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
EJE-PALETAS			
1	Varilla de acero AISI/SAE 1045 de 1.0 m de longitud y 20 mm (3/4") de diámetro.	\$ 3.25	\$ 3.25
1	Varilla de acero AISI/SAE 1045 de 1.0 m de longitud y 10 mm de diámetro.	\$ 0.90	\$ 0.90
5	Planchas de acero AISI/SAE 1045 de 11.5 x 11.5 x 0.3 cm.	\$ 4	\$ 20

2	Rodamientos 6002-2RSL con diámetro interior de 15 mm y diámetro exterior de 32 mm	\$ 1.07	\$ 2.14
6	Varillas de soldadura 6011	\$ 0.12	\$ 0.72
TANQUE			
2	Planchas de Sintra PVC de 122 x 244 x 0.8 cm	\$45	\$ 90
16	Tornillos autorroscados de cabeza hexagonal 3/8 – 16 – 1”	\$ 0.12	\$ 1.92
2	Rodamientos 6009 con diámetro interior de 24 mm y diámetro exterior de 75 mm	\$ 7.00	\$ 14.00
ESTRUCTURA O BASE			
2	Tubos de aluminio N2011 T6 de 3 m de longitud con 25 mm de diámetro exterior y 1.5 mm de espesor	\$ 4.00	\$ 8.00
1	platinas de aluminio N2011 T6 de 200 x 2.5 x 0.3 cm	\$ 5,28	\$ 5,28
1	Plancha de acero A36 de 40 x 26 x 0.3 cm	\$ 10	\$ 10
10	Varillas de soldadura 6011	\$ 0.12	\$ 1.20
4	Pernos hexagonales métrico M6 x 1 x 35	\$ 0.47	\$ 1.88
4	Tornillos hexagonales métrico M6 x 1 x 30	\$ 0.16	\$ 0.64
2	Tornillos ISO 1207 M6 x 10	\$ 0.14	\$ 0.28
10	Tuercas ISO 4035 M6	\$ 0.40	\$ 4.00
4	Ruedas	\$ 2.30	\$ 9.20
SISTEMA DE HUMEDAD Y TEMPERATURA			
3	Humidificador	\$ 14.00	\$ 42.00
1	Sensor de humedad YL-69	\$ 2.71	\$ 2.71
2	Resistencias eléctricas para calefacción	\$	\$
1	Sensor de temperatura DS18B20	\$ 3.00	\$ 3.00
1	Arduino UNO	\$ 30.00	\$ 30.00
SISTEMA DE AIREACIÓN Y REMOCIÓN DEL COMPOST			

1	Motor eléctrico de 0.12 hp	\$ 83.95	\$ 83.95
4	Piñones de 1.9 in de diámetro de paso	\$ 8.24	\$ 32.96
4	Engranajes de 5.2 in de diámetro de paso	\$ 6.51	\$ 26.04
1	Ventilador de 8 in de diámetro de aspas	\$ 30.00	\$ 30.00
TOTAL			\$ 424.07

3.15.3 Costo de construcción

Una vez enlistado todos los materiales a necesitar, se procede a mencionar la mano de obra que se requerirá, ya sea en cortes, perforaciones, soldadura, etc., obteniendo así la forma deseada de cada elemento y finalmente se realice el ensamble de las piezas para la construcción del equipo compostador portátil.

Los valores obtenidos en la siguiente lista, fue realizada en base los conocimientos de técnicos y maestros que llevan algunos años de experiencia en ciertos trabajos y poseen más información de los precios actuales de la mano de obra para cada uno de los trabajos a realizar.

Tabla 3.26 Costo de construcción

DETALLE	PRECIO TOTAL
Torneado de la varilla de acero AISI/SAE 1045 de 20 mm de diámetro a una reducción de 15 mm de diámetro en sus extremos	\$ 15
Corte de varilla de acero AISI/SAE 1045 de 1.0 m de longitud en 5 varillas de 17.55 cm con 10 mm de diámetro	\$ 15
Puntos de soldadura con electrodo 6011, para la unión de las paletas al eje motriz.	\$ 18

Corte de 2 tubos de aluminio N2011 T6 de 3 m de longitud a 2.51 m de longitud y forma redondeada en sus extremos a un diámetro de 2.5 cm	\$ 22
Corte de la platina de 200 cm en 4 platinas de 30 cm de longitud, redondeada en sus extremos a un diámetro de 2.5 cm	\$ 35
Corte de diversas formas en plancha acero A36 de 3 mm d espesor, para fabricación del soporte de los rodamientos	\$ 40
Rolado de una pieza en acero A36	\$ 10
Puntos de soldadura con electrodo 6011, para la unión de piezas cortadas de la plancha A36	\$ 30
Perforación en tubos de aluminio, platina, acero A36 y tanque.	\$ 45
Doblado a 90° el tubo de aluminio	\$ 25
TOTAL	\$ 255

3.16 Mantenimiento del sistema

3.16.1 Planes de mantenimiento

Todos los equipos y elementos poseen una vida útil, tiempo de duración estimada antes que deje de funcionar por completo, la cual su valor puede reducirse dependiendo de las condiciones a la cual trabajan dichos objetos. Estas condiciones pueden considerarse el ambiente en el que se encuentra laborando el material (temperatura, humedad, polvo, etc.), también dependerá del uso excesivo que esté empleando el elemento y el desgaste que este puede provocarse.

Las malas condiciones en la que trabajen los equipos pueden ocasionar que se deterioren con mayor rapidez, disminuyendo la eficiencia del equipo o componente. Para

evitar estos problemas de fallos, se realizará un plan de mantenimiento preventivo, que será programado a ciertos equipos o elementos.

MOTOR ELECTRICO 0.12 HP

- Mensualmente se debe realizar un chequeo de manera auditiva en los rodamientos del motor. Primero se debe prevenir que el equipo esté totalmente desconectado de alguna fuente de energía que active su funcionamiento, luego se realiza un pequeño golpe en un rodamiento, se presta la debida concentración para determinar si hay algún otro elemento interno el cual realiza otro sonido fuera de lo común. En caso de detectar un ruido no ordinario, proceder a desarmar completamente el motor, encontrar el problema que lo ocasiona y corregir.
- Cada 2 años se debe realizar un mantenimiento preventivo para mantener todos sus elementos internos y externos en perfecto estado. Este consiste en desarmar completamente el motor, separando con cuidado cada elemento o pieza, se limpia debidamente con aceite para metales, luego que se haya eliminado los residuos, se procede a colocar pasta o grasa en sus piezas y finalmente se ensambla.

RODAMIENTOS

- El mantenimiento preventivo que se le da a estos elementos es programado 1 vez al año, para agregar ya sea aceite para rodamientos, pasta o grasa. En caso de que exista mucha fricción en el rodamiento, debido a desgaste de este, realizar el cambio correctivo.
- En el caso de que los rodamientos trabajen bajo temperaturas elevadas, el mantenimiento preventivo se lo debe realizar cada 6 meses

VENTILADOR

- Para el caso de este mantenimiento preventivo, dependerá mucho del ambiente, es decir, que tanto polvo haya en el lugar el cual se encuentre el equipo, puede variar de 3 meses, 6 meses o hasta realizarse anualmente en caso de que el lugar esté sumamente limpio.

- Se procede a retirar el motor del ventilador para limpiarlo con aceite para metales y agregar grasa. Las aspas del ventilador al ser de un material de PVC, se puede realizar una limpieza con agua y un pedazo de tela. Antes de realizar el desmontaje de los elementos del ventilador, verificar que esté desconectado de la fuente de energía y así evitar cualquier tipo de accidente.

EJE-PALETAS

- Para evitar algún tipo de desgaste del material debido a la corrosión por el lixiviado del desecho orgánico, se recomienda anualmente aplicar una capa de galvanizado, que evitará que se oxide con mayor rapidez.

3.16.2 Costos de mantenimiento

Tabla 3.27 Costo de mantenimiento

DETALLE	PRECIO TOTAL
Mantenimiento preventivo del motor eléctrico 0.12 hp	\$ 35
Mantenimiento preventivo del ventilador	\$ 15
Mantenimiento preventivo de rodamientos del eje y tanque	\$ 10
Galvanizado del eje-paleta	\$ 5
TOTAL	\$ 65

3.16.3 Evaluación del desempeño del sistema

3.16.3.1 Modo de operación

Los resultados anteriores están basados en un modo de operación específico del equipo o sistema, el mismo que considera el periodo de tiempo que tarda aproximadamente el proceso de compostaje, hasta obtener un abono orgánico con características adecuadas.

El sistema actúa sobre el proceso de acuerdo con lo descrito en la tabla 3.28. Durante las primeras 2 semanas no hay necesidad de dar un tratamiento especial a los residuos sólidos, ya que es un periodo donde las propiedades de la mayoría de los

elementos o las variables involucradas como la temperatura o humedad no cambian en alto grado, más bien, se considera un periodo de recolección y llenado del contenedor, entonces la materia puede mantenerse a condiciones normales.

Muy distinto a lo que sucede en la etapa termofílica, donde si es necesario un tratamiento especial, y se caracteriza por ser la etapa más duradera y determinante. Es durante este periodo en el que las personas comienzan a realizar acciones específicas sobre la materia en el compostaje tradicional con pilas, ya que la materia comienza a cambiar de aspecto, como consecuencia de cambios en sus propiedades físico-químicas.

Es así que durante las semanas que dura la etapa termofílica, se deberá proceder a poner en funcionamiento el equipo al menos 2 horas por día, ya que es lo que se había establecido en el capítulo 2, aproximadamente desde la tercera hasta la 5 semana del proceso.

A partir de las siguientes semanas la materia debe pasar por una fase de enfriamiento y posterior maduración, lo cual puede darse sin mayor inconveniente a condiciones normales o ambientales, ya que durante estos periodos la actividad de los microorganismos no aumenta y disminuye, prácticamente es nula como se vio en el capítulo 1, entonces, aplicar un tratamiento especial para la materia solo generaría costos innecesarios.

Tabla 3.28 Modo de operación del sistema.

Fase/periodo	Condiciones/descripción	Valores típicos o establecidos
Semana 1-2 Etapa Mesofílica	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema apagado. • Se realiza el llenado del contenedor hasta el nivel establecido (3/4 del volumen total). • Residuos a condiciones de compostaje tradicional. 	$T = [15 - 40] \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\%HR = [45 - 60] \%$ $PH = [4 - 6]$

<p>Semana 3-4-5 Etapa Termofílica</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema encendido. • Se da el tratamiento a la materia orgánica a los valores establecidos. • Operación de equipo al menos 2 horas/día. 	<p>$T = [55 - 65] \text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{seteada}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\%HR = [50 - 60] \%$ $\%O_2 = [5 - 15] \%$ $PH = [8 - 9]$</p>
<p>Semana 6-7 Etapa de enfriamiento</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema apagado. • Materia a condiciones de compostaje tradicional. • Volteo manual del contenedor. 	<p>$T = [15 - 40] \text{ }^{\circ}\text{C}$ $\%HR = [45 - 60] \%$ $PH = [7 - 8]$</p>
<p>Semana 8 Etapa de maduración</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema apagado. • Materia a condiciones de compostaje tradicional. • Volteo manual (opcional) 	<p>$T_{\text{ambiente}} = [24 - 28] \text{ }^{\circ}\text{C}$ $PH = [6 - 8]$</p>

La ventaja que se debería conseguir sería la reducción del periodo total del proceso de compostaje, por ello, en este caso estamos asumiendo un periodo de 8 semanas o 2 meses, o podría ser menos. Un parámetro que nos puede indicar aquello es precisamente la tasa de degradación, que resultó ser de 0.898 kg/día, es decir, para una capacidad de 42 kg, los residuos orgánicos tomarían un tiempo aproximado de 47 días para degradarse casi en su totalidad.

El principal argumento para asumir aquello, es que el sistema está basado casi en su totalidad en el método de compostaje rápido de Berkeley. Como ya se conoce, dicho método, muy reconocido en el mundo, teóricamente permite obtener compost en solo 18 días, es decir, casi 3 semanas, si se cumple con las condiciones que demanda el método, sin necesidad de agregar un sustrato especial, simplemente manipulando las variables involucradas en el proceso.

Aquella manipulación de los valores e las variables se ha aplicado específicamente a la materia al inicio del proceso, refiriéndose al contenido de humedad, relación C/N, masa, y durante la etapa termofílica, mediante la temperatura, humedad, calor.

De lo anterior se puede estimar una curva teórica del desarrollo de la temperatura y los días que dura cada etapa en comparación con una curva de compostaje tradicional.

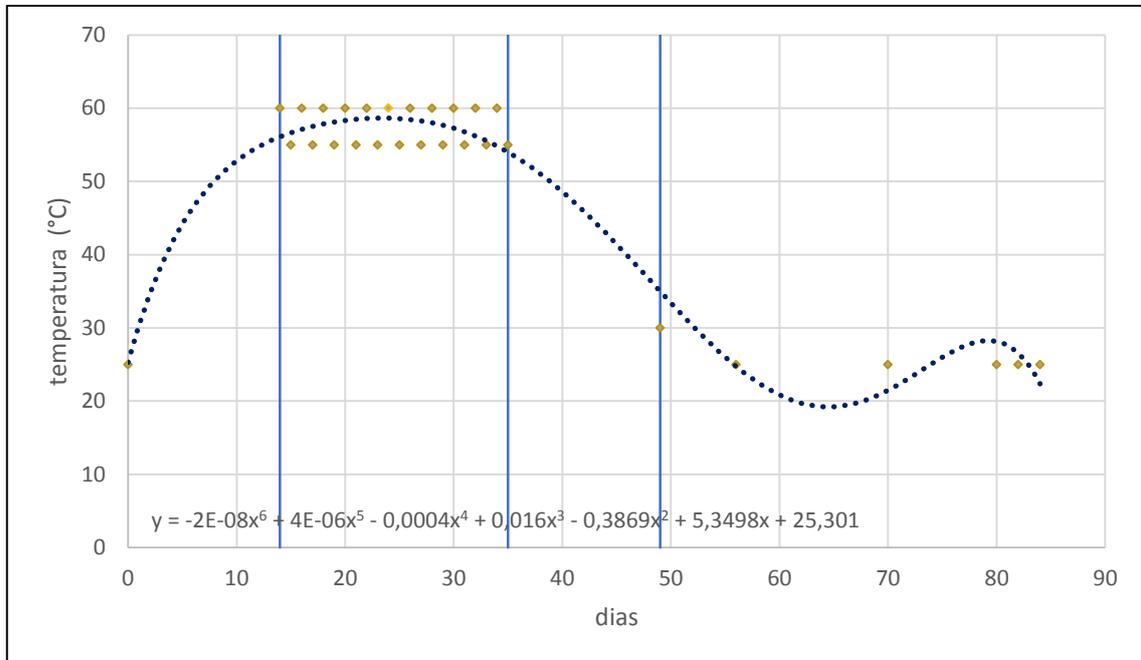


Figura 3.35 Variación de la temperatura estimada para el proceso (elaboración propia).

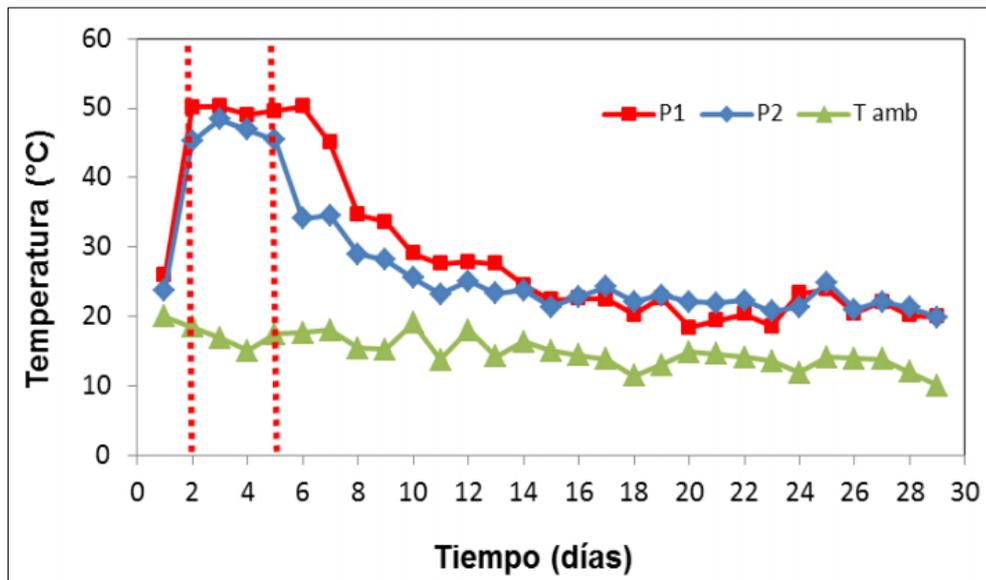


Figura 3.36 Variación de temperatura en pilas de compostaje tradicional (Ballesteros, 2018)

La figura 3.36 muestra lecturas de temperatura tomadas en 2 pilas de compostaje tradicional, en la imagen se observa claramente que la temperatura no logra mantenerse a los niveles óptimos o recomendados, al contrario, esta decrece rápidamente en pocos días, lo cual tiene como consecuencia la formación de microorganismos patógenos perjudiciales para el proceso, mientras que los organismos beneficiosos de la degradación realizan deficientemente sus actividades metabólicas. De igual manera, la humedad y concentración de oxígeno en general decrece rápidamente, convirtiéndose en limitantes del proceso.

El sistema propuesto, lograría mantener las condiciones óptimas en los periodos de tiempos más apropiados y decisivos del proceso de compostaje, tal como lo representa la figura 3.35. Como se puede observar, el sistema mantendría la temperatura aproximadamente entre los 55°C y 60°C durante la etapa más importante del proceso, en comparación con lo que sucede en el compostaje tradicional, donde prácticamente se crea un pico de temperatura muy pronunciado en dicha etapa.

Además, se humidificará la materia cada vez que el sistema detecte una pérdida de humedad menor al 45% de la materia orgánica, al mismo tiempo se oxigenará con el flujo de aire previamente establecido mientras las paletas realizan el volteo continuo de la materia.

De esta manera se garantiza las condiciones adecuadas para obtener un compost de muy buena calidad y en un tiempo bastante reducido, ya que al controlar las principales variables se obliga de cierta manera a acelerar el proceso.

3.16.3.2 Análisis del sistema

Es muy complicado determinar cómo variaría la humedad, ya que esta es afectada no solo por la temperatura sino también por la aireación aplicada; sin embargo, esta puede ser controlada de gran manera en base a la cantidad total de agua perdida por el material, leída por un sensor de humedad, y es lo que se ha establecido en este trabajo. Con dicha lectura se podrán activar el sistema humidificador para agregar agua cada vez que sea necesario de manera muy precisa.

Por otro lado, la energía que consume el equipo es bastante moderada y razonable en comparación al beneficio obtenido. A pesar de que las dos resistencias eléctricas utilizadas son de 1.5kW cada una, estas no estarán activadas durante todo el tiempo en que se mantiene encendido el sistema. El sistema de calefacción solo será puesto en marcha cuando un sensor detecte que la temperatura ha caído por debajo de los límites establecidos, y se desactivara cuando la materia nuevamente presenta la temperatura adecuada.

De la misma manera, no es recomendable mantener el ventilador encendido durante mucho tiempo, ya que la aireación forzada solo se debería aplicar durante periodos cortos de tiempo como lo indica Bustamante et al. (2008). Es por ello que para el cálculo del flujo de aire requerido se consideró que se agregaría aire durante 30 minutos para una operación de 2 horas cada día, esto puede realizarse aplicando 5 minutos de aireación cada 15 minutos durante 2 horas de funcionamiento. Además, el ventilador solo consumiría un máximo de 30 W.

El único componente que se mantiene operativo de manera continua durante el funcionamiento es el motor, el cual activará el sistema de volteo, más su potencia de consumo no es muy elevada, solo 1/8 hp o 93.2 W. Es decir, se tendría un consumo estimado de energía alrededor de 123 W si se considera que solo el motor y ventilador se mantendrán encendidos.

A esto se suma el hecho de que la materia prima para el equipo son desperdicios que no tienen ningún valor económico, de tal manera que el beneficio obtenido es muy considerable, ya que el sistema puede producir abono orgánico cuantas veces que se requiera, con una gran durabilidad de los componentes, por lo cual a pesar del costo inicial que tendría el equipo, para el usuario adquirir este tipo de compostador representaría una gran inversión.

Lo anterior se verifica mediante una investigación del mercado local, presentado en la siguiente sección.

Otra característica potencial del diseño obtenido es que puede ser aumentado fácilmente en capacidad, es decir, el modelo puede ser rediseñado con el objetivo de generar

grandes cantidades de abono orgánico, y no solo a niveles domésticos, lo cual beneficiaría la actividad agrícola al utilizar un producto que puede ser producido en el campo con los desechos generados propios de dichas actividades. Al mismo tiempo se reduce la contaminación del suelo y se protege al medio ambiente, dado que la cantidad de residuos orgánicos presente en la basura se reduciría considerablemente, obteniendo así actividades mucho más sustentables.

3.17 Comparación con un equipo de compost del mercado local

Realizando una investigación en la web, se puede encontrar pocos modelos de composteras tradicionales como el mostrado en la figura 3.37. Básicamente estos equipos están fabricados en madera y en general poseen una forma sencilla de caja o baúl, que pueden ser ubicados en cualquier sitio para lo cual habría que cargarlo y transportarlo, haciendo un esfuerzo considerable.



Figura 3.37 Compostera tradicional disponible en el mercado ecuatoriano (Zero Waste Store Ecuador).

Estos equipos manuales, artesanales y bastante rústicos tienen un costo de 190 USD en promedio en el mercado ecuatoriano, lo cual es un valor muy considerable que no cualquier persona estaría dispuesta a pagar, ya que prácticamente solo ofrece el beneficio de almacenaje de la materia orgánica para su descomposición natural sin algún

tipo de tratamiento especial, en el cual el usuario tendrá que manipular los residuos diariamente para lograr que el proceso de compostaje se dé de manera adecuada. De la misma manera el tiempo que durará el proceso será aproximadamente el mismo que el compostaje tradicional, es decir, 3 meses o más.

A continuación, se realiza una comparativa de las características de estos tipos de equipos comercializados a nivel local y el sistema de compostaje propuesto en este trabajo.

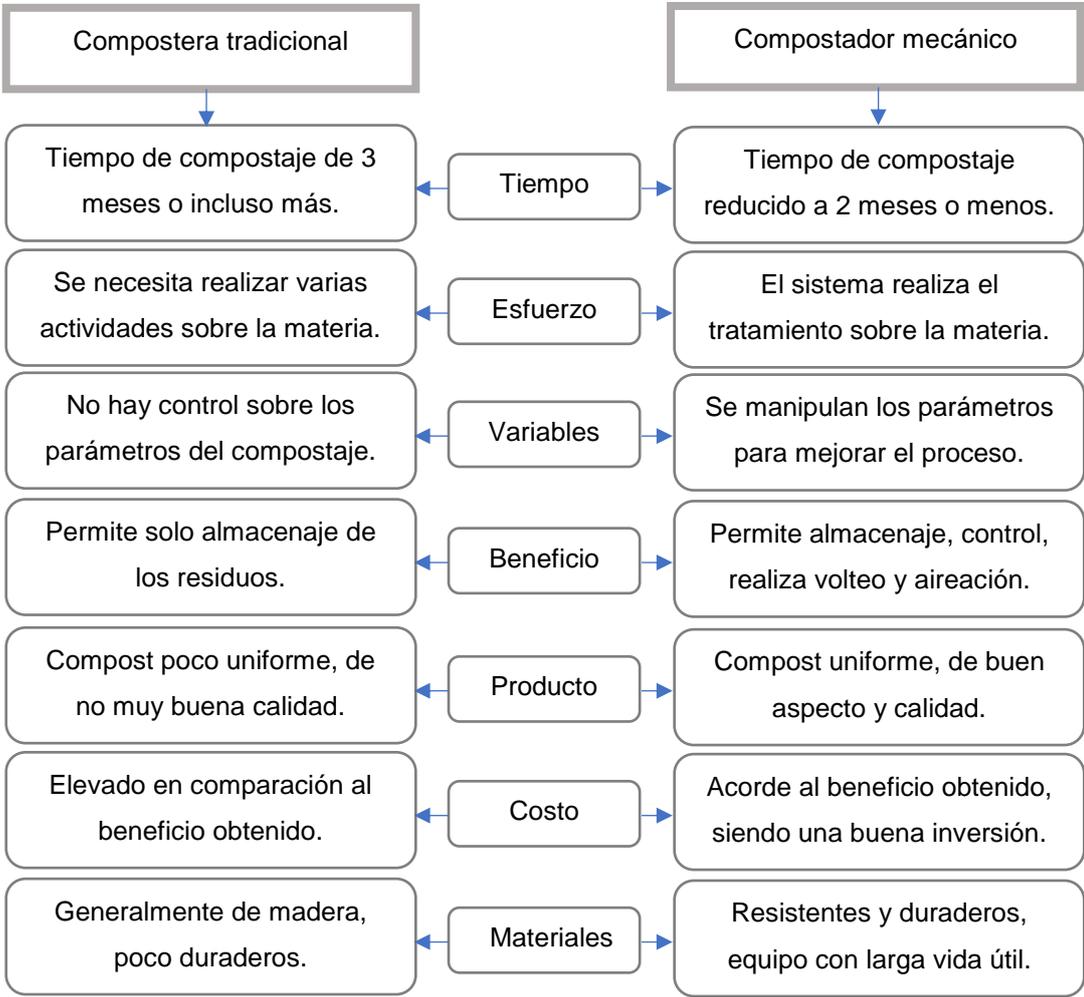


Figura 3.38 Comparación del compostador diseñado con uno del mercado local (elaboración propia).

Lo mismo se obtiene comparando con el proceso de compostaje más tradicional realizado, es decir las pilas de compostaje, un método en el cual no existe mayor control de los parámetros, y se deben realizar varias actividades manuales para tratar la materia.



Figura 3.39 Compostaje en pilas (Pixabay).

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

La fabricación de un equipo compostador para el desarrollo de abono casero en base al modelo diseñado en este proyecto favorece a la persona en la reducción del tiempo y el esfuerzo, al sustituir algunas actividades que emplearía al realizar abono de una manera tradicional. El mayor esfuerzo requerido por el humano es el volteo del compost, esta actividad es reemplazada por un mecanismo de eje giratorio que posee unas paletas las cuales, con ayuda de la potencia generada por el motor eléctrico de 0.12 Hp, removerán el desecho dentro del contenedor del equipo compostador

Para la aireación forzada del sistema, se realizó la selección de un ventilador tipo caja en base a los cálculos de flujo de aire, cuyo valor mínimo requerido es de 280 m³/h. Este componente permite que el compost tenga la cantidad de oxígeno necesario para que las bacterias realicen la descomposición aeróbica de la materia orgánica.

Otras de las tareas que evita a la persona llevar a cabo, es la medición de humedad y temperatura, ya que, un sistema de control implementado en el equipo realiza esta función de manera automática. En ello se encuentra un sensor de humedad conectada a un mecanismo de tres humidificadores, que aportan la cantidad necesaria de agua al contenido, siendo estas activadas si la lectura del sensor marca un valor menor al 45% de humedad requerida en el compost. De la misma manera, se tiene un sensor de temperatura en conjunto con dos resistencias, encargadas de elevar los grados de temperatura en cuanto este llegue a una medida menor a los 60°C.

Todas estas actividades están automatizadas y programadas mediante el interfaz con un Arduino UNO, con el fin de mantener un mejor control de los parámetros idóneos durante el proceso de compostaje en la etapa termofílica para el desarrollo de un abono de calidad durante un tiempo menos prolongado de aproximadamente dos meses.

En general, el equipo compostador beneficia al ser humano generando un abono natural, de alta calidad y eficaz para nutrir el suelo en los huertos hogareños y las

cosechas en los campos. Además, se reutiliza la basura orgánica que se produce diariamente en los hogares, disminuyendo de esta manera la contaminación ocasionada al medio ambiente.

Por lo tanto, el sistema diseñado en este proyecto, puede ser escalado, de manera que se pueda producir mayores cantidades de abono orgánico. No existe ninguna limitante física para ello, basado en el aumento de las dimensiones del sistema, este puede pasar de ser un equipo de uso doméstico a ser un equipo de uso industrial, y al mismo tiempo, se puede convertir en un gran negocio con alta rentabilidad, ya que la materia prima en este caso, no es más que solo desechos orgánicos, sin ningún tipo de valor económico.

4.2 Recomendaciones

Antes del ingreso del material orgánico desechable en el compostador, existen ciertos parámetros que hay que tener en consideración para el desarrollo efectivo de un abono casero. Hay que tomar en cuenta que el tamaño de partícula no sea mayor de 30 cm y tener una relación C: N de 25:1, este último parámetro se lo puede calcular mediante una tabla descrita en el desarrollo de este documento.

La automatización del equipo solo se la debe mantener activa durante la etapa termofílica (a partir de la tercera hasta la quinta semana) ya que, durante este proceso los valores de temperatura y humedad son más propensos a variar debido a otras condiciones como viento y temperatura ambiente.

Debido a que la selección de los componentes fue realizada en base a estudios teóricos, se recomienda hacer pruebas en situaciones reales en un compost de ciertos elementos electrónicos para comprobar su eficacia, caso contrario habría que realizar la sustitución de dichos dispositivos por unos similares de mejor calidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Amazon. (2020). AGPtek Mini maquina humidificadora de aluminio para Fuente de agua y estanque. Recuperado el 28 de julio de www.amazon.com.
- Ballesteros M., Hernandez M., Gomez I., Mañon M. y Carreño M. (2018) Crecimiento Microbiano en Pilas de Compostaje de Residuos Orgánicos y Bosólidos después de la aireación. *Revista Centro Azúcar*. 45 (1), 1-10
- Bolívar G. (21 de diciembre de 2020). *Calor latente*. Lifeder. Recuperado de <https://www.lifeder.com/calor-latente/>.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Novena edición (ISBN 978-607-15-0771-6 ed.). México.
- Bueno, P., Blanco, M. D., & Cabrera, F. (2008). *Factores que afectan al proceso de compostaje*. Departamento de Ingeniería Química, Química Física y Química Orgánica.
- Bustamante M., Paredes C., Marhuenda E., Bernal M., & Moral R. (2008). Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere*. 72(1), 551-557.
- Camacho R., Villada H., Hoyos H. (junio del 2017). Evaluación del Estiércol de Vaca como Inóculo en la Digestión Anaerobia Termófila de Residuos Sólidos Urbanos. *Información Tecnológica*, 28(3), 29-36. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000300004>
- Çengel Y. A. (2006). *Heat and Mass Transfer: A Practical Approach*. McGraw-Hill Companies.
- Connor N. (2019). *What is Natural Convection-Free Convection-Definition*. Recuperado el 25 de junio del 2021 de <https://www.thermal-engineering.org/what-is-natural-convection-free-convection-definition/>

- Costa, F., García, C., Hernández, T., & Polo, A. (1991). *Residuos orgánicos. Manejo y utilización*. CSIC, Madrid.
- Cornel Waste Management Institute (1996). *The Science and Engineering of Composting*. Recuperado el 25 de junio del 2021 de <http://compost.css.cornell.edu/science.html#Student>
- Daub W. y Seese W. (2005). Química. Person Educación.
- Deep Green Permaculture (2015). *How to Make Compost in 18 Days Using the Berkeley Hot Composting Method*. Recuperado el 15 de junio del 2021 de <https://deepgreenpermaculture.com/diy-instructions/hot-compost-composting-in-18-days/>
- Diario El Universo. (7 de junio del 2021). Nosotros seguimos enterrando la basura, una práctica de hace 240.000 años. Walter Bustos, experto ambiental. *El universo*. <https://www.eluniverso.com/noticias/ecuador/dia-del-medio-ambiente-economia-circular-entrevista-walter-bustos-manejo-basura-era-post-covid-junio-2021-nota/?outputType=amp>
- Dibut Álvarez, B. (2009). *Biofertilizantes como insumos en agricultura sostenible*. Habana: Editorial Universitario. ISBN 978-959-16-1032-4.
- Docampo, R. (1 de enero del 2013). Compostaje y compost. *Revista INIA Uruguay*. <http://www.inia.uy/Publicaciones/Paginas/publicacionAINFO-13220.aspx>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2013). *Manual de Compostaje del Agricultor. Experiencias en América Latina*. Santiago de Chile, Chile. ISBN 978-92-5-307845-5.
- Flexilatina. (2019). Catálogo técnico mangueras metálicas flexibles. Recuperado el 23 de julio de www.flexilatina.com.
- Geethamania R., Soundaraa B., Kanmanib S., Jayanthia V., Subaharinia T., Sowbiyalakshmia V. y Sowminia C. (2021). Production of cost affordable organic

- manure using institutional waste by rapid composting method. *Materialstoday: PROCEEDINGS*, 45(2), 764-768. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.803>
- González Rey, G. (2006). *Cálculo de árboles y ejes según criterio de resistencia a fatiga del material*. Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, Habana.
- Granja Borja, S. N. (2019). *Estudio comparativo de potencia de los sistemas de alimentación de combustible a 2800 MSNM*. Universidad Internacional del Ecuador, Quito.
- Gray, K. R., & Biddlestone, A. J. (1974). *Decomposition of urban waste*. As cited in: *Richard, 1992. Municipal solid waste composting: Physical and biological processing*. Tarrytown, NY.
- Haug R., Roger T. (1993). *The practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers.
- Hernández L., Benítez M., Bermúdez J. (mayo del 2018). Caracterización físico-química de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos del vertedero controlado en el Centro Urbano Abel Santamaría de Santiago de Cuba. *Tecnología Química*, 38(2), 369-379.
- Hogan J., Miller F. and Finstein M. (mayo de 1989). Physical Modeling of the Composting Ecosystem. *Applied and Environmental Microbiology*, 55(5), 1082–1092.
- Holman J. P. (2010). *Heat Transfer*. McGraw-Hill Companies.
- Incropera F., Dewitt D., Bergman T., Lavine A. (2007). *Fundamental of Heat and Mass Transfer*. Jhon Willey & Sons.
- INTA (Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria). (1993). *Manual Elaboración de abono orgánicos*. Nicaragua: Decreto No2293.
- Ison21 Ingeniería Sostenible. (2019). *Compostaje industrial en vaso*. Ison21. Recuperado el 10 de junio del 2021 de <https://www.ison21.es/compostaje-industrial-en-vaso/>

- Jeris, J. R. (1973). Controlling Environmental Parameters for Optimum Composting.
- Kaza, Silpa, Lisa Yao, Perinaz Bhada-Tata, and Frank Van Woerden. 2018. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development Series. Washington, DC: World Bank. Doi: 10.1596/978-1-4648-1329-0. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.
- Keener, H., Marugg, C., Hansen, R., & Hoitink, H. (1993). *Optimizing the efficiency of the composting process. Science and Engineering of Composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects*. Ohio.
- Lund H. F. (1996). *Manual McGraw-Hill de Reciclaje*. McGraw-Hill.
- Madejón, E. D., & Cabrera, F. (2002). New approaches to establish optimum moisture content for compostable materials.
- Manjunatha G., Chavan D., Lakshmikanthan P., Singh L., Kumar S., Kumar R. (Octubre 2020) Specific heat and thermal conductivity of municipal solid waste and its effect on landfill fires. *Waste Management*, 116(1), 120-130. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.033>
- Martinez C., Oechsner H., Brulé M., Marañón E. (abril del 2014). Estudio de algunas propiedades físico-mecánicas y químicas de residuos orgánicos a utilizar en la producción de biogás en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(2), 63-69.
- Martínez, F. T. (2013). *Determinación de las curvas de temperatura de mezclas de restos de poda de jardinería pública y estiércol de vaca para su compostaje*. Escuela Politécnica Superior de Orihuela, Orihuela.
- Menéndez M. (agosto 2017). *Determinación de Sólidos Totales, Fijos y Volátiles en aguas naturales y efluentes líquidos*. Recuperado el 25 de junio del 2021 de <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/publicaciones/solidos-totales-fijos-volaticos-1021uy>

- Millán F. (2016). Libro de Practicas de Química Analítica. Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3430.6803>
- Ministerio de Ambiente y Agua del Ecuador (2020). Manual de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos Municipales. Quito, Ecuador. ISBN 987-9942-8846-0-2.
- Miyatake, F., & Iwabuchi, k. (2006). *Effect of compost temperature on oxygen uptake rate, specific growth rate and enzymatic activity of microorganisms in dairy cattle manure*. Biores. Technol.
- Monsalve M., Delgado E., Giraldo E. (2000). Modelación del compostaje de biosólido en pila estática aireada. Universidad de los Andes.
- Moran J. y Shapiro N. (2004). Fundamentos de Termodinámica Técnica. Reverté S.A.
- Moreno J. y Moral R. (2008). *Compostaje*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Nagasaki, Kiyohiko, Kato, Junichi. (1987). A new Composting Model and Assessment of Optimum Operation for Effective Drying of Composting Material. *J. Ferment. Technol.*, 65 (4), 441-447.
- Nakasima M., Taboada P., Aguilar Q. y Nicolás Velázquez N. (2017). Adaptación de Inóculos Durante el Arranque de la Digestión Anaerobia con Residuos Sólidos Orgánicos. *Información tecnológica*, 28(1), 199-208. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000100020>
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de máquinas. Un enfoque integrado. Cuarta edición*. México: ISBN: 978-607-32-0589-4.
- Parada Puig*, Raquel. (8 de febrero de 2021). Bacterias Gram negativas. Lifeder. Recuperado de <https://www.lifeder.com/bacterias-gram-negativas/>.
- Petric I. & Selimbašić V. (1 de junio del 2008). Development and validation of mathematical model for aerobic composting process. *Chemical Engineering Journal*, 139(2), 304-317. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.08.017>

- Plastigama (2020). Tuberías y accesorios de PCV y PE BD. Recuperado el 23 de julio de www.plastigama.com.
- PNUD-INIFAT. (2002). *Manual para la producción de abonos orgánicos en la agricultura urbana*.
- Raabe R. D. (1981). *The Rapid Composting Method*. Berkeley: University of California Division of Agricultural Sciences.
- Reinoso, A., & Ruiz, P. (2008). *Determinación de la mejor cantidad de agua y relaciones carbono: nitrógeno para el establecimiento de una compostera*. Zamorano, Honduras.
- Romero, D. (06 de mayo de 2017). La basura orgánica se aprovecha en el relleno sanitario de El Inga. El Comercio. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/actualidad/quito/basura-rellenosanitario-elinga-energia-quito.html>
- Salazar T. (2014). Actividad microbiana en el proceso de compostaje aerobio de residuos sólidos orgánicos. *Revista de Investigación Universitaria*, 3(2), 74-84. <https://doi.org/10.17162/riu.v3i2.524>
- SKF. (2019). Rodamientos. Recuperado el 23 de Julio de www.skf.com.
- Soliva, M., & López, M. (2012). *Calidad del compost: Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso*. Escola Superior d'Agricultura de Barcelona. UPC, Barcelona.
- Stronguiló M., Chacón L. (octubre del 2915). *Caracterización de biomasa residual de la región Arequipa para la producción de biocombustibles*. Enfoque UTE, 6(4), 42-54. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v6n4.77>
- Suler, D., & Finstein, S. (1977). *Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO2 Formation in Bench-Scale, continuously Thermophilic Composting of Solid Waste*. Applied and Environmental Microbiology.

Techobanoglous G., Theisen H., Vigil S. (1996). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. McGraw-Hill.

Thalie, P. (7 de noviembre del 2020). Reciclaje de desechos, una tarea pendiente en Guayaquil. Primicias.ec. <https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/reciclaje-tarea-pendiente-guayaquil/>

Tortosa, G. (10 de febrero del 2015). *Sistemas de compostaje. Compostando ciencia*. Recuperado el 10 de junio del 2021 de <http://www.compostandociencia.com/2015/02/sistemas-de-compostaje/>

Traceparts. (2018). Ventilador axial D, 80x80x25mm,69 m3/h, 2W,12V dc. Recuperado el 23 de Julio de www.traceparts.com.

WEG. (2019). W22 Motor Eléctrico monofásico Catalogo Comercial Mercado Latinoamericano. Recuperado el 23 de Julio de www.weg.net.

White F. M. (2004). *Mecánica de Fluidos*. McGraw-Hill

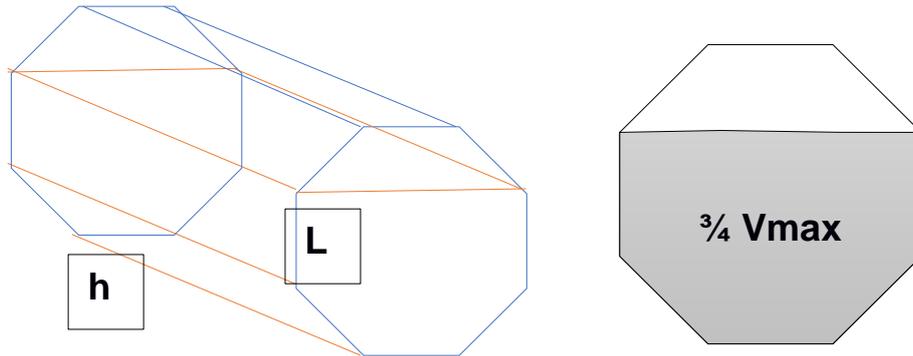
Zero Waste Store. (2020). Compostera Familiar. Recuperado el 23 de Julio de <https://zerowastestoreecuador.com/producto/composteras-caseras/>

APÉNDICES

APÉNDICE A

CÁLCULOS DEL DIMENSIONAMIENTO DE PILA

El tanque es de forma transversal octagonal y se establecerá que solo este lleno en sus $\frac{3}{4}$ partes de su volumen máximo, por seguridad y buen desarrollo del proceso.



4.1 Geometría del contenedor y volumen ocupado (Elaboración propia).

Debemos hacer que: $\frac{3}{4} V_{max} = V_{RSO} = 0.14 \text{ m}^3$ para conocer las dimensiones del tanque y la pila. Para un cilindro octogonal:

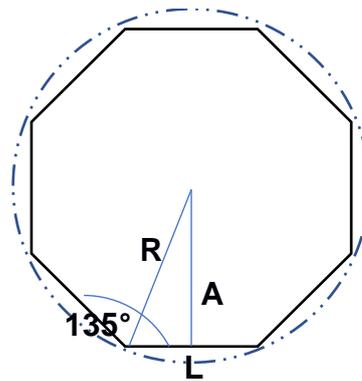
$$V_{max} = \frac{8hLA_p}{2}$$

$V_{max} (\text{m}^3)$ → Volumen máximo.

$h (\text{m})$ → Altura del cilindro o prisma.

$L (\text{m})$ → Longitud de lado.

$A_p (\text{m})$ → Apotema



4.2 Geometría del octágono (elaboración propia).

$$\frac{3}{4} V_{max} = 3hLA_p = 0.14 \text{ m}^3$$

Del triángulo formado dentro del octágono obtenemos:

$$\text{sen}67.5^\circ = \frac{A_p}{R} \quad y \quad \text{cos}67.5^\circ = L/2R$$

Tomando como radio de circunferencia $R = 0.28 \text{ m}$:

$$\text{sen}67.5^\circ = \frac{A_p}{0.28} \rightarrow A_p = 0.26 \text{ m} \quad y \quad \text{cos}67.5^\circ = \frac{L}{2(0.28)} \rightarrow L \approx 0.214 \text{ m}$$

$$3hLA_p = 0.14 \text{ m}^3 \rightarrow h = \frac{0.14}{3(0.214)(0.26)} \rightarrow h = 0.84 \text{ m}$$

Esa es una altura o longitud bastante considerable para el tanque, por lo cual dichas dimensiones son aceptadas.

APÉNDICE B

CÁLCULOS DE RELACIÓN C/N Y HUMEDAD DE MEZCLA

Tabla 4.1 Componentes de la mezcla de compostaje. Propiedades tomadas de Cornell Waste Management Institute (1996), Stronguilo M. y Chacón L. (2015).

	Sustrato	%C (en peso)	%N (en peso)	%HR (humedad)
Residuos de comestibles				
S ₁	Residuos de frutas	56	1,4	80
S ₂	Residuos de tomates	49,5	4,5	62
S ₃	Residuos vegetales	51,3	2,7	87
S ₄	Basura (desperdicio de comida)	36	2,4	69
Residuos de jardín-agrícolas				
S ₅	Hierba general	49,3	2,1	9
S ₆	Paja general	56	0,7	12
S ₇	Maderas (astillas, virutas, etc.)	50,4	0,09	15,5
S ₈	Hojas sueltas y secas	48,6	0,9	38
S ₉	Recortes de arbustos	53	1	15
S ₁₀	Aserrín	106,1	0,24	39
Estiércol				
S ₁₁	Estiércol de vaca	7,3	0,29	83
S ₁₂	Estiércol de ave	41	1,3	84

Como primera prueba consideramos los siguientes porcentajes de masas y valores individuales para cada sustrato.

Tabla 4.2 1era. Iteración de proporciones de masas (elaboración propia).

	Sustrato	Masa (kg)
50 % de la masa total		
S ₁	Residuos de frutas	4,5
S ₂	Residuos de tomates	4,5
S ₃	Residuos vegetales	4,5
S ₄	Basura (desperdicio de comida)	7,5

25 % de masa total		
S ₅	Hierba general	1,75
S ₆	Paja general	1,75
S ₇	Maderas (astillas, virutas, etc.)	1,75
S ₈	Hojas sueltas y secas	1,75
S ₉	Recortes de arbustos	1,75
S ₁₀	Aserrín	1,75
25% de la masa total		
S ₁₁	Estiércol de vaca	5,25
S ₁₂	Estiércol de ave	5,25

La suma de las masas de los sustratos debe ser igual a la masa total (42 kg).

$$M_T = \sum S_n = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7 + S_8 + S_9 + S_{10} + S_{11} + S_{12}$$

$$M_T = 4.5 + 4.5 + 4.5 + 7.5 + 1.75 + 1.75 + 1.75 + 1.75 + 1.75 + 5.25 + 5.25$$

$$M_T = 42.0 \text{ kg}$$

Hallamos la relación carbono nitrógeno C/N de la mezcla.

$$\frac{C}{N} = \frac{\sum S_n [C_n (100 - \%HR_n)]}{\sum S_n [N_n (100 - \%HR_n)]} = \frac{S_1 [C_1 (100 - \%HR_1)] + S_2 [C_2 (100 - \%HR_2)] + \dots}{S_1 [N_1 (100 - \%HR_1)] + S_2 [N_2 (100 - \%HR_2)] + \dots}$$

$$\frac{C}{N} = \frac{4.5[56(100 - 80)] + 4.5[49.5(100 - 62)] + \dots}{4.5[1.4(100 - 80)] + 4.5[4.5(100 - 62)] + \dots} \rightarrow \frac{C}{N} = 7.7$$

Ahora el porcentaje de humedad promedio de la mezcla.

$$\%HR_m = \frac{\sum \%HR_n}{n} = \frac{\%HR_1 + \%HR_2 + \%HR_3 + \dots}{12}$$

$$\%HR_m = \frac{80 + 62 + 87 + \dots}{12} \rightarrow \%HR_m = 49.5$$

La humedad está dentro del rango admitido, pero no se cumple con la relación C/N establecida, por ende, se volverá a realizar otra iteración con diferentes proporciones de masa.

Tabla 4.3 2da. Iteración de proporciones de masa (elaboración propia).

	Sustrato	Masa (kg)
33.1 % de la masa total		
S ₁	Residuos de frutas	3
S ₂	Residuos de tomates	3
S ₃	Residuos vegetales	3
S ₄	Basura (desperdicio de comida)	4,9
28.33 % de masa total		
S ₅	Hierba general	1
S ₆	Paja general	2
S ₇	Maderas (astillas, virutas, etc.)	2,3
S ₈	Hojas sueltas y secas	2,3
S ₉	Recortes de arbustos	2,3
S ₁₀	Aserrín	2
33.1% de la masa total		
S ₁₁	Estiércol de vaca	6,95
S ₁₂	Estiércol de ave	6,95

Realizamos los mismos cálculos que antes.

$$M_T = 3 + 3 + 3 + 4.9 + \dots \rightarrow M_T = 39.7 \text{ kg}$$

$$\frac{C}{N} = \frac{3[56(100 - 80)] + 3[49.5(100 - 62)] + \dots}{3[1.4(100 - 80)] + 3[4.5(100 - 62)] + \dots} \rightarrow \frac{C}{N} = 12.2$$

La relación C/N Aun no se encuentra dentro del rango admitido. Consideramos ahora las siguientes proporciones.

Tabla 4.4 3cera. iteración de proporciones de masas (elaboración propia).

	Sustrato	Masa (kg)
40 % de la masa total		
S ₁	Residuos de frutas	3,5
S ₂	Residuos de tomates	3,5
S ₃	Residuos vegetales	4
S ₄	Basura (desperdicio de comida)	5,8
30.24 % de masa total		
S ₅	Hierba general	0,2
S ₆	Paja general	2
S ₇	Maderas (astillas, virutas, etc.)	3
S ₈	Hojas sueltas y secas	3
S ₉	Recortes de arbustos	3
S ₁₀	Aserrín	1,5
29.76 % de la masa total		
S ₁₁	Estiércol de vaca	6,5
S ₁₂	Estiércol de ave	6

$$M_T = 3.5 + 3.5 + 4 + 5.8 + \dots \rightarrow M_T = 42.0 \text{ kg}$$

$$\frac{C}{N} = \frac{3.5[56(100 - 80)] + 3.5[49.5(100 - 62)] + \dots}{3.5[1.4(100 - 80)] + 3.5[4.5(100 - 62)] + \dots} \rightarrow \frac{C}{N} = 27.5$$

Con estas proporciones se obtiene una relación C/N dentro del rango 25-30:1, así también como humedad y masa total correcta.

APÉNDICE C

CÁLCULOS DE TASA DE CONSUMO DE SÓLIDOS VOLÁTILES

Para calcular la masa de sólidos volátiles biodegradables rápidamente SVB_R y lentamente SVB_L primero debemos clasificarlos.

Los residuos que se descomponen lentamente tienen mayor valor de C/N, mientras que los que se descomponen rápidamente tienen C/N bajo.

Tabla 4.5 Residuos que se descomponen lentamente (elaboración propia).

	Sustrato	C/N alto	Masa (kg)
S ₁	Residuos de frutas	40	3.5
S ₅	Hierba general	23.5	0.2
S ₆	Paja general	80	2.0
S ₇	Maderas (astillas, virutas, etc.)	560	3.0
S ₈	Hojas sueltas y secas	54	3.0
S ₉	Recortes de arbustos	53	3.0
S ₁₀	Aserrín	442	1,5
S ₁₁	Estiércol de vaca	25	6,5
S ₁₂	Estiércol de ave	31.5	6

Tabla 4.6 Residuos que se descomponen rápidamente (elaboración propia).

	Sustrato	C/N bajo	Masa (kg)
S ₂	Residuos de tomates	11	3,5
S ₃	Residuos vegetales	19	4
S ₄	Basura (desperdicio de comida)	15	5,8

Podemos calcular el porcentaje de sólido volátil de cada residuo multiplicando su masa por su respectivo %SV según el tipo de residuo que sea.

$$MSVB_n = S_n * \%SV$$

Con las tablas anteriores ya podemos calcular SVB_R y SVB_L .

$$SVB_L = S_1 * \%SV + S_5 * \%SV + S_6 * \%SV + S_7 * \%SV + S_8 * \%SV + S_9 * \%SV + S_{10} * \%SV \\ + S_{11} * \%SV + S_{12} * \%SV$$

$$SVB_L = 3.5(0.943) + 0.2(0.791) + 2.0(0.791) + 3.0(0.791) + 3.0(0.791) + 3.0(0.791) \\ + 1.5(0.791) + 6.5(0.793) + 6.0(0.793)$$

$$SVB_L = 23.2 \text{ kg}$$

$$SVB_R = S_2 * \%SV + S_3 * \%SV + S_4 * \%SV$$

$$SVB_R = 3.5(0.943) + 4.0(0.943) + 5.8(0.943) +$$

$$SVB_R = 12.5$$

Ahora calculamos los términos $F(ST)$.

$$F_1(T) = [1.0618^{T-20} - 1.39^{T-65}]$$

Asignamos a T el valor de la temperatura de la mezcla, tomamos $T = 25^\circ$.

$$F_1(T) = [1.0618^{25-20} - 1.39^{25-65}]$$

$$F_1(T) = 1.3$$

Esta entre 0 y 15, por lo cual es aceptable.

$$F_2(ST) = \frac{1}{e^{[A_2(1 - \frac{\%ST}{100}) + B_2]} + 1}$$

Para $\%ST$ consideramos el promedio de dicho valor de cada tipo residuo, mientras que $A_2 = -30$ y $B_2 = 4$

$$\%ST = \frac{\%ST_{res. \text{ dom.}} + \%ST_{res. \text{ jar-agri.}} + \%ST_{estier.}}{3}$$

$$\%ST = \frac{11 + 70 + 15.3}{3} \rightarrow \%ST = 32.1\%$$

$$F_2(ST) = \frac{1}{e^{[(-30)(1 - \frac{32.1}{100}) + 4]} + 1}$$

$$F_2(ST) = 0.90$$

Esta entre 0 y 1, por lo cual es aceptable.

$$F_3(ST) = \frac{1}{e^{[A_3(1 - \frac{\%ST}{100}) + B_3]} + 1}$$

Donde $A_3 = -19$ y $B_3 = 11.5$

$$F_3(ST) = \frac{1}{e^{[(-19)(1 - \frac{32.1}{100}) + 11.5]} + 1}$$

$$F_3(ST) = 0.80$$

Esta entre 0 y 1, por lo cual es aceptable.

Por lo tanto:

$$\frac{dSVB}{dt} = (Kd_{L20} * SVB_L + Kd_{R20} * SVB_R) * F_1(T) * F_2(ST) * F_3(ST)$$

$$\frac{dSVB}{dt} = \left(\frac{0.001}{dia} * 23.2kg + \frac{0.075}{dia} * 12.5kg \right) * 1.3 * 0.9 * 0.8$$

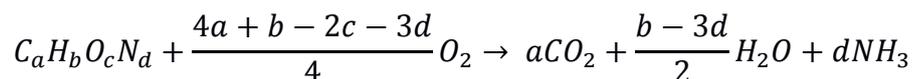
$$\frac{dSVB}{dt} = 0.898 \text{ kg/dia}$$

Este valor representaría la tasa de degradación de los residuos sólidos.

APÉNDICE D

CÁLCULOS DE LA TASA DE AIREACIÓN U OXIGENACIÓN

La ecuación química que describe el proceso es:



Para ello se hace necesario conocer las características químicas de los sustratos.

Tabla 4.7 Composición química de sustratos. Tomado de Cornell Waste Management Institute (1996), Stronguilo M. y Chacón L. (2015).

	Sustrato	%C (en peso)	%N (en peso)	%O (en peso)	%H (en peso)
S ₁	Residuos de frutas	56	1,4	39,5	6,2
S ₂	Residuos de tomates	49,5	4,5	45,0	6,0
S ₃	Residuos vegetales	51,3	2,7	45,0	6,0
S ₄	Basura (desperdicio de comida)	36	2,4	37,6	6,4
S ₅	Hierba general	49,3	2,1	45,0	6,0
S ₆	Paja general	56,0	0,7	35,7	8,1
S ₇	Maderas (astillas, virutas, etc.)	50,4	0,09	45,5	5,8
S ₈	Hojas sueltas y secas	48,6	0,9	45,0	6,0
S ₉	Recortes de arbustos	53	1,0	45,0	6,0
S ₁₀	Aserrín	106,1	0,24	45,5	5,8
S ₁₁	Estiércol de vaca	7,3	0,29	57,5	4,7
S ₁₂	Estiércol de ave de corral	41,0	1,3	23,9	5,5

Tabla 4.8 Peso atómico de elementos químicos.

Elemento químico	C	H	O	N
Peso atómico	12	1	16	14

$$\frac{\% \text{ elemento A}}{\text{peso atómico del elemento A}} = x_A ; \frac{\% \text{ elemento B}}{\text{peso atómico del elemento B}} = x_B ; \dots\dots\dots$$

$$\# \text{ de átomos de A} = \frac{x_A}{\text{menor } x}$$

- Para el sustrato S₁ (residuos de frutas)

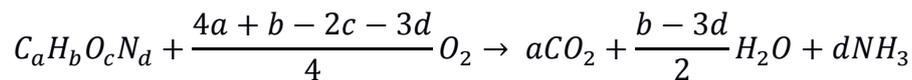
$C: \frac{56}{12} = 4.67$	$H: \frac{6.2}{1} = 6.2$	$O: \frac{39.5}{16} = 2.47$	$N: \frac{1.4}{14} = 0.1$
---------------------------	--------------------------	-----------------------------	---------------------------

$$\# \text{ de átomos de C} = \frac{4.67}{0.087} = 54 \rightarrow a = 47$$

$$\# \text{ de átomos de H} = \frac{6.2}{0.087} = 71 \rightarrow b = 62$$

$$\# \text{ de átomos de O} = \frac{2.82}{0.087} = 32 \rightarrow c = 25$$

$$\# \text{ de átomos de N} = \frac{0.087}{0.087} = 1 \rightarrow d = 1$$



Requerimiento de oxígeno:

$$n_{\text{moles}} = \frac{m}{M} \rightarrow m = n_{\text{moles}} M$$

$$\rightarrow g \text{ de } O_2 = n_{\text{moles } O_2} (M_{O_2}) \quad ; \quad n_{\text{moles } O_2} = 49 \text{ mol} \text{ y } M_{O_2} = 2 * 16 = 32 \text{ g/mol}$$

$$\rightarrow g \text{ de } O_2 = (49 \text{ mol}) \left(\frac{32 \text{ g}}{\text{mol}} \right) = 1570 \text{ g de } O_2$$

Dividiendo entre la masa del sustrato S₁ presente en la mezcla:

$$g \text{ de } O_2 / g \text{ de } S_1 = \frac{1570 \text{ g de } O_2}{3.5 \times 10^3 \text{ g de } S_1} = 0.45 \text{ g de } O_2 / g \text{ de } S_1$$

Lo mismo se realiza para cada sustrato, se obtiene lo siguiente:

Tabla 4.9 Masa de oxígeno requerida por gramo de sustrato.

	Sustrato	<i>g de O₂/g de S</i>
S ₁	Residuos de frutas	0,45
S ₂	Residuos de tomates	0,11
S ₃	Residuos vegetales	0,18
S ₄	Basura (desperdicio de comida)	0,11
S ₅	Hierba general	4,36
S ₆	Paja general	1,77
S ₇	Maderas (astillas, virutas, etc.)	7,01
S ₈	Hojas sueltas y secas	0,68
S ₉	Recortes de arbustos	0,67
S ₁₀	Aserrín	11,02
S ₁₁	Estiércol de vaca	0,01
S ₁₂	Estiércol de ave de corral	0,23

A continuación, se suma las cantidades anteriores y se multiplica por la masa total de la mezcla para obtener la oxigenación total.

$$O_2 = g \text{ de } O_2 / g \text{ de } S_1 + g \text{ de } O_2 / g \text{ de } S_2 + g \text{ de } O_2 / g \text{ de } S_3 + \dots$$

$$O_2 = 0.45 g \text{ de } O_2 / g \text{ de } S_1 + 0.12 g \text{ de } O_2 / g \text{ de } S_2 + 0.19 g \text{ de } O_2 / g \text{ de } S_3 + \dots$$

$$O_2 = 26.57 g \text{ de } O_2 / g \text{ de mezcla}$$

Debido a que se está trabajando con un contenido de 42 kg de mezcla de residuos sólidos orgánicos.

$$O_2REQ = (26.57 g \text{ de } O_2 / g \text{ de mezcla}) * (42 \times 10^3 g)$$

$$O_2REQ = 1.11 \times 10^6 g = 1110 kg \text{ de } O_2$$

$$aire_{REQ} = 1.11 \times 10^6 g \text{ de } * \frac{100 g \text{ de aire}}{23.3 g \text{ de } O_2} = 4764 kg \text{ de aire}$$

Se asume que se aplica aireación durante 30 minutos por día (5 minutos por cada 15, en 2 horas) durante 4 semanas correspondientes a la etapa termofílica.

Teniendo un total de 840 minutos.

$$aire_{REQ} = \frac{aire_{REQ}}{\Delta t} = \frac{4764 \text{ kg de aire}}{840 \text{ min} * (60\text{s}/1\text{min})} = 0.094 \frac{\text{kg de aire}}{\text{s}}$$

$$\rho_{aire} = \frac{\dot{m}}{\dot{V}} \rightarrow \dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_{aire @ 26^{\circ}\text{C}}} = \frac{0.094 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1.1614 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\text{flujo de aire requerido} \rightarrow \dot{V} = 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{V} = 288 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 169 \text{ cfm}$$

APÉNDICE E

CÁLCULOS DE ENERGÍA REQUERIDA

Tabla 4.10 Masa de CO₂ requerida por gramo de sustrato.

	Sustrato	<i>g de CO₂/g de S</i>
S ₁	Residuos de frutas	0,59
S ₂	Residuos de tomates	0,16
S ₃	Residuos vegetales	0,24
S ₄	Basura (desperdicio de comida)	0,13
S ₅	Hierba general	6,03
S ₆	Paja general	2,05
S ₇	Maderas (astillas, virutas, etc.)	9,58
S ₈	Hojas sueltas y secas	0,92
S ₉	Recortes de arbustos	0,91
S ₁₀	Aserrín	15,13
S ₁₁	Estiércol de vaca	0,20
S ₁₂	Estiércol de ave de corral	0,27

Sumando se obtiene:

$$CO_2 = 0.59 \text{ g de } CO_2/\text{g de } S_1 + 0.16 \text{ g de } CO_2/\text{g de } S_2 + 0.24 \text{ g de } CO_2/\text{g de } S_3 + \dots$$

$$CO_2 = 36.21 \text{ g de } CO_2/\text{g de mezcla}$$

$$CO_2GEN = (36.21 \text{ g de } CO_2/\text{g de mezcla}) * (42 \times 10^3 \text{ g})$$

$$CO_2GEN = 1.52 \times 10^6 \text{ g} = 1521 \text{ kg de } CO_2$$

De resultados anteriores:

$$CO_2GEN = 1.52 \times 10^6 \text{ g de } CO_2$$

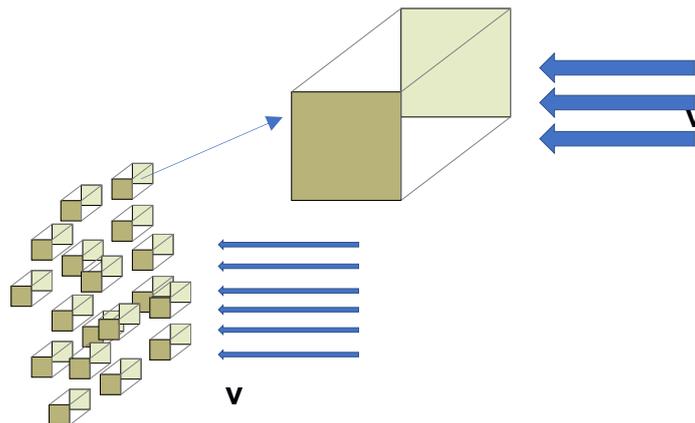
$$CO_2 GEN = 1.52 \times 10^6 \text{ g de } CO_2 * \frac{1 \text{ mol de } CO_2}{44 \text{ g de } CO_2} = 34.54 \times 10^6 \text{ mmol}$$

$$\rightarrow q_r = (0.11)(34.54 \times 10^6 \text{ mmol}) \rightarrow q_r = 3.8 \times 10^6 \text{ Kcal}$$

Asumiendo que el proceso tendrá una duración de 30 días, tenemos:

$$\dot{q}_r = \frac{q_r}{\Delta t} = \frac{3.8 \times 10^6 \text{ kcal}}{60 \text{ dias}} = 63.3 \times 10^3 \frac{\text{kcal}}{\text{dia}} = 2.64 \times 10^3 \text{ kcal/h}$$

Para hallar esta pérdida de calor supondremos que los residuos están muy bien fragmentados y poseen formas prismáticas como se muestra en la figura.



4.3 Modelamiento de la aireación sobre la materia.

Se procede a calcular el número de Reynolds Re_D con el flujo de aire a aplicar. De cálculos previos sabemos que:

$$\text{flujo de aire requerido} \rightarrow \dot{V}_{\text{aire}} = 12.31 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 44.28 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Tomando un área de ventilador A de diámetro 40 cm. La velocidad del aire será:

$$\dot{V} = Av \rightarrow v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{12.31 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{\pi}{4} (40 \times 10^{-2} \text{ m})^2} \rightarrow v = 0.10 \text{ m/s}$$

Para el aire a $T_\infty = 26^\circ\text{C} \approx 300 \text{ K} \rightarrow \nu = 15.89 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} ; k = 26.3 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{mK}} ; Pr = 0.69$

$$\text{Re}_D = vD/\nu$$

$$\text{Re}_D = \frac{\left(0.10 \frac{m}{s}\right) (2 \times 10^{-2} m)}{15.89 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 125 \rightarrow \text{flujo laminar}$$

De la tabla 1.3 se toma las constantes C y m en base al número de Reynolds y la geometría del elemento.

$$C = 0.102 ; m = 0.675$$

Calculamos el número de Nusselt.

$$\overline{\text{Nu}}_D = C \text{Re}_D^m \text{Pr}^{1/3}$$

$$\overline{\text{Nu}}_D = (0.102)(125)^{0.675} (0.69)^{1/3}$$

$$\overline{\text{Nu}}_D = 2.34$$

El coeficiente de convección es:

$$\overline{\text{Nu}}_D = \frac{\bar{h}D}{k} \rightarrow \bar{h} = \frac{\overline{\text{Nu}}_D k}{D} = \frac{(2.34)(26.3 \times 10^{-3} \frac{W}{mK})}{(2 \times 10^{-2} m)}$$

$$\bar{h} = 3.08 \frac{W}{m^2K}$$

La pérdida de calor será:

$$\dot{q} = \bar{h}A_s(T_s - T_\infty) = \bar{h}(4Dl)(T_s - T_\infty)$$

$$\dot{q} = \left(3.08 \frac{W}{m^2K}\right) (4 * 2 \times 10^{-2} m * 7 \times 10^{-2} m)(50 - 26)$$

$$\dot{q} = 0.414 W$$

Ésta la es la pérdida de calor para un solo elemento, estimando la pérdida para la cantidad de biomasa completa con el volumen que esta ocupa se obtiene lo siguiente:

$$\dot{q}_a = 0.414 W * \left(\frac{V_{total}}{V_{unitario}}\right) = 0.414 W * \left(\frac{0.14 m^3}{D^2 l}\right)$$

$$\dot{q}_a = 0.414 W * \left(\frac{0.14 m^3}{(2 \times 10^{-2} m)^2 (7 \times 10^{-2} m)}\right)$$

$$\dot{q}_a = 2070 \text{ W} = 1.78 \times 10^3 \text{ kcal/h}$$

- Conducción

$$\dot{q}_{cond} = \frac{kA_t}{e}(T_i - T_e)$$

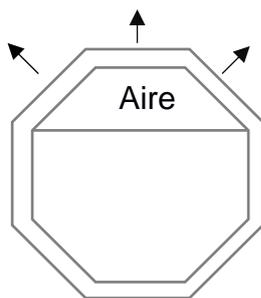
$$\dot{q}_{cond} = \frac{k(2A_1 + 2A_2 + 2A_3 + A_4)}{e}(T_i - T_e)$$

La conductividad térmica k para el material del tanque (PCV) es 0.16 W/mK.

$$\rightarrow \dot{q}_{cond} = \frac{k[2(3A_pL) + 2(hL) + 2(hL) + hL]}{e}(T_i - T_e)$$

$$\dot{q}_{cond} = \frac{(0.16 \frac{W}{mK})[6(0.26)(0.214) + 5(0.84)(0.214)]m^2}{7 \times 10^{-3}m}(50 - 26)^\circ\text{C}$$

$$\dot{q}_{cond} = 946.7 \text{ W} = 814 \text{ kcal/h}$$



$$\dot{q}_s = \frac{k(3hl)}{e}(T_i - T_e)$$

Establecemos que el aire en el interior está a $T_i = 30^\circ\text{C}$, mientras que la temperatura exterior a $T_e = 26$

$$\dot{q}_s = \frac{(0.16 \frac{W}{mK})(3)(0.84)(0.214)}{7 \times 10^{-3}m}(30 - 26)^\circ\text{C}$$

4.4 Convección en pared superior (elaboración propia).

$$\dot{q}_s = 49.3 \text{ W} = 42.4 \text{ kcal/h}$$

- Convección

Calculamos el número de Rayleigh considerando una temperatura del material $T_s = 50^\circ\text{C}$ y temperatura del aire alrededor de $T_\infty = 30^\circ\text{C}$.

Propiedades del aire a $T = (T_s + T_\infty)/2 = (50 + 30)/2 = 40^\circ\text{C} = 313 \text{ K}$:

$$k = 27.188 \times 10^{-3} \text{ W/mK} ; \nu = 17.097 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} ; \alpha = 24.276 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} ;$$

$$Pr = 0.7053 ; \beta = 1/T = 3.2 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$L = A_s/P = (2A_p h)/(4A_p 2h) = 0.25 \text{ m}$$

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} = \frac{(9.8m/s^2)(3.2 \times 10^{-3}K^{-1})(50 - 28)^\circ C(0.25)^3}{(17.097 \times 10^{-6}m^2/s)(24.276 \times 10^{-6}m^2/s)}$$

$$Ra_L = 25.9 \times 10^6$$

$$\rightarrow \overline{Nu}_D = 0.54Ra_L^{1/4} = 0.54(25.9 \times 10^6)^{1/4} = 38.52$$

$$\rightarrow \bar{h} = \frac{\overline{Nu}_D k}{L} = \frac{(38.52)(27.188 \times 10^{-3}W/mK)}{0.25m} = 4.19 W/m^2K$$

$$q_{conv} = \bar{h}A_s(T_s - T_\infty)$$

$$q_{conv} = (4.19 W/m^2K)(4 * 0.26 * 0.84)m(50 - 28)^\circ C$$

Para la pérdida de energía por evaporación de agua, se debe conocer la generación de agua durante el proceso. Mediante estequiometria se puede conocer ese valor al igual como se hizo para el cálculo de O2 y CO2.

Se obtiene lo siguiente:

$$H_2O \text{ generada} = 8.31 \text{ g de } H_2O/\text{g de mezcla}$$

Multiplicando por la tasa de degradación:

$$H_2O \text{ generada} = \frac{8.31 \text{ g de } H_2O}{\text{g de mezcla}} * \frac{898 \text{ g de mezcla}}{\text{dia}} = 7462 \text{ g de } H_2O/\text{dia}$$

$$H_2O \text{ generada} = \frac{7462 \text{ g de } H_2O}{\text{dia}} * \frac{\text{dia}}{24h} * \frac{1h}{3600s} = 8.64 \times 10^{-5} \text{ kg/s de } H_2O$$

Asumiendo que toda el agua generada se vaporiza a la misma tasa, el calor total para vaporizar el agua es:

$$\dot{q}_w = \dot{m}c_w\Delta T + \dot{m}L_v$$

El calor específico c_w y calor latente de vaporización L_v del agua es 1kcal/kgC° y 540 kcal/kg respectivamente.

$$\dot{q}_w = (8.64 \times 10^{-5} \text{ kg/s})(1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C})(100 - 26)^\circ\text{C} + (8.64 \times 10^{-5} \text{ kg/s})(540 \text{ kcal/kg})$$

$$\dot{q}_w = 0.053 \text{ kcal/s} = 190.8 \text{ kcal/h}$$

Para el cálculo de la pérdida de calor en sistema eje-paletas \dot{q}_{eje} se realiza lo siguiente

$$q = m_{eje} c_{acero} \Delta T$$

Asumiendo un diámetro del eje de $d = 25 \text{ mm}$, la longitud será $h = 0.84 \text{ m}$.

Peso específico del acero al carbono $\rightarrow \gamma = 0.28 \text{ lb/in}^3 = 76.0 \times 10^3 \text{ N/m}^3$

Calor específico del acero $\rightarrow c_{acero} = 460 \text{ J/kgK}$

$$\gamma = \rho g = (m/V)g \rightarrow m = \gamma V/g$$

$$m = (76.0 \times 10^3 \text{ N/m}^3) \left(\frac{\pi}{4} (25 \times 10^{-3})^2 (0.84) \text{ m}^3 \right) / (9.8 \text{ m/s}^2)$$

$$m_{eje} = 3.19 \text{ kg}$$

Asumiendo que el eje se encuentra a $T_1 = 30^\circ\text{C}$ antes del activar el sistema de calentamiento y alcanza la misma temperatura que la biomasa.

$$\rightarrow q = (3.19 \text{ kg})(460 \text{ J/kgK})(60 - 30)^\circ\text{C}$$

$$q = 44.02 \text{ kJ}$$

Con todas las transferencias de calor calculadas se puede determinar la energía que es necesario agregar.

Asumimos $T_i = 30^\circ\text{C}$, pretendemos mantener la temperatura de la materia a $T_f = 60^\circ\text{C}$.

Propiedades:

Calor específico promedio de la madera $\rightarrow C_{pm} = 0.57 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$

Calor específico del agua $\rightarrow C_{pw} = 1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$

Calor específico promedio de la biomasa $\rightarrow C_{ps} = 0.236 \frac{J}{gK} = 0.056 \frac{kcal}{kg^{\circ}C}$ (Manjunatha et al., 2020)

Masa de madera aproximada $\rightarrow M = 4.5 \text{ kg}$

Masa de agua aproximada $\rightarrow W = (49\%) * 42 \text{ kg} = 20.5 \text{ kg}$

Biomasa restante aproximada $\rightarrow S = 16 \text{ kg}$

Estableciendo que esas condiciones de temperatura se alcancen en un tiempo $\Delta T = 15 \text{ min}$

$$(C_{pm}M + C_{ps}S + C_{pw}W) \frac{\Delta T}{\Delta t} = (\dot{q}_r + \dot{q}_{agr}) - \dot{q}_a - \dot{q}_w - \dot{q}_p - \dot{q}_{eje}$$

$$\dot{q}_{agr} = (C_{pm}M + C_{ps}S + C_{pw}W) \frac{\Delta T}{\Delta t} + \dot{q}_a + \dot{q}_w + \dot{q}_p + \dot{q}_{eje} - \dot{q}_r$$

$$\dot{q}_{agr} = \left(0.57 \frac{kcal}{kg^{\circ}C} * 4.5 \text{ kg} + 0.056 \frac{kcal}{kg^{\circ}C} * 16 \text{ kg} + \frac{1kcal}{kg}^{\circ}C * 20.5 \text{ kg} \right) \frac{(60 - 30)^{\circ}C}{0.25} \\ + (1.78 \times 10^3 + 190.8 + 925.6 + 10.57 - 2.64 \times 10^3) kcal/h$$

$$\dot{q}_{agr} = 2608.3 \text{ kcal/h}$$

$$\dot{q}_{agr} = 3.03 \text{ kW}$$

APÉNDICE F

CÁLCULOS DEL DISEÑO DE ESTRUCTURA O BASE

Se hizo la selección del material y las respectivas dimensiones estimadas de la estructura. En base a los productos comunes en el mercado y con un menor precio económico, la aleación de aluminio número 2011-T6, cuya densidad a 20°C es 2.70 kg/dm³

Número	Material	Condición	Resistencia (a la tensión)					Resistencia a la deformación, exponente m	Resistencia a la fractura ϵ_f
			Fluencia S_y MPa (kpsi)	Última S_U MPa (kpsi)	A la fractura, σ_f MPa (kpsi)	Coefficiente σ_0 MPa (kpsi)			
1018	Acero	Recocido	220 (32.0)	341 (49.5)	628 (91.1) ^f	620 (90.0)	0.25	1.05	
1144	Acero	Recocido	358 (52.0)	646 (93.7)	898 (130) ^f	992 (144)	0.14	0.49	
1212	Acero	HR	193 (28.0)	424 (61.5)	729 (106) ^f	758 (110)	0.24	0.85	
1045	Acero	TyR 600°F	1520 (220)	1580 (230)	2380 (345)	1880 (273) ^f	0.041	0.81	
4142	Acero	TyR 600°F	1720 (250)	1930 (210)	2340 (340)	1760 (255) ^f	0.048	0.43	
303	Acero inoxidable	Recocido	241 (35.0)	601 (87.3)	1520 (221) ^f	1410 (205)	0.51	1.16	
304	Acero inoxidable	Recocido	276 (40.0)	568 (82.4)	1600 (233) ^f	1270 (185)	0.45	1.67	
2011	Aleación de aluminio	T6	169 (24.5)	324 (47.0)	325 (47.2) ^f	620 (90)	0.28	0.10	
2024	Aleación de aluminio	T4	296 (43.0)	446 (64.8)	533 (77.3) ^f	689 (100)	0.15	0.18	
7075	Aluminum aluminio	T6	542 (78.6)	593 (86.0)	706 (102) ^f	882 (128)	0.13	0.18	

4.5 Resultados de ensayos a la tensión de materiales (Norton, 2011).

Densidad a 20 °C [kg/dm ³]	Módulo de elasticidad [MS/m]	Conductividad térmica [W/m•K]	Calor específico [J/kg•K]	Módulo de elasticidad [MPa]	Módulo de cizalladura [MPa]
2,70	34–38	200–220	898	69500	26100

4.6 Ficha técnica AW-6060.

A continuación, se realiza una sumatoria de todas las fuerzas verticales ejercidas sobre el eslabón en estado estático.

$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 - W_T/2 - W_b = 0$$

$$R_1 = W_T + W_b = 162.8 + 1.21$$

$$R_1 = 164.01 \text{ N}$$

Luego, se procede a realizar la sumatoria de los momentos, con sentido horario positivo, ejercidos en el parte superior donde se aplica el peso del sistema.

$$\sum M_{WT} = 0$$

$$R_2(0.74) + W_b(0.15) - R_1(0.3) = 0$$

$$R_2 = \frac{(164.01)(0.3) - (1.21)(0.15)}{0.74}$$

$$R_2 = 66.245 \text{ N}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$R_3 - R_2 = 0$$

$$R_3 = R_2 = 66.245 \text{ N}$$

Para finalizar se realiza la suma de todas las fuerzas axiales sobre el elemento, dicha carga resultante P es la que provocará sobre el material un esfuerzo de compresión.

$$P = R_3 / \cos(68^\circ) + W_T / 2\cos(22^\circ) + W_b / \cos(22^\circ)$$

$$P = (66.245) / \cos(68^\circ) + (162.8) / 2\cos(22^\circ) + (1.21) / \cos(22^\circ)$$

$$P = 353.73 \text{ N}$$

Para determinar si una columna puede sufrir falla de compresión o pandeo, se utiliza un factor S_r llamado razón de esbeltez

$$A = \frac{\pi}{4}(d_o^2 - d_i^2) = \frac{\pi}{4}(0.025^2 - 0.0235^2) = 0.057 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$I = \frac{\pi}{64}(d_o^4 - d_i^4) = \frac{\pi}{64}(0.025^4 - 0.0235^4) = 4.2 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

Ahora se procede a determinar el radio de giro k

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{4.2 \times 10^{-9}}{0.057 \times 10^{-3}}} = 8.57 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$S_r = \frac{0.8l}{k} = \frac{0.8(0.8)}{8.57 \times 10^{-3}} = 74.68$$

Debido a que el valor de la razón fue mayor a 10, se concluye que la columna pertenece al tipo de columnas grandes. En base a este dato se realiza el siguiente cálculo de carga crítica.

$$P_{cr} = A \left[S_y - \frac{1}{E} \left(\frac{S_y S_r}{2\pi} \right)^2 \right]$$

Como datos principales del material de aleación de aluminio, tenemos el módulo de elasticidad $E = 69.5 \times 10^3$ MPa y el esfuerzo a la fluencia $S_y = 169$ MPa.

$$P_{cr} = (0.057 \times 10^{-3}) \left[169 \times 10^6 - \frac{1}{69.5 \times 10^9} \left(\frac{(169 \times 10^6)(74.68)}{2\pi} \right)^2 \right]$$

$$P_{cr} = 6.32 \times 10^3 N$$

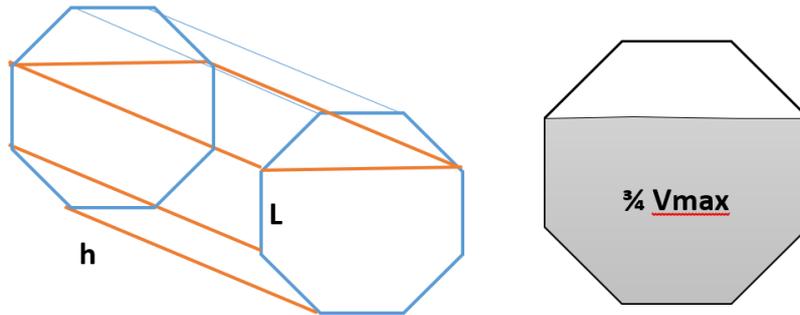
Para el factor de seguridad, generalmente se le asigna un valor promedio de 4, de esta manera, se procede a calcular la carga permisible que puede soportar el elemento.

$$P_{permisible} = \frac{P_{cr}}{SF} = \frac{6.32 \times 10^3}{4}$$

$$P_{permisible} = 1580 N$$

APÉNDICE G

CÁLCULOS DEL DISEÑO DEL TANQUE CERRADO



4.7 Porcentaje volumétrico del contenido del tanque (elaboración propia).

$$M_{RSO} = 42 \text{ Kg}$$

$$L = 0.214 \text{ m}$$

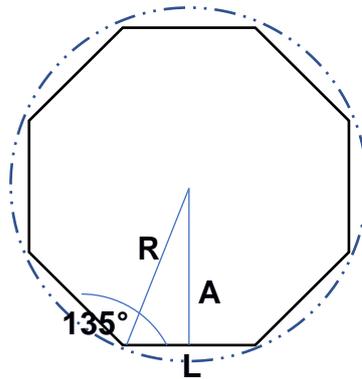
$$h = 0.84 \text{ m}$$

Presión experimentada por el tanque

$$P = \frac{F}{A} = \frac{w}{h \left[\frac{3}{4} \text{Perímetro} \right]} = \frac{M_{RSO} * g}{h \left[\frac{3}{4} (8L) \right]}$$

$$P = \frac{(42)(9.81)}{0.84 \left[\frac{3}{4} (8)(0.214) \right]}$$

$$P = 382 \text{ Pa}$$



4.8 Vista transversal del tanque.

$$R_i = 0.28 \text{ m}$$

$$D_i = 0.56 \text{ m}$$

Cuando se trata de recipientes de paredes delgadas, la cual el espesor de la pared no pasa más allá de la décima parte de su radio, se obtiene la siguiente ecuación de esfuerzo:

$$\sigma_{permisible} = \frac{P(D_i + t)}{2t}$$

Donde t es el espesor del tanque y el esfuerzo máximo permisible $\sigma_{permisible}$ se lo expresa en términos de la resistencia del material S y el factor de seguridad n .

$$\sigma_{permisible} = \frac{S}{n}$$

En base a la figura 4.8, el valor del PVC rígido, la resistencia a la fluencia $S_y = 55 \text{ MPa}$ con un factor de seguridad de 4, obtenemos un esfuerzo permisible de:

PROPIEDADES	Metodos de ensayo ISO/(IEC)	Unidades	Valores
Color	-	-	Gris
Densidad	DIN 53 479	g/cm ³	1,42
PROPIEDADES TERMICAS			
Temperatura de Fusion	DIN 53 736	°C	80
Conductividad termica a 23°C	-	W/(K·m)	0,15
Coefficiente de dilatacion lineal (23°C)	-	10 ⁻⁵ .(1K)	8
Capacidad calorica especifica (23° C)	-	5(g.k)	1
Temperatura maxima de servicio:	-	-	-
-en periodos cortos	-	°C	65
-	-	°C	60
PROPIEDADES MECANICAS A 23°C			
Ensayo de tracción	-	-	-
-esfuerzo en el punto de fluencia	DIN 53 455	MPa	55
-elongacion a la rotura	DIN 53 455	%	20
-modulo de elasticidad a la tensión	DIN 53 457	-	2.600
-Resistencia al impacto	DIN 53 457	Kj/m ²	15
-Coeficiente dinamico de fricción	-	N/mm ²	0
Dureza a la bola (30s)	DIN53457	Mpa	75
PROPIEDADES ELECTRICAS A 23°C			
Resistencia dielectrica	60243	KV/mm	>10 ¹⁴
Factor de disipación	DIN 53 483	-	0,015
Resistencia especifica de paso	DIN 53 483	-	>10 ¹⁵
Resistencia superficial	DIN 53 482	Ohm.cm	50
Coefficiente dielectrico	60250	-	3,0

4.9 Ficha técnica del PVC.

$$\sigma_{permisible} = \frac{55 \times 10^6}{4} = 13.75 \times 10^6$$

Realizando un despejo del espesor t de la ecuación de esfuerzo permisible para recipientes con paredes delgadas, obtenemos la siguiente ecuación:

$$t = \frac{PD_i}{2\sigma_{permisible} - P}$$

$$t = \frac{(382)(0.56)}{2(13.75 \times 10^6) - 382}$$

$$t = 0.007m$$

APÉNDICE H

CÁLCULOS DEL DISEÑO DEL EJE

La fuerza sobre cada una de estas paletas será la fuerza que aplican, e igual al peso del volumen que deben desplazar.

$$F = mg = \rho_{RSO} Vg = \gamma_{RSO} V$$

Consideraremos el valor máximo de peso específico de los residuos sólidos, este es: $\gamma_{RSO} = 480 \text{kgf}/\text{m}^3 = 4.7 \text{kN}/\text{m}^3$. Por lo tanto:

$$F_1 = \gamma_{RSO} V_1 = \left(4.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right) * \frac{3}{5} (2\pi * 0.1755\text{m})(0.115\text{m})^2 = 41.12 \text{ N}$$

$$F_2 = \gamma_{RSO} V_2 = \left(4.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right) * \frac{2}{5} (2\pi * 0.1755\text{m})(0.115\text{m})^2 = 27.4 \text{ N}$$

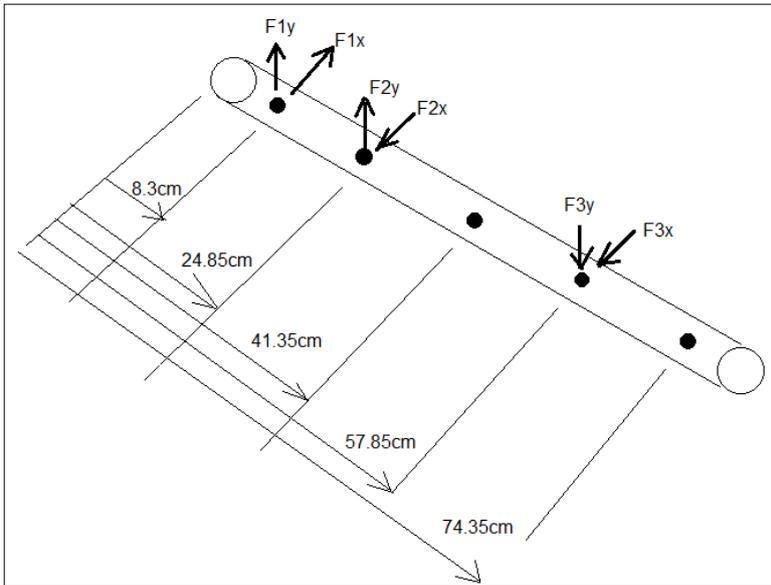
$$F_3 = \gamma_{RSO} V_3 = \left(4.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right) * \frac{1}{5} (2\pi * 0.1755\text{m})(0.115\text{m})^2 = 13.7 \text{ N}$$

A estos valores le sumaremos una fuerza de presión sobre las paletas causada por el material debido a que están inmersas en el mismo. Se calcula de manera similar a una fuerza hidrostática en una superficie plana en el fondo.

$$F_p = \gamma_{RSO} h_c A = \gamma_{RSO} \left(a + \frac{L}{2}\right) A = \left(4.7 \text{k} \frac{\text{N}}{\text{m}^3}\right) (0.1755 + 0.107)\text{m} (0.115\text{m})^2 = 17.55 \text{ N}$$

$$F_1 = 58.67 \text{ N}; \quad F_2 = 44.95 \text{ N}; \quad F_3 = 31.25 \text{ N}$$

Estas fuerzas representan las cargas sobre el eje.



Por trigonometría:

$$F_{1x} = 34.48 \text{ N}$$

$$F_{1y} = 47.46 \text{ N}$$

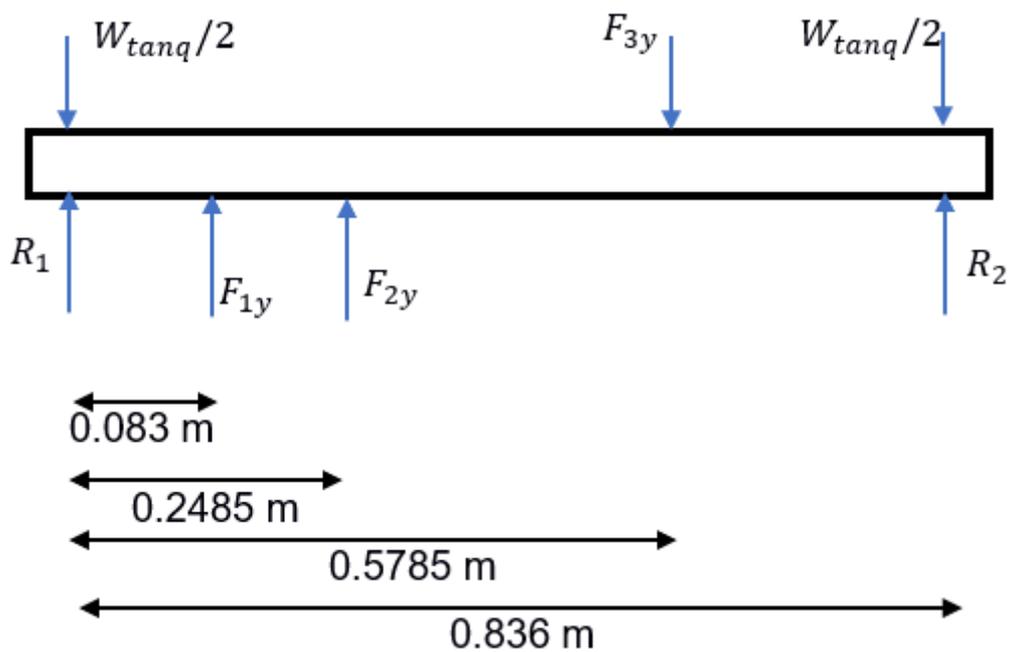
$$F_{2x} = 36.36 \text{ N}$$

$$F_{2y} = 26.42 \text{ N}$$

$$F_{3x} = 18.37 \text{ N}$$

$$F_{3y} = 25.28 \text{ N}$$

4.10 Fuerzas sobre eje motriz (elaboración propia).



4.11 Fuerzas que actúan sobre el eje.

Donde:

$$W_{tanq} = 620.34 \text{ N}$$

$$F_{1y} = 47.46 \text{ N}$$

$$F_{2y} = 26.42 \text{ N}$$

$$F_{3y} = 25.28 \text{ N}$$

Para hallar la una de las reacciones de apoyo de la base sobre el eje, se realiza una sumatoria de momento con sentido anti horario positivo.

$$\sum M_{R1} = 0$$

$$R_2(0.836) - \frac{W_{tanq}}{2}(0.836) - F_{3y}(0.5785) + F_{2y}(0.2485) + F_{1y}(0.083) = 0$$

$$R_2 = \left[\frac{W_{tanq}}{2}(0.836) + F_{3y}(0.5785) - F_{2y}(0.2485) - F_{1y}(0.083) \right] / (0.836)$$

$$R_2 = [(310.17)(0.836) + (25.28)(0.5785) - (26.42)(0.2485) - (47.46)(0.083)] / (0.836)$$

$$R_2 = 315.1 \text{ N}$$

Realizando una sumatoria de fuerzas verticales, se obtiene la reacción R_1

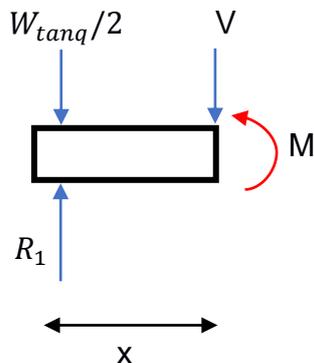
$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 + R_2 + F_{2y} + F_{1y} - W_{tanq} - F_{3y} = 0$$

$$R_1 = (310.17) + (25.28) - (315.1) - (26.42) - (47.46)$$

$$R_1 = 256.64 \text{ N}$$

A continuación, se realiza los cálculos de corte y momento para hallar el máximo momento flector sobre el eje.



$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 - W_{tanq}/2 - V = 0$$

$$V = 256.64 - \frac{620.34}{2} = -53.53 \text{ N}$$

$$\sum M = 0$$

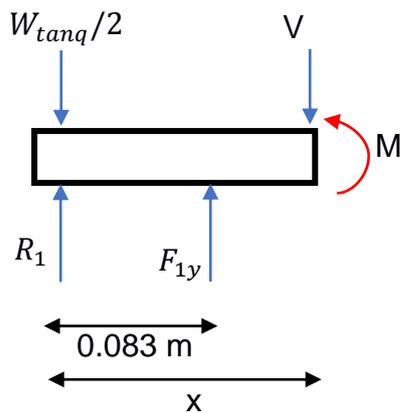
$$-R_1(x) + \frac{W_{tanq}}{2}(x) + M = 0$$

$$M = \left(256.64 - \frac{620.34}{2} \right) x = -53.53x \text{ N}$$

Reemplazando la ecuación de momento con $x= 0$ m y $x= 0.083$ m tenemos:

$$M_{x=0} = 0 \text{ Nm}$$

$$M_{x=0.083} = -4.443 \text{ Nm}$$



$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 + F_{1y} - W_{tanq}/2 - V = 0$$

$$V = 256.64 + 47.46 - \frac{620.34}{2}$$

$$= -6.07 \text{ N}$$

$$\sum M = 0$$

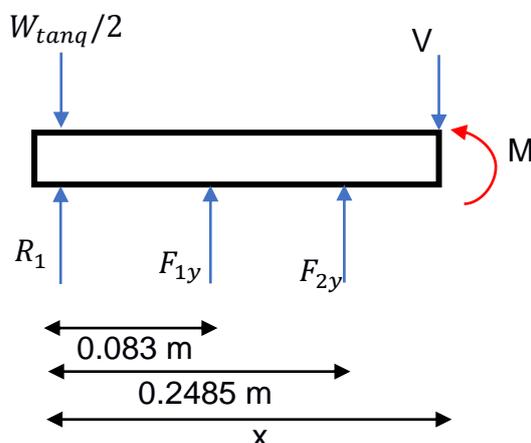
$$-R_1(x) - F_{1y}(x - 0.083) + \frac{W_{tanq}}{2}(x) + M = 0$$

$$M = -6.07x - 3.94 \text{ Nm}$$

Reemplazando la ecuación de momento con $x= 0.083$ m y $x= 0.2485$ m tenemos:

$$M_{x=0.083} = -4.443 \text{ Nm}$$

$$M_{x=0.2485} = -5.448 \text{ Nm}$$



$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 + F_{1y} + F_{2y} - W_{tanq}/2 - V = 0$$

$$V = 256.64 + 47.46 + 26.42 - \frac{620.34}{2}$$

$$V = 20.35 \text{ N}$$

$$\sum M = 0$$

$$-R_1(x) - F_{1y}(x - 0.083)$$

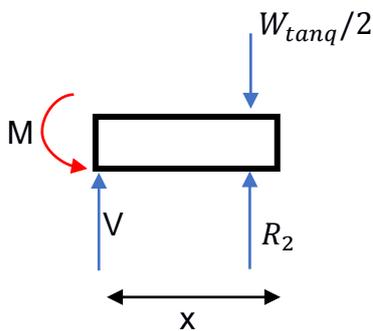
$$-F_{2y}(x - 0.2485) + \frac{W_{tanq}}{2}(x) + M = 0$$

$$M = 20.35x - 10.505 \text{ Nm}$$

Reemplazando la ecuación de momento con $x= 0.2485$ m y $x= 0.5785$ m tenemos:

$$M_{x=0.2485} = -5.448 \text{ Nm}$$

$$M_{x=0.5785} = 1.267 \text{ Nm}$$



$$\sum F_y = 0$$

$$R_2 - \frac{W_{tanq}}{2} + V = 0$$

$$V = -315.1 + \frac{620.34}{2} = -4.93 \text{ N}$$

$$\sum M = 0$$

$$R_2(x) - \frac{W_{tanq}}{2}(x) + M = 0$$

$$M = \left(-315.1 + \frac{620.34}{2} \right) x$$

$$M = -4.93 x \text{ Nm}$$

Reemplazando la ecuación de momento con $x= 0.2575$ m y $x= 0$ m tenemos:

$$M_{x=0.2575} = 1.267 \text{ Nm}$$

$$M_{x=0} = 0 \text{ Nm}$$

Por lo tanto, se tiene que, a lo largo del eje debido a las fuerzas y reacciones que actúan sobre ella, el momento máximo de flexión está ubicado entre una distancia de 0.2485 m y 0.5785 m medido desde la reacción R_1 de apoyo sobre la base, cuyo valor del momento es de 5.448 Nm.

A continuación, se procede a calcular cada uno de los factores que influyen en la determinación del límite de la resistencia a la fatiga

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e'$$

k_a : factor de superficie

$$k_a = aS_{ut}^b$$

Para el acero 1045, la tabla mostrada con anterioridad brinda los valores de la resistencia ultima que es igual a 565 MPa, por lo tanto:

$$k_a = 57.7(565)^{-0.718} = 0.61$$

k_b : factor de tamaño

se asume un valor de diámetro menor de 10mm

$$k_b = 1,24d^{-0,107} = 1,24(10)^{-0,107} = 0.969$$

k_c : factor de carga

$$k_c = 1$$

k_d : factor de temperatura

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \rightarrow 50^\circ \rightarrow 1.01$$

k_e : factor de confiabilidad

$$k_e = 1 - 0,08z_\alpha \rightarrow 99\% \rightarrow 0.814$$

k_f : factor de efectos varios

$$k_f = 1 + q(k_t - 1)$$

$$k_{fs} = 1 + q_{cortante}(k_{ts} - 1)$$

Se asume que el diámetro mayor del eje tiene un $D=20$ mm y el diámetro menor es de $d=10$ mm, cuyo radio de muesca debido a ese cambio de diámetros es de $r=2.5$ mm. En base a estos valores de las dimensiones del eje, se revisa las figuras A-15-7 y A-15-8 del libro de Shigley para hallar los valores de k_t y k_{ts} que da 1.36 y 1.2 respectivamente.

De la misma manera, para hallar los valores de q y $q_{cortante}$ se revisa las figuras 6-20 y 6-21 del libro de Shigley y se obtiene como resultado 0.8 y 0.83 respectivamente.

$$k_f = 1 + (0.8)(1.36 - 1) = 1.288$$

$$k_{fs} = 1 + (0.83)(1.2 - 1) = 1.166$$

S_e' : límite de resistencia a la fatiga

$$S_e' = 0.5 S_{ut} = (0.5)(565) = 282.5 \text{ MPa}$$

Para este caso que se requiere de diseñar un eje, se recomienda la siguiente fórmula más simplificada, para casos de valores de esfuerzo de flexión y torsión constante

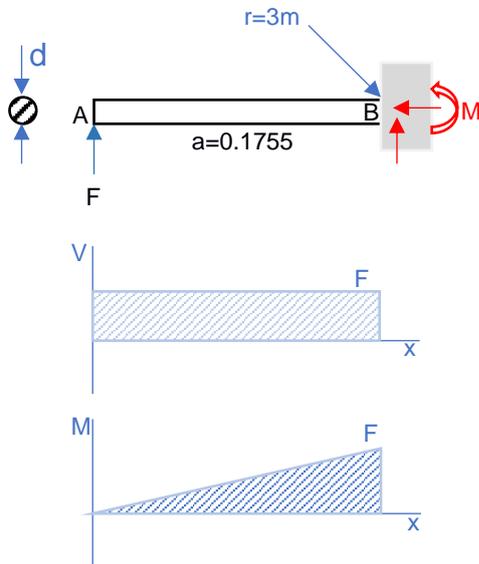
$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(k_f M_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [3(k_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

$$d = \left(\frac{16(4)}{\pi} \left\{ \frac{1}{191.01 \times 10^6} [4(1.288 \times 5.448)^2]^{1/2} + \frac{1}{565 \times 10^6} [3(1.166 \times 23.67)^2]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

$$d = 0.015 \text{ m}$$

APÉNDICE I

CÁLCULOS DEL DISEÑO DE LAS PALETAS



$$F = [58.67 \text{ N} - 0]$$

$$M_{max} = F * a = (58.67 \text{ N})(0.1755 \text{ m}) = 10.30 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} * c}{I}$$

En este caso I es la inercia de un círculo, y c es la distancia desde la mitad del eje hasta el punto crítico (punto inferior en la sección B).

4.12 Modelamiento del eje, momento y cortante (elaboración propia).

$$\sigma_{max} = \frac{32M_{max}}{\pi d^3} = \frac{32(10.30 \text{ Nm})}{\pi d^3}$$

$$\sigma_{min} = 0$$

- Análisis estático

Se diseñará de manera estática para obtener un diámetro que pueda ser usado para el análisis dinámico o por fatiga.

Punto crítico → punto inferior de la sección B



Establecemos un factor de seguridad $n = 3$.

Para el acero al carbono SAE/AISI 1045:

$$S_y = 310 \text{ MPa}; S_u = 565 \text{ MPa}$$

$$\text{esfuerzo Von Misses} \rightarrow \sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

$$\sigma' = \sigma_x = \sigma_{max} = \frac{32(10.30 \text{ Nm})}{\pi d^3}$$

Teoría de falla estática de Von Misses:

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \rightarrow 3 = \frac{310 \text{ MPa}}{\frac{32(10.30 \text{ Nm})}{\pi d^3}} \rightarrow d = 0.01 \text{ m} = 10 \text{ mm}$$

- Análisis dinámico (por fatiga)

Empleamos el diámetro calculado en el análisis estático y verificamos que no fallará en fatiga.

$$\sigma_{max} = \frac{32(10.30 \text{ Nm})}{\pi d^3} = 105 \text{ MPa} \quad ; \quad \sigma_{min} = 0$$

Tenemos una carga de tipo repetida, donde existe tanto esfuerzo medio como alternante. En este caso:

$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{\sigma_{max}}{2} = \frac{105 \text{ MPa}}{2} = 52.5 \text{ MPa}$$

$$k_f = 1 + q(k_t - 1)$$



$$r = 3 \text{ mm} ; S_{ut} = 565 \text{ MPa}; \text{ de la figura 4.36 Norton: } q = 0.825$$



$$\text{Para varilla en voladizo tomamos: } k_t = 2$$

$$\rightarrow k_f = 1 + (0.825)(2 - 1) = 1.825$$

$$k_f |\sigma_{max}| < S_y \rightarrow k_{fm} = k_f$$

$$(1.825)|52.5 \text{ MPa}| = 95.8 \text{ MPa} < 310 \text{ MPa} \rightarrow k_{fm} = 1.825$$

Esfuerzos Von Misses alterno y medio:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_a' = \sigma_x = \sigma_a k_f = (52.5 \text{ MPa})(1.825) = 95.8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m' = \sigma_x = \sigma_m k_{fm} = 95.8 \text{ MPa}$$

Límite de resistencia a la fatiga:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f (S_e')$$

$$S'_e = 0.5S_{ut} = 0.5(565MPa) = 282.5MPa$$

$k_a = aS_{ut}^b$; de la tabla 6-2 Shigley, maquinado $\rightarrow a = 4.51, b = -0.265$, entonces:

$$k_a = (4.51)(565)^{-0.265} = 0.84$$

$k_b = 1.24d^{-0.107}$, eje no rotatorio: $d_e = 0.370d = 3.7 \text{ m}$, por lo tanto:

$$k_b = 1.24(3.7)^{-0.107} \approx 1$$

$k_c = 1$ (Esfuerzo de flexión)

$k_d = 1$ (Temperatura de operación $< 450^\circ\text{C}$)

$k_e = 0.814$ (%confiabilidad = 99%)

$k_f = 1$

$$\rightarrow S_e = (0.84)(1)(1)(1)(0.814)(1)(282.5 \text{ Mpa}) = 193.2 \text{ MPa}$$

Aplicando la teoría de Goodman:

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} \rightarrow \frac{1}{n} = \frac{95.8 \text{ MPa}}{193.2 \text{ MPa}} + \frac{95.8 \text{ MPa}}{565 \text{ MPa}}$$

$$n \approx 2$$

El factor de seguridad es aceptable, por lo tanto, establecemos $d = 10\text{mm}$ para la varilla de cada paleta.

A continuación, se calcula el espesor de paletas considerándola cuadrada y plana, ya que su curvatura no es muy considerable.

$$M_{max} = \frac{ws^2}{2} = \frac{(0.51\text{N/mm})(57.2\text{mm})^2}{2} = 1.686\text{Nm}$$

$$V_{max} = -ws = \left(\frac{0.51\text{N}}{\text{mm}}\right)(57.5\text{mm}) = 21.3 \text{ N}$$

Consideramos al punto inferior en el empotramiento como punto crítico, donde la flexión toma un mayor valor.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}c}{I} = \frac{M_{max}(e_p/2)}{\frac{be_p^3}{12}}$$

Probamos un espesor de paleta de $e_p = 3\text{mm}$.

$$\sigma_{max} = \frac{(1.7Nm)(0.003m/2)}{\frac{(0.115)(0.003m)^2}{12}} = 9.8 MPa \quad ; \quad \sigma_{min} = 0$$



$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{\sigma_{max}}{2} = 4.9 MPa$$

Con $r = 3$, $S_{ut} = 565 MPa \rightarrow q = 0.825$. Además, tomamos $k_t = 2$.

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) = 1 + (0.825)(2 - 1) = 1.825 \quad y \quad k_{fm} = k_f$$

Esfuerzo Von Misses:

$$\sigma'_a = \sigma_x = \sigma_a k_f = (4.9 MPa)(1.825) = 8.94 MPa$$

$$\sigma'_m = \sigma_x = \sigma_m k_{fm} = 8.94 MPa$$

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f (S_e')$$

$$S_e' = 0.5 S_{ut} = 282.5 MPa$$

$$k_a = (4.51)(565)^{-0.265} = 0.84$$

$$\text{Sección rectangular} \rightarrow d_e = 0.808 \sqrt{e_p * b} = 15 mm \rightarrow k_b = 1.24 d_e^{-0.107} = 0.93$$

$$k_c = 1 \text{ (Flexión).}$$

$$k_d = 1 \text{ (T < 450°C).}$$

$$k_e = 0.814 \text{ (% confiabilidad = 99%).}$$

$$k_f = 1$$

$$S_e = (0.84)(0.93)(1)(1)(0.814)(1)(282.5 MPa) = 180 MPa$$

Aplicando la teoría de Goodman:

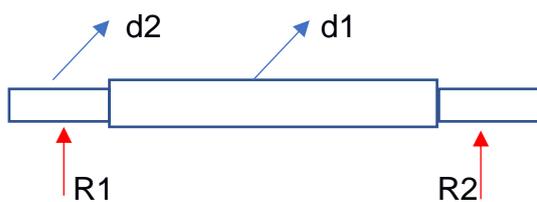
$$\frac{1}{n_d} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} = \frac{8.94 MPa}{180 MPa} + \frac{8.94 MPa}{282.5 MPa} \rightarrow n_d = 12.3$$

Se obtiene un factor de seguridad bastante aceptable, por ende $e_p = 3 mm$.

APÉNDICE J

CÁLCULO DE RODAMIENTOS

- Rodamientos de bolas para giro de eje motriz.



$$R_1 = 256.64 \text{ N} ; R_2 = 315.1 \text{ N}$$

$$d_1 = 20 \text{ mm} ; d_2 = 15 \text{ mm}$$

$$\text{Tomaremos: } R = R_1 = R_2 = 315.1 \text{ N}$$

$$\text{Carga radial} \rightarrow R = 315 \text{ N}$$

$$\text{Carga axial} \rightarrow T = 0$$

4.13 Diámetros y reacciones del eje (elaboración propia).

$$P = VxR + YT = VxR$$

Tomamos $x = 0.56$, mientras que $V = 1$

$$P = VxR = (1)(0.56)(315.1) = 176.5 \text{ N}$$

Establecemos una vida útil de $L_d = 10$ años de operación. El eje gira a 20 RPM.

$$L_d = 10 \text{ años} = 87600 \text{ h}$$

$$\rightarrow L_d = (87600 \text{ h}) \left(20 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \right) * \left(60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \right) = 1.05 \times 10^8 \text{ rev}$$

$$\rightarrow C = P_d \left(\frac{L_d}{10^6} \right)^{1/k} \quad \text{para rodamientos de bolas: } k = 3$$

$$C = (176.5 \text{ N}) \left(\frac{1.05 \times 10^8 \text{ rev}}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}} \rightarrow C = 0.833 \text{ kN}$$

Del catálogo SKF seleccionamos un rodamiento con $C = 0.833 \text{ kN}$ y $d_2 = 15 \text{ mm}$:

Rodamiento 6002-2RSL $\rightarrow C = 5.85 \text{ kN} ; C_o = 2.85 \text{ kN} ; d = 15 \text{ mm}$

Con lo anterior: $\frac{T}{C_o} = 0 ; \frac{T}{R} = 0$, no hay empuje.

Nuevamente:

$$P = VxR = (1)(0.56)(315.1) = 176.5 \text{ N}$$

$$C = P_d \left(\frac{L_d}{10^6} \right)^{1/k} = 0.833 \text{ kN} < C = 5.85 \text{ kN}$$

Lo cual indica que el rodamiento seleccionado es apropiado. Se utilizará un rodamiento en cada extremo del eje. Del catálogo se toman sus características.

- Rodamientos de bolas para giro de contenedor.

Para la reacción en los extremos del contenedor se considerará adicionar una fuerza debida al peso del eje a $R = 315.1N$, ya que no se había tomado en cuenta.

$$W_{eje} = \gamma_{acero} V_{eje} \quad ; \quad \gamma_{acero} = 76.0 \times 10^3 \text{ N/m}^3 \text{ (Norton, 2008)}$$

Consideramos una longitud de 50mm para la sección de menor diámetro.

$$V_{eje} = \left(\frac{\pi}{4} d_1^2 \right) (0.826m) + \left(\frac{\pi}{4} d_2^2 \right) (0.05m)(2)$$

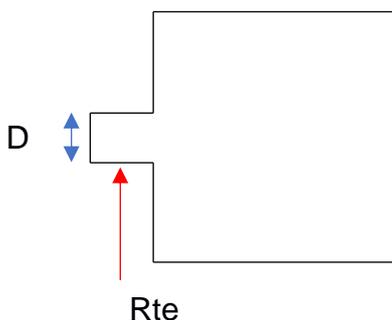
$$V_{eje} = \left(\frac{\pi}{4} (0.02)^2 \right) (0.826m) + \left(\frac{\pi}{4} (0.015)^2 \right) (0.1m)(2) = 2.77 \times 10^{-4} m^3$$

$$W_{eje} = \left(\frac{76.0 \times 10^3 \text{ N}}{m^3} \right) (2.77 \times 10^{-4} m^3) = 21.0 \text{ N}$$

$$R_{te} = R + W_{eje}/2 = 315.1N + 21N/2$$

$$R_{te} = 325.6$$

$$D_c = 45mm$$



Realizamos el mismo procedimiento.

$$\text{Carga radial} \rightarrow R = 325.6 \text{ N}$$

$$\text{Carga axial} \rightarrow T = 0$$

Tomamos $x = 0.56$, mientras que $V = 1$

$$P = VxR = (1)(0.56)(325.6N) = 182.33 \text{ N}$$

$L_d = 10$ años de operación. El eje gira a 20 RPM.

$$L_d = 10 \text{ años} = 87600 \text{ h}$$

$$\rightarrow L_d = (87600 \text{ h}) \left(20 \frac{\text{rev}}{\text{min}}\right) * \left(60 \frac{\text{min}}{\text{h}}\right) = 1.05 \times 10^8 \text{ rev}$$

$$\rightarrow C = P_d \left(\frac{L_d}{10^6}\right)^{1/k} \quad \text{para rodamientos de bolas: } k = 3$$

$$C = (182.33 \text{ N}) \left(\frac{1.05 \times 10^8 \text{ rev}}{10^6}\right)^{\frac{1}{3}} \rightarrow C = 0.86 \text{ kN}$$

Del catálogo SKF seleccionamos un rodamiento con $C = 0.86 \text{ kN}$ y $D_c = 15 \text{ mm}$:

Rodamiento 6002-2RSL $\rightarrow C = 22.1 \text{ kN}$; $C_o = 14.6 \text{ kN}$; $d = 45 \text{ mm}$

Con lo anterior: $\frac{T}{C_o} = 0$; $\frac{T}{R} = 0$, no hay empuje.

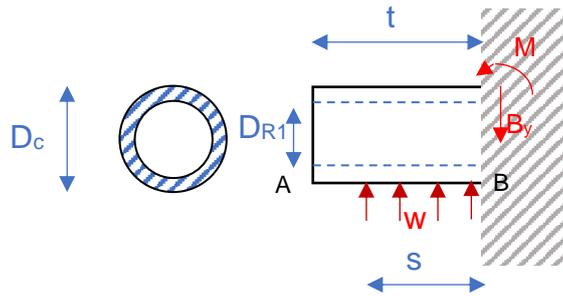
$$P = VxR = (1)(0.56)(325.6) = 176.5 \text{ N}$$

$$C = P_d \left(\frac{L_d}{10^6}\right)^{1/k} = 0.86 \text{ kN} < C = 22.1 \text{ kN}$$

Lo cual indica que el rodamiento seleccionado es apropiado. Se utilizará un rodamiento en cada extremo del contenedor. Del catálogo tomamos sus características.

APÉNDICE K

CÁLCULOS DE DIMENSIONES DE TAPA DEL CONTENEDOR Y ACOPLES



4.14 Modelamiento de acoples (elaboración propia).

Aplicamos un análisis de falla estática, considerando el material como frágil. Previamente sabemos que $D_{R1} = 32mm$ y tomamos $t = 30mm$; $s = 20mm$.

$$\text{La carga distribuida es: } w = \frac{R_{te}}{20mm} = \frac{325.6N}{20mm} = 16.28N/mm$$

$$\text{Para PVC rígido: } S_{ut} = 44.13MPa ; S_{uc} = 60MPa$$

Para el modo de carga de la figura 4.12, el momento y cortante máximo están en el empotramiento (sección B), y están dados por:

$$M_{max} = \frac{ws^2}{2} = \frac{(16.28N/mm)(20mm)^2}{2} = 3256Nmm = 3.26Nm$$

$$V_{max} = -ws = -\left(\frac{16.28N}{mm}\right)(20mm) = -325.6N$$

En el punto superior e inferior de sección B: $M \rightarrow \text{maximo}$, $V \rightarrow 0$

En el punto central de sección B: $M \rightarrow 0$, $V \rightarrow \text{maximo}$

En este caso la flexión no es muy significativa, ya que las dimensiones son pequeñas; sin embargo, el esfuerzo cortante puede causar una falla debido a la gran carga transversal.

Analizamos el punto central de la sección B.

$$\tau = \frac{V_{max}Q}{It}$$

$$Q = \frac{2}{3}(r_e^3 - r_c^3) = \frac{2}{3}\left(\left(\frac{D_c}{2}\right)^3 - \left(\frac{0.032}{2}\right)^3\right)$$

$$I = \frac{\pi}{4}(r_e^4 - r_c^4) = \frac{\pi}{4}\left(\left(\frac{D_c}{2}\right)^4 - \left(\frac{0.032}{2}\right)^4\right)$$

$$t = D_c - D_{R1} = D_c - 0.032$$

Asumiremos un diámetro $D_c = 45mm$, entonces:

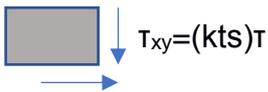
$$\tau = 8.13 \times 10^5 Pa = 0.81 MPa$$

Concentrador de esfuerzos k_{ts} :

Tomamos $k_{ts} = 3$ para el empotramiento

$$\tau_{xy} = k_{ts} * \tau$$

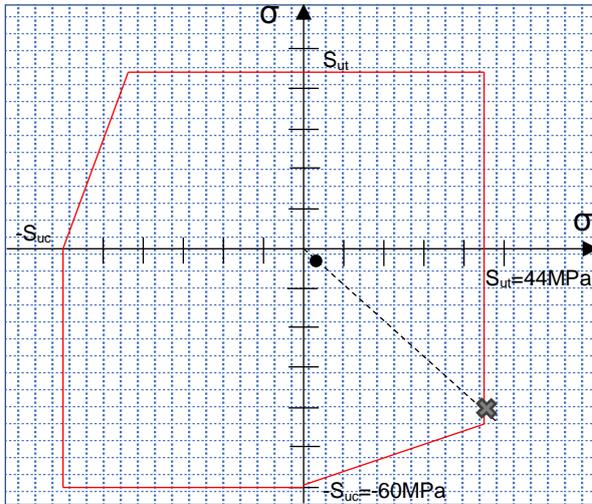
$$\tau_{xy} = 3 * 0.81 MPa = 2.43 MPa$$



Aplicamos la teoría de Coulomb-Mohr modificada para materiales frágiles.

$$\text{Esfuerzos principales: } \sigma_1, \sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_1 = +\tau_{xy} = +2.43 MPa ; \sigma_3 = -\tau_{xy} = -2.43 MPa; \sigma_2 = 0$$



Del estado de esfuerzo obtenido y su intercepción con los límites de la región de la teoría de Coulomb, obtenemos que el factor de seguridad es:

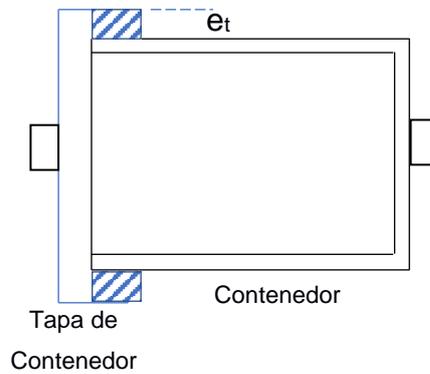
$$n_d = \frac{S_{ut}}{\sigma_1} = \frac{44MPa}{2.43MPa}$$

$$n_d = 18$$

Figura 4.1 Región de falla según teoría de Coulomb.

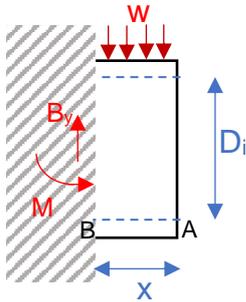
Por lo tanto, con un diámetro de $D_c = 45mm$ no habrá problemas de falla.

se debe determinar el espesor adecuado e_t .



4.15 Espesor de tapa de contenedor (elaboración propia).

De la misma manera consideramos esta sección como un tubo hueco empotrado.



$$D_i = 2A_p = 520 \text{ mm}$$

Consideramos:

$$x = 30 \text{ mm}$$

Además:

$$w = \frac{R_{te}}{30\text{mm}} = 16.28 \text{ N/mm}$$

4.16 Modelamiento para espesor de tapa del contenedor (elaboración propia).

Sección crítica → B

$$M_{max} = \frac{-wx^2}{2} = \frac{-(16.28 \text{ N/mm})(30 \text{ mm})^2}{2} = -7326 \text{ Nmm} = -7 \text{ Nm}$$

$$V_{max} = wx = \left(\frac{16.28 \text{ N}}{\text{mm}}\right)(30 \text{ mm}) = 325.6 \text{ N}$$

En el punto superior e inferior de sección B: $M \rightarrow \text{máximo}$, $V \rightarrow 0$

En el punto central de sección B: $M \rightarrow 0$, $V \rightarrow \text{maximo}$

Consideramos el punto central de la sección B, la flexión no es muy significativa.

$$\tau = \frac{V_{max} Q}{It}$$

$$Q = \frac{2}{3}(r_e^3 - r_i^3) = \frac{2}{3}\left(\left(\frac{D_e}{2}\right)^3 - \left(\frac{0.520 \text{ m}}{2}\right)^3\right)$$

$$I = \frac{\pi}{4}(r_e^4 - r_i^4) = \frac{\pi}{4}\left(\left(\frac{D_e}{2}\right)^4 - \left(\frac{0.520 \text{ m}}{2}\right)^4\right)$$

$$t = D_e - 0.520 = D_e - 0.520$$

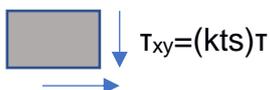
Asumiremos un diámetro $D_e = 544 \text{ mm}$, entonces:

$$\tau = 1.54 \text{ MPa}$$

$k_{ts} = 3$ para el empotramiento.

$$\tau_{xy} = k_{ts} * \tau$$

$$\tau_{xy} = 3 * 1.54 \text{ MPa} = 4.62 \text{ MPa}$$



Aplicamos la teoría de Coulomb-Mohr modificada para materiales frágiles.

$$\text{Esfuerzos principales: } \sigma_1, \sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_1 = +\tau_{xy} = +4.62MPa ; \sigma_3 = -\tau_{xy} = -4.62MPa; \sigma_2 = 0$$

Graficando la región correspondiente a la teoría de Coulomb Mohr, obtenemos que el factor de seguridad es:

$$n_d = \frac{S_{ut}}{\sigma_1} = \frac{44MPa}{4.62MPa}$$

$$n_d = 9.5$$

Por lo tanto, con un diámetro de $D_e = 544 \text{ mm}$ no habrá problemas de falla, y el espesor de la tapa es:

$$e_t = \frac{D_e - D_i}{2} = \frac{544 - 520}{2} = 12 \text{ mm}$$

Por otro lado, el espesor de la tapa e_{ta} lo podemos considerar igual al espesor del contenedor, es decir, 8 mm.

APÉNDICE L

CÁLCULOS DE TORNILLOS

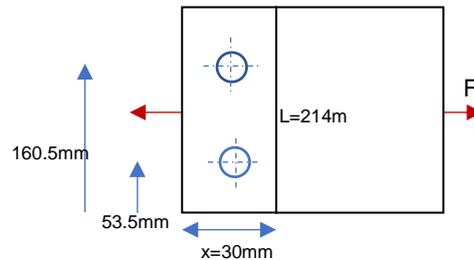


Figura 4.2 Ubicación de tornillos en cada cara octagonal del contenedor (elaboración propia).

Consideramos $F = R_{te} = 325.6\text{ N}$ como la máxima carga que se puede dar.

Implementamos tornillos de cabeza hexagonal 3/8", grado 2, entonces mediante un análisis de falla estática:

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{S_{sy}}{n_d}$$

Grado 2, 3/8" $\rightarrow S_y = 57\text{ kpsi}$ (tabla 8-11, Shigley)

$$\rightarrow S_{sy} = 0.577S_y = 32.9\text{ kpsi}$$

$$n_d = \frac{S_{sy}A}{F} = \frac{32.9 \times 10^3\text{ lb/in}^2}{73.20\text{ lb}} \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{3}{8}\text{ in} \right)^2 \right] (2) \rightarrow n_d = 99$$

Verificamos la falla por aplastamiento.

$$\sigma_d = \frac{F}{A} = \frac{S_y}{n_d}$$

$$A = t * d = \left[(2)(20) \left(\frac{1\text{ in}}{25.4\text{ mm}} \right) \right] (3/8\text{ in}) = 0.59\text{ in}^2$$

$$n_d = \frac{S_y A}{F} = \frac{(57 \times 10^3\text{ lb/in}^2)(0.59\text{ in}^2)}{73.20\text{ lb}} = 265$$

Por lo tanto, no habrá problemas si se usa estos tornillos, y en las posiciones indicadas previamente.

APÉNDICE M

CÁLCULOS DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE POTENCIA

El torque neto requerido en el eje es:

$$T = Fr$$

$$T = T_1 + T_2 + T_3 = (58.67N + 44.95N + 31.25 N)(0.1755m) = 23.67 Nm$$

Para $n = 20 RPM$ en el eje:

$$P = \omega T = \left(\frac{20rev}{min}\right) * \left(\frac{2\pi rad}{1rev}\right) \left(\frac{1min}{60s}\right) (23.67) = 49.57W = 0.067 hp$$

Se Toma el doble de este valor ya que motores eléctricos de baja potencia es difícil encontrar en el mercado y son más caros.

$$P_{motor} = 0.12 hp = 1/8 hp$$

Considerando que el motor tiene una velocidad de 1120 RPM, entonces debemos diseñar un sistema de reducción para obtener una velocidad de solo 20 RPM en el eje.

Se implementará un sistema de reducción con engranes.

Asumimos un ángulo de presión de $\phi = 20^\circ$ y un paso diametral $P_d = 10$ para el engranaje.

- Probando con un engranaje de 1 etapa:

El mínimo número de dientes del piñón de un engranaje es $N_p = 18$ dientes (Norton, 2011).

$$\text{para el piñon: } P_d = \frac{N_p}{d_p} \rightarrow d_p = \frac{N_p}{P_d} = \frac{18}{10} = 1.8 \text{ in}$$

$$\text{relacion de velocidad: } m_v = \frac{n_{salida}}{n_{entrada}} = \frac{20 RPM}{1120 RPM} = 0.01786$$

$$\text{relacion de engranaje: } m_G = 1/ m_v = 56$$

El número de dientes del engrane será:

$$m_G = \frac{N_g}{N_p} \rightarrow N_g = m_G N_p = (56)(18) = 1008 \text{ dientes}$$

El resultado es muy elevado y factible.

- Probando con un engranaje de 2 etapa:

Debemos conseguir un reductor 56:1.

$$\sqrt{56} = 28 \rightarrow \text{relacion de engrane por etapa}$$

Tabla 4.11 Resultados de números de dientes para engranaje de 2 etapas (elaboración propia).

N_p	$m_G N_p =$	N_g
18	(28)(18)	504
19	(28)(19)	532

Se consigue que el número de dientes de los engranes sea un numero entero, pero es muy elevado.

- Probando con un engranaje de 4 etapa:

$$\sqrt[4]{56} = 2.7356 \rightarrow \text{relacion de engrane por etapa}$$

Tabla 4.12 Resultados de números de dientes para engranaje de 4 etapas (elaboración propia).

N_p	$m_G N_p =$	N_g
18	(2.7356)(18)	49.2
19	(2.7356)(19)	≈ 52
20	(2.7356)(20)	54.7
21	(2.7356)(21)	57.4

Con $N_p = 19$ dientes se consigue obtener $N_g \approx 52$

Por lo tanto:

piñones: $N_2 = N_4 = N_6 = N_8 = 19 \text{ dientes}$

engranes: $N_3 = N_5 = N_7 = N_9 = 52 \text{ dientes}$

Verificamos la relación de engrane total con este reductor de 4 etapas:

$$m_G = \frac{N_3}{N_2} * \frac{N_5}{N_4} * \frac{N_7}{N_6} * \frac{N_9}{N_8} = \frac{52}{19} * \frac{52}{19} * \frac{52}{19} * \frac{52}{19} = 52.1$$

Asumiendo que el torque el torque nominal de dicho motor es 0.765Nm, el torque que se obtendría en la salida del reductor (entrada del eje) sería:

$$T_1 * n_1 = T_2 * n_2$$

$$T_2 = \frac{T_1 * n_1}{n_2} = \frac{0.765Nm * (1120 \text{ RPM})}{(20 \text{ RPM})} = 17kNm$$

Esto es bastante aceptable.

APÉNDICE N

CÁLCULO DEL SISTEMA DE HUMIDIFICACIÓN

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771

4.17 Tabla de propiedades del agua saturada (Çengel, 2006).

APÉNDICE Ñ

EQUIPOS SELECCIONADOS PARA EL SISTEMA

W22 Monofásico - Con condensador permanente - 60 Hz

Potencia		Carcasa	Par nominal Tn (kgfm)	Corriente con rotor trabado I/Tn	Par con rotor trabado TU/Tn	Par Máximo Tt/Tn	Momento de Inercia J (kgm²)	Tiempo máximo con rotor trabado (s)	Peso (kg)	Nivel de ruido dB (A)	RPM	% de la potencia nominal						Corriente nominal In (A)			
kW	HP											Rendimiento			Factor de potencia			220 V		440 V	
												50	75	100	50	75	100	220 V	440 V		
II Polos																					
0,09	0,12	63	0,025	4,8	0,60	3,1	0,0002	11	9,0	50	3500	30,2	39,9	47,0	0,87	0,89	0,93	0,936	0,468		
0,12	0,16	63	0,033	4,7	0,65	3,1	0,0002	9	9,3	50	3505	31,4	41,5	49,2	0,93	0,94	0,96	1,15	0,575		
0,18	0,25	63	0,050	4,9	0,50	3,0	0,0002	6	9,6	50	3505	37,5	48,2	55,6	0,76	0,84	0,88	1,67	0,835		
0,25	0,33	63	0,070	4,4	0,50	2,5	0,0002	6	9,8	50	3480	42,2	53,1	60,2	0,91	0,92	0,95	1,99	0,995		
0,37	0,5	71	0,106	4,0	0,55	2,25	0,0005	14	10,8	60	3415	45,5	55,6	61,3	0,94	0,96	0,99	2,74	1,37		
0,55	0,75	71	0,157	4,2	0,45	2,2	0,0006	11	11,8	60	3410	53,6	62,8	67,2	0,94	0,97	0,99	3,76	1,88		
0,75	1	80	0,212	4,1	0,45	2,1	0,0009	18	16,4	65	3450	59,4	68,8	73,2	0,96	0,98	0,99	4,70	2,35		
1,1	1,5	90S	0,310	5,2	0,30	2,2	0,0022	8	24,0	69	3455	70,0	77,0	79,2	0,94	0,96	0,97	6,51	3,26		
1,5	2	90L	0,428	5,2	0,30	2,15	0,0023	13	26,5	69	3410	76,7	81,3	81,9	0,95	0,97	0,97	8,58	4,29		
2,2	3	90L	0,623	6,0	0,45	2,3	0,0027	6	28,0	69	3440	73,0	79,0	81,5	0,97	0,98	0,99	12,4	6,20		
Carcasas opcionales																					
0,75	1	71	0,216	3,9	0,6	2,1	0,0006	6	11,8	60	3385	54,0	63,7	68,6	0,94	0,96	0,99	5,02	2,51		
IV Polos																					
0,09	0,12	63	0,051	3,7	0,90	2,7	0,0006	41	9,0	47	1720	30,2	40,4	47,7	0,86	0,90	0,93	0,922	0,461		
0,12	0,16	63	0,069	3,3	0,65	2,0	0,0006	29	9,0	47	1690	35,3	45,5	52,3	0,84	0,89	0,93	1,12	0,560		
0,18	0,25	63*	0,104	3,6	0,75	2,2	0,0007	19	9,5	47	1690	35,7	46,3	53,5	0,87	0,92	0,95	1,61	0,805		
0,25	0,33	71	0,142	3,2	0,65	2,0	0,0008	15	11,4	55	1720	39,0	50,0	58,0	0,94	0,96	0,97	2,02	1,01		
0,37	0,5	71	0,212	3,5	0,70	1,8	0,0009	28	11,4	55	1700	51,0	62,0	68,0	0,89	0,93	0,95	2,61	1,31		
0,55	0,75	80	0,313	3,9	0,40	1,9	0,0029	12	16,5	55	1710	54,2	63,4	67,4	0,95	0,93	0,96	3,86	1,93		
0,75	1	80	0,430	3,7	0,45	1,9	0,0029	11	16,8	55	1700	57,1	66,4	70,3	0,92	0,94	0,97	5,00	2,50		
1,1	1,5	90S	0,630	4,8	0,45	2,05	0,0055	20	24,8	58	1700	64,3	72,1	75,1	0,97	0,98	0,98	6,79	3,40		
1,5	2	90L	0,864	4,4	0,45	1,9	0,0066	17	27,7	58	1690	66,2	73,8	76,2	0,99	0,99	0,99	9,04	4,52		
Carcasas opcionales																					
0,25	0,33	63	0,148	3,4	0,60	1,8	0,0007	31	10,2	47	1650	49,7	59,6	64,5	0,86	0,91	0,94	1,87	0,935		
0,37	0,5	80	0,208	4,2	0,55	2,25	0,0025	10	15,8	55	1730	45,4	56,3	62,7	0,93	0,95	0,97	2,77	1,39		
0,55	0,75	71*	0,321	3,7	0,45	1,7	0,0009	22	12,2	55	1670	51,5	63,0	69,1	0,90	0,94	0,96	3,77	1,89		
VI Polos																					
0,09	0,12	63	0,078	2,5	0,70	2,0	0,0007	6	9,5	47	1120	35,0	45,0	50,0	0,85	0,88	0,89	0,920	0,460		
0,12	0,16	71	0,107	2,5	1,1	2,0	0,0008	6	11,8	55	1090	28,0	37,5	44,0	0,91	0,93	0,94	1,30	0,650		
0,18	0,25	71	0,162	2,5	0,75	2,0	0,0009	6	12,7	55	1080	27,0	35,0	43,0	0,64	0,70	0,75	2,54	1,27		
0,25	0,33	71	0,230	2,5	0,70	1,7	0,0009	6	12,7	55	1060	39,0	49,0	53,0	0,74	0,80	0,86	2,50	1,25		
0,37	0,5	80	0,318	3,7	0,45	1,7	0,0024	6	14,7	55	1135	49,0	59,5	64,5	0,81	0,88	0,91	2,87	1,44		
0,55	0,75	80	0,491	3,0	0,60	1,7	0,0032	6	16,7	55	1090	51,0	60,0	64,0	0,83	0,90	0,94	4,20	2,10		

4.18 Características técnicas del motor seleccionado.

Carcasa	A	AA	AB	AC	AD	B	BB	BD	C	Eje							
										D	E	ES	F	G	GD		
63	100	25.5	116	125	128	80	95	7.5	40	11j6	23	14	4	8.5	4		
71	112	28.5	132	141	136	90	113.5	11.75	45	14j6	30	18	5	11	5		
80	125	30.5	149	159	145	100	125.5	12.75	50	19j6	40	28	6	15.5	6		
90S	140	37	164	179	155	125	131	15.5	56	24j6	50	36	8	20	7		
90L					181		156										
100L	160	40	188	206	191	140	173	16.5	63	28j6	60	45	246	206	7		
112M	190	40.5	220	226	206		177	18.5	70								
132S	216	45.5	248	272	234	187	178	225	23.5	89	38k6	80	63	10	33	8	
132M						178											225
132M/L						178/203											250
Carcasa	H	HA	HB	HC	HD	HH	HK	K	L¹	L²	LL	LM	S1	Rodamientos			
														Delantero	Trasero		
63	63	7	23	130	156.3	80	65	7	256	230	184	135	1xM20	6201 ZZ	6201 ZZ		
71	71		31	145	163.8	90			293	250				6202 ZZ	6202 ZZ		
80	80	8	41	163	174.3	100	91	10	326	277	221	206	1xM25	6204 ZZ	6203 ZZ		
90S	90	9	45	182	182.4	106			334	305				6205 ZZ			
90L			26	23	203	244	133	118.5	358	329	6206 ZZ	6207 ZZ					
100L	100	10	40	226	280	140	94	12	418	-	246	232	1xM32	6308 ZZ	6206 ZZ		
112M	112		43	244	280	159			423							246/286³	
132S	132	16	60	274	319	178	190.5	94	451	-	246	232	1xM32	6308 ZZ	6206 ZZ		
132M						178											
132M/L						190.5											

4.19 Dimensiones del motor seleccionado.

SERIE CRN 17 FORMA 3U

MODELOS EN FORMA DE 3U CON RACOR DE 1 1/2"

Código	Modelo	W	L mm	Racor	W/cm²	Tubo	Peso kg
278917312	CRN17-021	1200	415	1 1/2"	2,2	AISI 321	0,84
278917315	CRN17-025	1500	180	1 1/2"	8,3	AISI 321	0,53
278917316	CRN17-025C	1500	180	1 1/2"	8,3	Cu	0,53
278917320	CRN17-030C	2000	180	1 1/2"	9,5	Cu	0,53
278917322	CRN17-026C	2250	260	1 1/2"	7,5	Cu	0,63
278917327	CRN17-022	2700	635	1 1/2"	3,1	AISI 321	1,1
278917330	CRN17-023	3000	956	1 1/2"	2,2	AISI 321	1,5
278917331	CRN17-027C	3000	350	1 1/2"	7	Cu	0,79
278917332	CRN17-031C	3000	290	1 1/2"	8,4	Cu	0,71
278917345	CRN17-028C	4500	520	1 1/2"	6,6	Cu	1
278917346	CRN17-024	4500	956	1 1/2"	3,4	AISI 321	1,5
278917360	CRN17-029C	6000	680	1 1/2"	6,4	Cu	1,2
278917361	CRN17-032C	6000	315	1 1/2"	14,5	Cu	0,74

4.20 Características de las resistencias de calefacción.

Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designaciones	
d	D	B	dinámica C	estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite ¹⁾		Rodamiento	tapado en un lado ¹⁾
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-	
12	21	5	1,74	0,915	0,039	-	20 000	0,0063	► 61801-2RS1	-
	21	5	1,74	0,915	0,039	70 000	36 000	0,0063	► 61801-ZZ	-
	21	5	1,74	0,915	0,039	70 000	43 000	0,0063	► 61801	-
	24	6	2,91	1,46	0,062	-	19 000	0,011	► 61901-2RS1	-
	24	6	2,91	1,46	0,062	67 000	32 000	0,011	► 61901-ZZ	-
	24	6	2,91	1,46	0,062	67 000	40 000	0,011	► 61901	-
	28	8	5,4	2,36	0,1	60 000	38 000	0,021	► 6001	-
	28	8	5,4	2,36	0,1	-	17 000	0,022	► 6001-2RSH	6001-RSH
	28	8	5,4	2,36	0,1	60 000	30 000	0,021	► 6001-2RSL	6001-RSL
	28	8	5,4	2,36	0,1	60 000	30 000	0,022	► 6001-ZZ	6001-Z
	28	12	5,07	2,36	0,1	-	17 000	0,029	63001-2RS1	-
	30	8	5,07	2,36	0,1	-	17 000	0,028	16101-2RS1	-
	30	8	5,07	2,36	0,1	56 000	28 000	0,028	16101-ZZ	-
	30	8	5,07	2,36	0,1	60 000	38 000	0,026	16101	-
	32	10	7,28	3,1	0,132	50 000	32 000	0,037	► 6201	-
	32	10	7,28	3,1	0,132	-	15 000	0,038	► 6201-2RSH	6201-RSH
	32	10	7,28	3,1	0,132	50 000	26 000	0,038	► 6201-2RSL	6201-RSL
	32	10	7,28	3,1	0,132	50 000	26 000	0,039	► 6201-ZZ	6201-Z
	32	14	6,89	3,1	0,132	-	15 000	0,045	62201-2RS1	-
	37	12	10,1	4,15	0,176	45 000	28 000	0,06	► 6301	-
	37	12	10,1	4,15	0,176	-	14 000	0,062	► 6301-2RSH	6301-RSH
	37	12	10,1	4,15	0,176	45 000	22 000	0,06	6301-2RSL	6301-RSL
	37	12	10,1	4,15	0,176	45 000	22 000	0,063	► 6301-ZZ	6301-Z
	37	17	9,75	4,15	0,176	-	14 000	0,07	62301-2RS1	-
15	24	5	1,9	1,1	0,048	-	17 000	0,0074	► 61802-2RS1	-
	24	5	1,9	1,1	0,048	60 000	30 000	0,0074	► 61802-ZZ	-
	24	5	1,9	1,1	0,048	60 000	38 000	0,0065	► 61802	-
	28	7	4,36	2,24	0,095	-	16 000	0,016	► 61902-2RS1	-
	28	7	4,36	2,24	0,095	56 000	28 000	0,016	► 61902-2RZ	-
	28	7	4,36	2,24	0,095	56 000	28 000	0,016	► 61902-ZZ	-
	28	7	4,36	2,24	0,095	56 000	34 000	0,016	► 61902	-
	32	8	5,85	2,85	0,12	50 000	32 000	0,027	► 16002	-
	32	8	5,85	2,85	0,12	50 000	26 000	0,025	► 16002-ZZ	16002-Z
	32	9	5,85	2,85	0,12	50 000	32 000	0,03	► 6002	-
	32	9	5,85	2,85	0,12	-	14 000	0,03	► 6002-2RSH	6002-RSH
	32	9	5,85	2,85	0,12	50 000	26 000	0,03	► 6002-2RSL	6002-RSL

4.21 Características del primer par de rodamientos.

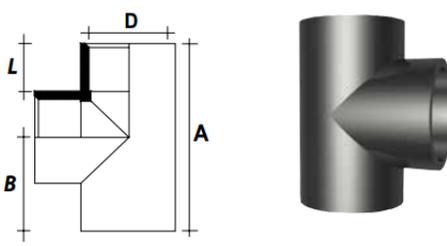
Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designaciones	
d	D	B	dinámica C	estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite ¹⁾		Rodamiento abierto o tapado en ambos lados	tapado en un lado ²⁾
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-	
45	58	7	6,63	6,1	0,26	-	6 700	0,04	▶ 61809-2RS1	-
	58	7	6,63	6,1	0,26	22 000	11 000	0,04	▶ 61809-2RZ	-
	58	7	6,63	6,1	0,26	22 000	14 000	0,04	▶ 61809	-
	68	12	14	10,8	0,465	-	6 000	0,14	▶ 61909-2RS1	-
	68	12	14	10,8	0,465	20 000	10 000	0,14	▶ 61909-2RZ	-
	68	12	14	10,8	0,465	20 000	13 000	0,14	▶ 61909	-
	75	10	16,5	10,8	0,52	20 000	12 000	0,17	▶ 16009	-
	75	16	22,1	14,6	0,64	20 000	12 000	0,24	▶ 6009	-
	75	16	22,1	14,6	0,64	-	5 600	0,25	▶ 6009-2RS1	6009-RS1
	75	16	22,1	14,6	0,64	20 000	10 000	0,25	▶ 6009-2Z	6009-Z
	75	23	20,8	14,6	0,64	-	5 600	0,36	▶ 63009-2RS1	-
	85	19	35,1	21,6	0,915	17 000	11 000	0,42	▶ 6209	-
	85	19	35,1	21,6	0,915	-	5 000	0,42	▶ 6209-2RSH	▶ 6209-RSH
	85	19	35,1	21,6	0,92	17 000	8 500	0,43	▶ 6209-2Z	6209-Z
	85	23	33,2	21,6	0,915	-	5 000	0,51	▶ 62209-2RS1	-
100	25	55,3	31,5	1,34	15 000	9 500	0,84	▶ 6309	-	
100	25	55,3	31,5	1,34	15 000	14 000	0,85	▶ 6309 M	-	
100	25	55,3	31,5	1,34	-	4 500	0,85	▶ 6309-2RSH	▶ 6309-RSH	
100	25	55,3	31,5	1,34	15 000	7 500	0,87	▶ 6309-2Z	6309-Z	
100	36	52,7	31,5	1,34	-	4 500	1,2	▶ 62309-2RS1	-	
120	29	76,1	45	1,9	13 000	8 500	1,55	▶ 6409	-	

4.22 Características del segundo par de rodamientos.

Diámetro Nominal (mm)		Diámetro Interior	Espesor Nominal	Presión de Trabajo		
UNIÓN U/Z	UNIÓN E/C	mm	mm	MPa	PSI (lb/pulg ²)	Kgf/cm ²
	20	17.8	1.1	1.25	181	12.75
		16.8	1.6	2.00	290	20.40
	25	22.8	1.1	1.00	145	10.20
		21.8	1.6	1.60	232	16.32
	32	29.8	1.1	0.80	116	8.16
		28.8	1.6	1.25	181	12.75
	40	37.8	1.1	0.63	91	6.43
		36.8	1.6	1.00	145	10.20
		36.0	2.0	1.25	181	12.75
	50	47.4	1.3	0.63	91	6.43
		46.8	1.6	0.80	116	8.16
		46.0	2.0	1.00	145	10.20
		45.0	2.5	1.25	181	12.75
	63	59.8	1.6	0.63	91	6.43
		58.8	2.1	0.80	116	8.16
		58.0	2.5	1.00	145	10.20
		56.8	3.1	1.25	181	12.75
	75	72.0	1.5	0.50	73	5.10
		71.2	1.9	0.63	91	6.43
		70.2	2.4	0.80	116	8.16
		69.0	3.0	1.00	145	10.20
	90	67.6	3.7	1.25	181	12.75
		86.4	1.8	0.50	73	5.10
		85.4	2.3	0.63	91	6.43
		84.2	2.9	0.80	116	8.16

4.23 Tubo PVC seleccionado de catálogo de tubos (Plastigama, 2020).

TEE E/C



CÓDIGO	DIÁMETRO	A	B	L
		(mm)	(mm)	(mm)
925650	20 mm	54	27	16
925659	25 mm	64	32	19
925660	32 mm	78	39	22
925651	40 mm	97	48	26
925670	50 mm	114	57	31
925661	63 mm	140	70	38
925609	75 mm	170	85	44
962366	90 mm	200	100	51
925646	110 mm	234	117	61
925605	125 mm	266	133	69
925606	140 mm	306	153	76
925647	160 mm	348	174	86
925649	200 mm	414	207	106
925608	250mm	518	259	131

4.24 Accesorio de unión tipo TEE seleccionado de catálogo de tubos (Plastigama, 2020).

Manguera Metálica Flexible (SU)

Material del Fuelle: AISI-304-316-321
Material de Malla: AISI-304
Tº DE SERVICIO: -200°C a 600°C

Diámetros				Cantidad de mallas externas	Presión nominal		Mínimo Radio de Curvatura	
Nominal mm	Nominal pulgadas	Interno d (mm)	Externo D (mm)		Kgf /cm ²	PSI	Montaje estático (mm)	Montaje dinámico (mm)
6	1/4"	7	10,8	0	10	143	30	100
			11,8	1	130	1859		
			12,8	2	160	2288		
10	3/8"	11	16,1	0	8	114,4	40	120
			17,1	1	90	1287		
			18,1	2	140	2002		
12	1/2"	14	19,4	0	5	71,5	45	140
			20,4	1	65	929,5		
			21,4	2	130	1859		
20	3/4"	20,5	28	0	4	57,2	55	160
			29	1	40	572		
			30	2	70	1001		
25	1"	27	36,5	0	3	42,9	65	180
			38,1	1	50	715		
			39,7	2	65	929,5		
32	1 ¼"	33	44,5	0	2	28,6	80	220
			46,1	1	40	572		
			47,7	2	45	643,5		
40	1 ½"	40,5	54	0	2	28,6	90	260
			55,6	1	30	429		
			57,2	2	45	643,5		
50	2"	52,5	68	0	1,5	21,45	110	330
			69,6	1	25	357,5		
			71,2	2	35	500,5		
65	2 ½"	64,5	82	0	1,5	21,45	155	400
			83,6	1	25	357,5		
			85,2	2	40	572		

4.25 Manguera metálica flexible seleccionada (Flexilatina, 2019).

Hembra fija

Terminal hembra fija con rosca NPT, BSP correspondiente al diámetro nominal respectivo, fabricado en acero carbono y acero inoxidable.



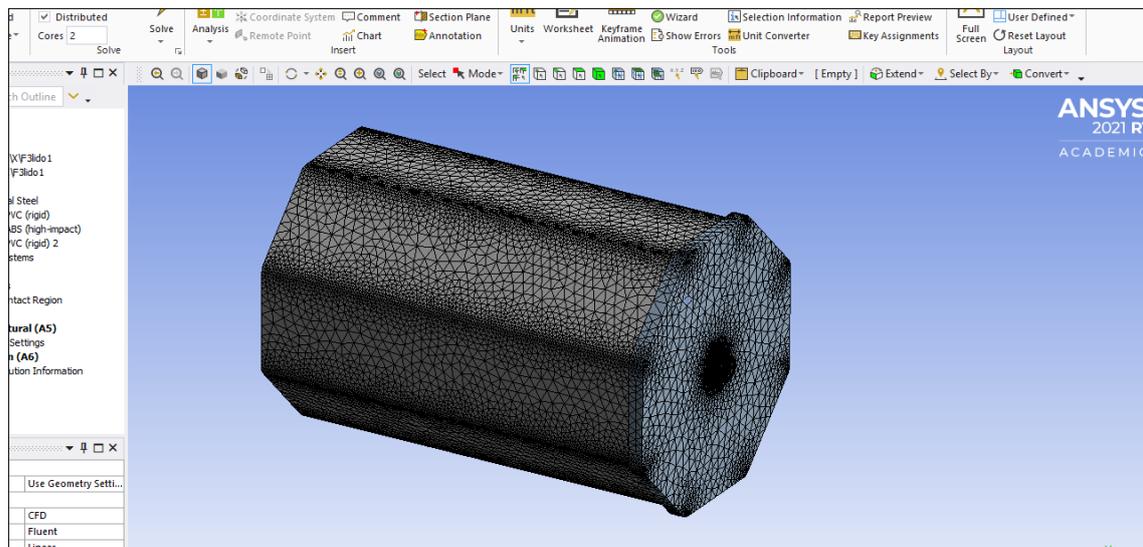
4.26 Terminal roscado seleccionado (Flexilatina, 2019).

APÉNDICE O

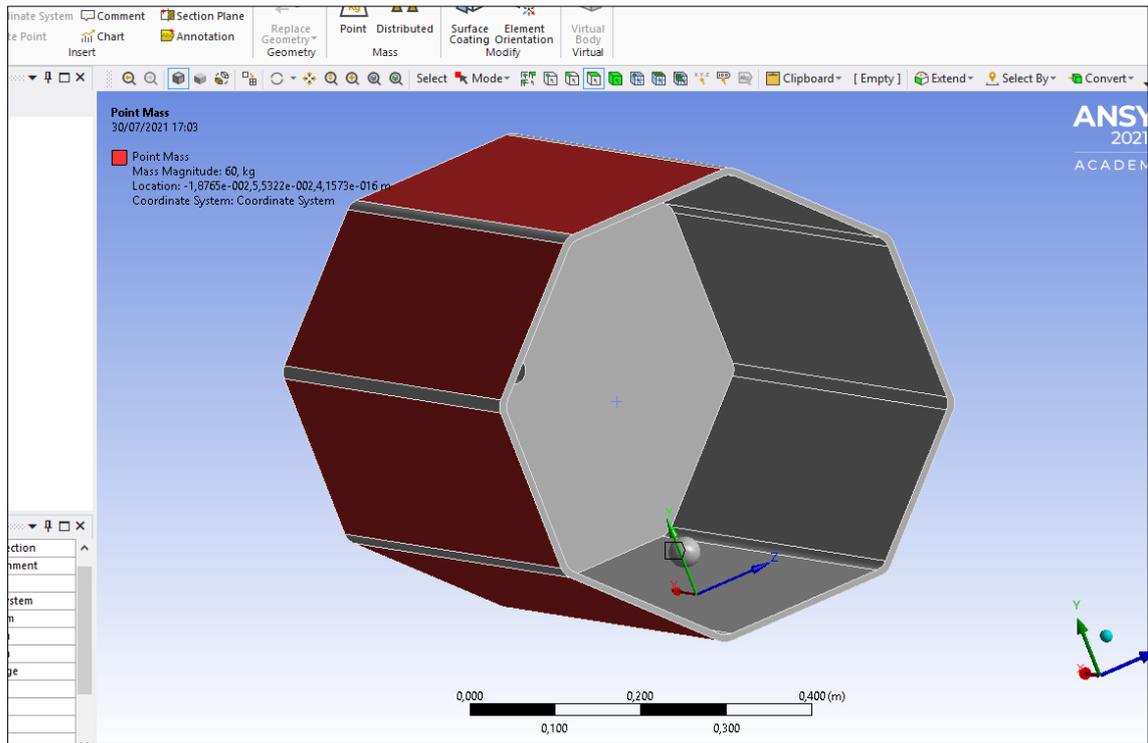
SIMULACIONES

Outline of ANSYS GRANTA Materials Data for Simulation (Sample)					
	A	B	C	D	E
4	General Materials				General use material samples for use in various analyses.
5	Additive Manufacturing Materials				Additive manufacturing material samples for use in additive manufacturing analyses.
1	Contents of ANSYS GRANTA Materials Data for Simulation (Sample)	Add	Source		Description
26	Plastic, PVC (rigid)				Poly Vinyl Chloride (Rigid, Molding); Type I Data compiled by the Granta Design team at ANSYS, incorporating various sources including JAHM and MagWeb. ANSYS Inc. provides no warranty for this data.
27	Propylene glycol 50				Liquid, Propylene Glycol 50 Data compiled by the Granta Design team at ANSYS, incorporating various sources including JAHM and MagWeb.

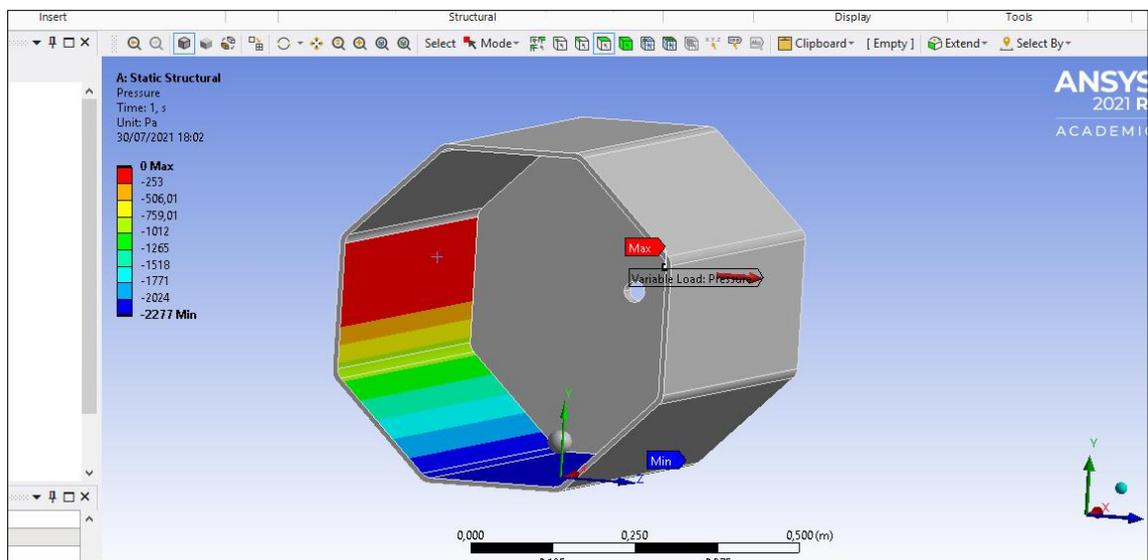
4.27 Datos ingresados para la simulación del tanque en ANSYS (elaboración propia).



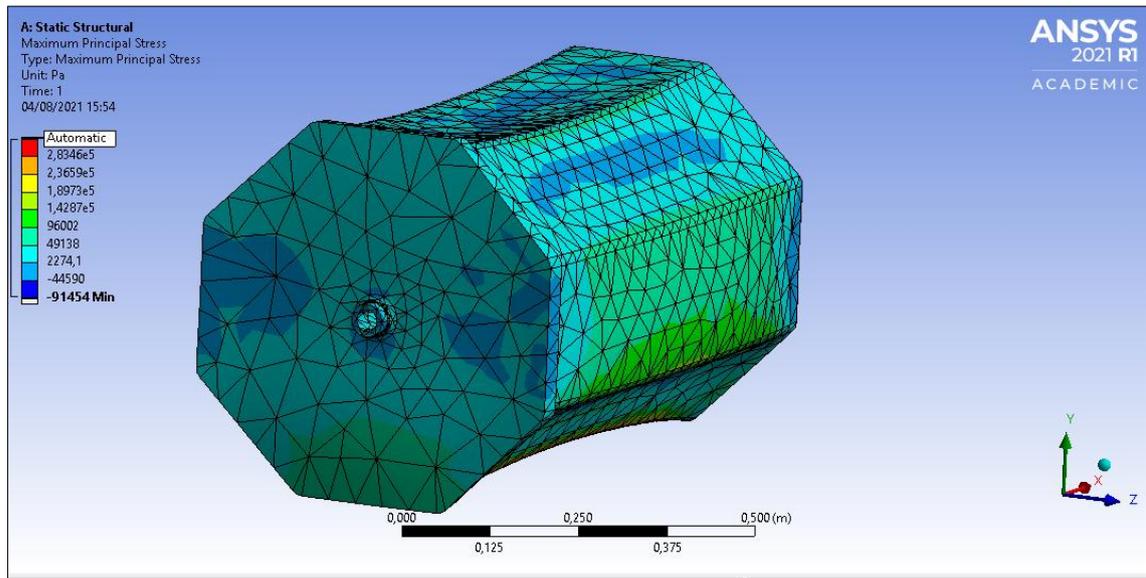
4.28 Mallado del contenedor en ANSYS (elaboración propia).



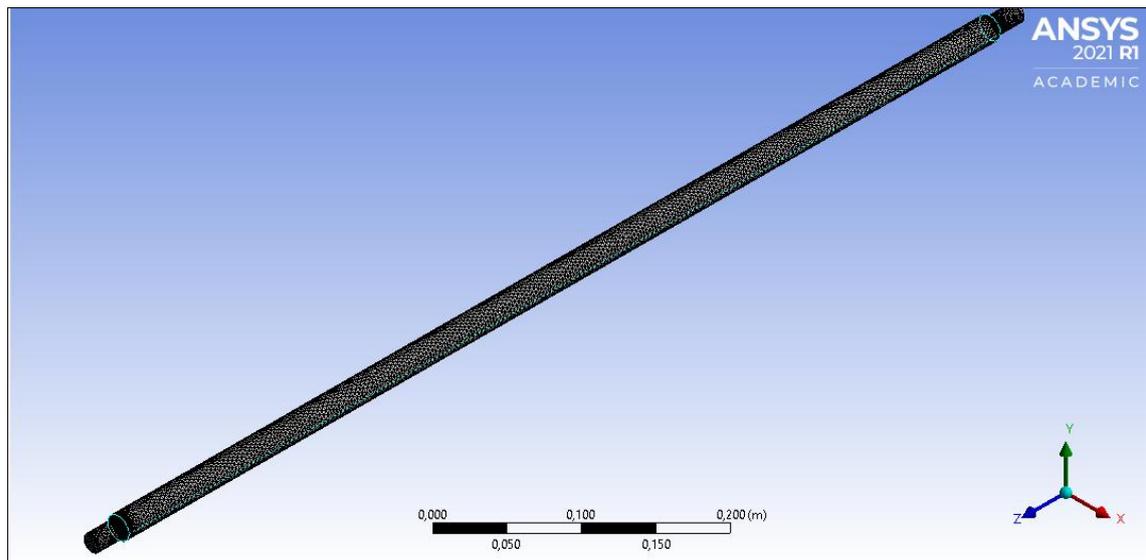
4.29 Ubicación de la masa del contenedor en ANSYS (elaboración propia).



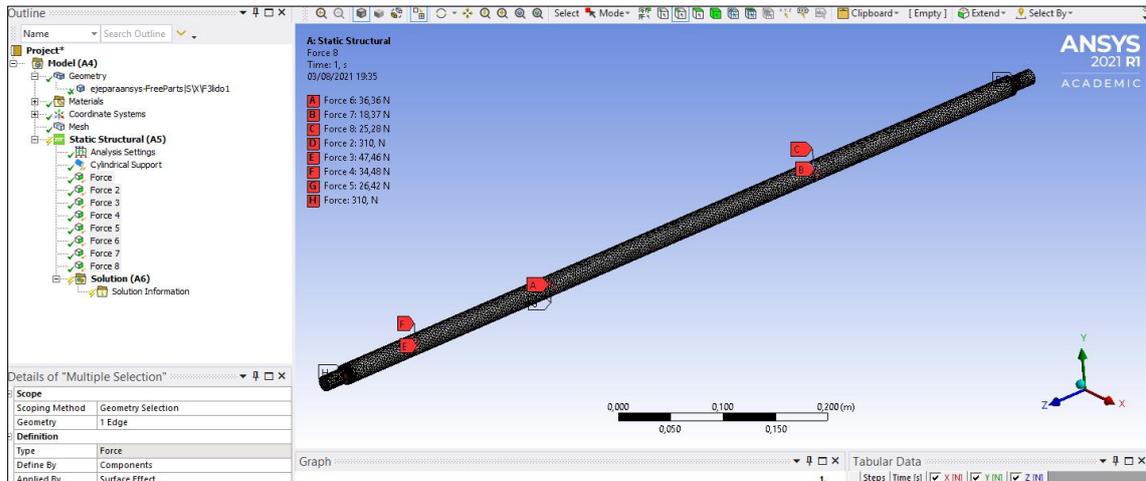
4.30 Simulación de presiones en el contenedor en ANSYS (elaboración propia).



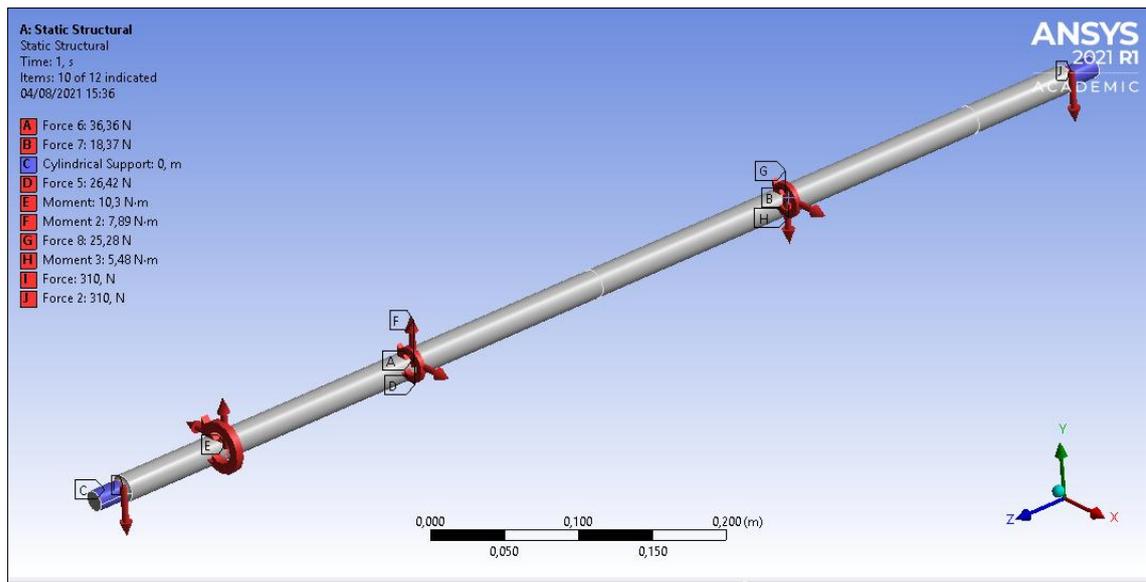
4.31 Simulación del máximo esfuerzo principal en ANSYS (elaboración propia).



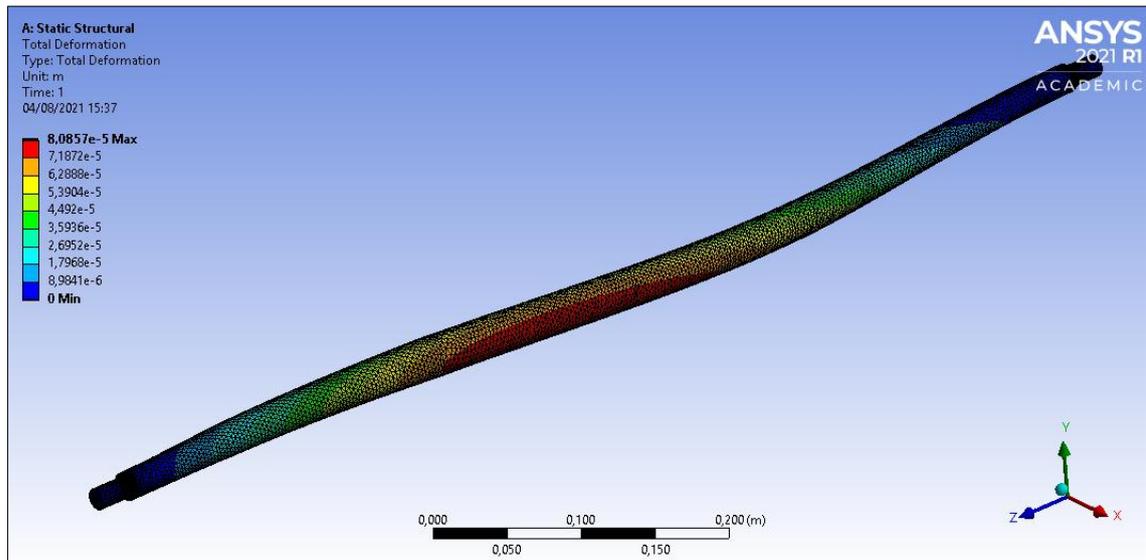
4.32 Mallado del eje motriz en ANSYS (elaboración propia).



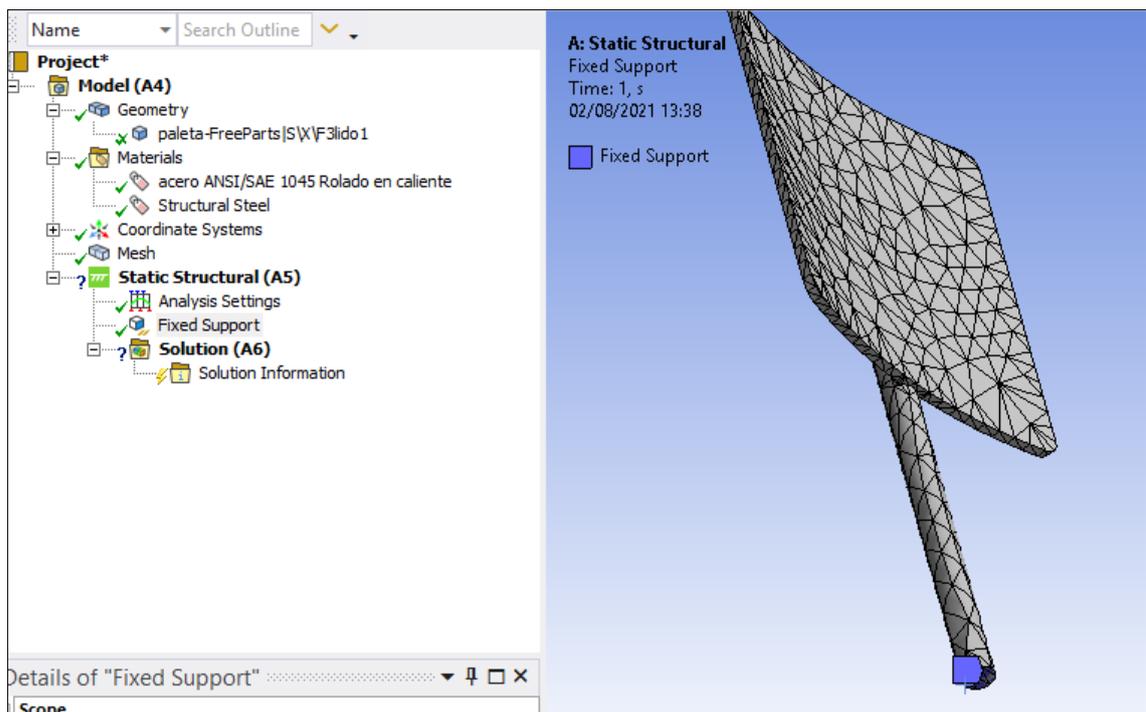
4.33 Colocación de las fuerzas actuantes en el eje motriz en ANSYS (elaboración propia).



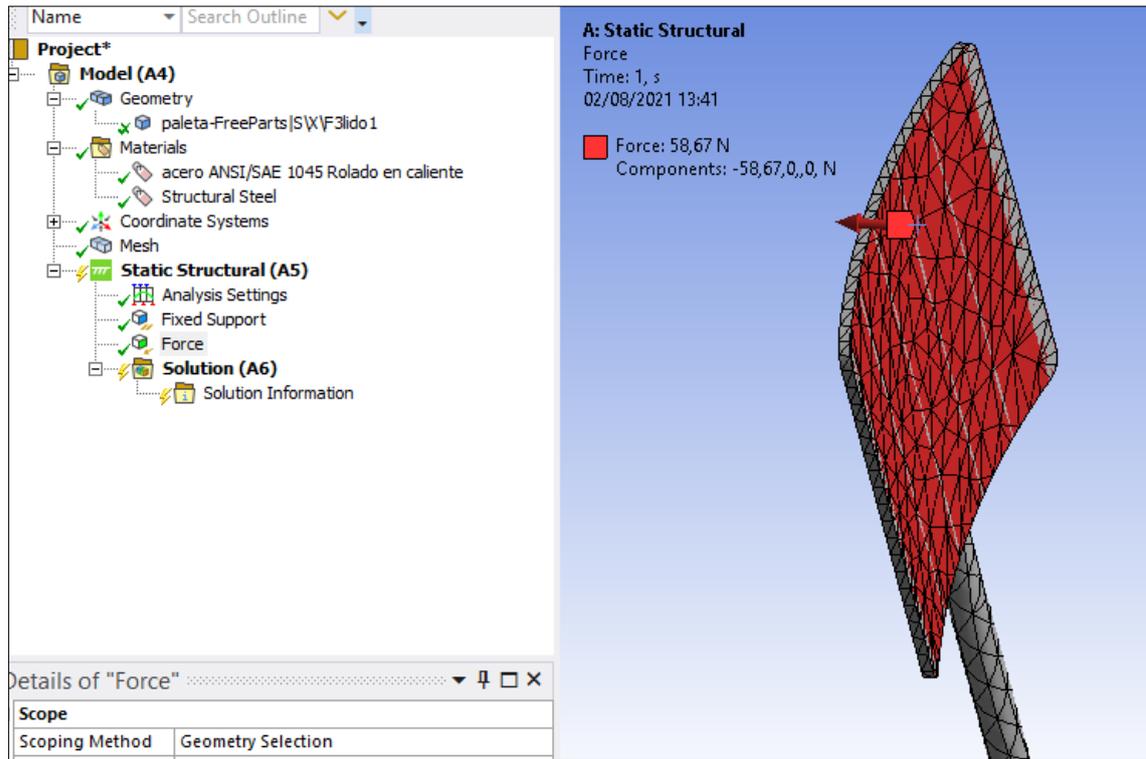
4.34 Colocación de momentos sobre el eje motriz en ANSYS (elaboración propia).



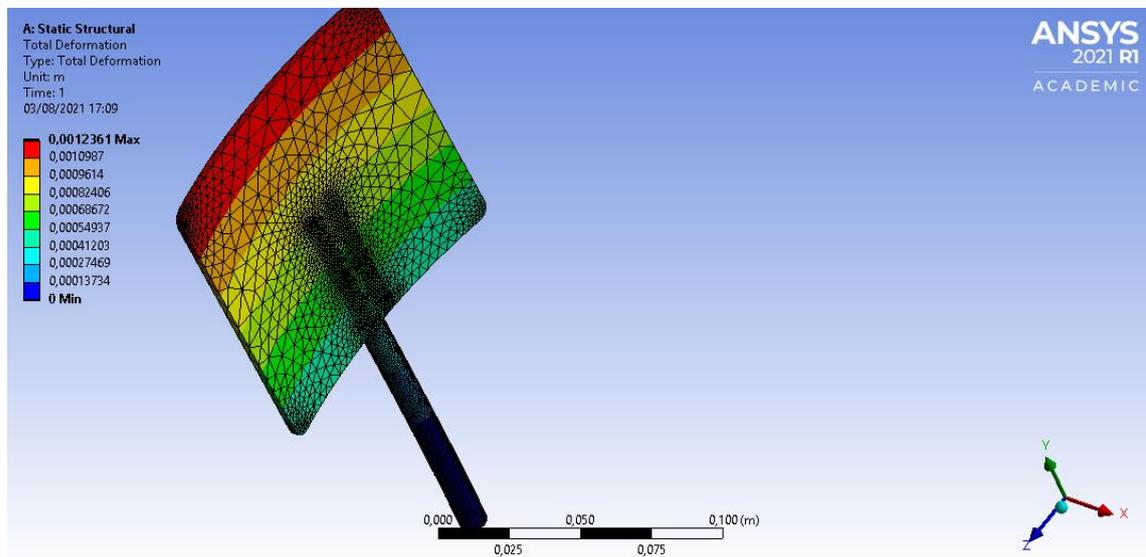
4.35 Simulación de la deformación del eje motriz en ANSYS (elaboración propia).



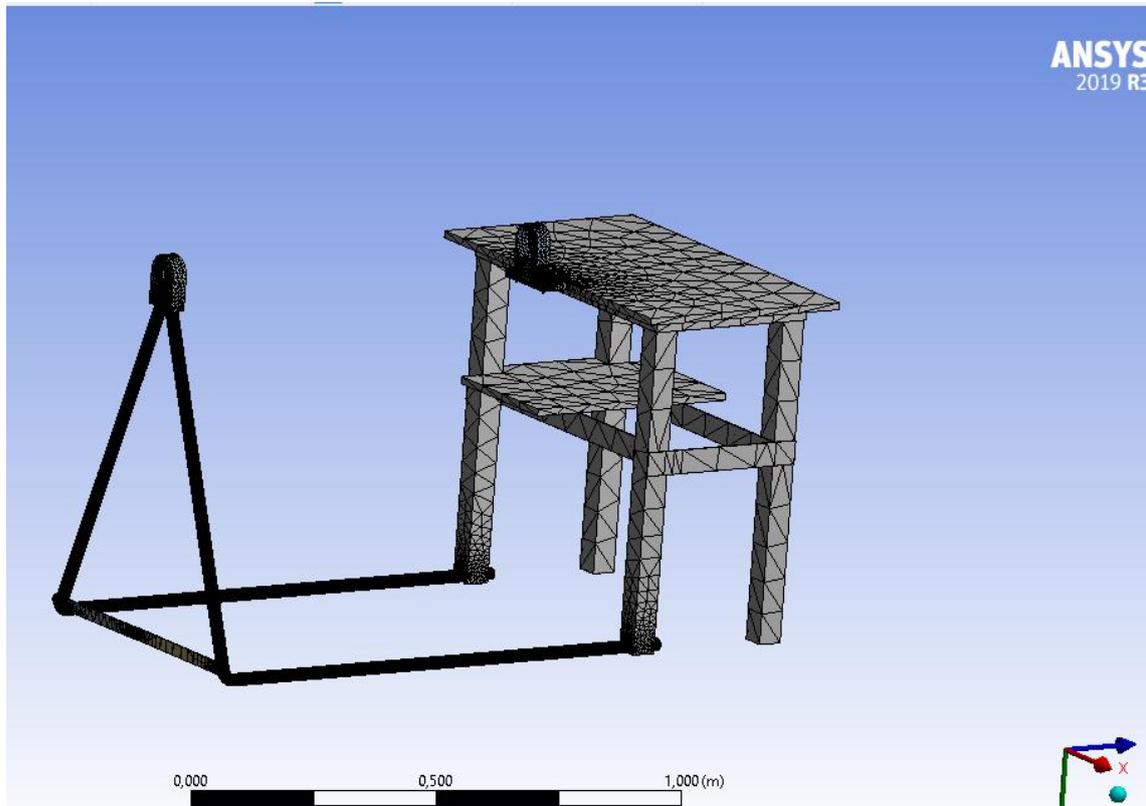
4.36 Mallado de la paleta en ANSYS (elaboración propia).



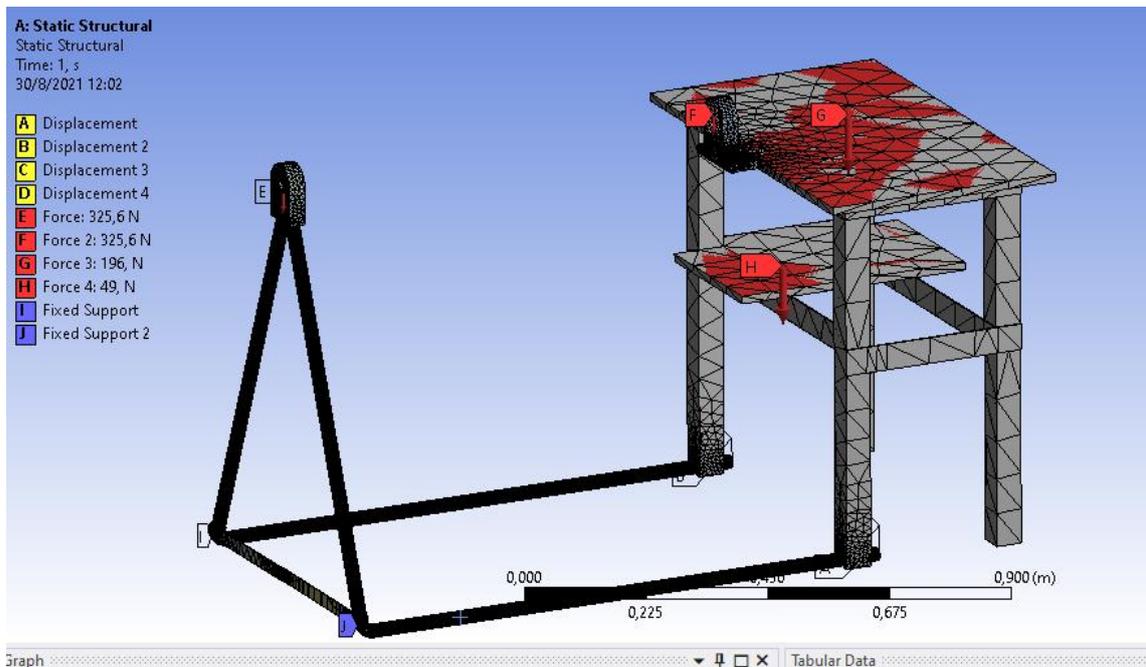
4.37 Ubicación de la fuerza sobre la paleta en ANSYS (elaboración propia).



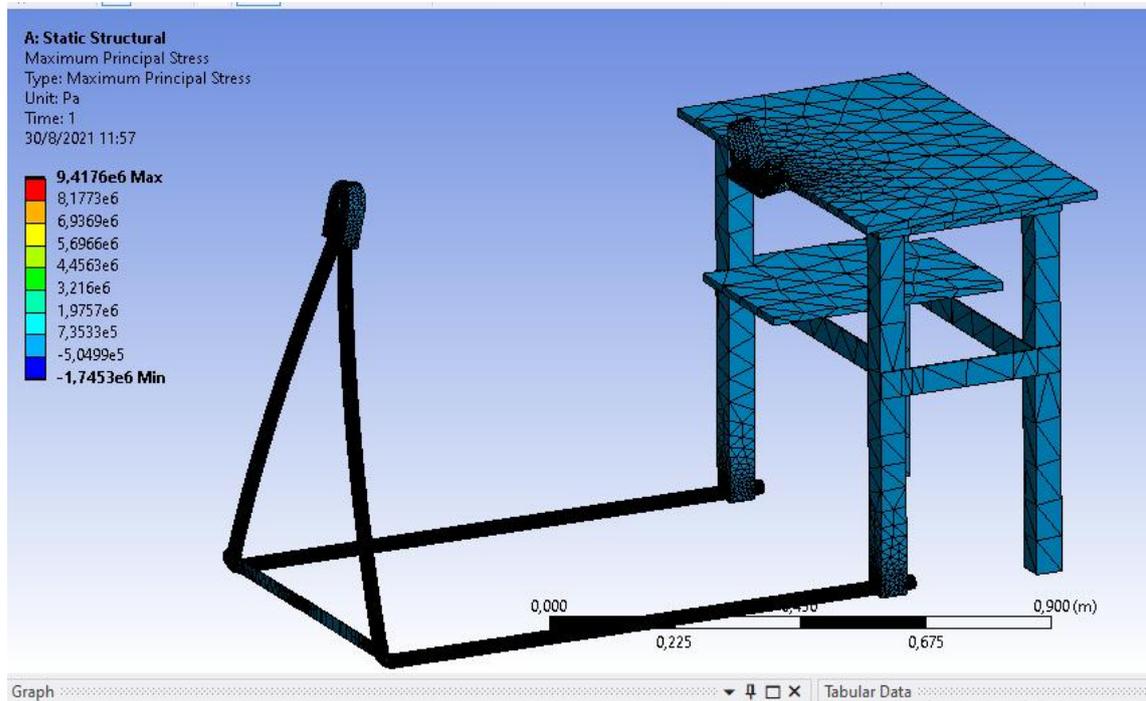
4.38 Simulación de la deformación de la paleta en ANSYS (elaboración propia).



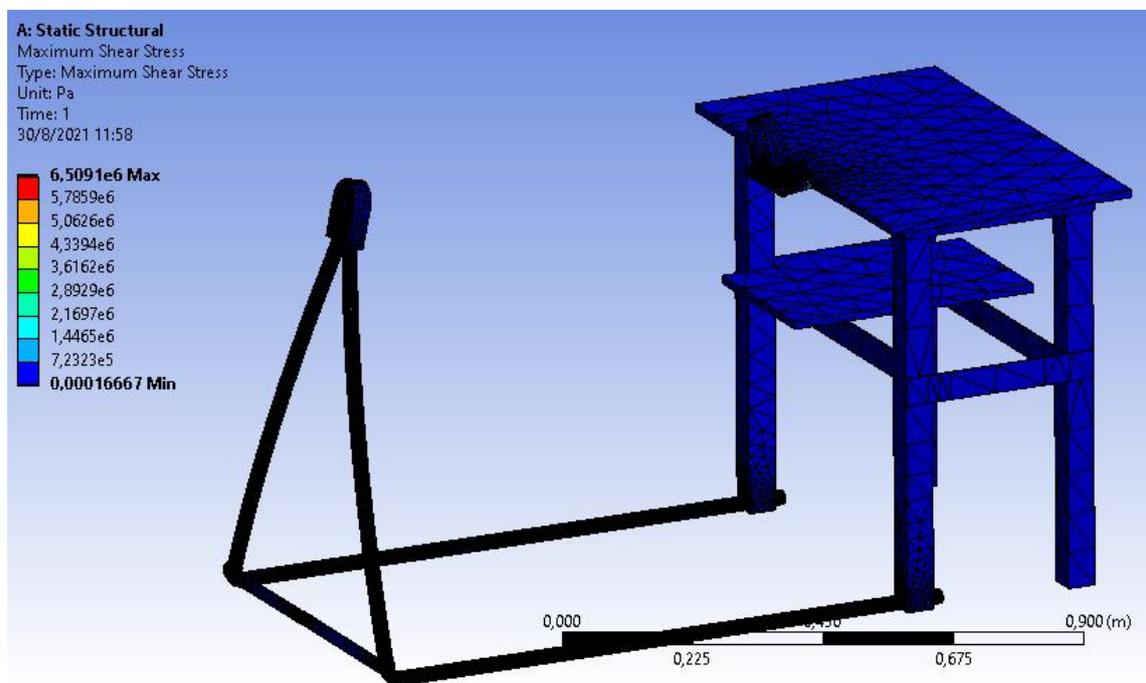
4.39 Mallado de la estructura de la base en ANSYS (elaboración propia).



4.40 Restricciones de la estructura en ANSYS (elaboración propia).



4.41 Simulación del máximo esfuerzo principal en la estructura base en ANSYS (elaboración propia).



4.42 Simulación del máximo esfuerzo cortante en la estructura base en ANSYS (elaboración propia).

APÉNDICE P

CODIGOS DEL SISTEMA DE CONTROL

```
1 /* Main.ino file generated by New Project wizard
2 *
3 * Created: sáb. ago. 14 2021
4 * Processor: Arduino Uno
5 * Compiler: Arduino AVR (Proteus)
6 */
7
8 // Peripheral Configuration Code (do not edit)
9 ---CONFIG_BEGIN---
10 #pragma GCC push_options
11 #pragma GCC optimize ("Os")
12
13 #include <core.h> // Required by cpu
14 #include <cpu.h>
15
16 #pragma GCC pop_options
17
18 // Peripheral Constructors
19 CPU &cpu = Cpu;
20
21 void peripheral_setup () {
22 }
23
24 void peripheral_loop() {
25 }
26 ---CONFIG_END---
27
28
29 #include <TimeLib.h>
```

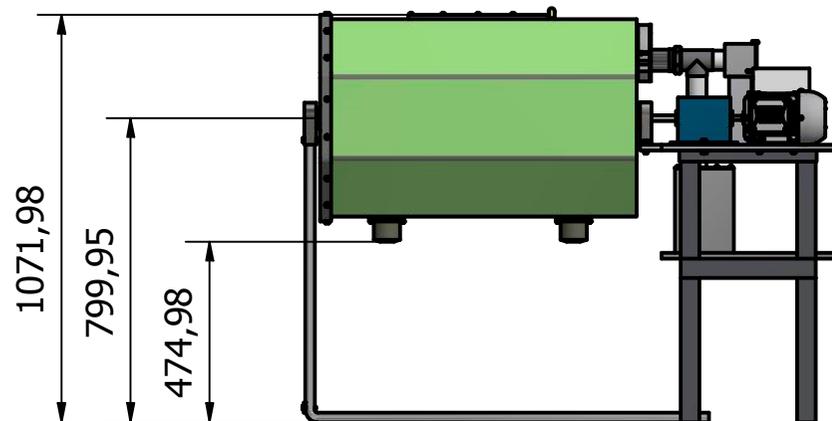
```
30 #include "DHT.h"
31 #define DHTPIN 4
32 #define DHTTYPE DHT11
33
34 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
35
36 const int humedificadores = 2;
37 const int resistencias = 3;
38 const int ventilador = 5;
39 float h;
40 float t;
41
42
43 int temp1 = 0;
44 int cont1 = 0;
45 int temp2 = 0;
46 int cont2 = 0;
47 int temp3 = 0;
48 int cont3 = 0;
49
50
51 void setup () {
52   peripheral_setup();
53   // TODO: put your setup code here, to run once:
54   Serial.begin(9600);
55   Serial.println(F("DHTxx test!"));
56
57   dht.begin();
58   pinMode(humedificadores , OUTPUT);
59   pinMode(resistencias , OUTPUT);
60   pinMode(ventilador , OUTPUT);
61 }
```

```
62
63 void loop() {
64   peripheral_loop();
65   // TODO: put your main code here, to run repeatedly:
66   if (second()%2==0 && cont1 == 0){
67     temp1 = second();
68     cont1 = cont1 + 1;
69     // Sensor readings may also be up to 2 seconds 'old' (its a very slow sensor)
70     h = dht.readHumidity();
71     // Read temperature as Celsius (the default)
72     t = dht.readTemperature();
73     Serial.print(F("Humidity: "));
74     Serial.println(h);
75     Serial.print(F("% Temperature: "));
76     Serial.print(t);
77     Serial.println(F("°C "));
78   }else if(second()!=temp1 && cont1 == 1) {
79     cont1 = 0;
80   }
81
82   if (minute()%15==0 && cont2 == 0){
83     temp2 = minute();
84     cont2 = cont2 + 1;
85     digitalWrite(ventilador, HIGH);
86     Serial.println("Ventilador encendido");
87   }else if(minute()!=temp2 && cont2 == 1) {
88     cont2 = 0;
89   }
90
91   if (minute()==temp2+5 && cont3 == 0){
92     temp3 = minute();
93     cont3 = cont3 + 1;
```

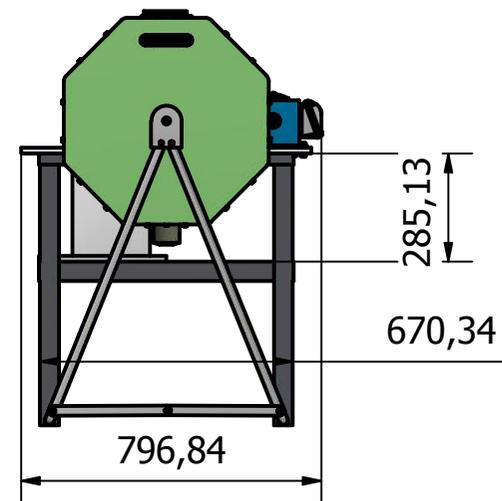
```
94 digitalWrite(ventilador, LOW);
95 Serial.println("Ventilador apagado");
96 }else if(minute() != temp3 && cont3 == 1) {
97 cont3 = 0;
98 }
99
100 if(h < 45.0){
101 digitalWrite(humedificadores, HIGH);
102 }else{
103 digitalWrite(humedificadores , LOW);
104 }
105 if(t < 45.0){
106 digitalWrite(resistencias , HIGH);
107 }else{
108 digitalWrite(resistencias , LOW);
109 }
110 }
111
```

APÉNDICE Q
PLANOS DE CONSTRUCCIÓN

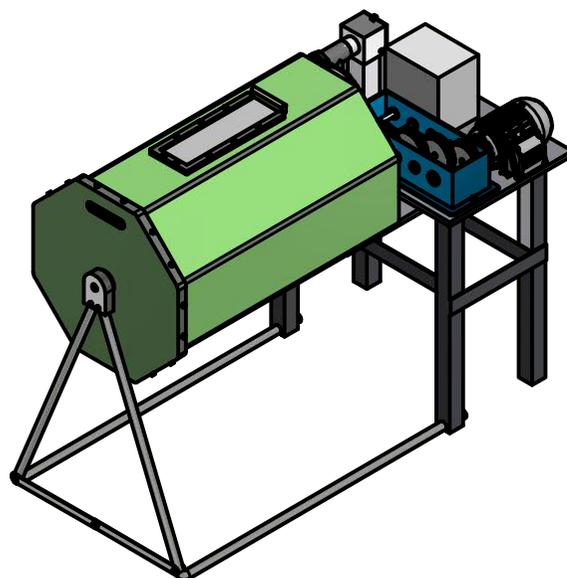
VISTA LATERAL (0,06 : 1.2)



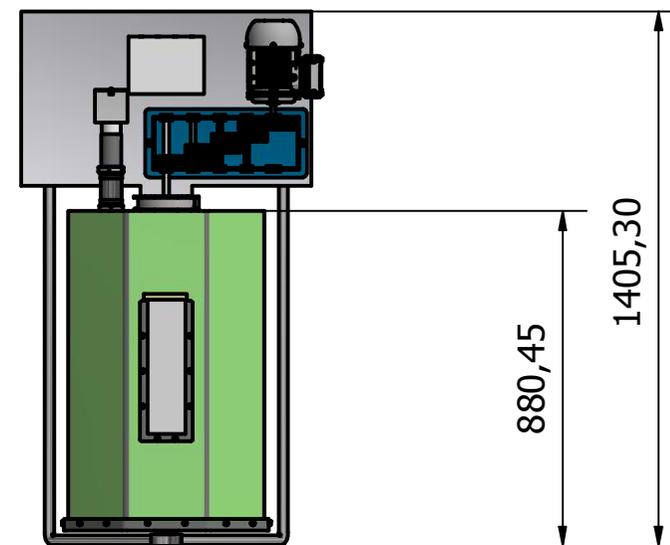
VISTA FRONTAL (0,06 : 1.2)



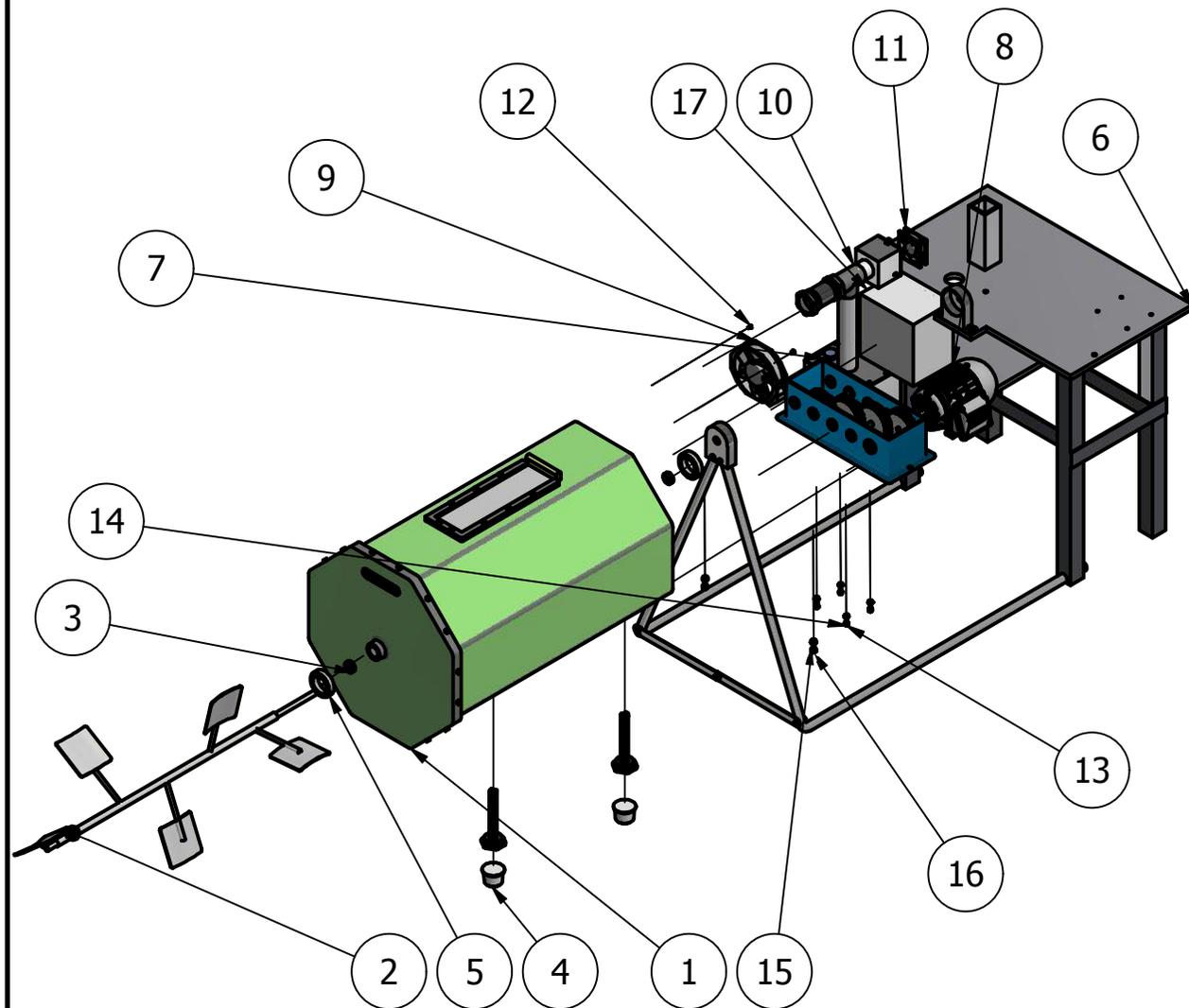
VISTA ISOMÉTRICA (0,06 : 1.2)



VISTA DE PLANTA (0,06 : 1.2)



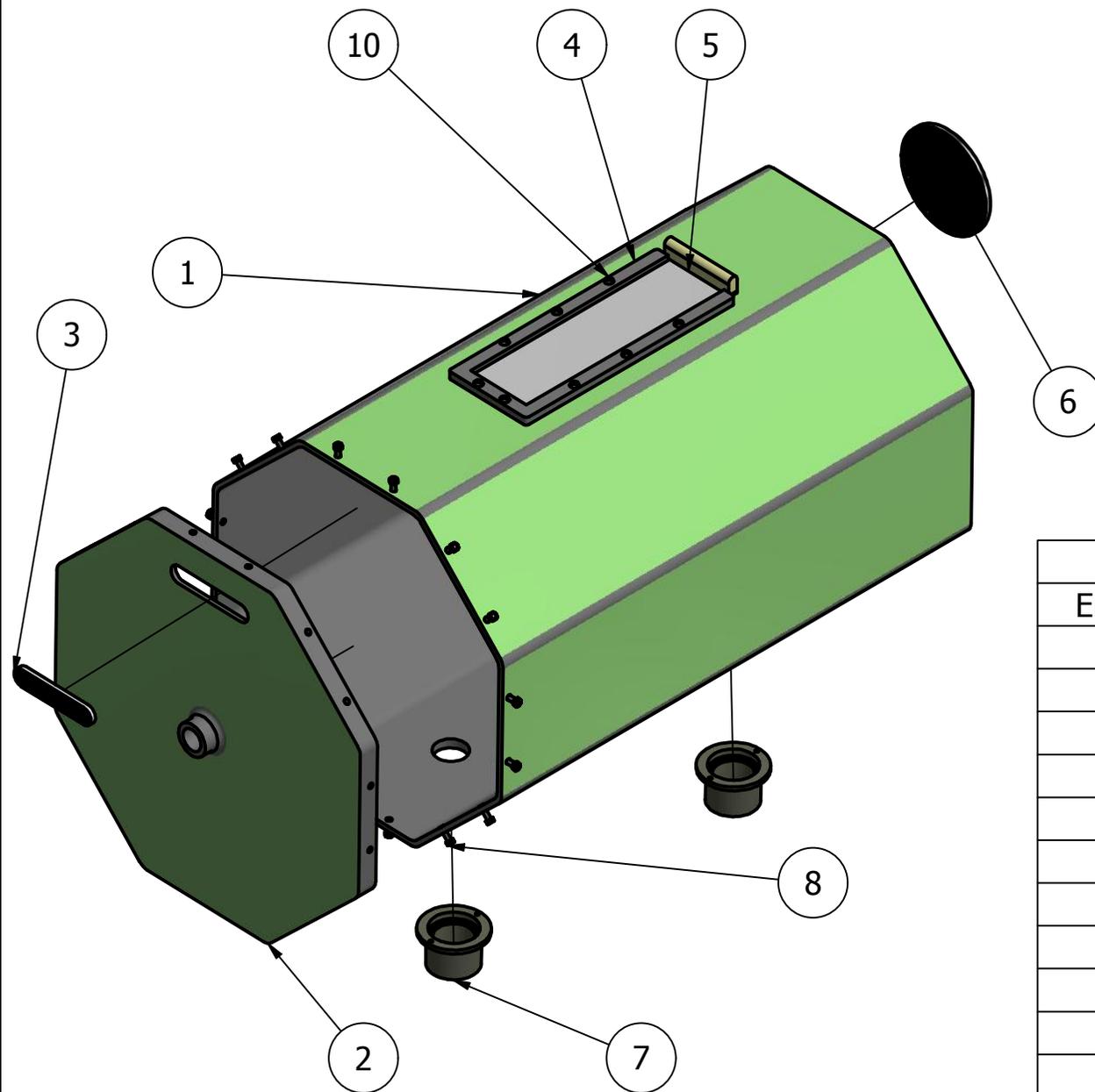
Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 0,06 : 1.2	Fecha 25/08/2021		
GRUPO BAQUE-SOLORZANO		Equipo compostador mecánico			
Material principal PVC/Acero/Aluminio			Edición 01	N° Hoja 01	



VISTA EXPLOSIONADA

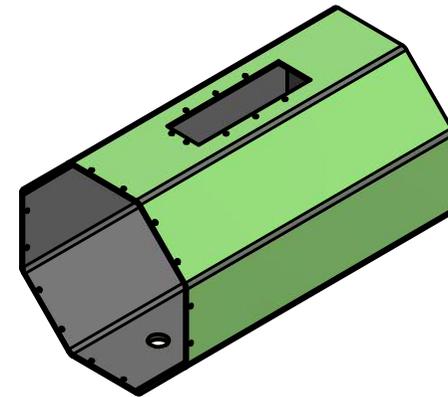
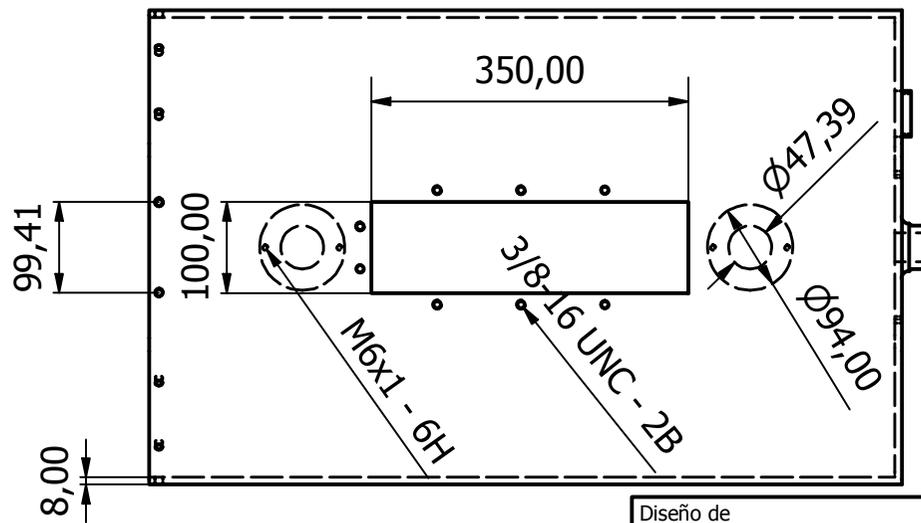
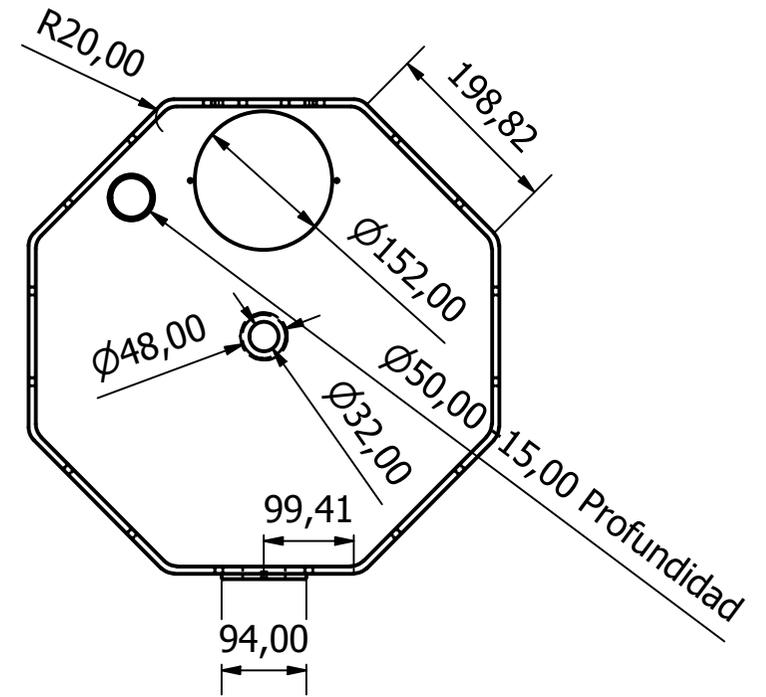
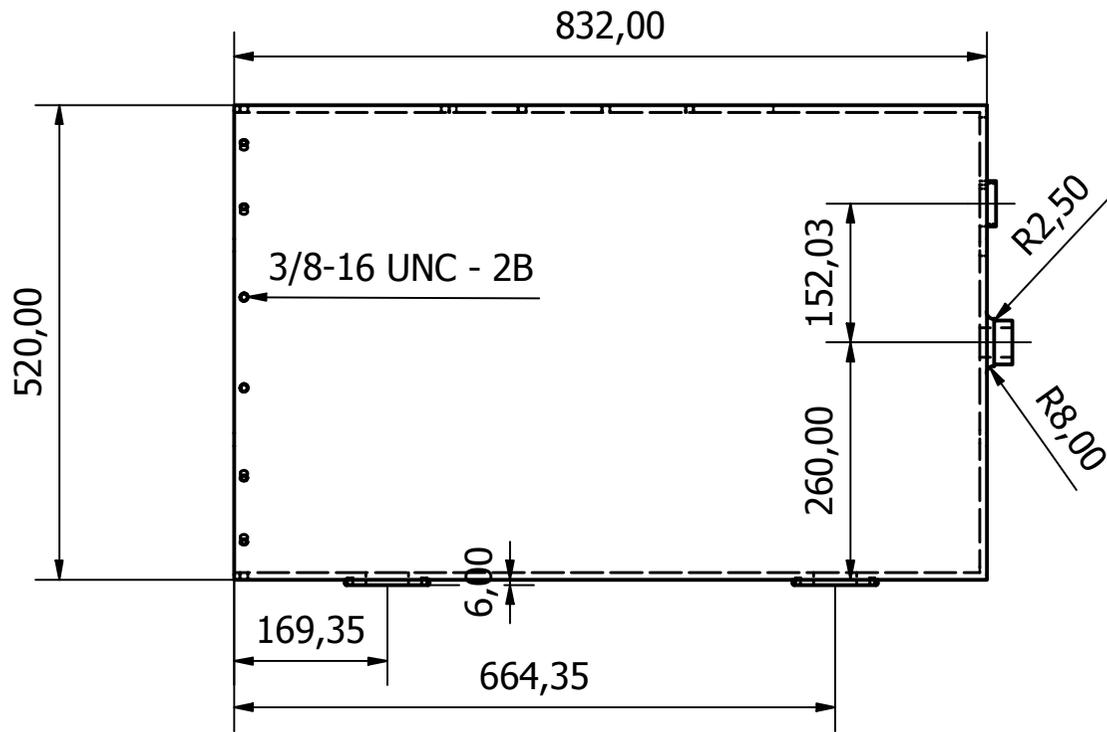
LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Contenedor
2	1	Sistema eje-paletas
3	2	Rodamiento de bolas 15x32x9mm
4	2	Acoples de resistencias
5	2	Rodamiento de bolas 45x75x16mm
6	1	Estructura de soporte
7	1	Caja de reducción
8	1	Motor eléctrico 1/8 hp
9	1	Ventilador de oxigenación
10	1	Sistema de humidificación
11	1	Ventilador de humidificación
12	4	AS 1427 - M4 x 8
13	4	ANSI B18.6.3 - 1/4-20 UNC x 1,125
14	4	ANSI B18.2.4.2M - M6x1
15	2	AS 1427 - M8 x 30
16	2	ANSI B18.2.4.2M - M8x1,25
17	1	Caja de control

Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 1 : 19	Fecha 25/08/2021	
GRUPO BAQUE-SOLORZANO		Equipo compostador mecánico		
		Material principal PVC/Acero/Aluminio	Edición 01	Nº Hoja 02

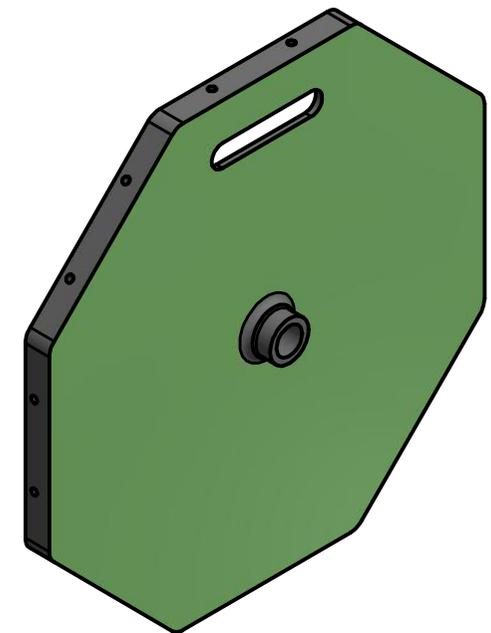
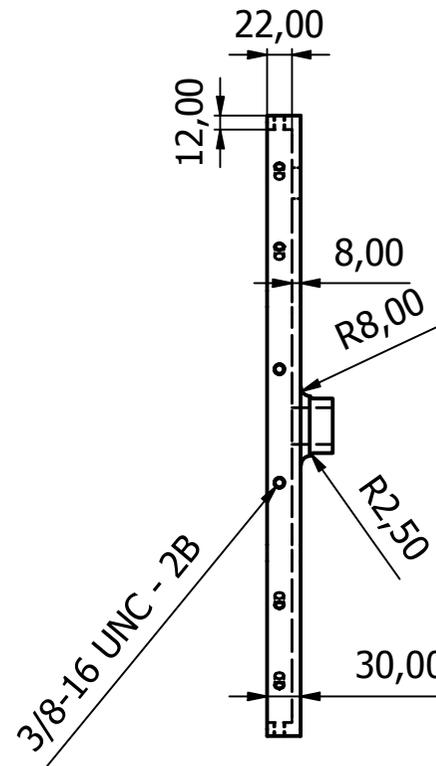
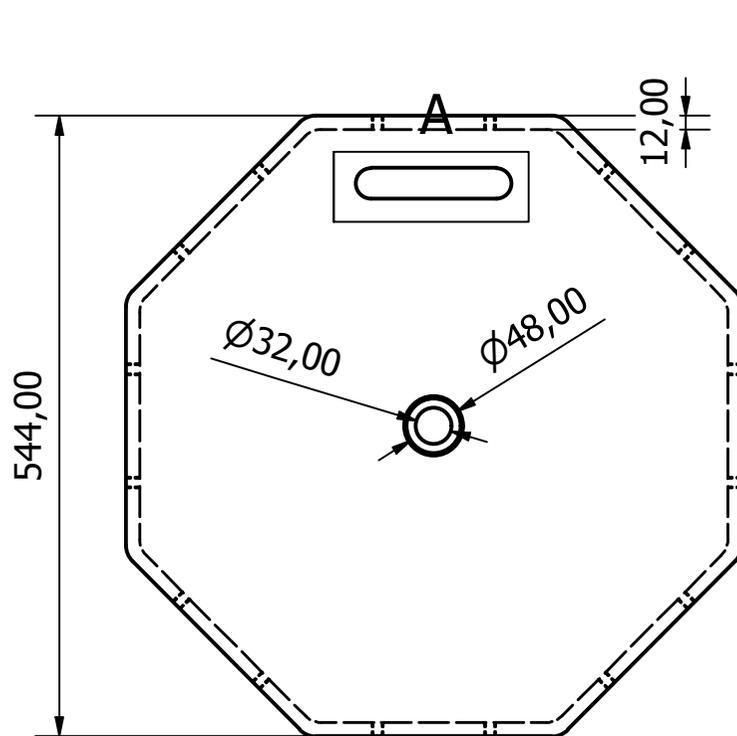
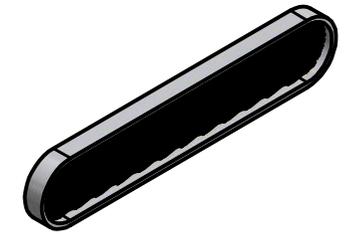
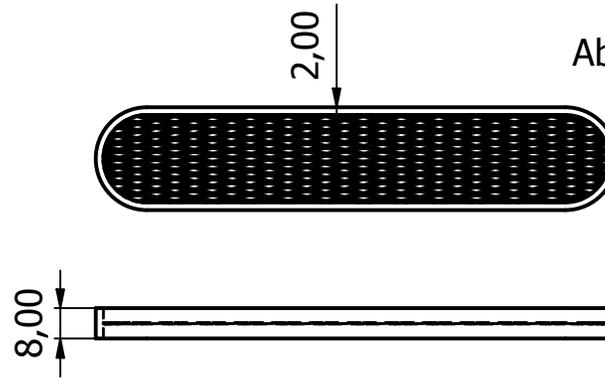
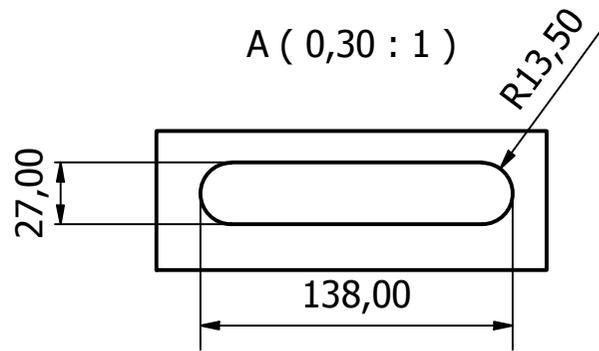


LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Contenedor
2	1	Tapa de contenedor
3	1	Abertura mallada
4	1	Marco de encaje
5	1	Tapa superior
6	1	Anillo con malla metálica
7	2	Acoples de resistencias
8	14	IFI 502 - 6.3x1.8 x 20
9	2	IFI 502 - 6.3x1.8 x 13
10	8	AS 1427 - M6 x 16
11	4	AS 1427 - M6 x 12

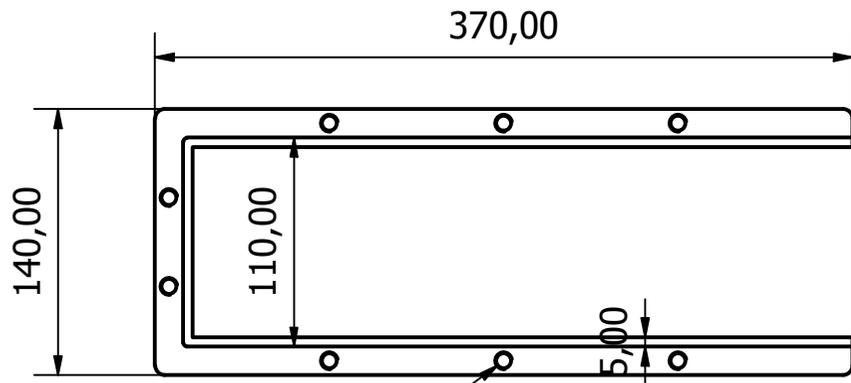
Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 0,06 : 1	Fecha 25/08/2021	
GRUPO BAQUE-SOLORZANO		Contenedor de materia orgánica		
		Material principal PVC	Edición 01	Nº Hoja 03



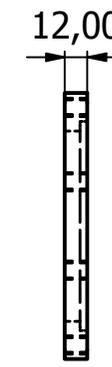
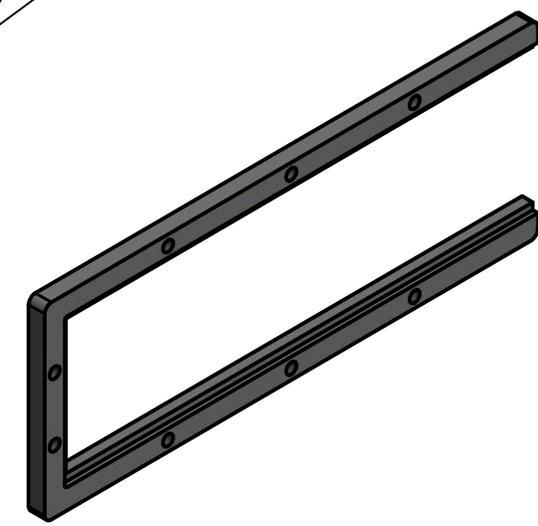
Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 0,06 : 0.5	Fecha 25/08/2021		
GRUPO BAQUE-SOLORZANO		Contenedor			
Material principal PVC			Edición 01	N° Hoja 04	



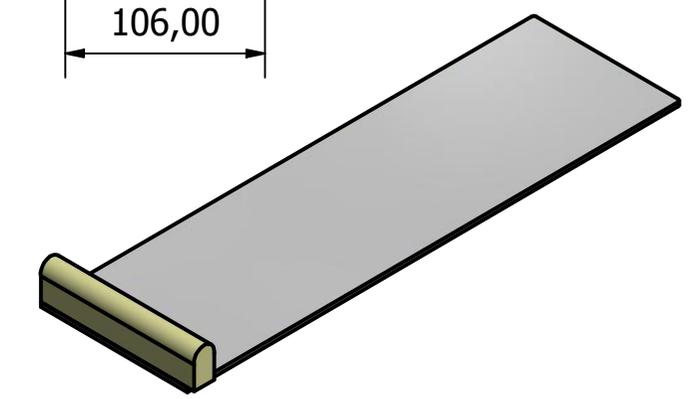
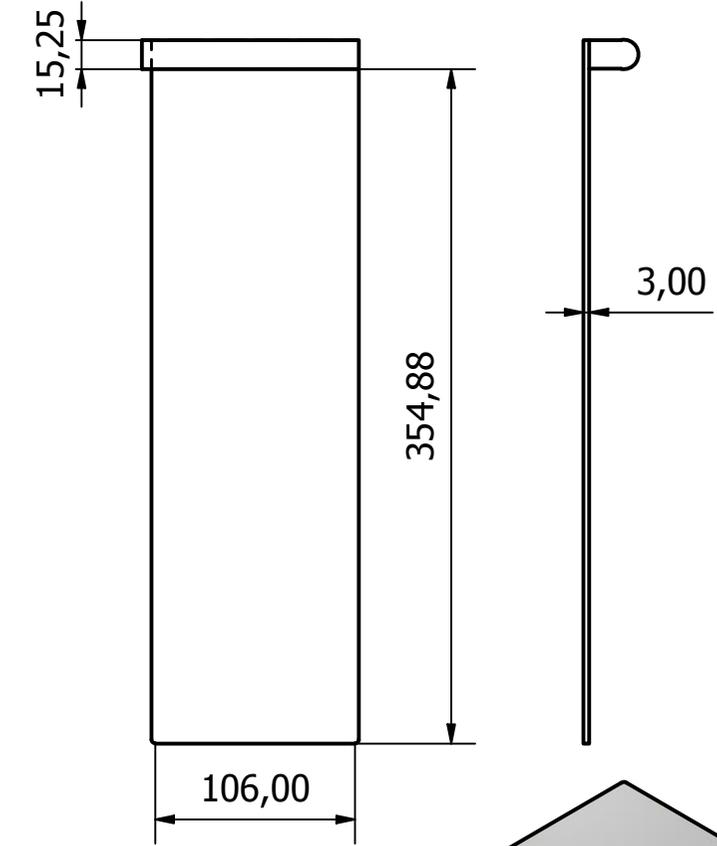
Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 0,06 : 0.4	Fecha 25/08/2021			
GRUPO BAQUE-SOLORZANO		Tapa de contenedor				Material principal PVC



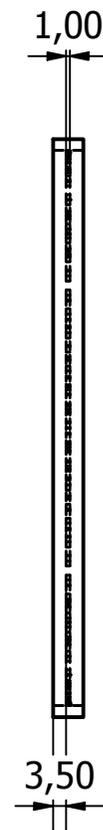
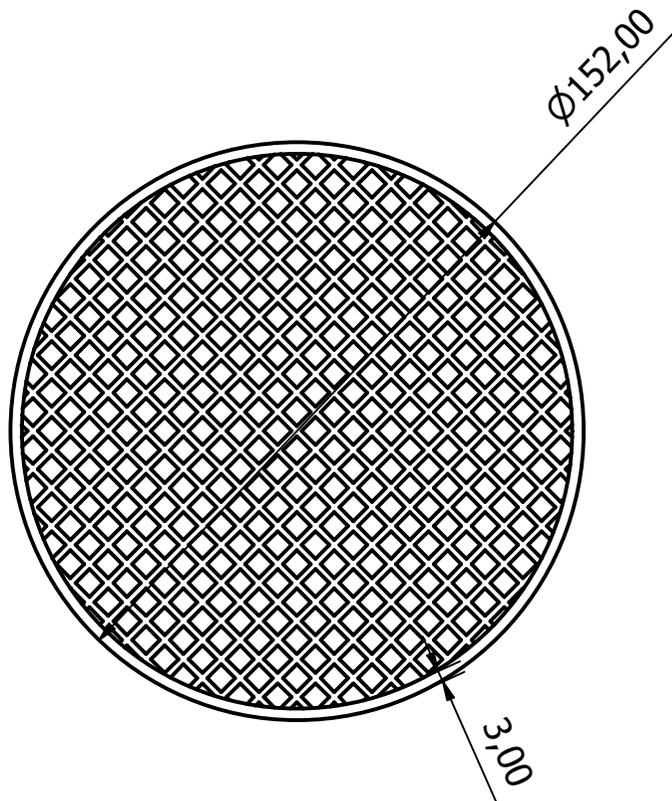
3/8-16 UNC - 2B



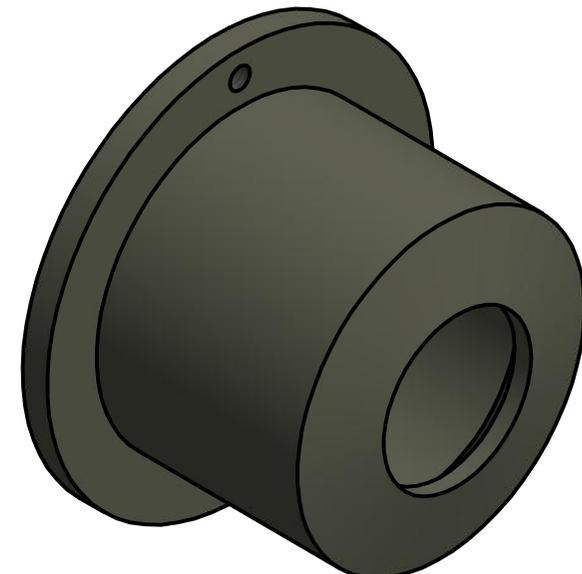
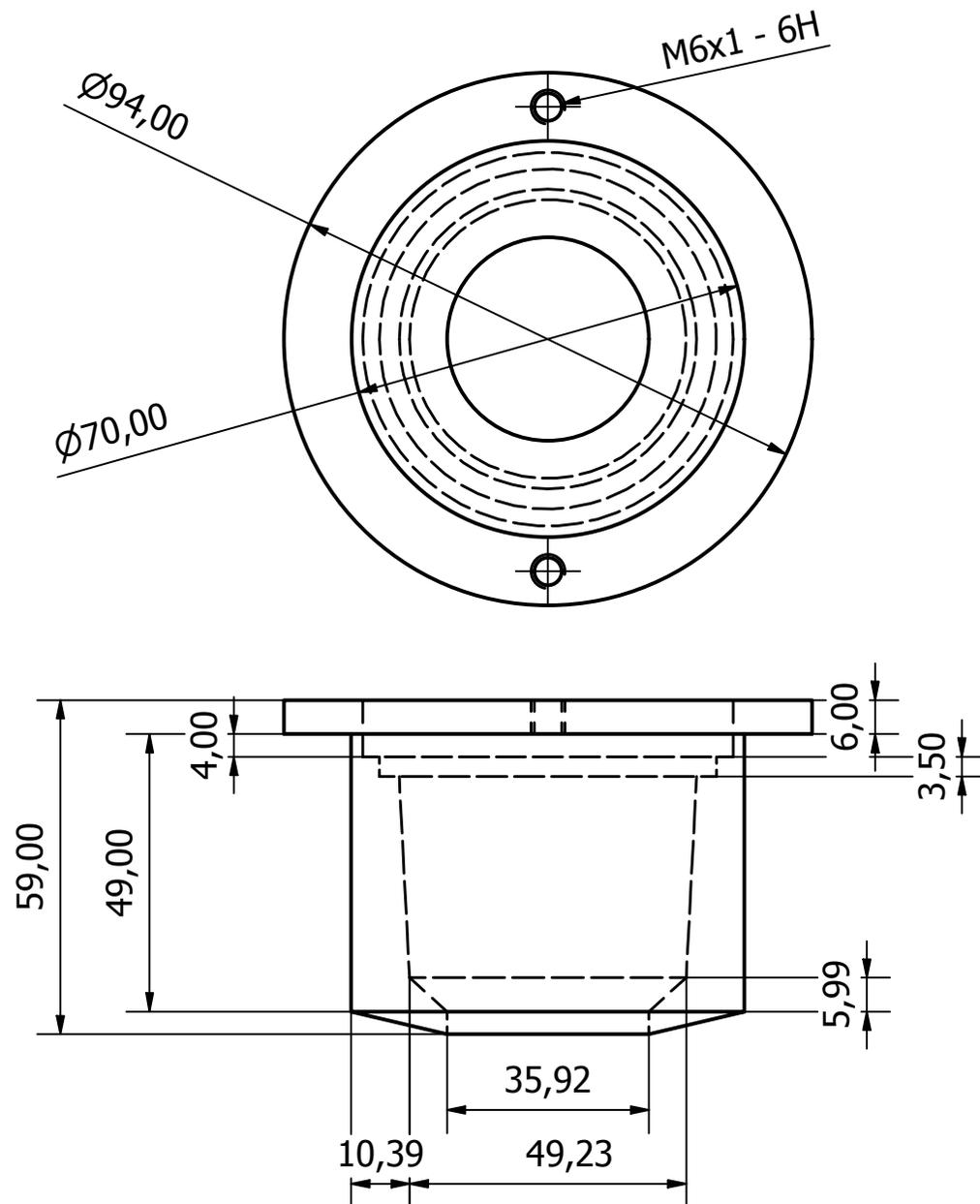
Tapa superior



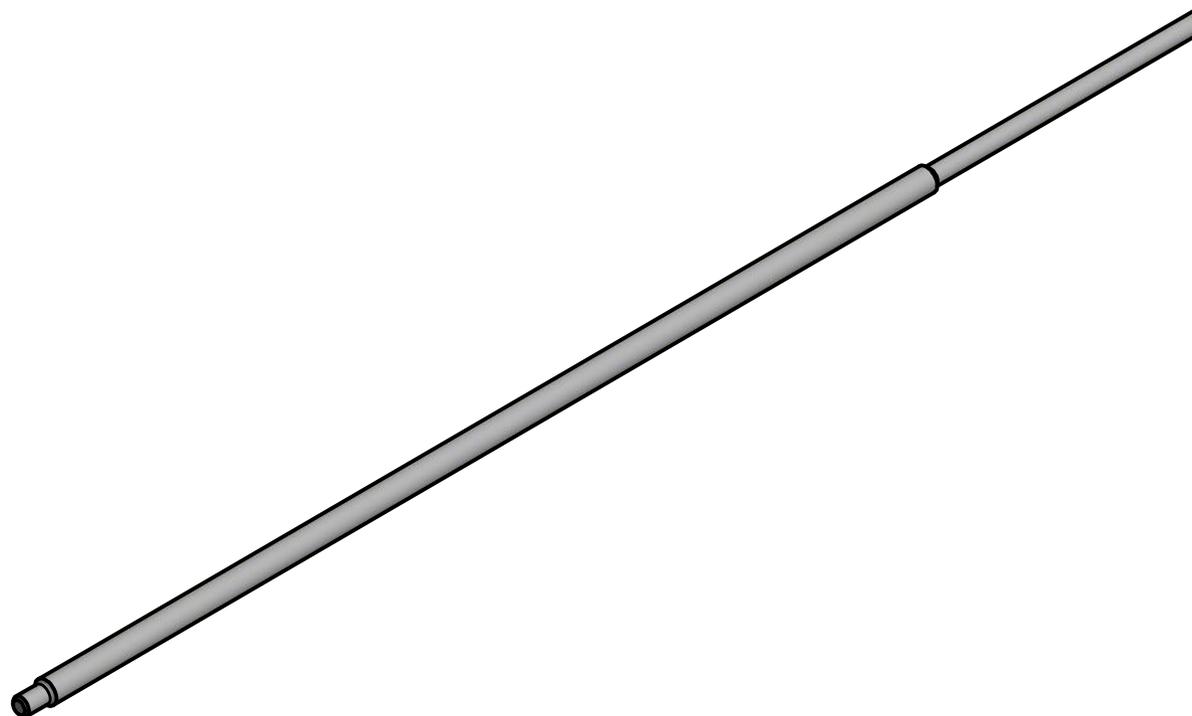
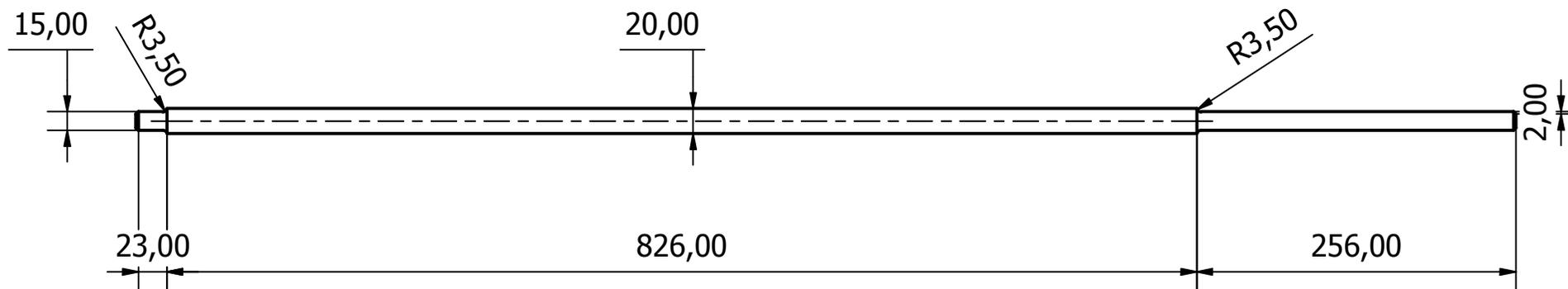
Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 1 : 4	Fecha 25/08/2021		
GRUPO BAQUE-SOLORZANO		Marco de encaje			
Material principal PVC/acero			Edición 01	N° Hoja 06	



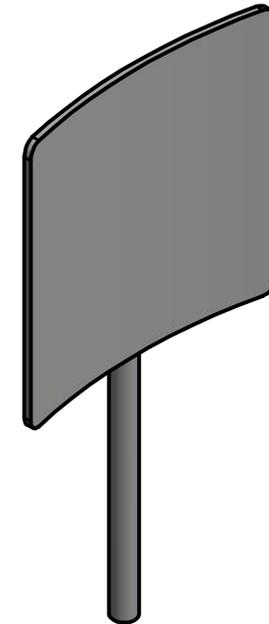
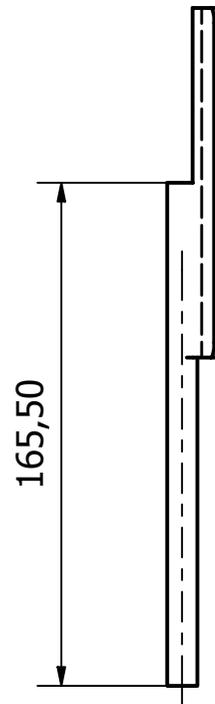
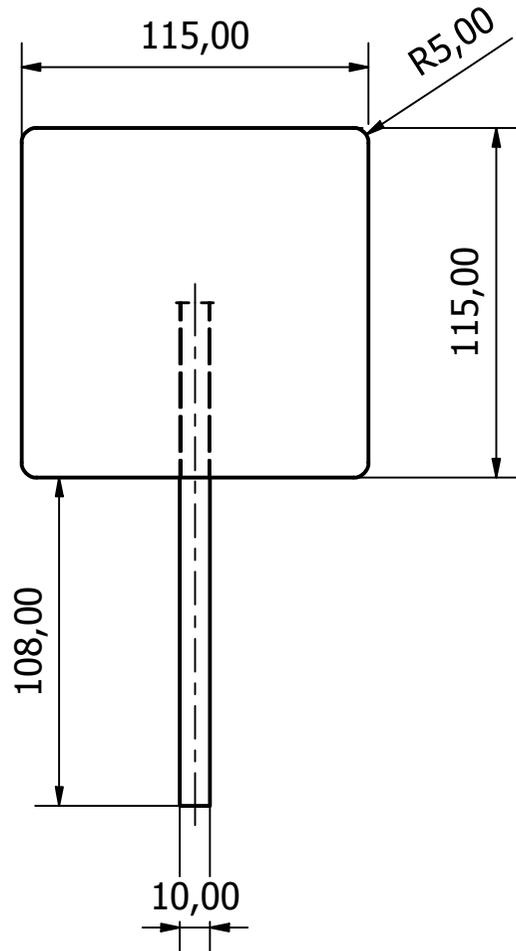
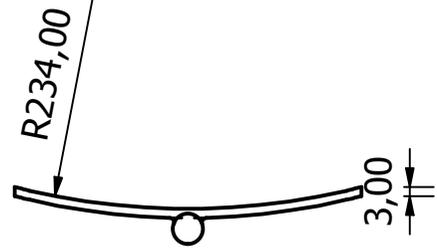
Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 1 : 2	Fecha 25/08/2021		
GRUPO BAQUE-SOLORZANO <i>espol</i>		Anillo con malla metálica			
		Material principal Acero	Edición 01	N° Hoja 07	



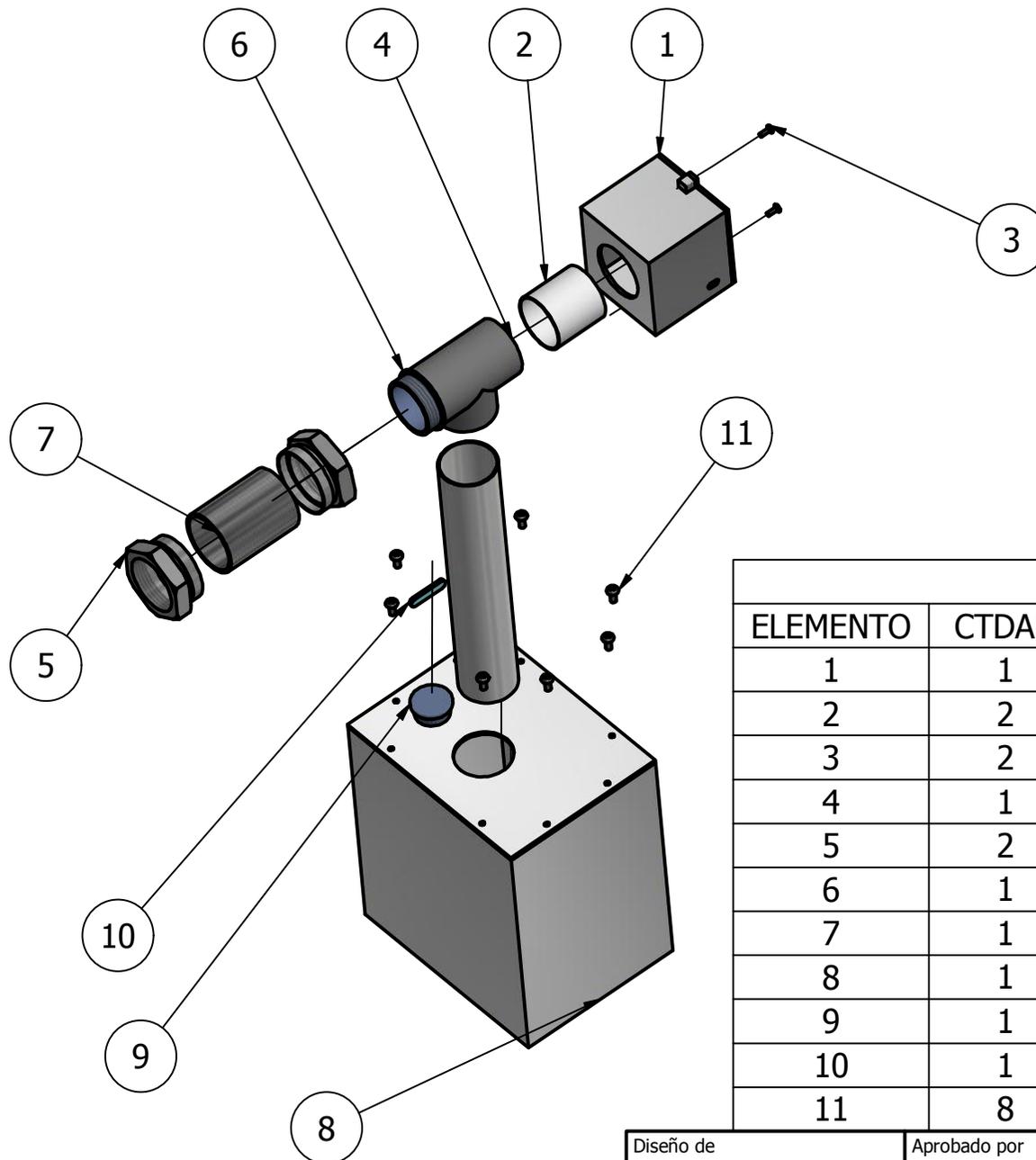
Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 1 : 1.3	Fecha 25/08/2021		
GRUPO BAQUE-SOLORZANO <i>espol</i>		Acoples de resistencias			
		Material principal PCV	Edición 01	N° Hoja 08	



Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 0,08 : 0.4	Fecha 25/08/2021		
GRUPO BAQUE-SOLORZANO <i>espol</i>		Eje motriz			
		Material principal Acero AISI 1045	Edición 01	N° Hoja 09	



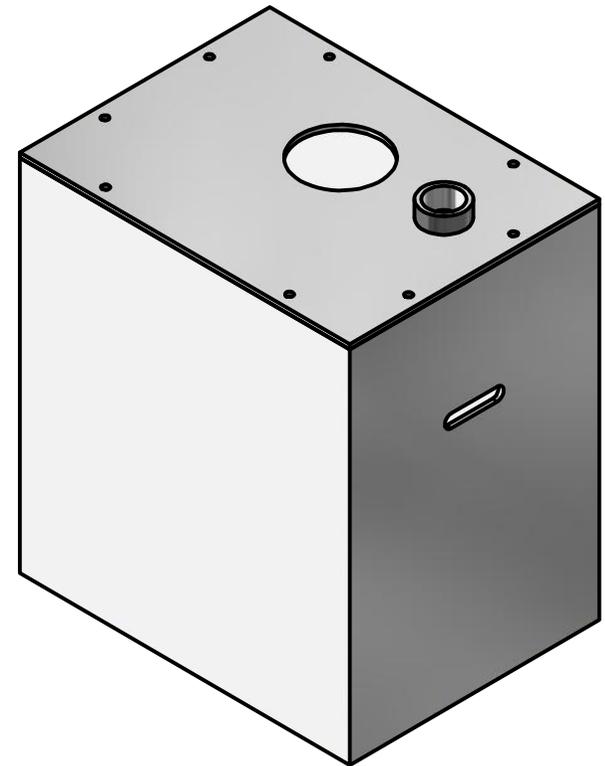
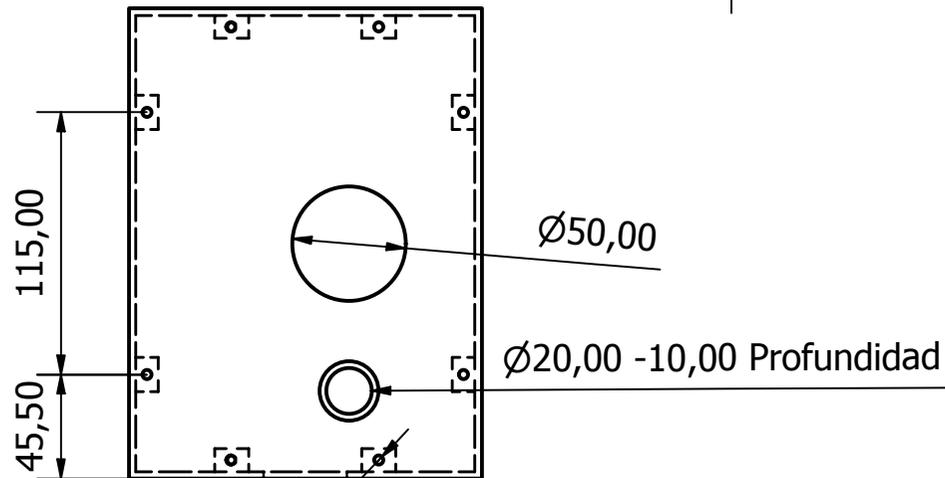
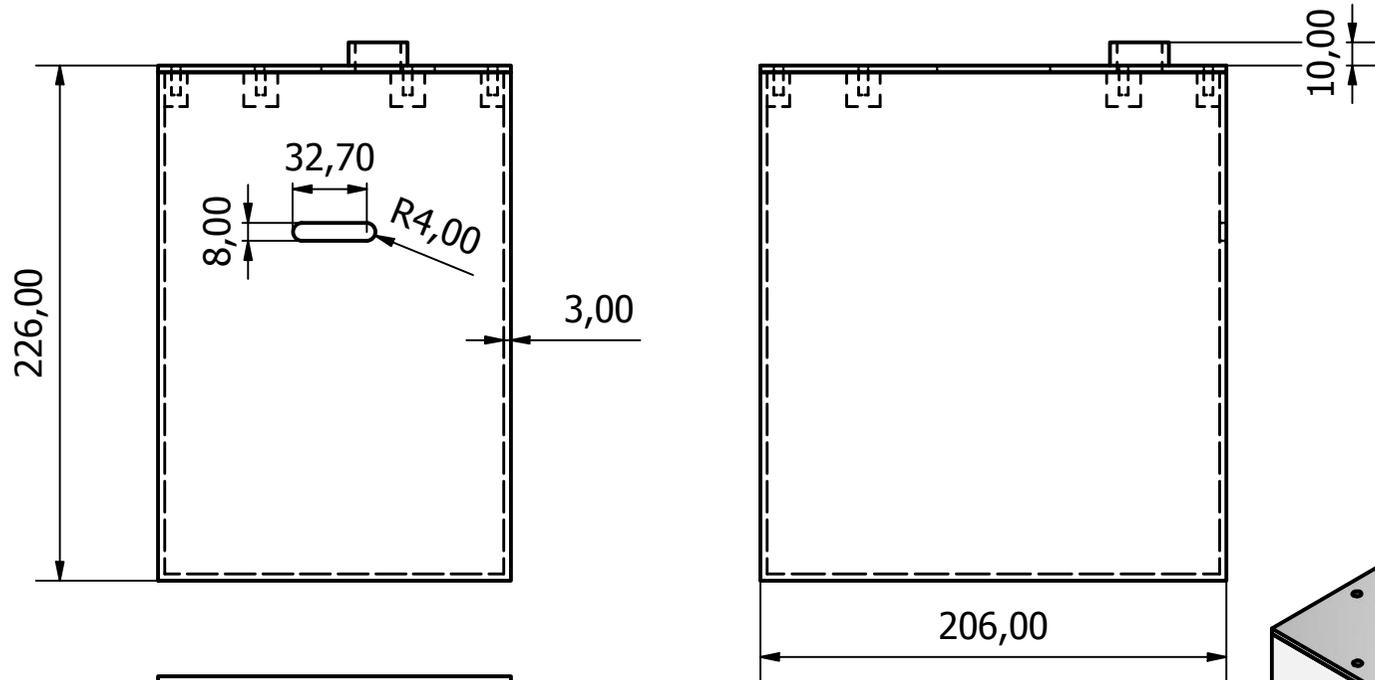
Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 0,08 : 0.2	Fecha 25/08/2021		
GRUPO BAQUE-SOLORZANO <i>espol</i>		Paletas mezcladoras			
		Material principal Acero AISI 1045	Edición 01	N° Hoja 10	



LISTA DE PIEZAS

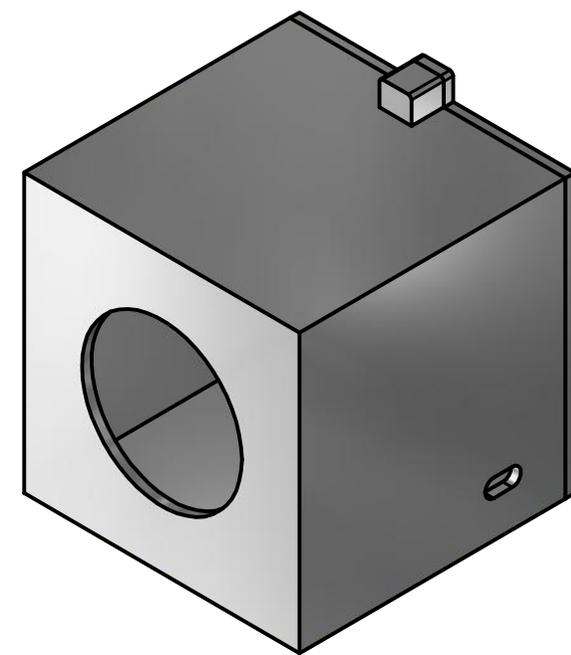
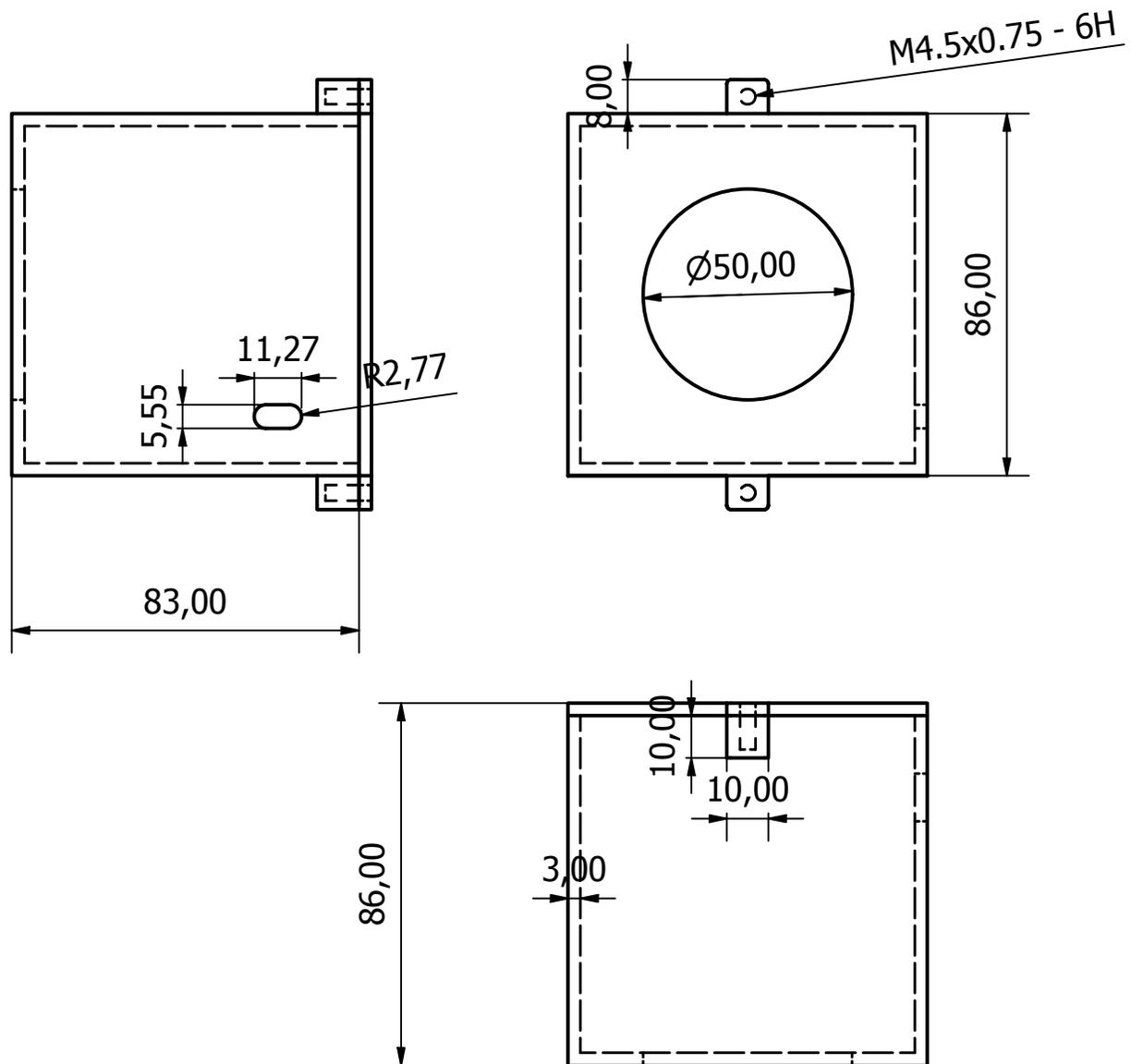
ELEMENTO	CTDAD	TÍTULO
1	1	Caja de ventilador de humidificación
2	2	Tubo PVC 50mm DN.
3	2	AS 1427 - M3,5 x 10
4	1	Accesorio tipo straight tee 50mm DI.
5	2	Terminal hembra con rosca NPT 50mm DN.
6	1	Acople con rosca externa 50mm DE.
7	1	Manguera metálica flexible 50mm DI.
8	1	Contenedor de agua
9	1	Tapa con rosca
10	1	Visor de nivel de agua
11	8	AS 1427 - M5 x 12

Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 0,09 : 0.5	Fecha 25/08/2021	
GRUPO BAQUE-SOLORZANO		Sistema de humidificación		
		Material principal Aluminio	Edición 01	Nº Hoja 11

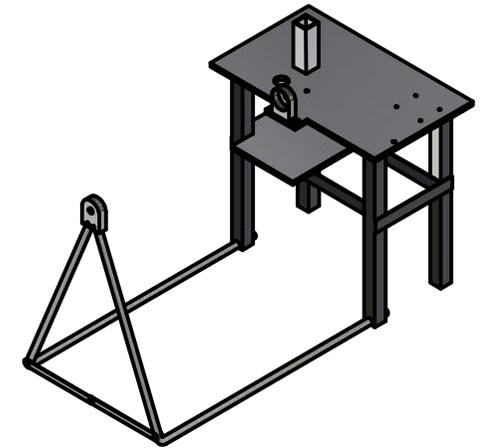
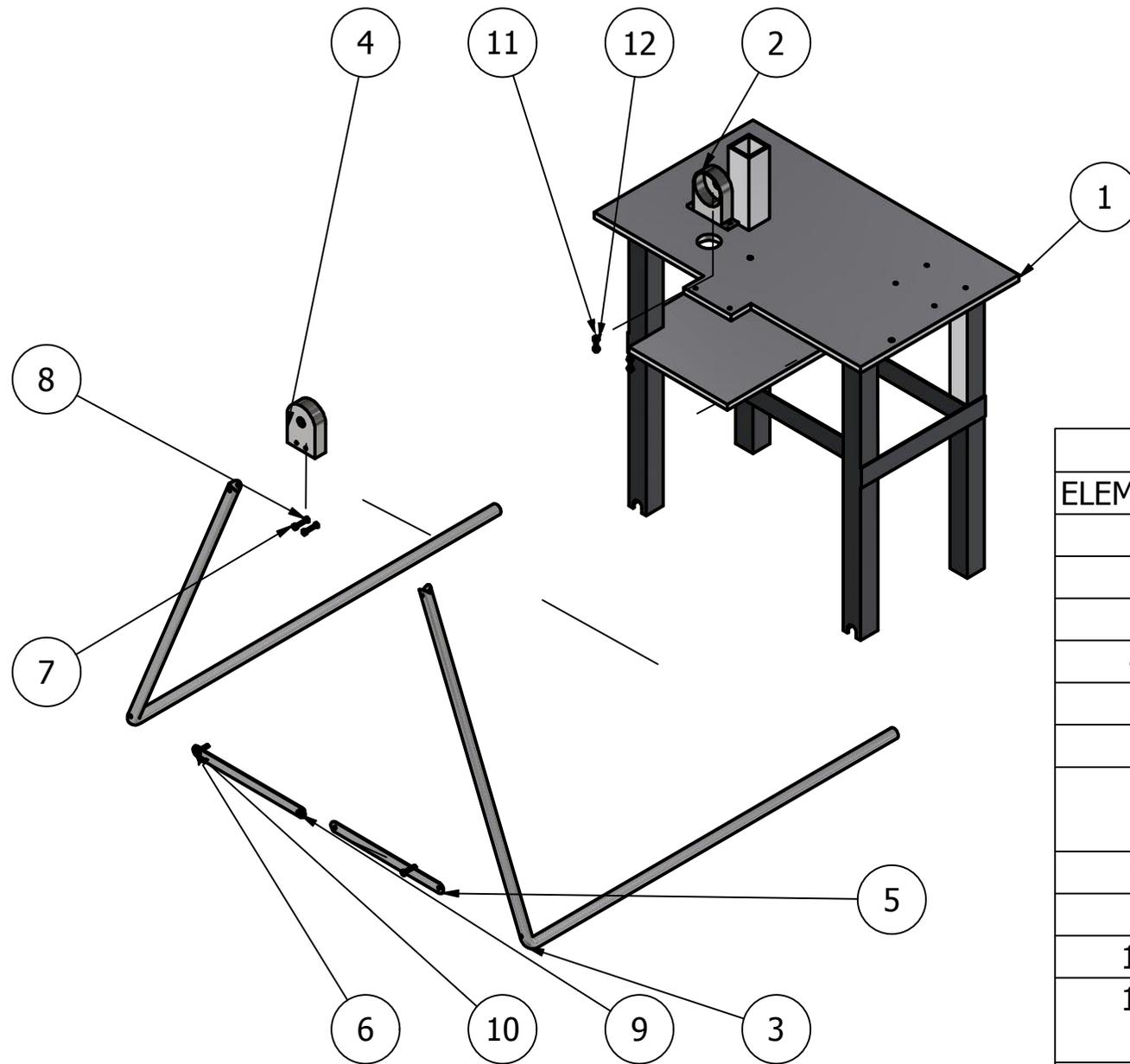


M5x0.8 - 6H

Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 0,09 : 0.3	Fecha 25/08/2021		
GRUPO BAQUE-SOLORZANO <i>espol</i>		Contenedor de agua			
Material principal Aluminio			Edición 01	N° Hoja 12	



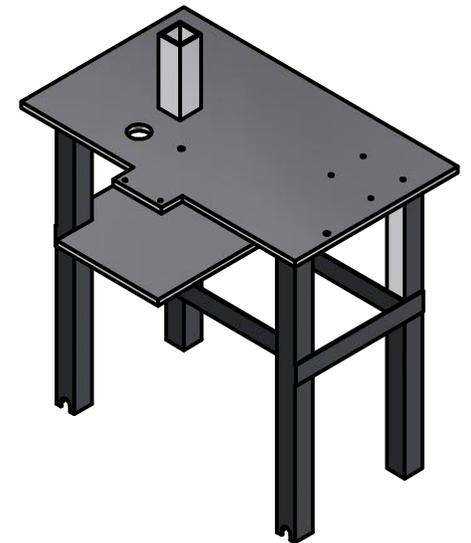
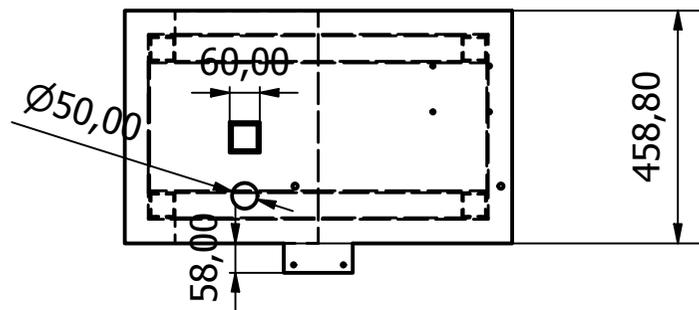
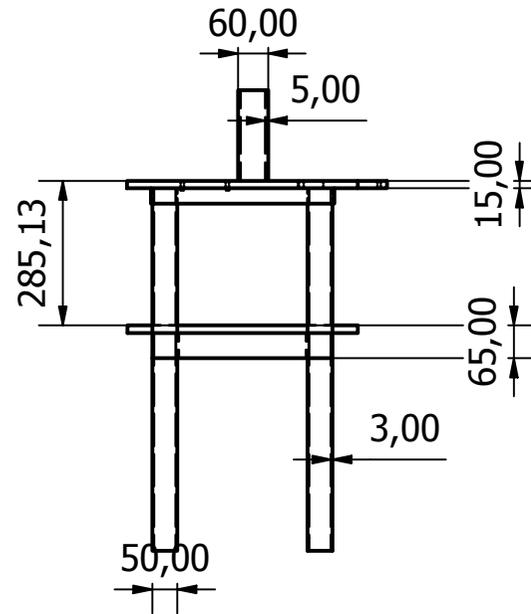
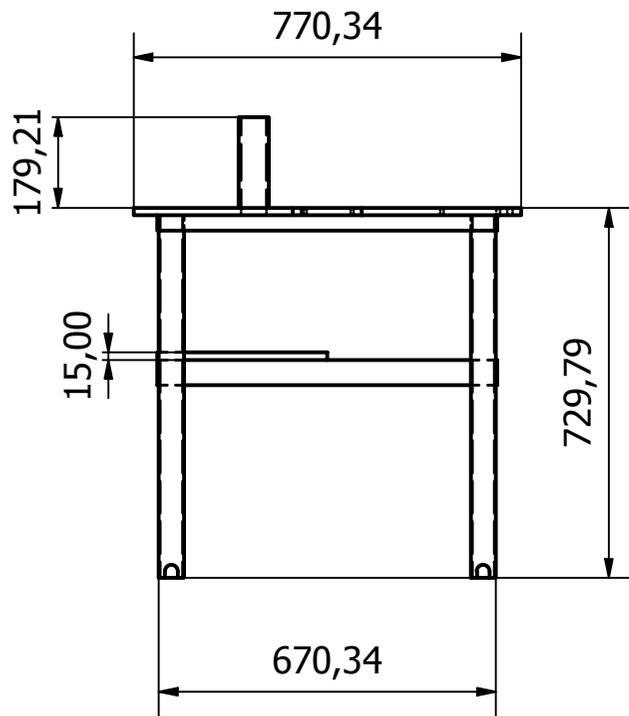
Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 0,09 : 0.15	Fecha 25/08/2021		
GRUPO BAQUE-SOLORZANO <i>espol</i>		Caja de ventilador de humidificación			
		Material principal Aluminio	Edición 01	Nº Hoja 13	



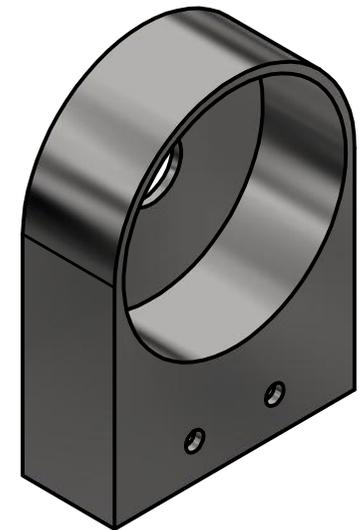
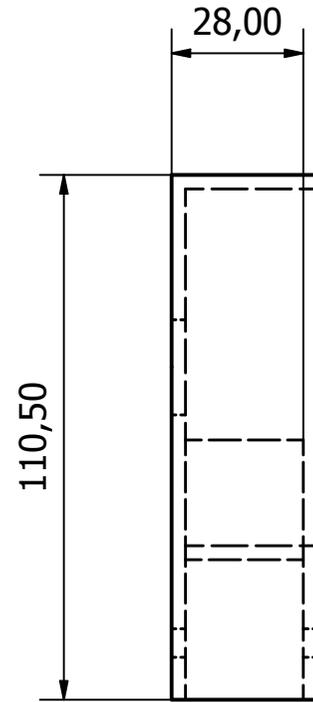
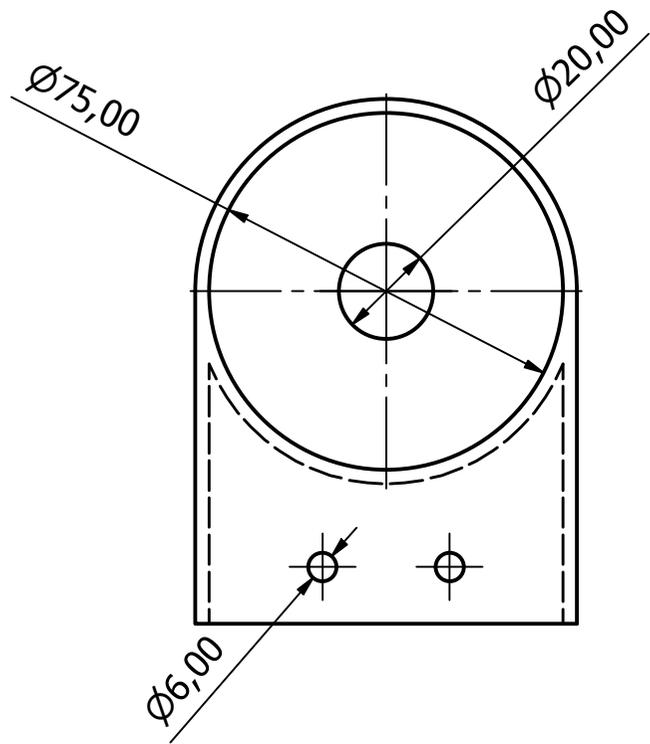
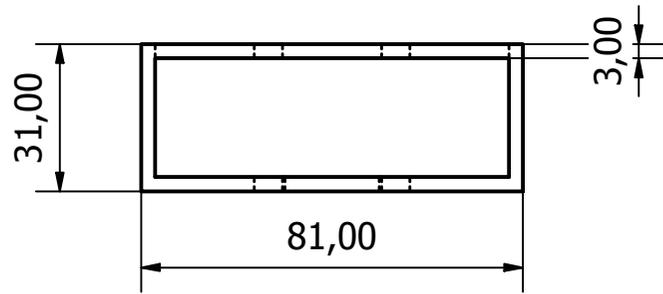
LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	TÍTULO
1	1	Mesa de soporte
2	1	Soporte 2 de contenedor
3	2	Tubo de base
4	1	Soporte 1 de contenedor
5	1	Platina 1 de base
6	1	Platina 2 de base
7	2	ANSI B18.2.3.5M - M6 x 1 x 35
8	5	ISO 4035 - M6
9	1	ISO 1207 - M6 x 10
10	2	ANSI B18.2.3.2M - M6x1 x 30
11	2	ANSI B18.2.3.5M - M6 x 1 x 30
12	4	ISO 7089 - 6

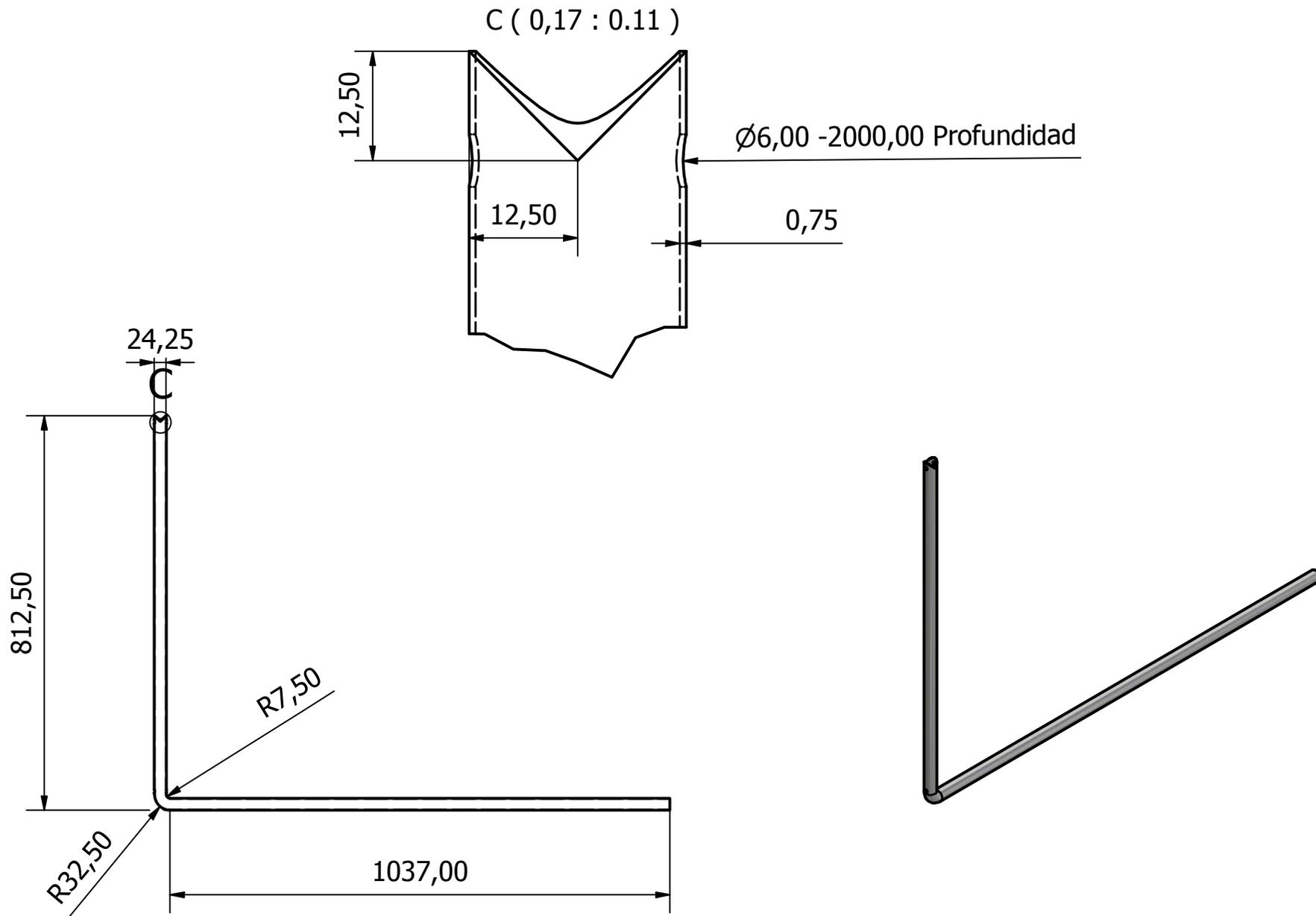
Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 0,03 : 0.4	Fecha 25/08/2021	
GRUPO BAQUE-SOLORZANO		Estructura de soporte		
		Material principal Acero	Edición 01	Nº Hoja 14



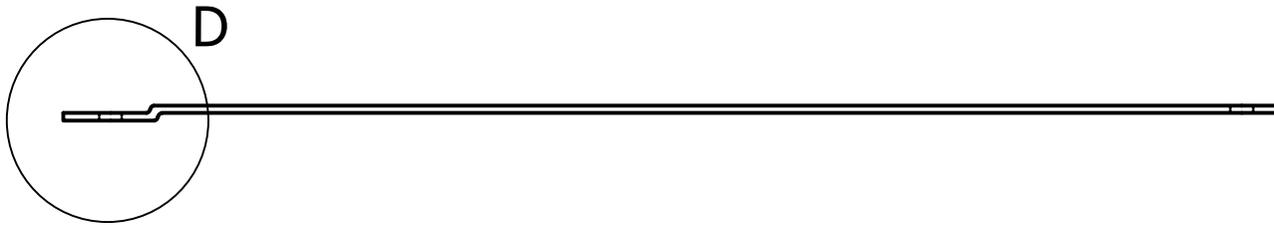
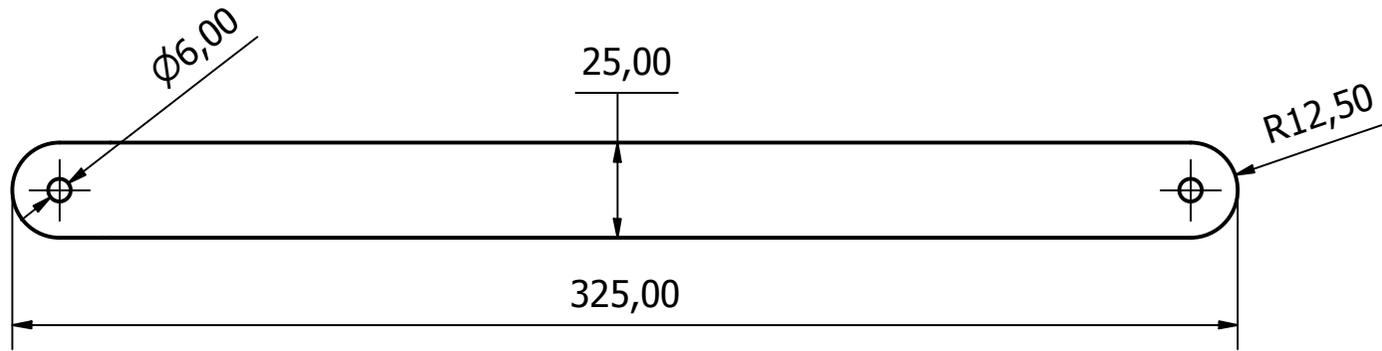
Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 1 : 15	Fecha 25/08/2021		
GRUPO BAQUE-SOLORZANO 		Mesa de soporte			
		Material principal Acero	Edición 01	N° Hoja 15	



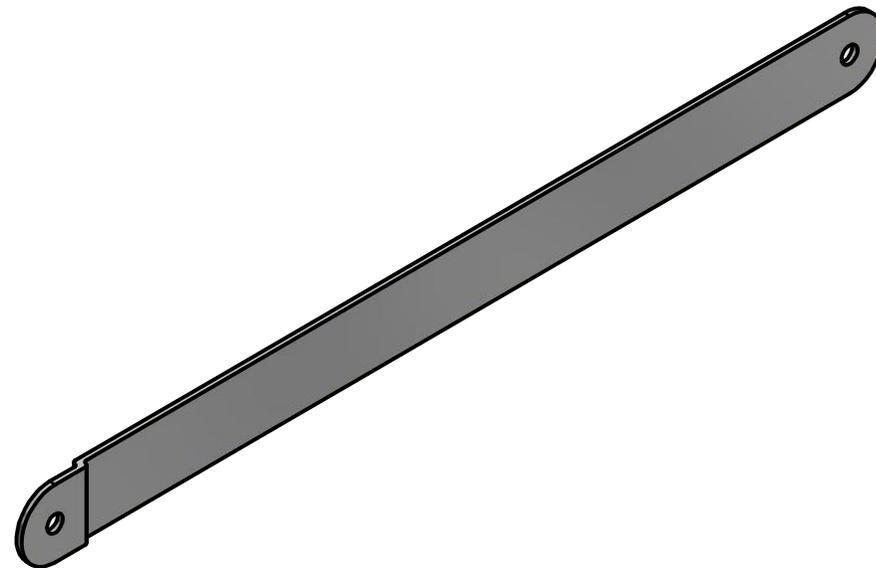
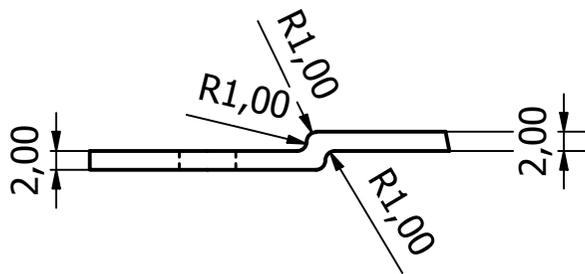
Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 1 : 1.6	Fecha 25/08/2021		
GRUPO BAQUE-SOLORZANO <i>espol</i>		Soporte 1 de contenedor			
		Material principal Acero	Edición 01	N° Hoja 16	



Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 0,11 : 1.2	Fecha 25/08/2021		
GRUPO BAQUE-SOLORZANO <i>espol</i>		Tubo de base			
		Material principal Acero	Edición 01	N° Hoja 17	



D (1 : 0.8)



Diseño de Grupo Baque-Solorzano	Aprobado por ESPOL	Escala 1 : 2	Fecha 25/08/2021		
GRUPO BAQUE-SOLORZANO <i>espol</i>		Platina 2 de base			
		Material principal Acero	Edición 01	N° Hoja 18	