

OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA AGITADOR TIPO VERTICAL DE PALETAS
PLANAS INCLINADAS PARA MEZCLA DE ABONO ORGANICO APLICADO EN
EL SECTOR AGROINDUSTRIAL

JORGE IVAN NAVARRO OSPINO

ALBERTO CASTRILLON VELASQUEZ

ANDRES DAVID ARDILA MONTOYA

INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
INGENIERIA MECANICA
MEDELLIN
2015

OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA AGITADOR TIPO VERTICAL DE PALETAS
PLANAS INCLINADAS PARA MEZCLA DE ABONO ORGANICO APLICADO EN
EL SECTOR AGROINDUSTRIAL

JORGE IVAN NAVARRO OSPINO

ALBERTO CASTRILLON VELASQUEZ

ANDRES DAVID ARDILA MONTOYA

Proyecto de grado para optar al título en Ingeniería Mecánica

Asesor

CHRISTIAN ANDRES GONZALEZ
INGENIERO MECANICO

INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
MEDELLIN

2015

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Medellín, 26 de Enero de 2015

Agradezco a Dios por la salud que me ha dado y sobre todo el buen estado de espíritu y la fuerza para no desfallecer en los momentos tan difíciles que se presentaron durante mis estudios.

A mi Madre, Martha Ruth Ospino, una mujer que amo con todas mis fuerzas. Humilde, luchadora, y de la cual he heredado la constancia, disciplina y responsabilidad; fortalezas que me permitieron lograr este objetivo.

A María E. Lopera, quien me apoyo en todo este arduo, pero satisfactorio proceso de formación personal y profesional. A ella, le agradezco de manera infinita.

A mi abuela, Ena Miranda a quien adoro. A mi tío, Albeiro Ospino y a mi hermana, Dayany Yepes; quienes siempre me tuvieron en oración y me dieron ánimos durante este tiempo.

Jorge.

Primeramente a Dios. A mi esposa, Gloria I. Rojas con todo mi amor, a mis padres que son mi adoración y mis hijos que llevo siempre en mi corazón.

A todos ellos gracias por el apoyo y por la paciencia que me tuvieron durante todo este tiempo de formación.

Alberto C.

Le doy gracias a Dios por darme la salud, por la constancia y esfuerzo para no decaer en circunstancias difíciles que pudieron haberse presentado durante el tiempo de mis estudios.

A mi padre, Carlos Antonio Ardila y a mi madre, Alba Ofelia Montoya

A mi hermano, Juan Carlos Ardila;

Que los llevo en mi corazón, porque sin ellos no sería nadie en este momento. Les agradezco el apoyo, los buenos consejos, las ayudas en general y por la paciencia que me tuvieron durante todo este tiempo de formación.

Andrés A.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Nuestras familias por su gran apoyo incondicional.

La Institución Universitaria Pascual Bravo, formadora de profesionales y sobre todo de seres comprometidos con la sociedad y forjadores de desarrollo tecnológico.

Álvaro León Delgado, MS.c, por sus aportes y ser “pieza” clave durante nuestro proceso de formación profesional.

Christian Andrés González, Ingeniero mecánico. Por sus excelentes asesorías y ante todo por enseñarnos la importancia de la disciplina y la responsabilidad como profesionales y como personas.

DianaMaría Agudelo, Ingeniera Mecánica. Por brindarnos su apoyo y transferencia de conocimiento en lo concerniente a la etapa de diseño en CAD de proyecto y por brindarnos su amistad.

Jorge Wilson Ocampo Vásquez, Ingeniero químico. Por su asesoría metodológica y acompañamiento en el proceso de estudios reológicos de las muestras de abono orgánico en el laboratorio de la IUPB.

Marlon Fulla, MS.c, por sus aportes y colaboración con la revisión del proyecto. Por sus consejos y su amistad.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	34
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	35
1.1 ANTECEDENTES.....	35
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	36
1.3 JUSTIFICACION.....	36
2. OBJETIVOS.....	38
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	38
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	38
3. ESTADO DEL ARTE.....	39
3.1 AGITACIÓN Y MEZCLA.....	39
3.2 AGITACIÓN DE LIQUIDOS.....	39
3.2.1 Flujo laminar y flujo turbulento.....	45
3.3 OBJETIVOS DE LA AGITACIÓN.....	47
3.3.1 Transferencia de materia en sistemas heterogéneos.....	47

3.3.2 Mezcla de líquidos.....	47
3.3.3 Formación de emulsiones.....	48
3.3.4 Tráansferencia calórica y uniformidad de temperatura.....	48
3.4 CLASIFICACION DE AGITADORES SEGÚN LAS DIRECCIONES DE FLUJO.....	49
3.4.1 Agitadores de flujo axial.....	49
3.4.2 Agitadores de flujo radial.....	49
3.4.3 Agitadores de paso cerrado.....	50
3.5 TIPOS DE AGITADORES.....	50
3.5.1 Agitadores de hélice.....	50
3.5.2 Agitadores de paletas planas tipo turbina.....	52
3.5.3 Agitadores de paletas planas.....	53
3.5.4 Agitador impulsor.....	56
3.5.5 Agitadores de banda helicoidal.....	57
3.6 AGITADORES ESPECIALES.....	58

3.6.1	Agitador ISOJET.....	59
3.6.2	Agitador VISKOPROP.....	59
3.6.3	Agitador PHASEJET.....	60
3.6.4	Agitador INTERMING.....	60
3.6.5	Agitador PARAVISC.....	60
3.6.6	Agitador Doppel-PARAVISC.....	61
3.7	RECIPIENTE DE AGITADO.....	62
3.7.1	Prevención de flujo circulatorio.....	62
3.7.2	Circulación, velocidades y consumo de potencia en tanques Agitados.....	65
3.7.3	Potencia consumida en el tanque agitado.....	66
3.7.4	Tanques con placas deflectoras.....	67
3.7.5	Tanques sin placas deflectoras.....	68
4.	METODOLOGIA.....	72
4.1	MATERIALES Y EQUIPOS.....	72

4.2	ETAPA 1. CALCULO DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL ABONO ORGANICO.....	72
4.2.1	Procedimientos y cálculos para determinar la densidad y la viscosidad dinámica	73
4.2.2	Calculo de los parámetros geométricos y la potencia Consumida.....	76
4.2.3	Calculo de la potencia de diseño.....	79
4.3	ETAPA 2. CALCULO DE ESFUERZOS Y CARGAS.....	80
4.3.1	Diseño del eje de agitado.....	81
4.3.1.1	Cálculo y selección del material para la espiga de sujeción	82
4.3.1.2	Cálculo y selección del material para el eje hueco.....	84
4.3.1.3	Cálculo de las dimensiones de los propulsores.....	86
4.3.2	Cálculo y selección de la chaveta.....	91
4.3.3	Cálculo del espesor de las placas deflectoras.....	94
4.3.4	Selección de los rodamientos.....	99

4.3.5	Calculo de las vigas y selección del perfil de ala ancha.....	102
4.3.6	Calculo de la placa soporte.....	110
4.4	ETAPA 3. SELECCIÓN DEL MOTORREDUCTOR, DEL RECIPIENTE DE AGITADO Y MODELADO DEL SISTEMA.....	113
4.4.1	Selección del motor eléctrico.....	114
4.4.2	Selección del reductor de velocidad.....	114
4.4.3	Capacidad del tanque de agitado.....	117
4.4.3.1	Capacidad del tanque de agitado.....	119
5.	PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO (PMP).....	121
5.1	MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EL SISTEMA AGITADOR.....	121
5.1.1	Descripción.....	121
5.1.2	Procedimiento del PMP.....	121
5.	ANALISIS DE COSTOS.....	123
6.1	COSTOS DIRECTOS.....	123

6.1.1	Costos de materiales directos.....	123
6.1.2	Costos de elementos normalizados.....	125
6.1.3	Costos de montaje.....	125
6.1.4	Costos directos totales.....	126
6.1.5	COSTOS INDIRECTOS.....	126
6.2.1	Costos de materiales indirectos.....	126
6.2.2	Costos de ingeniería.....	127
6.2.3	Otros.....	127
6.2.4	Costos indirectos totales.....	128
6.3	COSTOS TOTAL DEL SISTEMA AGITADOR TIPO VERTICAL DE PALETAS PLANAS INCLINADAS PARA MEZCLA DE ABONO ORGANICO.....	128
6.	CONCLUSIONES.....	129
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	131
	ANEXOS.....	134

LISTA DE ABREVIATURAS

HP	Horsepower - caballo de vapor inglés
Hertz	Ergio
in.	Pulgada
J	Joule
kW	Mil Watt
Kg/m³	Kilogramo por metro cubico
L	Litro
<i>m</i>	Masa
Mpa	1X10 ⁶ Pascales
m	Metro
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cubico
m³/s	Metro cubico por segundo
m/s	Metro por segundo
m/s²	Metro por segundo cuadrado
mm	Milímetro
mm³	Milímetros cúbicos
mm⁴	Milímetros a la cuatro
N	Newton
Nm	Newton metro

N/m²	Newton por metro cuadrado
Pa	Pascales
Pa.s	Pascal segundo
rpm	Revoluciones por minuto
rev	Revolución
rev/s	Revoluciones por segundo
SAE	Sociedad de Ingenieros Automotores (Society of Automotive Engineers)
s	Segundo
s⁻¹	Segundo a la menos uno
W	Watt

LISTA DE SIMBOLOS

A	Área
A_{def}	Área del deflector
A_{Alma}	Área del alma
C	Centroide de la figura
C_D	Coefficiente de arrastre
D	Diámetro exterior
D_a	Diámetro del agitador
d	Diámetro interior
d_1	Diámetro del tanque de agitado
d_2	Diámetro del agitador
e	Espesor
E_k	Energía cinética
F_D	Fuerza de arrastre
F_f	Fuerza del fluido sobre el propulsor
g	Aceleración gravitacional
h_1	Altura del nivel del fluido
h_2	Altura de posición del propulsor
h_3	Altura del propulsor
h_f	Altura del fluido desde el propulsor hasta la superficie

I	Momento de inercia
J	Momento polar de inercia
K_t	Factor de concentración de esfuerzos
L	Longitud
L_{viga}	Longitud de viga
m	Factores de forma
M	Momento flector
$M_{m\acute{a}x}$	Momento flector máximo
n	Factor de seguridad o de diseño
N	Frecuencia de giro o ciclos por segundo
N_p	Número de potencia
N_Q	Número de flujo
N_{Re}	Número de Reynolds
N_{Fr}	Número de Froude
P_a	Potencia consumida por el agitador
P_d	Potencia de diseño
PE	Potencia equivalente efectiva
PMP	Plan de Mantenimiento Preventivo
P_h	Presión hidrostática
P_T	Carga total
P_o	Carga estática

P_r	Carga radial
q	Cantidad de flujo generado por el rodete
r	Radio
S_y	Resistencia a la fluencia
S	Módulo de sección
$S_{mín}$	Módulo de sección mínima
S_{perfil}	Módulo de sección del perfil de viga
t	Tiempo
t_w	Espesor del alma de la viga
T	Momento de torsión
U_2	Velocidad de las puntas de las palas
$V_{máx}$	Fuerza cortante máxima
V'^2	Resultante de la velocidad radial y tangencial
V	Volumen del recipiente de agitado
V_{def}	Velocidad del fluido sobre el deflector
V_f	Volumen del fluido sobre el rodete o propulsor
V	Velocidad
V_t	Velocidad tangencial
W	Altura de la pala del propulsor
$\delta_I(\text{Delta})$	Ancho de la placa deflectora

δ_2	Holgura entre la placa deflectora y el tanque de agitado
μ	Viscosidad dinámica
π (Pi)	3.1416...
ρ (Ro)	Densidad del estiércol
ρ_b	Densidad de la bola o esfera
$\tau_{m\acute{a}x}$ (Tau)	Esfuerzo cortante
σ_{med} (Sigma)	Esfuerzo normal medio
σ_{min}	Esfuerzo normal mínimo
ω (Omega)	Velocidad angular en radianes por unidad de tiempo

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Velocidades de giro según operaciones de agitación.....	44
Tabla 2. Características de los agitadores de hélice.....	51
Tabla 3. Características del agitador de paletas planas tipo turbina.....	52
Tabla 4. Características de agitadores de paletas planas.....	55
Tabla 5. Características del agitador impulsor.....	56
Tabla 6. Características del agitador de banda helicoidal.....	57
Tabla 7. Parámetros de diseño para tanques agitados provistos de placas deflectoras.....	67
Tabla 8. Constantes a y b de la ecuación (4).....	71
Tabla 9. Datos de la bola (esfera metálica).....	73
Tabla 10. Dato promedio del abono orgánico.....	74
Tabla 11. Promedio de resultados experimentales.....	76
Tabla 12. Parámetros de diseño del sistema agitador.....	78
Tabla 13. Lista de perfiles W.....	106
Tabla 14. Dimensiones de la viga en pulgadas y en milímetros.....	106
Tabla 15. Número de Reynolds para fluidos dentro de un recipiente de agitado.....	118
Tabla 16. Costos de materiales directos.....	124
Tabla 17. Costo de elementos normalizados.....	125

Tabla 18. Costos de montaje.....	126
Tabla 19. Costos directos totales.....	126
Tabla 20. Costos de materiales indirectos.....	127
Tabla 21. Costos indirectos totales.....	128
Tabla 22. Costo total del sistema agitador.....	128
Tabla 23. Materiales y equipos.....	134
Tabla 24. Características de los 3 principales rodetes en un Recipiente de agitado.....	137
Tabla 25. Consumo de energía eléctrica del agitador diseñado.....	155
Tabla 26. Consumo de energía eléctrica del agitador existente.....	155

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Nomenclatura de dimensionado según norma DIN 28131.....	41
Figura 2. Dimensiones de un agitador de hélice.....	42
Figura 3. Dimensiones de un agitador de palas planas inclinadas.....	42
Figura 4. Dimensiones de un agitador helicoidal.....	43
Figura 5. Dimensiones de un agitador de palas planas.....	43
Figura 6. Trayectoria axial	44
Figura 7. Trayectoria radial.....	44
Figura 8. Experimento de Reynolds para diferentes tipos de flujo: (a) laminar (b) turbulento.....	46
Figura 9. Hélice marina de tres aspas.....	51
Figura 10. Turbina de 6 paletas planas.....	53
Figura 11. Agitador de paletas planas.....	55
Figura 12. Turbina tipo impulsor.....	56
Figura 13. Banda helicoidal.....	58
Figura 14. Impulsor ISOJET.....	59
Figura 15. VISKOPROP.....	59
Figura 16. Impulsor PHASEJET.....	60
Figura 17. Impulsor INTERMING.....	60
Figura 18. Impulsor PARAVISC.....	61
Figura 19. Impulsor Doppel – PARAVISC.....	61

Figura 20. Agitador no centrado.....	62
Figura 21. Rodete con entrada lateral.....	63
Figura 22. Formación de vórtices y tipo de flujo en un tanque de agitado.....	63
Figura 23. Modelo de flujo en un tanque con placas deflectoras y un agitador de turbina instalado centralmente.....	64
Figura 24. Vectores de velocidad en el extremo de la pala de un rodete de turbina.....	66
Figura 25. Numero de potencia N_p frente a NR_e para turbinas de 6 palas. Para la porción de trazos de la curva D.....	68
Figura 26. Numero de potencia N_p frente a NR_e para rodetes de 3 palas. Para la porción de trazos de la curva B, C y D.....	70
Figura 27. Viscosímetro de bola en caída libre.....	75
Figura 28. Variación de la velocidad del fluido con respecto a la distancia del propulsor.....	88
Figura 31. Momento polar de inercia para un rectángulo.....	90
Figura 32. Dimensiones de la chaveta cuadrada según la norma ANSI B17.1-1967.....	92
Figura 33. Fuerzas sobre una chaveta.....	94
Figura 34. Fuerza ejercida por el abono orgánico sobre una placa deflectora.....	98

Figura 35. Fuerza del abono orgánico sobre el sistema propulsor.....	99
Figura 36. Designación de dimensiones del perfil de viga W.....	106
Figura 37. Puntos de esfuerzo en un perfil W.....	108
Figura 38. Estado de esfuerzos en la unión ala-alma.....	109
Figura 39. Diagrama de momento flector para la placa soporte.....	111
Figura 40. Recipientes de agitación: (a) cilindro de base esférica, (b) cilindro de base plana.....	117
Figura 41. Recipiente de agitado cilíndrico de base plana con radios en las esquinas.....	120

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Variables del ambiente dentro del laboratorio IUPB e instrumentos para el cálculo de la viscosidad dinámica del abono orgánico.....	134
ANEXO 2. Relación entre N_P y el N_{Re} para diferentes tipos de Agitadores con placas deflectoras.....	135
ANEXO 3. Principales tipos de impulsores para fluidos de baja o Media viscosidad: (a) propela o hélice marina; (b) palas; (c) turbina De Rushton de 6 palas.....	136
ANEXO 4. Rango de viscosidades para agitadores.....	136
ANEXO 5. Propulsores principales para agitadores.....	137
ANEXO 6. Fotografía de un motor eléctrico cubierto de purín.....	138
ANEXO 7. Fotografía de un sistema agitador de una finca ganadera en San Antonio de Prado.	139
ANEXO 8. Relación entre C_D y la geometría del área de la paleta plana a 45°	140
ANEXO 9. Relación entre C_D y la geometría del área mojada de la Placa deflectora.....	140
ANEXO 10. Propiedades mecánicas aproximadas de algunos aceros....	141
ANEXO 11. Propiedades mecánicas de la tubería de acero al carbón Schedule 80 – calidad ASTM-A106 GR B.....	142

ANEXO 12. Factor de servicio FS_1 para selección del tamaño del Reductor de velocidad.....	143
ANEXO 13. Factor de servicio FS_2 para funcionamiento intermitente del reductor de velocidad.....	143
ANEXO 14. Propiedades mecánicas del acero ASTM A-36.....	144
ANEXO 15. Tabla de especificaciones de la malla estructural para La plataforma.....	144
ANEXO 16. Propiedades y especificaciones dimensionales de la varilla Corrugada.....	145
ANEXO 17. Propiedades mecánicas del concreto.....	145
ANEXO 18. Tabla de chaveteros y chavetas estándar en pulgadas de sección cuadrada.....	146
ANEXO 19. Tabla de dimensión de platinas para los propulsores.....	147
ANEXO 20. Fotografías que muestra la inseguridad con que trabaja el personal de mantenimiento en la estructura de un sistema agitador de una finca ganadera ubicada a las afueras de San Antonio de Prado.....	149
ANEXO 21. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector de la viga.....	150
ANEXO 22. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector de la placa deflectora.....	151
ANEXO 23. Cuadro comparativo del agitador que opera	

actualmente Vs el agitador diseñado.....	152
ANEXO 24. Carga del fluido sobre el sistema agitador diseñado y el existente.....	154
ANEXO 23. Costo del consumo de energía eléctrica.....	155
ANEXO 26. Plan de Mantenimiento Preventivo (PMP).....	156
ANEXO 27. Planos.....	157

LISTA DE PLANOS

PLANO No. 2014-00. Equipo Agitador.....	157
PLANO No. 2014-01. Tanque de agitado.....	158
PLANO No. 2014-02. Placa deflectora o Baffle.....	159
PLANO No. 2014-03. Amarre de viga.....	160
PLANO No. 2014-04. Placa soporte.....	161
PLANO No. 2014-05. Espiga de sujeción.....	162
PLANO No. 2014-06. Buje propulsor.....	163
PLANO No. 2014-07. Pasamanos.....	164
PLANO No. 2014-08. Estructura del techo.....	165

GLOSARIO

Altura del líquido (h_l): corresponde al nivel que ocupa el fluido en el tanque de agitado. Generalmente $h_l = d_1$

Altura total del tanque (h_T): altura total del recipiente de agitado.

Ancho de la placa deflectora (δ_l): dimensión correspondiente a la longitud que ocupa la placa deflectora desde la holgura hacia el centro del tanque, es diferente al espesor de dicha placa, el cual se debe calcular.

Altura de las palas (w): dimensión de un propulsor paralela al eje de agitado.

Coefficiente de arrastre (C_D): parámetro que está principalmente relacionado con la geometría del propulsor.

Diámetro del recipiente de agitado (d_1): ancho del recipiente, generalmente es de base circular.

Diámetro del propulsor agitador (d_2): también llamado diámetro del agitador (D_a) en otras bibliografías.

Frecuencia de giro del eje de agitado (N): número de revoluciones o giros en un determinado tiempo (t).

Fuerza de arrastre (F_D): fuerza que se opone al movimiento del propulsor.

Número de Reynolds (N_{Re}): número adimensional que relaciona las propiedades físicas del fluido como la viscosidad dinámica, la densidad, velocidad y la geometría del recipiente o ducto por el cual fluye.

Número de potencia (N_p): es análogo a un factor de fricción o a un coeficiente de rozamiento. Es proporcional a la relación entre la fuerza de rozamiento que actúa sobre una unidad de área del rodete y la fuerza inercial, este parámetro depende del N_{Re} y del tipo de propulsor.

Par de torsión (T): par que tiene una magnitud común T , y sentidos opuestos.

Posición del propulsor agitador: es la ubicación que ocupa dicho dispositivo dentro del tanque de agitado, las cuales pueden ser de forma centrada, lateral o inclinada.

Potencia de agitación (P_a): potencia absorbida por el sistema agitador y depende del número de potencia (N_p), la densidad del fluido, la frecuencia de giro del eje de agitado y del diámetro del agitador (D_a o d_2).

Potencia de diseño (P_d): relación de la potencia consumida por el agitador y el producto de la eficiencia del rodamiento y la eficiencia de la unidad reductora.

Offset u holgura de las placas deflectoras (δ_2): luz que hay entre el tanque de agitado y la placa deflector.

Velocidad tangencial (V): vector perpendicular al radio del eje de agitado, y el cual traza una trayectoria tangencia a la circunferencia formada por el sistema de

propulsión. Esta velocidad es el resultado entre el producto del radio y la velocidad angular del agitador.

RESUMEN

Este proyecto se fundamentó principalmente, en el mejoramiento de la mezcla de abono orgánico, mediante el rediseño de un sistema de agitación de palas planas inclinadas. Los sistemas de agitado empíricos para fertilizar las tierras de producción de pastos nutritivos son cada vez más utilizados en las fincas ganaderas del departamento de Antioquia-Colombia. Dichos sistemas, al menos en su gran mayoría, son fabricados por personas sin experiencia y conocimiento de la ciencia del mezclado y agitación, y no cumplen con las expectativas de calidad que debe tener el abono. Debido a lo anterior se presenta una deficiente suspensión de partículas sólidas en la mayor parte del volumen del líquido, generando que el enriquecimiento por carga bacteriana del abono no se lleve a cabo de forma homogénea.

Para lograr una optimización y mejor rendimiento de dicho sistema, fue necesario realizar un estudio sobre las propiedades reológicas del abono orgánico, es decir, hallar su densidad y viscosidad dinámica; y así, determinar la potencia teórica del agitador. De igual manera se profundizó un poco en el estudio de los fenómenos de agitación y mezcla.

Luego de lograr comprender los fenómenos antes mencionados, se seleccionó un modelo de agitador basado en la norma DIN 28131. A partir de dicho modelo, se comenzó a realizar todos los cálculos de los parámetros y variables relacionados al diseño, buscando siempre un modelo económico, confiable, y de buen rendimiento y funcionamiento a fin de alcanzar la mayor disponibilidad y duración del sistema.

Una vez terminada la etapa anterior, se realizó el análisis y los cálculos concernientes a la mecánica de materiales, y posterior a ello se realizó el modelo del sistema agitador en CAD Inventor.

Finalmente se creó un plan de mantenimiento preventivo (PMP) y un análisis de costos. El primer parámetro nos permitirá hacer un seguimiento de control operativo y, el segundo, vislumbrar un costo aproximado para la futura fabricación del sistema agitador.

INTRODUCCION

Un agitador es un sistema electromecánico que mediante una fuerza electromotriz transmite un movimiento circular a un eje, conectado generalmente a un sistema motorreductor, un elemento flexible de transmisión de potencia (Ej. polea-banda); o en ocasiones acoplado directamente al eje motriz de un motor eléctrico; estos, a su vez generan el movimiento de un eje de agitado dotado de un propulsor agitador o rodete, que mediante movimientos circulatorios en el interior de un recipiente abierto o cerrado, distribuye y suspende las partículas sólidas en un líquido (Ej. sistema liquido-sólido).

Actualmente existen en Colombia dentro del sector agroindustrial, sistemas agitadores; los cuales, son utilizados para obtener una mezcla homogénea de buena calidad bacteriana, que atribuye características de fertilidad excelente al abono orgánico, logrando así el rápido crecimiento del pasto y calidad del mismo. Sin embargo, estos sistemas tienen grandes deficiencias de diseño mecánico, eléctrico, de fabricación y montaje; todo esto debido a la fabricación empírica, selección inadecuada de materiales, falta de capacitación del personal de mantenimiento, manipulación incorrecta del sistema agitador por operarios no calificados y la no implementación de un PMP.

Dentro de este proyecto se optimizará un sistema de agitador¹ de palas de tipo eje vertical, el cual es comúnmente usado en el sector agroindustrial. En primer lugar, se comenzará con un estudio de las variables físicas correspondientes a la mezcla, en este caso purín² con agua (abono orgánico), después se llevaran a cabo el análisis, cálculo y diseño de los componentes mecánicos y, finalmente el modelado e implementación del plan de mantenimiento de dicho sistema.

¹ Sistema agitador: está compuesto por motor eléctrico, sistema de transmisión de potencia, eje de agitado y tanque de agitado.

²Purín: Heces y estiércol del cerdo.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2 ANTECEDENTES

En la actualidad, en la agroindustria colombiana operan sistemas agitadores con deficiencias mecánicas y eléctricas entre otras, debidas principalmente a fabricaciones de forma empírica, errores en el montaje final del dispositivo y la incorrecta manipulación por parte de los operarios y del personal de mantenimiento. Por estas causas se presentan averías con alta frecuencia, que, en consecuencia, afectan el proceso de crecimiento y engorde del ganado vacuno, el cual se ve afectado directamente por la pérdida de calidad y lento crecimiento del pasto.

De otra parte se incrementan los costos por recambio y mano de obra por fallos, ya que a esto se suma la poca o ninguna frecuencia de mantenimiento como se evidencia en el anexo 6. Finalmente, por medio de observación en varias fincas ganaderas en el corregimiento de San Antonio de Prado en Medellín, se identificaron algunas fallas de diseño en el tanque de agitado el cual tiene una altura en dimensiones muy desproporcionadas al diámetro del mismo, por lo cual también se genera gran intensidad en el flujo circulatorio lo cual da origen a los vórtices, también se produce gran estancamiento de las corrientes de flujo dado que el fondo del tanque es totalmente plano con esquinas rectas. En lo concerniente al proceso de homogenización del abono orgánico, es decir, la dispersión superficial del material sólido, se están formando costras de abono orgánico en la superficie de la mezcla, lo cual nos indica claramente que la agitación en las capas superiores del fluido no es la correcta, lo que ocasiona además la producción de emisiones de gases de efecto invernadero como dióxido de carbono, amoníaco, y metano respectivamente CO_2 , NH_3 y CH_4 .

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los actuales sistemas de agitado han sido fabricados de forma intuitiva y empírica, sin cálculos de ingeniería que respalden su correcto funcionamiento, de allí, las deficiencias en el mezclado del abono orgánico y por consecuencia un lento crecimiento del pasto, lo que se refleja inmediatamente en el sector productivo relacionado a la demora de rotación del ganado y correcta alimentación del mismo. A esto se suman muchas averías relacionadas a funcionamiento mecánico, eléctrico y químico de los agitadores como por ejemplo: fractura de soldaduras y elementos de la estructura, flexión de la placa soporte, motores fundidos por cortos circuitos, deterioro interno y externo del moto-reductor y la estructura del sistema agitador por corrosión generalizada debido al ambiente húmedo y emisiones de gases producidas por las costras superficiales del abono orgánico.

1.3 JUSTIFICACION

Este proyecto se realizó con el objetivo de optimizar un sistema agitador de paletas planas inclinadas de tipo eje vertical para mezcla de abono orgánico, a fin de lograr mayor calidad de este, mientras se minimizan averías asociadas a corrosión, vibración excesiva, esfuerzos y deformaciones mecánicas, problemas eléctricos, de montaje y de manipulación entre otros. De igual manera proporcionar un ciclo de vida útil mayor del dispositivo, lo que se verá reflejado directamente en beneficios en cuanto a reducción de costos de mantenimiento y aumento de la producción ganadera.

La optimización de este dispositivo beneficia a los criadores y productores intensivos de ganado porcino y bovino, ya que el purín de cerdo es aprovechado de forma adecuada y eficiente en cuanto a mitigación de la contaminación

ambiental mientras es utilizado para el riego de pastos, pero es aquí donde es clave tener un sistema de agitado que proporcione una mezcla rica en carga bacteriana y que a su vez favorezca el crecimiento y rendimiento del ganado bovino de carne en menor tiempo, lo cual se traduce en índices de rentabilidad y ganancia.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Mejorar la calidad de la mezcla de abono orgánico resultante de un sistema agitador mecánico, mediante la aplicación de la ingeniería y el rediseño del mecanismo actual.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el estudio teórico y técnico de un sistema de agitador de palas de tipo eje vertical.
- Aumentar el porcentaje de partículas sólidas en suspensión de la mezcla de abono.
- Calcular y modelar un sistema que ofrezca mayor estabilidad mecánica, eficiencia, rendimiento, menor consumo energético.
- Llevar a cabo un estudio económico del sistema de agitador para una futura fabricación del mismo.
- Diseñar un plan de mantenimiento preventivo (PMP) para el sistema agitador.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 AGITACIÓN Y MEZCLA

El éxito de muchas operaciones industriales depende de la eficacia de agitación y mezcla de fluidos. Aunque con frecuencia tienden a confundirse, agitación y mezcla no son sinónimos. La agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una forma específica, generalmente con un modelo circulatorio dentro de algún tipo de contenedor. La mezcla es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas. Un único material homogéneo, tal como un tanque con agua fría, puede ser agitado pero, en cambio, no puede mezclarse mientras no se le adicione otro material, tal como una cierta cantidad de agua caliente o algún sólido pulverulento³.

3.2 AGITACIÓN DE LIQUIDOS

Los líquidos se agitan con diversos fines, dependiendo de los objetivos de la etapa del proceso. Dichos fines comprende:

1. Suspensión de partículas sólidas.
2. Mezclado de líquidos miscibles, por ejemplo alcohol metílico y agua.
3. Dispersión de un gas en un líquido en forma de pequeñas burbujas.
4. Dispersión de un segundo líquido, inmisible con el primero, para formar una emulsión⁴ o suspensión de gotas diminutas.
5. Promoción de la transformación de calor entre el líquido y un serpentín o encamisado.

³Pulverulento: En estado de polvo., Según la RAE.

⁴Emulsión: dispersión de un líquido en otro no miscible con él.

Con frecuencia un agitador cubre varias finalidades al mismo tiempo, como ocurre en el caso de la hidrogenación catalítica de un líquido (*Warren., et al., 1998*).

Un equipo de agitación realiza varias de estas operaciones básicas simultáneamente, pero es conveniente instalar mezcladores agitadores que pueden llevar a cabo la agitación en el sentido deseado, con el menor consumo energético posible. Para ello, existen en el mercado gran variedad de agitadores, con distintas características y funciones. Los más habituales tienen sus dimensiones estandarizadas de acuerdo con la norma DIN 28131, según varios criterios. Ver figuras 1 a 5.

- Mecánica
- Características de proceso
- Características de aplicación

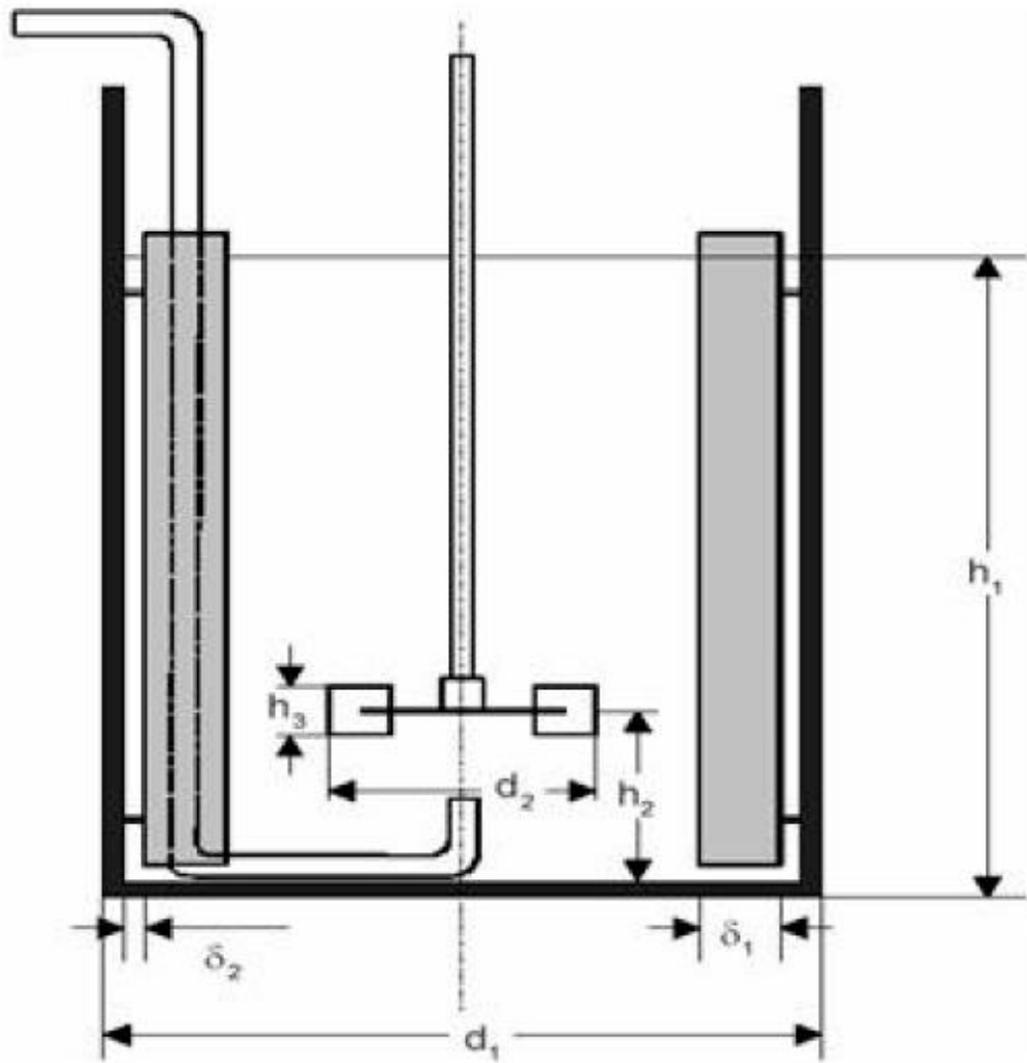


Figura 1. Nomenclatura de dimensionado según norma DIN 28131

Dimensiones estándar de cuatro sistemas de agitación según la norma DIN 28131

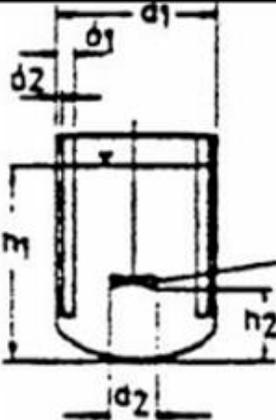
DENOMINACIÓN	SÍMBOLO	GEOMETRIA
Agitador de hélice		 <p> $h_1 / d_1 = 1.0$ $d_2 / d_1 = 0.33$ $h_2 / d_1 = 0.33$ $\alpha = 25^\circ$ $\delta_1 / d_1 = 0.1$ $\delta_2 / d_1 = 0.02$ </p>

Figura 2. Dimensiones de un agitador de hélice

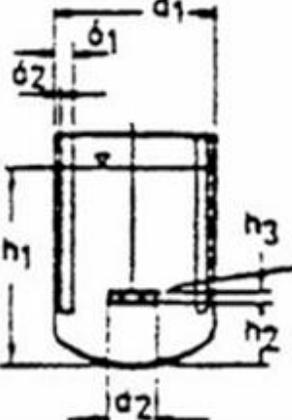
Agitador con palas planas inclinadas		 <p> $h_1 / d_1 = 1.0$ $d_2 / d_1 = 0.337$ $h_2 / d_1 = 0.17 \div 0.34$ $h_3 / d_2 = 0.177$ $\alpha = 45^\circ$ 6 Blätter $\delta_1 / d_1 = 0.1$ $\delta_2 / d_1 = 0.02$ </p>
--------------------------------------	---	---

Figura 3. Dimensiones de un agitador de palas planas inclinadas

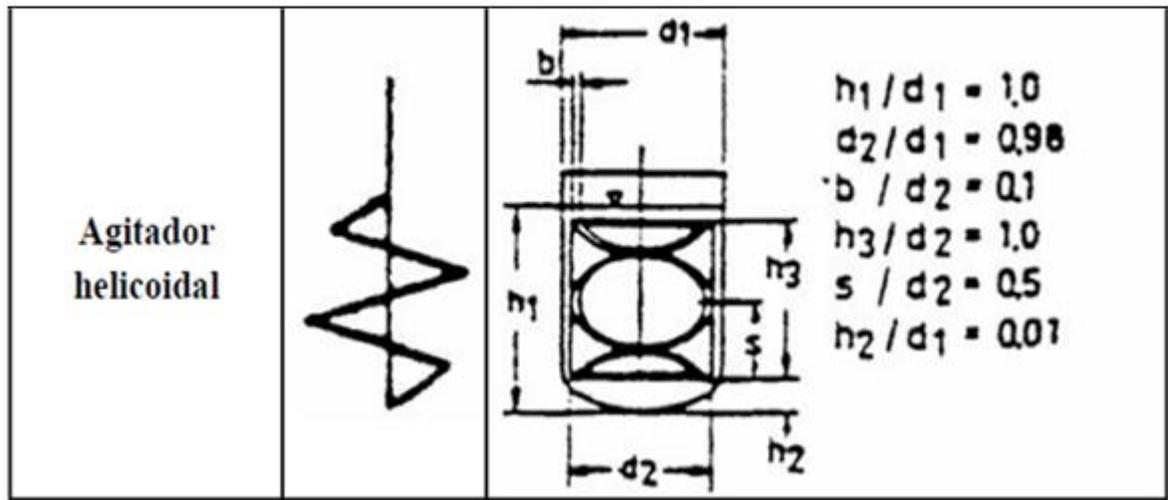


Figura 4. Dimensiones de un agitador helicoidal

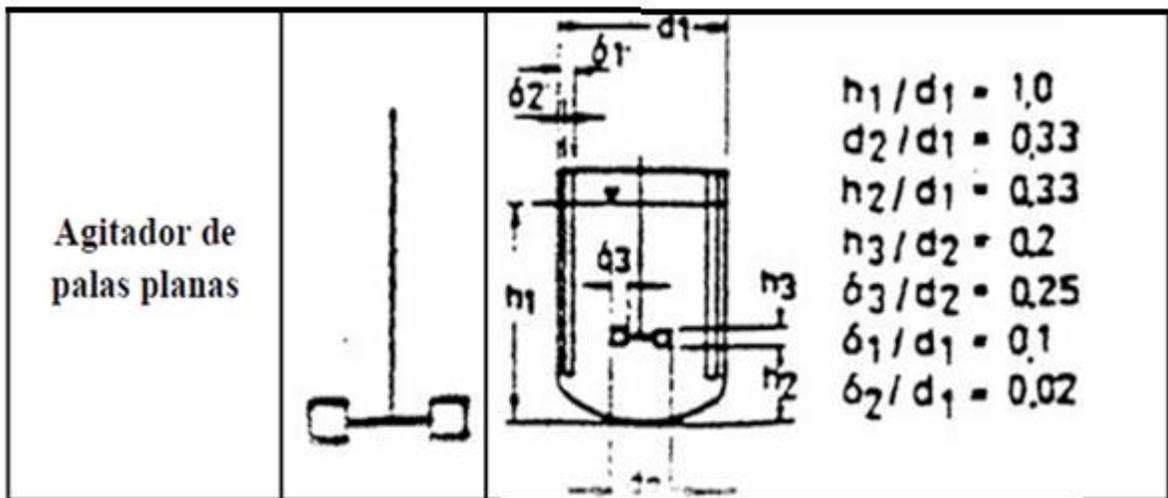


Figura 5. Dimensiones de un agitador de palas planas

Los agitadores se pueden clasificar según los siguientes criterios:

- Modelo de flujo producido (axial, radial, tangencial)
- Viscosidad del fluido
- Relación entre el diámetro del agitador y el del depósito d_2/d_1
- Velocidad tangencial inducida en el fluido

- Régimen: laminar ó turbulento
- Geometría del fondo del deposito

La velocidad de giro se elige normalmente en función del tipo de operación que se desea realizar. Como norma general, se sigue el siguiente criterio. Ver tabla 1.

Tabla 1. Velocidades de giro según operaciones de agitación

Agitación rápida	Medios muy fluidos en régimen turbulento
Agitación lenta	Medios muy viscosos en régimen laminar

En la realidad, el campo de flujo producido por los agitadores es siempre tridimensional, pero existe siempre un flujo predominante de trayectoria como el tipo axial representado en la figura 6 y de trayectoria radial representado en la figura 7.

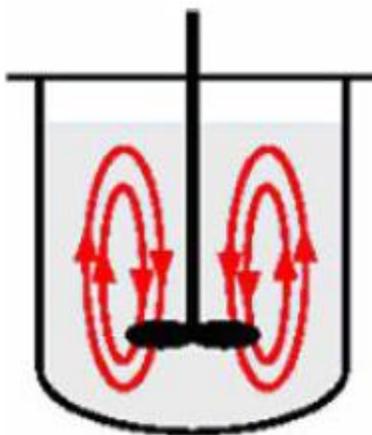


Figura 6. Trayectoria axial

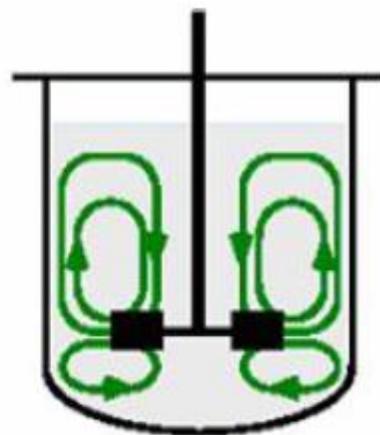


Figura 7. Trayectoria radial

3.2.1 Flujo laminar y flujo turbulento

El tipo de flujo que se presenta en el desplazamiento de un fluido por un canal es muy importante en los problemas de dinámica de fluidos. Cuando los fluidos se mueven por un canal cerrado de cualquier área de corte transversal, se puede presentar cualquiera de dos tipos diferentes de flujo, dependiendo de las condiciones existentes. Estos dos tipos de flujo pueden verse con frecuencia en un río o en cualquier corriente abierta. Cuando la velocidad de flujo es baja, su desplazamiento es uniforme y terso. Sin embargo, cuando la velocidad es bastante alta, se observa una corriente inestable en la que se forman remolinos o pequeños paquetes de partículas de fluido que se mueven en todas direcciones y con gran diversidad de ángulos con respecto a la dirección normal del flujo.

Flujo laminar

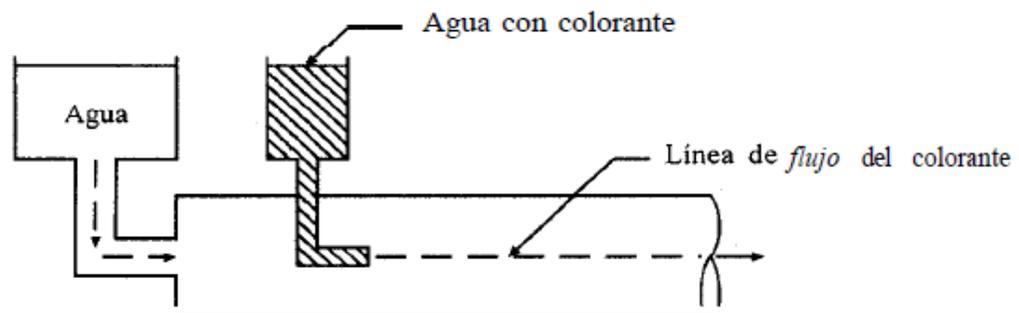
Se genera por velocidades bajas, donde las capas de fluido parecen desplazarse unas sobre otras sin remolinos o turbulencias, este tipo de flujo obedece a la ley de viscosidad de Newton.

Flujo turbulento

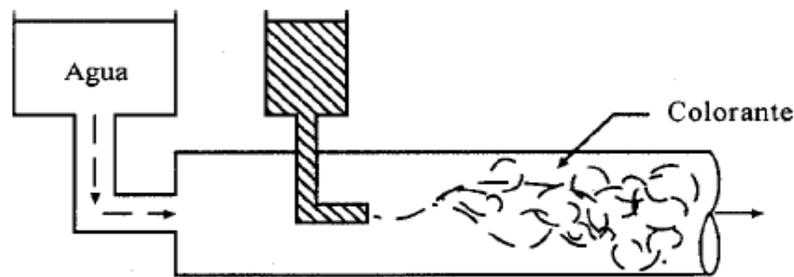
Este flujo se genera a velocidades más altas, donde se generan remolinos que imparten al fluido una naturaleza fluctuante.

La existencia de flujo laminar y turbulento puede visualizarse con facilidad por medio de los experimentos de Reynolds que se muestran en la figura 8. Se hace fluir agua de manera uniforme a través de una tubería transparente, controlando la velocidad por medio de una válvula situada al final del tubo. Se introduce una corriente muy fina y uniforme de agua con un colorante, a través de una boquilla de inyección, para observar su flujo. Cuando la velocidad de flujo del agua es baja, la coloración es regular y forma una sola línea, esto es, una

corriente similar a un cordel, tal como lo muestra la figura 8(a). En este caso no hay mezclado lateral del fluido y éste se desplaza en una línea recta por el tubo. Al colocar varios inyectores en otros puntos de la tubería se demuestra que no hay mezclado en ninguna parte del mismo y que el fluido fluye en líneas rectas paralelas, a este tipo de flujo se le llama laminar o viscoso.



(a)



(b)

Figura 8. Experimento de Reynolds para diferentes tipos de flujo: (a) laminar (b) turbulento.

Al aumentar la velocidad, se ve que al llegar a cierto límite, la línea de colorante se dispersa y su movimiento se vuelve errático, figura 8(b). A este tipo de flujo se le llama turbulento. La velocidad a la que se presenta el cambio de tipo de flujo se llama *velocidad crítica* (Christie, 1998).

3.3 OBJETIVOS DE LA AGITACIÓN

3.3.1 Transferencia de materia en sistemas heterogéneos

Esta categoría de operaciones incluye las reacciones químicas, la disolución de sólidos, la extracción y la absorción. Las exigencias que debe satisfacer el agitador son dobles: debe dispersar o suspender la fase discontinua en la totalidad de la continua: y debe provocar intensa turbulencia entre las partículas suspendidas, para favorecer la transferencia de materia entre las fases. Para estas finalidades se necesita un agitador que produzca velocidades de flujo suficiente que impidan la sedimentación de las partículas o la estratificación de las fases. La intensidad de la turbulencia debe ser uniforme en todo el recipiente, si se requiere que la transferencia de materia tenga lugar en todos los puntos.

Para esta operación se recomienda rodetes de tamaño mediano, que funcione a velocidades medias.

3.3.2 Mezcla de líquidos

Los líquidos pueden mezclarse de modo continuo haciéndolos pasar por una bomba centrífuga. En el mezclado discontinuo, por lotes como el que puede tener lugar en un recipiente, el agitador debe mover grandes corrientes líquidas hacia todos los puntos del sistema.

En conclusión, el mezclado definitivo depende de la intensidad de la turbulencia en los distintos puntos del sistema, es decir, de la difusión molecular. La parte más importante de esta operación reside en que haya corrientes intensas que lleguen a todos los puntos, porque la turbulencia local no es eficaz.

Por lo tanto, para mezclar dos o más fluidos es preferible emplear grandes rodetes que funcionen a escasas velocidades y no rodetes pequeños muy revolucionados.

3.3.3 Formación de emulsiones

Algunas operaciones, como la emulsión de dos líquidos no miscibles, requieren una turbulencia de gran intensidad en algún punto del sistema. En general, las cosas suelen disponerse de manera que los líquidos estén bastante bien mezclados antes de llegar al punto de gran turbulencia. Si la operación se conduce en forma discontinua, es preciso que, gradualmente, todo el contenido del depósito pase por la zona de gran turbulencia. Para esta operación son especialmente recomendables los rodetes pequeños, a grandes velocidades, bien ajustados y con pequeños espacios libres entre el rodete y las piezas fijas de sus alrededores.

3.3.4 Tránsferencia calórica y uniformidad de temperatura

La transmisión calórica suele ir acompañada de transferencia de materia, especialmente en el caso de reacciones químicas. En consecuencia, los tanques de reacción suelen estar provistos de serpentines de calefacción (o de refrigeración) o de doble pared y es necesario que se produzcan velocidades adecuadas a lo largo de las superficies cambiadoras para favorecer la transmisión calórica.

En estos casos, el dispositivo de agitación debe estar situado cerca de los serpentines o de las camisas de calefacción. Además, el rodete debe producir corrientes de gran volumen, de manera que la totalidad del contenido del recipiente se ponga fácilmente en contacto, o llegue a la proximidad de las superficies transmisoras de calor, única manera de obtener temperaturas uniformes en todo el sistema. Para estas operaciones son apropiados los agitadores a grandes o pequeñas velocidades.

3.4 CLASIFICACION DE AGITADORES SEGÚN LAS DIRECCIONES DE FLUJO

A continuación se describe los tres tipos básicos de agitadores directamente relacionados con los tres modelos de flujo fundamentales.

3.4.1 Agitadores de flujo axial

Permiten un flujo desprendido del rodete de aproximadamente 45° y por tanto presenta recirculación, que retorna hasta la zona central de las palas del agitador, creando un campo de flujo de ida y vuelta paralelo al eje de giro. Este tipo de flujo se presenta con un Reynolds de entre 200 a 600, y se transforma en flujo radial cuando el número de Reynolds disminuye. Los agitadores de flujo axial incluyen a todos los que tienen palas que forman un ángulo menor de 90° con el plano perpendicular al eje. Las hélices y turbinas de palas o aspas inclinadas son las más representativas de este tipo de agitadores.

Existen dos rangos básicos de velocidades de giro: de 1150 a 1750 rpm con transmisión directa, y de 350 a 420 rpm con transmisión por engranajes. Para la suspensión de sólidos es habitual utilizar las unidades de transmisión por engranajes, mientras que para reacciones o dispersiones rápidas son más apropiadas las unidades de alta velocidad.

3.4.2 Agitadores de flujo radial

Los más representativos son los agitadores de palas planas. Este tipo de agitadores incluyen palas (o aspas) paralelas al eje del motor. Los más pequeños y de aspas múltiples se denominan “turbinas”; los mayores, de velocidades más bajas, con dos o cuatro aspas, se denominan agitadores de palas o de paletas. Generan un flujo radial para cualquier Reynolds y proporcionan alta velocidad tangencial aunque baja capacidad de impulsión.

3.4.3 Agitadores de paso cerrado

En estos se incluyen los de tipo ancla y helicoidal. Estos agitadores trabajan muy cercanos a la pared del tanque y son particularmente eficaces para fluidos pseudoplásticos y, en general, de alta viscosidad, en los que es necesario tener concentrada la capacidad de mezcla cerca de la pared, consiguiéndose un campo de flujo más efectivo que con los impulsores del tipo abierto explicados anteriormente.

3.5 TIPO DE AGITADORES

A continuación se describen algunos tipos de agitadores mecánicos de uso industrial.

3.5.1 Agitadores de hélice

Son generalmente agitadores de alta velocidad y tipo de flujo axial. El impulsor está constituido por una hélice de dos, tres, o hasta cuatro aspas. Las hélices se pueden usar en fluidos de baja viscosidad casi sin ninguna restricción en cuanto al tamaño y forma del recipiente. La capacidad de circulación es alta y, como con un chorro, se produce arrastre del líquido circundante.⁵

Los agitadores de hélice trabajan a velocidades entre 300 y 1000 rpm, por lo que crean una gran turbulencia en la zona próxima al rodete.

A continuación se exponen las características principales de los tipos de rodetes más importantes:

⁵ UHL V., GRAY J.; Mixing: Theory and Practice; Academic Press Inc.; Estados Unidos; 1966; p. 113

Tabla 2. Características de los agitadores de hélice

Descripción	<ul style="list-style-type: none"> - 3 alabes (generalmente) - Ángulo de inclinación del aspa constante
Campo de flujo generado	Axial
Régimen alcanzado	Turbulento
Velocidad tangencial	3-15 m/s
Viscosidad del medio	< 8 Pa.s
Posición del rodete (d_2/d_1)	0,1 – 0,5 (alejado de la pared del tanque)
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Homogenizar - Suspender - Favorecer el intercambio de calor

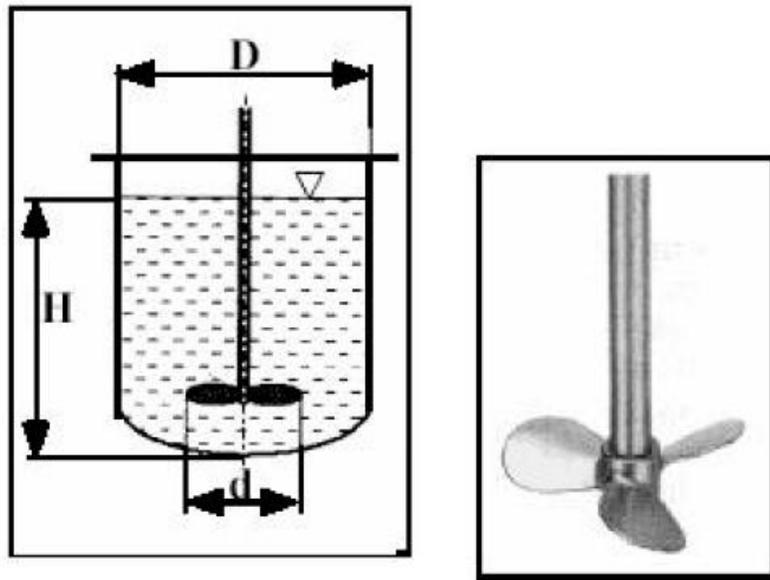


Figura 9. Hélice marina de tres aspas

3.5.2 Agitadores de paletas planas tipo turbina

Cuando se procesa líquidos con amplia diversidad de viscosidades se usan turbinas semejantes a un agitador de paletas múltiples con aspas más cortas. El diámetro de una turbina suele medir del 30 al 50% del diámetro interior del tanque. Normalmente las turbinas tienen cuatro o seis aspas como se puede apreciar en la figura 10. Las turbinas con aspas o (paletas) planas producen un flujo radial figura 7., para dispersar un gas en un líquido, el gas puede hacerse penetrar justo por debajo del propulsor de la turbina en su eje; de esa manera las paletas dispersan el gas en muchas burbujas. Con la turbina de paletas inclinadas a 45°, se imparte cierto flujo axial como el apreciado en la figura 6, de modo que hay una combinación de flujos radial y axial. Este tipo es útil para sólidos en suspensión, ya que las corrientes fluyen hacia abajo y luego levantan los sólidos depositados⁶.

Tabla 3. Características del agitador de paletas planas

Descripción	6 palas rectas
Campo de flujo generado	Radial
Régimen alcanzado	Turbulento
Velocidad tangencial	3 - 7 m/s
Viscosidad del medio	Hasta 10 Pa.s
Posición del rodete (d_2/d_1)	0,2 – 0,5 (alejado de la pared)
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Homogenizar - Favorecer el intercambio de calor - Inyección de un gas en un fluido - Emulsionar

⁶GEANKOPLIS CHRISTIE J.; Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias; University of Minnesota; México; tercera edición; 1998; p. 162.

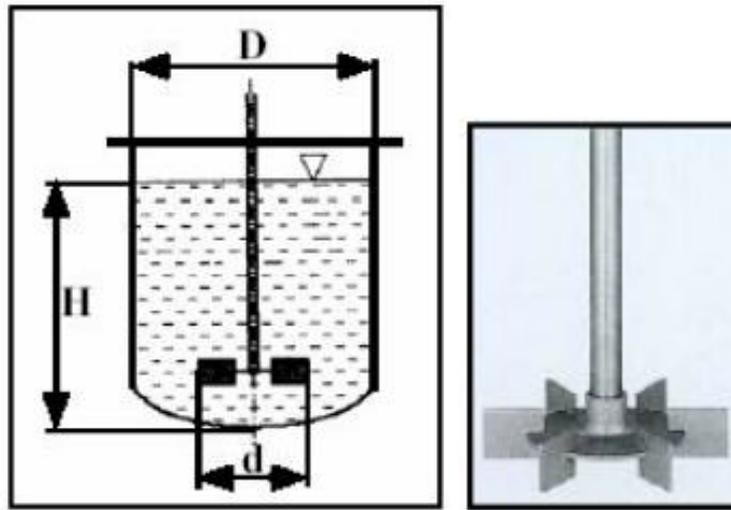


Figura 10. Turbina de 6 paletas planas

3.5.3 Agitadores de paletas planas

Para los problemas más sencillos, un agitador eficaz consta de una pala plana que gira sobre un eje vertical. Son frecuentes los agitadores de dos y cuatro palas. A veces las palas están inclinadas, pero lo más frecuente es que sean verticales. Las palas giran a bajas o moderadas velocidades en el centro del tanque, impulsando el líquido radial y tangencialmente, sin que haya prácticamente movimiento vertical excepto que las placas estén inclinadas. Las corrientes que generan se desplazan hacia fuera hasta la pared del tanque y después hacia arriba o hacia abajo. En tanques profundos se instalan varias palas, unas sobre otras en un mismo eje. En algunos diseños las placas se adaptan a la forma de las paredes del tanque, de forma que rascan la superficie y pasan sobre ella con una muy pequeña holgura. Una pala de este tipo recibe el nombre de *agitador de áncora*. Las áncoras resultan útiles para prevenir que se depositen sólidos sobre una superficie de transmisión de calor, tal como un tanque encamisado, pero en cambio son malos mezcladores. Casi siempre operan conjuntamente con un agitador de alta velocidad que generalmente gira en sentido contrario.

Los agitadores industriales de palas giran a velocidades comprendidas entre 20 y 150 rpm. La longitud total de un rodete de palas esta típicamente comprendido entre el 50 y 80% del diámetro interior del tanque. La anchura de la pala es de 1/6 a 1/10 de su longitud. A velocidades muy bajas los agitadores de palas generan una agitación muy suaves en tanques sin placas deflectoras, las cuales son necesarias para velocidades más elevadas, pues de lo contrario el líquido se desplaza en bloque alrededor del tanque con una velocidad alta, pero con poca mezcla⁷.

Los agitadores de palas producen un flujo radial, y se emplean muy frecuentemente por que son adaptables a casos muy extremos y por la facilidad con que se pueden modificar su longitud y numero de paletas. Además se pueden construir con materiales muy distintos y de tamaños muy diversos⁸.

Dentro de los agitadores de palas encontramos unas subfamilias que son:

- Agitadores de ancla
- Agitadores Helicoidales

⁷ MACCABE WARREN L., SMITH JULIAN C., HARRIOTT PETER.; Operaciones Unitarias en Ingeniería Química; McGraw-Hill.; Madrid; p. 245

⁸ VIAN A., OCÓN J.; Elementos de Ingeniería Química; Aguilar S.A.; Quinta edición; España; 1976; p. 723

Tabla 4. Características de agitadores de paletas planas

Descripción	<ul style="list-style-type: none">- 4 - 6 palas rectas- Ángulo de inclinación = 45°
Campo de flujo generado	Axial y radial (componente radial mayor que con el mezclador de hélice)
Régimen alcanzado	De transición – turbulento
Velocidad tangencial	3 - 15 m/s
Viscosidad del medio	Hasta 20 Pa.s
Posición del rodete (d_2/d_1)	0,2 – 0,5 (alejado de la pared)
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none">- Suspensión de sólidos en un líquido- Favorecer el intercambio de calor- Homogenizar

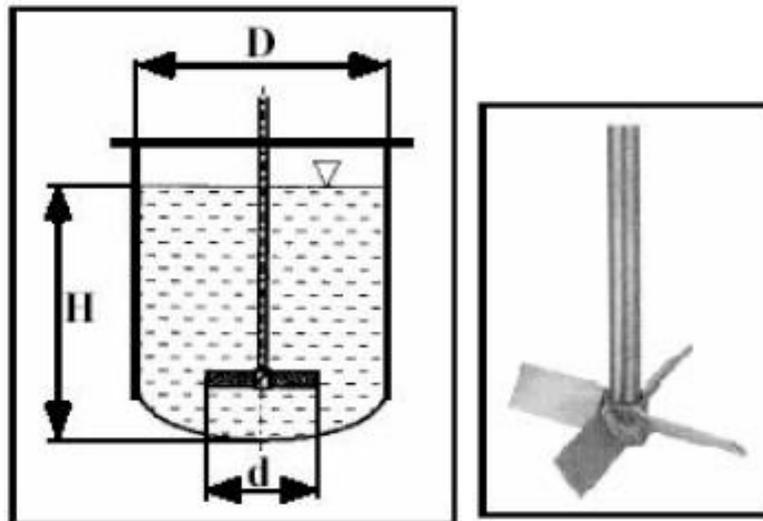


Figura 11. Agitador de paletas planas

3.5.4 Agitador impulsor

Tabla 5. Características del agitador impulsor

Descripción	<ul style="list-style-type: none">- 3 palas inclinadas- Palas curvadas hacia atrás en dirección del flujo
Campo de flujo generado	Radial / axial
Régimen alcanzado	De transición – turbulento
Velocidad tangencial	3 - 8 m/s
Viscosidad del medio	Hasta 100 Pa.s
Posición del rodete (d_2/d_1)	0,2 – 0,5 (alejado de la pared)
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none">- Homogenizar- Favorecer el intercambio de calor

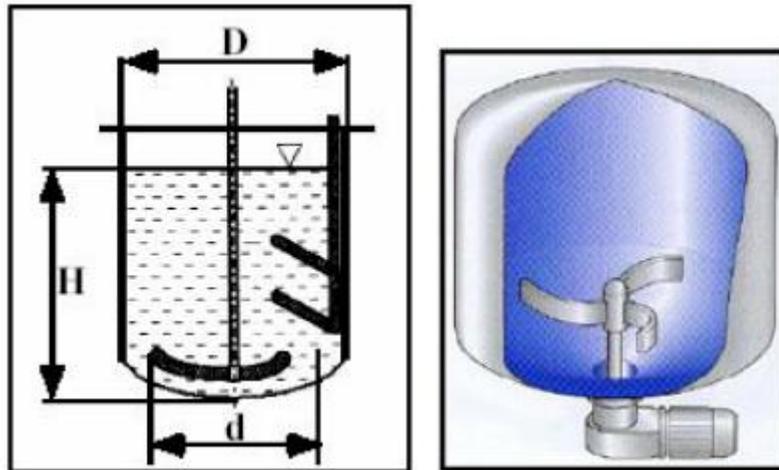


Figura 12. Turbina tipo impulsor

3.5.5 Agitadores de banda helicoidal

Este tipo de agitadores se utiliza para soluciones sumamente viscosas y opera a pocas rpm, en la región laminar. La banda se forma en una trayectoria helicoidal y está unida a un eje central. El líquido se mueve en una trayectoria de flujo tortuosa hacia abajo en el centro y hacia arriba a los lados, con movimiento de giro. Otros tipos semejantes son el de banda helicoidal doble y el de banda helicoidal con tornillo⁹.

Tabla 6. Características del agitador de banda helicoidal

Descripción	- Forma de espiral
Campo de flujo generado	Radial / axial
Régimen alcanzado	Laminar
Velocidad tangencial	Hasta 2 m/s
Viscosidad del medio	500 hasta 1000 Pa.s
Posición del rodete (d_2/d_1)	0,90 – 0,98 (cerca de la pared)
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none">- Homogenizar- Favorecer el intercambio de calor

⁹GEANKOPLIS CHRISTIE J.; Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias; University of Minnesota; México; tercera edición; 1998; p. 162.

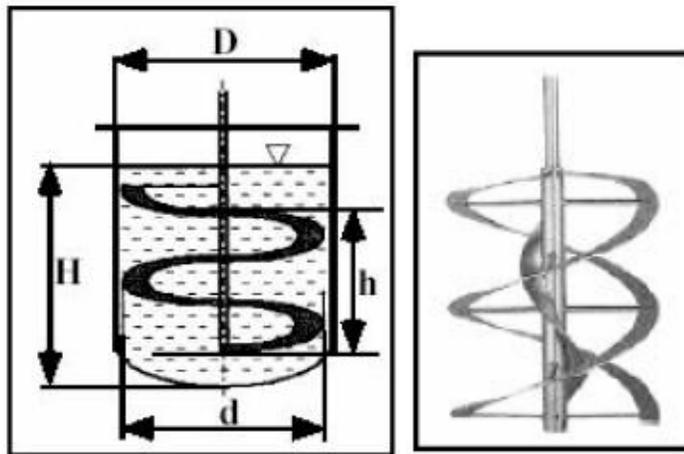


Figura 13. Banda helicoidal

3.6 AGITADORES ESPECIALES

Existen muchas gamas de agitadores, aparte de los antes mencionados, especialmente diseñados para tareas específicas, como por ejemplo los siguientes modelos registrados:

- ISOJET
- VISKOPROP
- PHASEJET
- INTERMING
- PARAVISC.
- Doppel-PARAVISC



3.6.1 Agitador ISOJET

Las siguientes son algunas características de este agitador.

- a. Optimización del flujo axial.
- b. Muy adecuado para suspensiones.
- c. Tiempo de mezcla corto
- d. Potencia inducida pequeña.

Figura 14. Impulsor ISOJET

3.6.2 Agitador VISKOPROP

Es muy adecuado para homogenizar fluidos con viscosidades muy altas o fluidos no newtonianos.

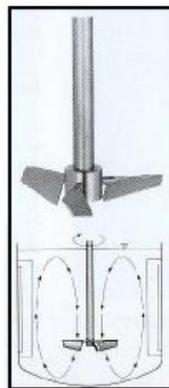
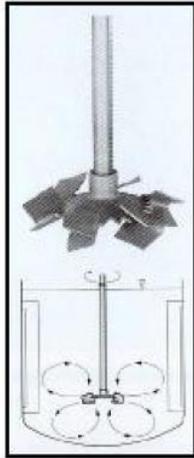


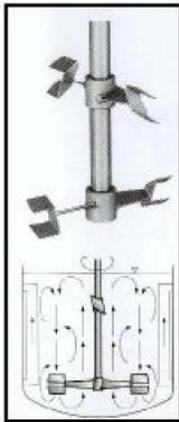
Figura 15. VISKOPROP



3.6.3 Agitador PHASEJET

- a. Especial para inyección de gas
- b. Potencia inducida pequeña
- c. El gas se introduce por el eje

Figura 16. Impulsor PHASEJET



3.6.4 Agitador INTERMING

- a. Flujo predominante axial
- b. Más de un rodete situado a 90° unos respecto de otros.
- c. Muy adecuado para homogenizar fluidos de viscosidad media.

Figura 17. Impulsor INTERMING

3.6.5 Agitador PARAVISC

- a. Rodete situado cerca de la pared
- b. Combinación de tipo ancla y helicoidal
- c. Para régimen laminar
- d. Aplicación para fluidos con viscosidad alta, fluidos con reología difícil y fluidos con esfuerzo umbral muy alto.

e. Suspensiones con poco líquido

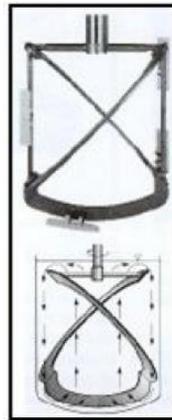


Figura 18. Impulsor PARAVISC

3.6.6 Agitador Doppel-PARAVISC

Este agitador es utilizado para fluidos de alta viscosidad (polimerización de poliamidas)

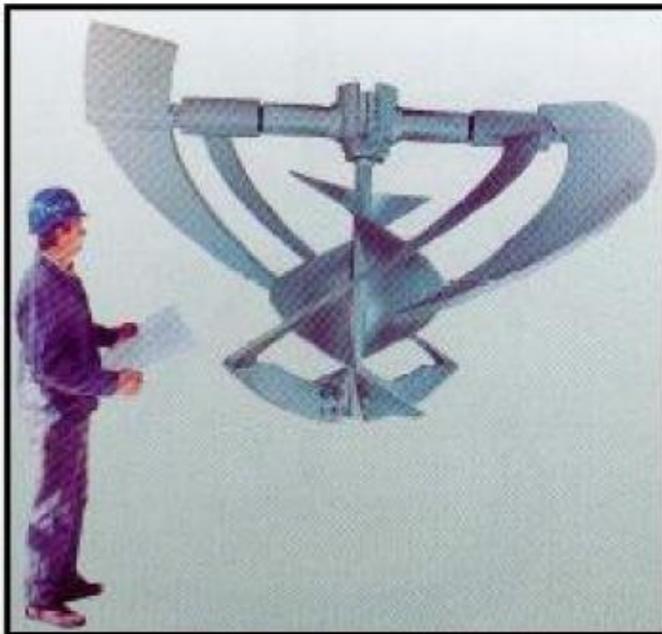
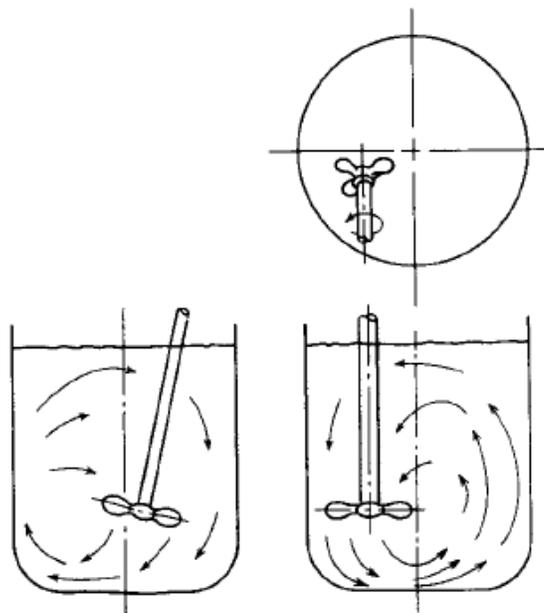


Figura 19. Impulsor Doppel – PARAVISC

3.7 RECIPIENTE DE AGITADO



El tanque de agitado es generalmente cilíndrico. Este hace parte del sistema agitador y en él se deposita el fluido que será agitado. Estos pueden ser verticales u horizontales, aunque los primeros son los más comúnmente utilizados. También pueden ser fabricados de diversos materiales, dependiendo del tipo de industrias en la cuales serán utilizados.

Figura 20. Agitador no centrado
(Según Bissell et al.)

3.7.1 Prevención de flujo circulatorio

El flujo circulatorio y los remolinos pueden evitarse por uno de los tres métodos siguientes. En tanques de pequeño tamaño se dispone el rodete separado del centro del tanque como se ve en la figura 20. El eje se mueve alejado de la línea que pasa por el centro del tanque, inclinándose después según un plano perpendicular a la dirección del movimiento. En los tanques de mayor tamaño, el agitador puede montarse en la parte lateral del tanque, con el eje en un plano horizontal, pero formando un cierto ángulo con el radio, como se aprecia en la figura 21.

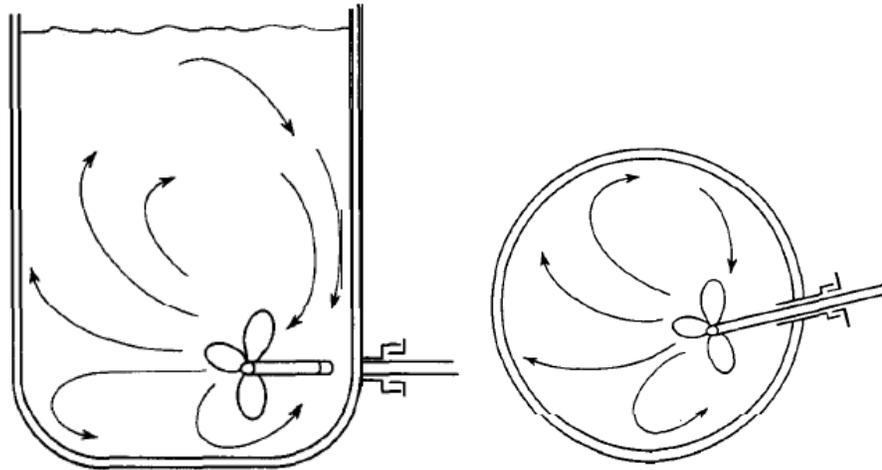


Figura 21. Rodete con entrada lateral (Según *Bissell et al.*)

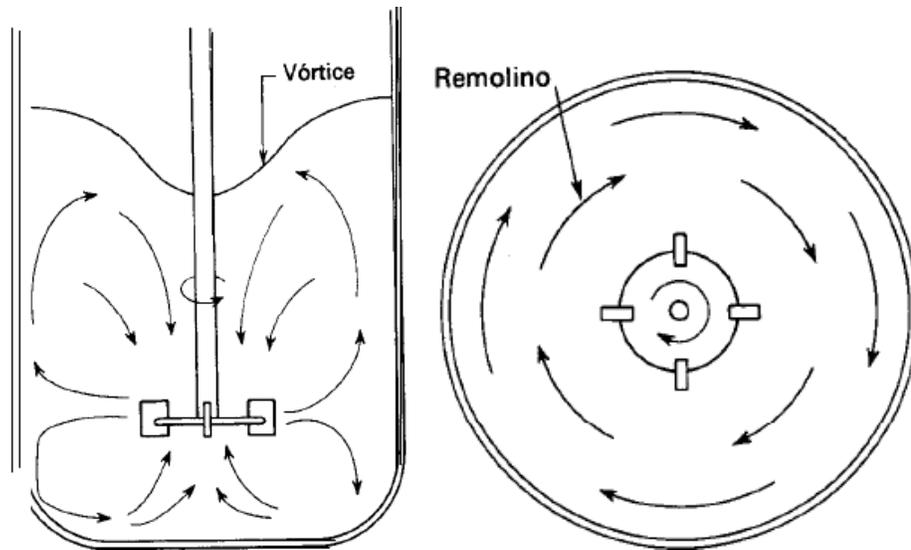


Figura 22. Formación de vórtices y tipo de flujo en un tanque de agitado (Según *Lyons.*)

En los tanques de gran tamaño, con agitadores verticales, el modelo más conveniente de reducir los remolinos es instalar placas deflectores, que impiden el flujo rotacional sin afectar al flujo radial y longitudinal. Un método sencillo y eficaz

de destruir los remolinos, se consigue instalando placas verticales perpendiculares a la pared del tanque como se aprecia en la figura 22. Se representan placas deflectoras de este tipo, y el tipo de flujo a que dan lugar. Excepto en tanques muy grandes, son suficientes cuatro placas deflectoras, para evitar los remolinos y la formación de vórtices. Para agitadores de turbina, la anchura de la placa deflectora no es preciso que sea mayor de la doceava parte del diámetro del tanque; para agitadores de hélice basta con un octavo. Cuando el rodete entra al tanque lateralmente, está inclinado, o desplazado del centro, no son necesarias placas deflectoras

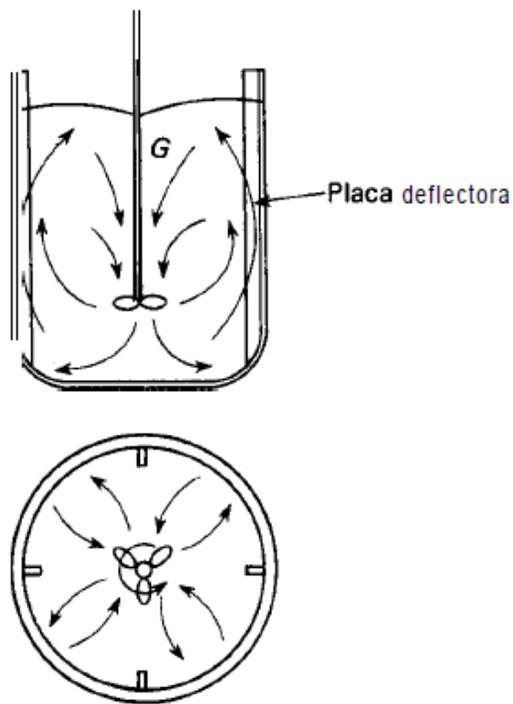


Figura 23. Modelo de flujo en un tanque con placas deflectoras y un agitador de turbina instalado centralmente

Una vez que el flujo circulatorio ha cesado, el modelo específico del flujo en el tanque depende del tipo de rodete. Los agitadores de hélice generalmente dirigen el líquido hacia el fondo del tanque, donde la corriente se esparce radialmente en todas las direcciones hacia la pared, ascienden a lo largo de la pared y retorna desde la parte superior hasta el punto de succión

del rodete. Este modelo de flujo se representa en la figura 23. Se utilizan agitadores de hélice cuando se desean fuertes corrientes verticales, es decir, cuando han de mantenerse partículas sólidas en suspensión. No se utilizan ordinariamente cuando la viscosidad del líquido es superior a aproximadamente 50 P (5 Pa.s). Con el fin de obtener un fuerte flujo axial para la suspensión de sólidos

también se utilizan turbinas con una inclinación de las placas de 45° (*Warren et al., 1998*).

Los agitadores de palas y las turbinas de placas planas producen un buen flujo radial en el plano del rodete, dividiendo el flujo hacia la pared para formar dos modelos distintos de circulación, tal como se muestra en la figura 22. Una parte fluye hacia abajo a lo largo de la pared y retorna hacia el centro del rodete desde el fondo, mientras que otra asciende hacia la superficie y retorna al rodete desde la parte superior.

3.7.2 Circulación, velocidades y consumo de potencia en tanques agitados

Para que un tanque de proceso sea eficaz, con independencia del problema de agitación, el volumen de fluido movido por el agitador debe ser suficiente para llevar las corrientes hasta las partes más remotas del tanque. En las operaciones de mezcla y dispersión la velocidad de circulación no es el único factor, ni siquiera el más importante, sino que con frecuencia la turbulencia de la corriente controla la eficacia de la operación. La turbulencia es una consecuencia de que las corrientes estén adecuadamente dirigidas y de que se generen grandes gradientes de velocidad en el líquido. Tanto la circulación como la generación de turbulencia consumen energía. Algunos problemas de agitación requieren grandes flujos o elevadas velocidades medias, mientras que otros necesitan una elevada turbulencia o disipación local de potencia. En general, se utilizan grandes agitadores que se mueven a velocidades medias para promover el flujo, y agitadores más pequeños a velocidad elevada cuando lo que se requiere es una elevada turbulencia interna.

Numero de flujo. Un agitador de turbina o de hélice es, en esencia, un rodete de una bomba que funciona sin carcasa y con flujos de entrada y salida no dirigidos. Las relaciones que rigen el comportamiento de turbinas son similares a las de las

bombas centrifugas. En la figura 24 se muestran las fuerzas que actúan sobre un rodete de turbina de palas rectas. Donde u_2 es la velocidad de las puntas de las palas: V'_{u2} y V'_{r2} son las velocidades tangencial y radial del líquido que abandona los extremos de las palas, y V'_2 es la velocidad total del líquido en el mismo punto.¹⁰

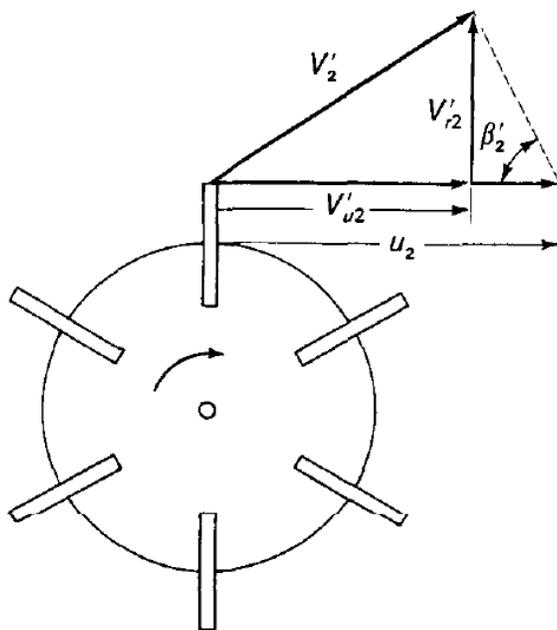


Figura 24. Vectores de velocidad en el extremo de la pala de un rodete de turbina

3.7.3 Potencia consumida en el tanque agitado

Un importante factor en el diseño de un tanque agitado es la potencia que se requiere para mover el rodete. Cuando el flujo en el tanque es turbulento, la potencia necesaria puede estimarse a partir del producto del flujo q generado por el rodete y la energía cinética E_k

por unidad de volumen de fluido¹¹

$$q = N(D_a)^3 N_Q \quad (1)$$

o bien
$$E_k = \rho (V'_2)^2 / 2g_c \quad (2)$$

¹⁰ MACCABE WARREN L., SMITH JULIAN C., HARRIOTT PETER.; Operaciones Unitarias en Ingeniería Química; McGraw-Hill.; Madrid; p. 252

¹¹ MACCABE WARREN L., SMITH JULIAN C., HARRIOTT PETER.; Operaciones Unitarias en Ingeniería Química; McGraw-Hill.; Madrid; p. 256-257

Donde:

q : Flujo generado por el rodete

N : Frecuencia de giro del rodete

D_a : Diámetro del agitador

N_Q : Número de flujo

E_k : Energía cinética del fluido

V'_2 : Resultante de la velocidad tangencial y radial desprendida del rodete

Tabla 7. Parámetros de diseño para tanques agitados provistos de placas deflectoras (Según Warren et al.)

Tipo de rodete	Razón geométrica	Número de flujo
Hélices marinas	paso cuadrado = 1,0	$N_Q = 0,5$
Turbina de 4 palas a 45°	$(W/D_a = 1/6)$	$N_Q = 0,87$
Turbina con 6 palas planas	$(W/D_a = 1/5)$	$N_Q = 1,3$

Donde W , es el ancho de la placa deflectora y D_a es el diámetro del agitador.

3.7.4 Tanques con placas deflectoras

Las placas en los tanques son utilizadas con el objetivo de eliminar remolinos o vórtices que se originan al interior del tanque y los cuales son un factor importante en la reducción de la eficiencia de mezclado, ya que no permiten que las moléculas en el caso de gases o partículas sólidas en el caso de un sistema

líquido- sólido sean distribuidas y dispersadas de forma uniforme. La agitación a bajas velocidades requiere de estos dispositivos para generar mayor turbulencia en el fluido, dando un mejor resultado en el proceso. Sin embargo, es de suma importancia dejar una pequeña brecha entre los deflectores y el tanque para evitar estancamientos en el flujo del fluido.

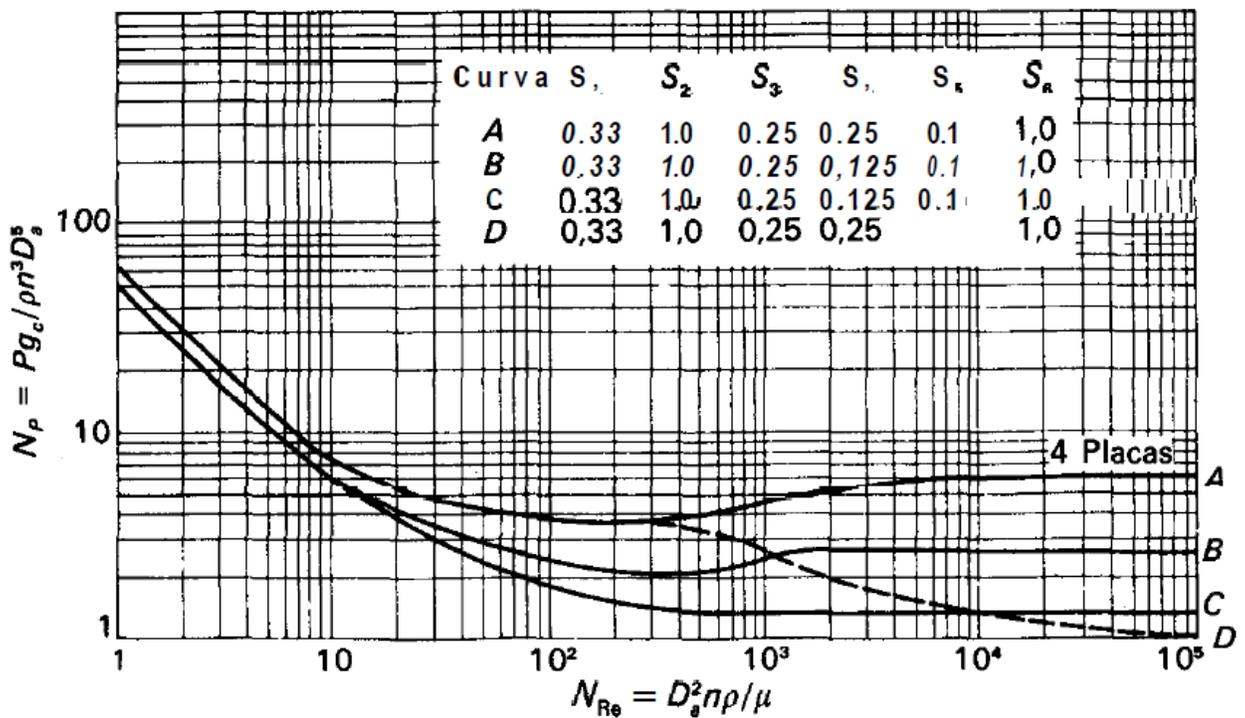


Figura 25. Numero de potencia N_p frente a N_{Re} para turbinas de 6 palas. (Según Bates et al.; Rushton et al.) Para la porción de trazos de la curva D, el valor de N_p que se obtiene de la figura hay que multiplicarlo por N_{Fr}^m .

3.7.5 Tanques sin placas deflectoras

Para bajos números de Reynolds, inferiores a 300, las curvas para tanques con y sin placas deflectoras son idénticas. Sin embargo, las curvas divergen para

números de Reynolds más elevados, tal como se muestra en las líneas punteadas de la curva **D** de la figura 25 y las curvas B, C y D de la figura 26. En esta región de los números de Reynolds, que habitualmente se evitan en la práctica cuando se utilizan tanques sin placas deflectoras, se forma un vórtice y tiene influencia el número de Froude como se aprecia en la ecuación 3.

$$\frac{N_P}{N_{Fr}^m} = \Psi(N_{Re}, S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (3)$$

Donde:

N_p : Número de potencia

N_{Fr}^m : Número de Froude

Donde el exponente **m** de la ecuación 3, para un conjunto dado de factores de forma, esta empíricamente relacionado con el número de Reynolds por la ecuación

$$m = a - \log_{10} \frac{N_{Re}}{b} \quad (4)$$

Donde **a** y **b** son constantes. En la tabla 8 se dan los respectivos valores para las curvas de las figuras 25 y 26. Para utilizar las curvas punteadas de las figuras

nombradas anteriormente hay que corregir el número de potencia N_p , leído en la escala de ordenadas, multiplicándolo por $N^{m_{Fr}}_{Fr}$ ¹².

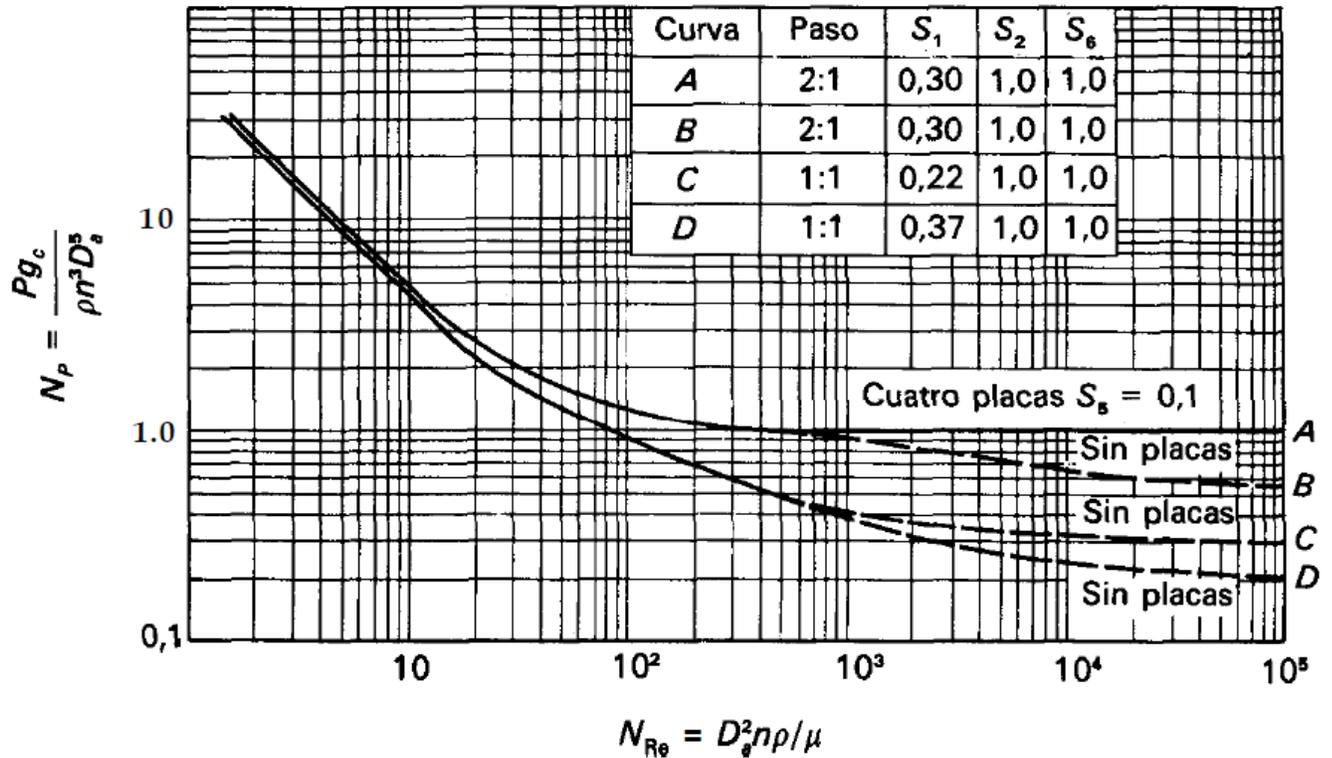


Figura 26. Numero de potencia N_p frente a N_{Re} para rodetes de 3 palas. (Según *Rushton et al.*) Para la porción de trazos de la curva B, C y D, el valor de N_p que se obtiene de la figura hay que multiplicarlo por $N^{m_{Fr}}_{Fr}$.

¹² MACCABE WARREN L., SMITH JULIAN C., HARRIOTT PETER.; Operaciones Unitarias en Ingeniería Química; McGraw-Hill.; Madrid; p. 259 - 261

Tabla 8. Constantes a y b de la ecuación (4)

Figura	Línea	a	b
30	D	1.0	40
31	B	1.7	18
31	C	0	18
31	D	2.3	18

Fuente: MACCABE WARREN L., SMITH JULIAN C., HARRIOTT PETER.; Operaciones Unitarias en Ingeniería Química; McGraw-Hill.; Madrid; p. 261

4. METODOLOGIA

Para el desarrollo de este proyecto se estableció un método de diseño basado en tres etapas. La primera etapa comprende la observación y cálculo de las propiedades reológicas de la mezcla y parámetros relacionada con esta, para esto se tomaron 3 muestras de abono orgánico del tanque del agitador que opera en la finca ganadera La Ceiba, ubicada a las afueras del corregimiento de San Antonio de Prado en el departamento de Antioquia. Una vez observado el comportamiento de la mezcla en este sistema, se procedió con la segunda etapa, la cual tuvo como objetivo integrar los estudios citados en el estado del arte para diseñar los componentes del sistema, a partir de la selección de materiales y cálculos de los esfuerzos y las cargas mediante operación manual y apoyo del software MDSOLID 3.5 a fin de determinar las dimensiones adecuadas para el diseño del sistema agitador. En la etapa 3, se realizó la selección del motor, el reductor de velocidad, y el recipiente de agitado; para finalmente realizar el modelado en el software INVENTOR 2014 integrando los parámetros geométricos de la norma internacional DIN 28131. Con ello se obtuvo un esquema del sistema óptimo para dicha aplicación.

4.2 ETAPA 1. CALCULO DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL ABONO ORGANICO

En esta etapa fue necesario llevar a cabo unos procedimientos con las muestras del abono orgánico en el laboratorio IUPB para hallar las propiedades reológicas de la mezcla y así poder determinar la densidad y la viscosidad dinámica; luego se calcularon los parámetros geométricos, la potencia consumida por la máquina y la potencia de diseño requerida para poder hacer el cálculo y análisis de los esfuerzos y de las cargas que soportarán los componentes principales del sistema agitador.

4.2.1 Procedimientos y cálculos para determinar la densidad y la viscosidad dinámica

Para cuantificar estas variables que son la base principal para el cálculo y diseño del sistema, fue necesaria la toma de 3 muestras de la mezcla de abono de la finca ganadera La Ceiba, localizada en la vereda Montañita, cerca del corregimiento de San Antonio de Prado. Después fueron llevadas al laboratorio de química de la IUPB¹³, donde se obtuvo los datos necesarios que permitieron hallar los valores de la densidad y de la viscosidad dinámica del abono orgánico, mediante los siguientes procedimientos:

- Se procede a pesar la esfera metálica en la balanza para obtener su masa. Después se mide el diámetro de la esfera para hallar su volumen y con ambos datos se calculó la densidad de la esfera ρ_b , como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Datos de la bola (esfera metálica)

ρ_b (g/cm³)	10,8
Masa (g)	2,90
Volumen (cm³)	0,27
Radio R_b(cm)	0,4
Diámetro D_b(cm)	0,8

Elaboración: propia

- Después se agregaron 250 ml de abono orgánico en la probeta graduada y se colocó dentro de esta el aerómetro universal, a fin de obtener la

¹³INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO - Medellín

densidad del abono ρ . Por medio de las escalas de lecturas del aerómetro se pudo de forma inmediata leer el resultado de la densidad. Este procedimiento se realizó con cada una de las muestras de abono y con los resultados arrojados se sacó un promedio como dato de trabajo. Ver tabla 10.

Tabla 10. Datos promedio del abono orgánico

ρ (g/cm³)	0,99
Masa (g)	247,5
Volumen (cm³)	250

- Luego se lleno con abono orgánico el tubo de vidrio de 1 m de longitud con el objetivo de realizar la prueba del viscosímetro de bola en caída libre presentado en la figura 27. Para obtener lecturas de tiempo con mayor precisión, se utilizo un imán el cual nos permitió sostener la esfera metálica en la parte superior del tubo mientras se colocaba en cero el cronómetro. después se colocaron dos marcas separadas a una distancia medida ($d_m = 39 \text{ Cm}$), y quitando el imán para dejar caer la esfera desde una altura superior a las marcas, se logró una velocidad constante de la misma durante su desplazamiento dentro del abono y así lograr lecturas con rango de errores no muy amplios. Finalmente se tomo el tiempo promedio t_{prom} que tardo la esfera metálica en recorrer d_m para poder obtener la velocidad terminal V_t mediante la ecuación 5.

$$V_t = d_m / t_{prom} \quad (5)$$

$$V_t = 27.86 \text{ cm/s}$$

Donde:

V_t : Velocidad terminal

d_m : Distancia medida

t_{prom} : Tiempo promedio de caída de la esfera metálica

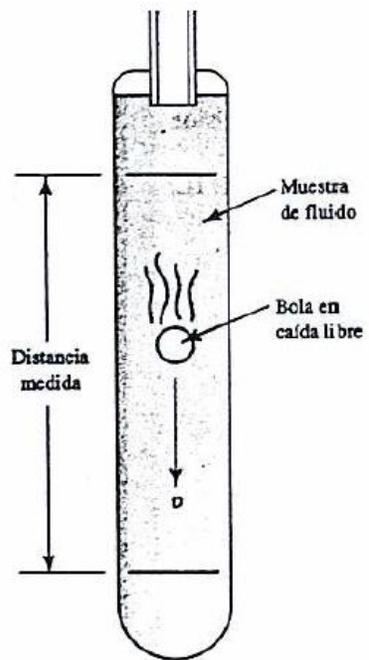


Figura 27. Viscosímetro de bola en caída libre

En la tabla 16 se encuentran consignados los valores de los tiempos tomados en la prueba del viscosímetro de bola en caída libre y el resultado del tiempo promedio de caída de la esfera.

➤ Finalmente después de obtener los datos que se muestran en la tabla 14, 15 y el resultado de la ecuación 5, se procede a calcular la viscosidad dinámica del abono orgánico (ecuación 6).

$$\mu = \left(\frac{2 \times g \times R_b^2}{9 \times V_t} \right) (\rho_b - \rho) \quad (6)$$

$$\mu = 1.23 \text{ Pa.s}$$

Donde:

- μ : Viscosidad dinámica del abono orgánico
- R_b : Radio de la esfera
- ρ_b : Densidad de la esfera
- g : Constante de aceleración gravitacional con que cae la esfera
- ρ : Densidad del abono orgánico

Tabla 11. Promedio de resultados experimentales

Muestra	<i>Tiempo de caída (s)</i>	<i>V_t (cm²/s)</i>	<i>μ (pa.s)</i>
1	1,37	28,47	
2	1,47	26,53	
3	1,41	27,66	
4	1,35	28,89	
Promedio	1,40	27,89	1.23

4.2.2 Calculo de los parámetros geométricos y la potencia consumida

Para calcular estos parámetros fue necesario remitirnos a la figura 3 de la norma DIN 28131. Los resultados de dichos cálculos se pueden apreciar en la tabla 17 y fueron requeridos para el cálculo de la potencia del agitador. Esta potencia corresponde a la energía que el agitador va a poder transmitir al fluido en un tiempo dado, con el objetivo de poner este en movimiento y por consiguiente crear una circulación del mismo¹⁴

¹⁴ GUNTZBURGER, Yoann,. Une Méthode Expérimentale d'Évaluation Globale du Pompage d'un Agitateur. Thèse Professionnelle en Maîtrise des Science Appliquées. Montréal.: École Polytechnique de Montréal. Département de Génie Chimique. P. 17

Con los datos que se encuentran organizados a continuación, los parámetros de la tabla 17 y con la utilización de la ecuación 7, se obtuvo el número de Reynolds, el cual nos indicó que el fluido dentro del recipiente de agitado se encuentra en régimen transitorio.

Datos

Densidad del abono orgánico (ρ) = **990 kg/m³**.

Viscosidad dinámica del abono orgánico (μ) = **1.23 kg/m.s**

Número de paletas del propulsor = **4 a 45° y distribuidas a 90°**

Número de revoluciones del eje de agitado (**rpm**) = **90** (dato extraído de teoría de agitado, se selecciona un valor entre 20 – 150)¹⁵.

Número de placas deflectoras = **4 ubicadas radialmente a 90°**

¹⁵MACCABE WARREN L., SMITH JULIAN C., HARRIOTT PETER.; Operaciones Unitarias en Ingeniería Química; McGraw-Hill.; Madrid; p. 245

Tabla 12. Parámetros de diseño del sistema agitador

PARAMETRO	DESCRIPCION
h_1	Altura del fluido
d_1	Diámetro del tanque
$h_1 = d_1 = 2.4\text{m}$	
$h_T = 3\text{ m}$	Altura total del tanque
$d_2 = (2.4\text{m}) (0.337) = 0.81\text{m}$	Diámetro del propulsor
$h_2 = (2.4\text{m}) (0.34) = 0.816\text{ m}$	Altura de posición del propulsor
$h_3 = (0.81\text{m}) (0.177) = 0.143\text{ m}$	Altura del propulsor
$\alpha = 45^\circ$	Ángulo de ataque de las paletas

$$N_{Re} = \left[\frac{d_2^2 \times N \times \rho}{\mu} \right] \quad (7)$$

$$N_{Re} = \left[\frac{(0.81\text{m})^2 (1.5\text{s}^{-1}) (990 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3})}{1.23 \frac{\text{Kg}}{\text{m.s}}} \right] = 792.12$$

Donde:

N_{Re} : Número de Reynolds

d_2 : Diámetro del agitador

N : Frecuencia de giro

ρ : Densidad del abono orgánico

Para alcanzar un valor de revoluciones de 90 rpm fue necesario calcular la potencia teórica N_p con la ecuación 8.

$$N_p = \left(\frac{P_a}{\rho \times N^3 \times d_2^5} \right) \quad (8)$$

Con el diagrama (N_p Vs N_{Re}) y con el resultado obtenido en la ecuación 7, se interceptó la curva N° 3 resultando $N_p = 1.2$ (ver anexo 2).

Finalmente se halla la potencia consumida por el sistema agitador despejando P_a de la ecuación 8.

$$P_a = N_p \times \rho \times N^3 \times d_2^5 \quad (9)$$

$$P_a = \left[(1.2) \left(990 \frac{Kg}{m^3} \right) (1.5s^{-1})^3 (0.81m)^5 \right] = 1.398 kW \approx 1.87 HP$$

4.3.1 Cálculo de la potencia de diseño

Esta es la potencia real consumida por el sistema agitador y la que finalmente se utilizará para el cálculo del torque generado por la máquina. En este cálculo se debe tener en cuenta las eficiencias del reductor de velocidad y del rodamiento como se aprecia en la ecuación 10.

Datos

Las siguientes don las eficiencias del reductor de velocidad y la eficiencia del rodamiento.

$n_{Reductor} = 98\%$ (Para reductores de engranes cilíndricos de 1 etapa, referencia R, F y K¹⁶)

$n_{Rodamiento} = 90\%$ (Según el ASA¹⁷).

Remplazando el resultado de la ecuación 9 en la ecuación 10 se obtuvo:

$$P_d = \left[\frac{P_a}{n_{Reductor} \times n_{Rodamiento}} \right] \quad (10)$$

$$P_d = 1.585 \text{ kW} \approx 2.12 \text{ HP}$$

Se toma como potencia 3 HP, ya que comercialmente no se encuentran motores de 2.5 HP.

4.3 ETAPA 2. CALCULO DE ESFUERZOS Y CARGAS

Para realizar el cálculo de los esfuerzos y las cargas que soportará el eje de agitado¹⁸ y los componentes principales de la estructura del sistema, se realizó el análisis de esfuerzos cortantes. Con el software MDSOLID 3.5, se hallaron los

¹⁶ MANUAL SEW EURODRIVE. Reductores y motorreductores. Edición 07/2006. p. 46

¹⁷ MORING, VIRGIL.,F. Diseño de elementos de máquinas. Universidad de North Carolina. p. 441

¹⁸ Eje de agitado: está compuesto por la espiga de sujeción, el eje hueco y el sistema propulsor

momentos máximos de flexión y cargas máximas cortantes para las vigas y la placa soporte como se puede ver a continuación.

4.3.1 Diseño del eje de agitado

Las principales especificaciones que deben seguirse en el diseño de un eje de transmisión son *la potencia* que debe transmitirse y *la velocidad de rotación* del eje¹⁹.

Las siguientes son las ecuaciones de potencia de diseño y velocidad angular del eje de agitado.

$$P_d = T \times \omega \quad (11)$$

$$\omega = 2\pi(1.5 \text{ Hertz}) \quad (12)$$

$$T = \left[\frac{1585 \text{ W}}{2 \times \pi \times 1.5 \text{ s}^{-1}} \right] = 168.2 \text{ Nm}$$

Donde:

P_d : Potencia de diseño

T : Momento de torsión

ω : Velocidad angular

¹⁹BEER, F. y JOHNSTON, E. R..Mecánica de materiales. Colombia:McGRAW-HILL, 1981. Primera Edición.
p. 121

4.3.1.1 Cálculo y selección del material para la espiga de sujeción

En un diseño típico de ejes se usa generalmente un $n = 2^{20}$. En este caso se utilizó un factor de diseño es $n = 5$ para la espiga de sujeción, ya que el ambiente en el cual operará el sistema, presenta mucha humedad y el fluido con el cual tendrá contacto, presenta alto grado corrosivo. Además existen concentraciones de esfuerzos asociados a las uniones por masa (soldaduras).

Se selecciona para el diseño de la espiga de sujeción un acero ASTM 1045 como se muestra en el anexo 10.

Primero calculamos la espiga de sujeción para poder conocer el diámetro interno del eje hueco gracias a la ecuación 13.

Datos

$$n = 5$$

$M = 0$; No existen fuerzas transversales aplicadas a la espiga de sujeción.

$$S_y = 531 \text{ Mpa}; \text{ para un acero ASTM 1045}$$

$$T = 168.2 \text{ Nm}$$

Ecuación de diseño para ejes sólidos²¹

$$d_{\text{espiga}} = \left\{ \frac{32n}{\pi} \sqrt{[(K_t M / S_n)^2 + 3/4(T/S_y)]^2} \right\}^{1/3} \quad (13)$$

²⁰MOTT ROBERT., L.Diseño de elementos de máquinas. University of Dayton. México, 2006. p. 546

²¹MOTT ROBERT L. Diseño de elementos de máquinas.University of Dayton. México, 2006. p. 548

$$d_{espiga} = \left\{ \frac{32(5)}{\pi} \sqrt{\left(\frac{3}{4}\right) \left[\left(\frac{168.2 Nm}{531 \times 10^6 \frac{N}{m^2}} \right) \right]^2} \right\}^{1/3} = 24.1 mm$$

Donde:

n : Factor de diseño

M : Momento flector

K_t : Concentración de esfuerzos asociados a la geometría de la pieza

S_n : Fatiga asociada a factores ambientales

T : Momento de torsión

S_y : Resistencia a la fluencia

Se selecciona un $d_{espiga} = 38.14 mm$, que corresponde al diámetro interior del eje de agitado.

Formula de torsión para la espiga de sujeción (ecuación 14)

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{TC}{J} \quad (14)$$

$$n = \frac{\tau_y}{\tau_{m\acute{a}x}} \quad (15)$$

$$J = \pi/2 (C^2) \quad (16)$$

Donde:

$\tau_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo cortante máximo

τ_y : Esfuerzo cortante máximo admisible o resistencia a la fluencia

C : Radio de la espiga de sujeción

J : Momento polar de inercia para un eje sólido (espiga de sujeción)

$$\tau_{m\acute{a}x} = \left[\frac{(168.2Nm)(0.01907m)}{\frac{\pi}{2}(0.01907m)^4} \right] = 15.44 \text{ Mpa}$$

Luego de obtener el esfuerzo cortante máximo fue comparado con la resistencia a la fluencia y se observa que el cálculo cumple con las exigencias de diseno para la espiga de sujeción (ecuación 17).

$$\tau_{m\acute{a}x}(15.44 \text{ Mpa}) < (541 \text{ Mpa})\tau_y \quad (17)$$

4.3.1.2 Cálculo y selección del material para el eje hueco

Este elemento hace parte del eje de agitado y es donde va alojada la espiga de sujeción previamente calculada. Ver plano N 2014-00 - elementos 7 y 8 del anexo 27.

Para este componente se selecciona una tubería de acero al carbono ASTM – A106 GR B Schedule 80 que se muestra en el anexo 11.

Datos

$$D_2 = 48.3 \text{ mm}$$

$$D_1 = 38.14 \text{ mm}$$

$$C_2 = 24.15 \text{ mm}$$

$$C_1 = 19.07 \text{ mm}$$

$$T = 168.2 \text{ Nm}$$

Como este elemento del eje de agitado trata de un eje hueco, entonces el momento polar de inercia viene dado por la ecuación 18.

$$J = \frac{\pi}{2}(c_2^4 - c_1^4) \quad (18)$$

Donde:

D_2 : Diámetro exterior del eje

D_1 : Diámetro interior del eje

C_2 : Radio exterior

C_1 : Radio interior

Utilizando la ecuación 14 y 18 respectivamente, se obtuvo el esfuerzo cortante máximo.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \left[\frac{(168.2 \text{ Nm})(0.02415 \text{ m})}{\frac{\pi}{2}[(0.02415 \text{ m})^4 - (0.01907 \text{ m})^4]} \right] = 12.45 \text{ Mpa}$$

$$\tau_{\text{máx}}(12.45 \text{ Mpa}) < (241 \text{ Mpa}) \tau_y \quad (19)$$

Con esto se concluye que para el momento de torsión (T), los esfuerzos cortantes, tanto de la espiga de sujeción como del eje hueco se encuentran por debajo de la resistencia a la fluencia τ_y , es decir, por debajo del límite elástico; Así, no habrá deformaciones permanentes y se cumple con los requerimientos de diseño.

4.4.3.2 Cálculo de las dimensiones de los propulsores

El propulsor o rodete está compuesto por un buje y unas palas planas inclinadas a 45° que entran en unas ranuras del buje al cual van soldadas. Ver anexo 27 plano N° 2014-06.

Según la norma DIN 28131, las dimensiones de los propulsores están relacionadas como se muestra en la tabla 12.

Con los siguientes datos se halló la altura y longitud de un propulsor, y luego se procedió al cálculo del espesor.

Datos

Material de diseño de los propulsores: Acero AISI-ASTM 1045 (Ver anexo 10)

Diámetro del tanque de agitado $d_1 = 2400 \text{ mm}$.

Diámetro del agitador $d_2 = 810 \text{ mm}$

$$r_1 = 38 \text{ mm}$$

$$r_2 = 405 \text{ mm}$$

$$P_{f-prop} = 13 \text{ mm}$$

$$\omega = 9.42 \text{ rev/s} \text{ (Ver ecuación 12)}$$

Ecuaciones para el cálculo de la altura y longitud de los propulsores

$$h_3 = (d_2)(0.177) \quad (24)$$

$$L = (r_2 - r_1) + P_{f-prop} \quad (25)$$

Donde:

h_3 : Altura del propulsor

L : Longitud de un propulsor

r_1 : Radio del buje propulsor

r_2 : Radio del agitador

P_{f-prop} : Profundidad de entrada del impulsor en el buje propulsor

Reemplazando los valores de d_2 , r_1 , r_2 y P_{f-prop} en las ecuaciones 24 y 25 se tiene:

$$h_3 = 0.143 \text{ m}$$

$$L = 0.380 \text{ m}$$

El cálculo del espesor de los propulsores se realiza de la siguiente forma:

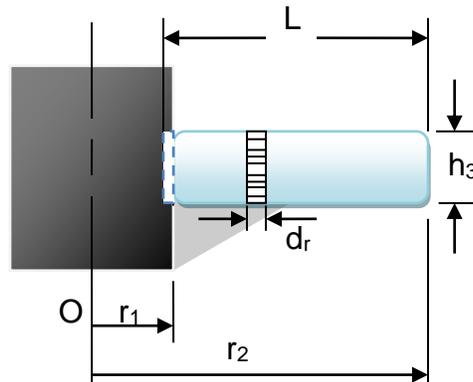


Figura 28. Variación de la velocidad del fluido con respecto a la distancia del propulsor

Como el fluido ejerce una fuerza de arrastre sobre los propulsores, por facilidad de cálculos tomamos sólo uno como se muestra en la figura 28. En este caso la fuerza de arrastre varía con la longitud del propulsor.

Para este cálculo utilizaremos la siguiente fórmula²².

$$F_D = \left[(C_D) \left(\frac{\rho V_{t-rodete}^2}{2} \right) \right] A_{def} \quad (26)$$

$$V_{t-rodete} = \omega * r_2 \quad (27)$$

$$A_{def} = 143r \quad (28)$$

Donde:

²² FOX R., ALAN M.; Introducción a la mecánica de fluidos; McGraw-Hill; Segunda edición; México; 1989, p.424-428.

- F_D : Fuerza de arrastre o de rozamiento
 C_D : Coeficiente de arrastre
 ρ : Densidad del abono orgánico
 $V_{t-rodete}$: Velocidad de la corriente libre del fluido en relación al propulsor (velocidad tangencial)
 A_{def} : Área de contacto de la pieza (propulsor) con el fluido

Nota: el C_D depende de varios factores como la geometría del cuerpo, el acabado superficial, el número de Reynolds entre otras como se muestra en el anexo 8.

Multiplicando la ecuación 26 a ambos miembros por d_r e integrando entre los límites r_1 y r_2 se tiene como resultado lo siguiente:

$$\int_{r_1}^{r_2} F_D d_r = \int_{r_1}^{r_2} C_D \rho (V_{t-rodete})^2 A_{def} d_r \quad (29)$$

Sustituyendo los datos anteriores y las ecuaciones 26, 27 en la ecuación 28; y evaluando entre los límites se obtiene el siguiente resultado:

$$\int_{r_1}^{r_2} F_D d_r = \int_{r_1}^{r_2} C_D \rho (\omega r)^2 A_{def} d_r$$

$$M_o = \int_{0.038}^{0.405} (1.2) \left(990 \frac{Kg}{m^3}\right) (9.425 s^{-1})^2 (0.143m) r^3 dr = 50.7 Nm \quad (30)$$

Luego se reemplaza el resultado de la ecuación 30 en la ecuación de flexión²³

$$S_y = \left(\frac{nM_o C}{I_x} \right) = \frac{nM_o \left(\frac{e}{2} \right)}{\left(\frac{h_3 e^3}{12} \right)} \quad (31)$$

Donde:

M_o : Magnitud del momento de flexión con respecto al origen de coordenadas

C : Distancia del eje neutro al punto de la periferia de la geometría rectangular en metros.

I_x : Momento de inercia del área transversal con respecto al eje neutro en metros a la cuatro.

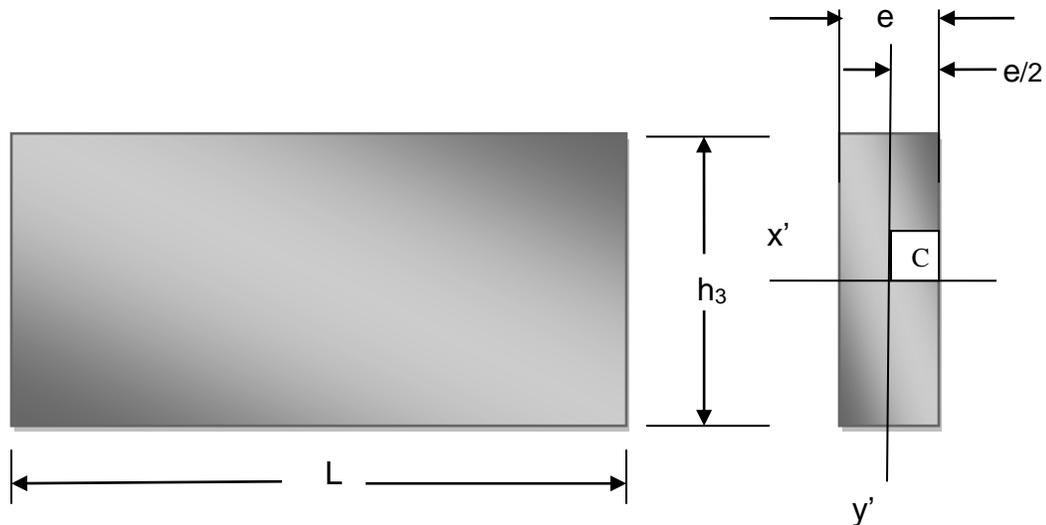


Figura 29. Momento polar de inercia para un rectángulo

²³ BEER, F. y JOHNSTON, E. R..Mecánica de materiales. Colombia: McGRAW-HILL, 1981. Primera Edición.
p. 157

Como el propulsor tiene forma rectangular entonces el momento polar de inercia se presenta en la ecuación 32.

$$I_{y'} = \frac{h_3 e^3}{12} \quad (32)$$

Se tomo como factor de diseño $n = 5$ y sustituyendo el valor de la ecuación 30 y la ecuación 32 en la ecuación 31 se obtuvo:

$$S_y = \frac{n M_o \left(\frac{e}{2} \right)}{\left(\frac{h_3 e^3}{12} \right)}$$

$$e = \sqrt{\frac{6(5)(50.7Nm)}{(0.143m)(531 \times 10^6 N/m^2)}} = 4.5 \text{ mm}$$

Por facilidad de construcción de los propulsores se tomo un espesor de

$$e = 6.35 \text{ mm} \approx 1/4 \text{ in}$$

4.4.4 Cálculo y selección de la chaveta

Como la espiga de sujeción tiene un diámetro menor de 6.1/2 in, seleccionamos una chaveta con las dimensiones mostradas en la figura 30 guiándonos del anexo 18.

Datos

Material : Acero AISI-SAE 1020. Estirado en frio

$S_y = 393 \text{ MPa}$ (Ver anexo 10)

$n = 3$; es adecuado en aplicaciones industriales típicas

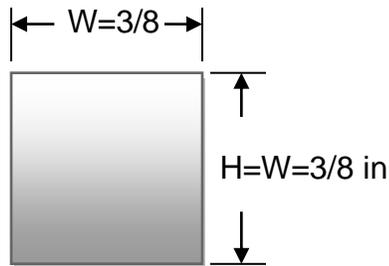


Figura 30. Dimensiones de la chaveta cuadrada según la norma ANSI B17.1-1967

Se procedió a realizar el análisis de esfuerzos para determinar la longitud de la cuña (*Según Mott.*)

$$F = \frac{2T}{D} \quad (20)$$

$$\tau = \frac{F}{A_s} \quad (21)$$

Sustituyendo la ecuación 20 en la ecuación 21 se obtiene la ecuación 22.

$$\tau = \frac{2T}{DWL} \quad (22)$$

Donde:

- F : Fuerza cortante
 D : Diámetro del eje
 τ : Esfuerzo cortante
 A_s : Área de carga
 W : Ancho de la chaveta (ver figura 33)
 L : Longitud de la chaveta

En los diseños se puede igualar el esfuerzo cortante y el esfuerzo de diseño al corte τ_d , para teoría de falla por esfuerzo cortante máximo $\tau_{m\acute{a}x}$, utilizando la ecuación 22²⁴.

$$\tau_d = \frac{0.5S_y}{n} \quad (23)$$

La cuña que vamos a diseñar tiene menor resistencia de su material que la espiga de sujeción y el cubo del reductor de velocidad, entonces sustituyendo la ecuación 22 en la ecuación 23, se obtuvo:

$$L = \frac{2Tn}{0.5WDS_y} = \left[\frac{(2)(168.2Nm)(3)}{(0.5)(9.525 \times 10^{-3}m)(0.038 m) \left(393 \times 10^6 \frac{N}{m^2}\right)} \right]$$

$$L = 14.2 \text{ mm}$$

Este resultado satisface los esfuerzos cortantes y de empuje.

²⁴MOTT ROBERT L.; Diseño de elementos de máquinas. University of Dayton. México, 2006. p. 499

Como $L_{real} \geq L$ y por facilidad de construcción se tomó una longitud $L_{real} = 30 \text{ mm}$ que ofrezca mayor área de carga y por consecuencia mejor transmisión de movimiento del reductor a la espiga de sujeción.

Nota: El prisionero por tabla es de $3/8 \text{ in} \approx 9.525 \text{ mm}$ (Ver anexo 18).

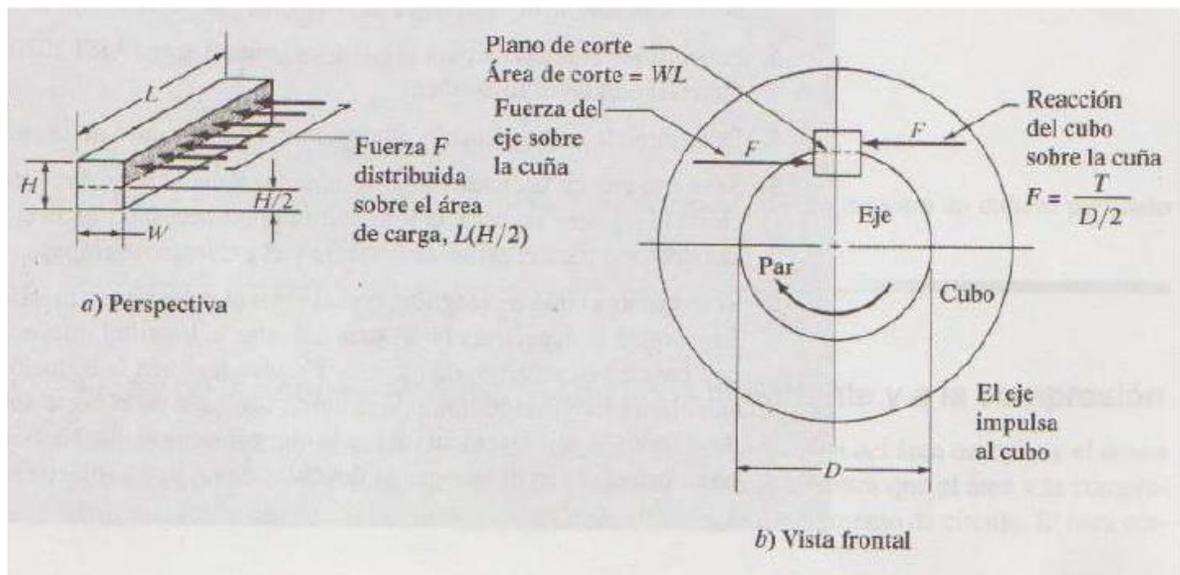


Figura 31. Fuerzas sobre una chaveta

Fuente: MOTT ROBERT L.; Diseño de elementos de máquinas. University of Dayton. México, 2006; p. 499

4.4.5 Cálculo del espesor de las placas deflectoras

Las placas deflectoras son componentes de suma importancia en el diseño de un sistema de agitación, ya que absorben energía del flujo circulatorio evitando la presencia de vórtices que son perjudiciales para el funcionamiento de la máquina. Además provocan turbulencia que ocasiona buena suspensión de partículas en el fluido.

De acuerdo a la figura 3, se obtienen los resultados de las siguientes ecuaciones para las placas deflectoras.

$$\delta_1 = (d_1)(0.1) \quad (33)$$

$$\delta_1 = 0.24 \text{ m}$$

$$\delta_2 = (d_1)(0.02) \quad (34)$$

$$\delta_2 = 0.048 \text{ m}$$

$$V_{def} = \frac{1}{10} V_{t-rodete} \quad (35)$$

$$G_{def} = \frac{h_1}{\delta_1} \quad (36)$$

Donde:

δ_1 : Ancho de la placa deflectora

δ_2 : Holgura entre la placa deflectora y el tanque de agitado

V_{def} : Velocidad del fluido en los alrededores de la placa

$V_{t-rodete}$: Velocidad tangencial del rodete o sistema propulsor

G_{def} : Geometría del área mojada de la placa deflectora

Datos

Material : Concreto

$S_y = 8430 \text{ MPa}$ (Ver anexo 17)

$n = 3$

Sustituyendo la ecuación 33 en la ecuación 36 se tiene:

$$G_{def} = \frac{h_1}{\delta_1} = \left(\frac{2400 \text{ mm}}{240 \text{ mm}} \right)$$

$$G_{def} = 10$$

Tomando el valor de la geometría del área mojada de la placa deflectora G_{def} en el eje x , y haciendo coincidir con la función $y = f(x)$, se halla el valor correspondiente del coeficiente de arrastre C_D . (Ver anexo 9)

Entonces;

$$C_D = 1.3 \quad (37)$$

Sustituyendo la ecuación 27 en la ecuación 35, se obtuvo la velocidad aproximada del fluido con respecto a una placa deflectora.

$$V_{def} = \left[\left(\frac{1}{10} \right) (3.815 \text{ m/s}) \right] = 0.3815 \text{ m/s} \quad (38)$$

Para calcular el área mojada de la placa deflectora se utilizó la ecuación 39.

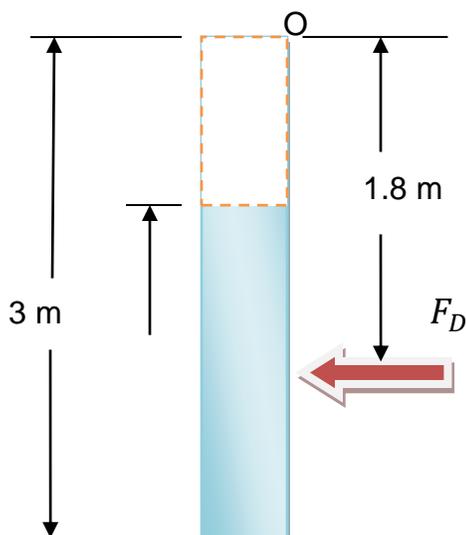
$$A_{def} = h_1 \times \delta_1 \quad (39)$$

$$A_{def} = (2400 \text{ mm})(240 \text{ mm}) = 0.576 \text{ m}^2$$

Luego se procedió al cálculo de la fuerza de arrastre que efectúa el abono orgánico sobre los baffles o placas deflectoras, para así hallar el momento flector ejercido por el abono orgánico. La fuerza que ejerce el abono sobre las placas deflectoras es en el centroide del área mojada como se aprecia en la figura 32.

Reemplazando en la ecuación 26 la densidad del abono orgánico y los valores obtenidos en las ecuaciones 37, 38 y 39 se tiene:

$$F_D = \left\{ (1.3) \left[\frac{(990 \text{ Kg/m}^3) (0.3815 \text{ m/s})^2}{2} \right] (0.576 \text{ m}^2) \right\} = 54 \text{ N}$$



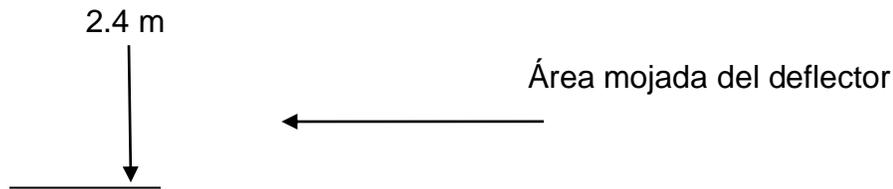


Figura 32. Fuerza ejercida por el abono orgánico sobre una placa deflectora

$$M_O = (F_D \times 1.8 \text{ m}) \quad (40)$$

$$M_O = 54 \text{ N} \times 1.8 \text{ m}$$

$$M_O = 97.2 \text{ Nm}$$

Sustituyendo en la ecuación 31 el valor obtenido de la ecuación 40 resulta:

$$e = \sqrt{\left[\frac{(6)(5)(97.2 \text{ Nm})}{(3\text{m})(8430 \times 10^6 \text{ N/m}^2)} \right]} = 0.34 \text{ mm}$$

Por facilidad de construcción se tomó $e = 50 \text{ mm}$ para las placas deflectoras.

4.4.6 Selección de los rodamientos

Se instalará un rodamiento de bolas rígidas con base de brida cuadrada en la parte de abajo de la placa soporte del sistema agitador. Esto para garantizar una buena alineación del sistema espiga de sujeción y el cubo del reductor de

velocidad. Además evitar al máximo vibraciones en el motorreductor, ya que el sistema propulsor se encuentra suspendido como se muestra en la figura 33.

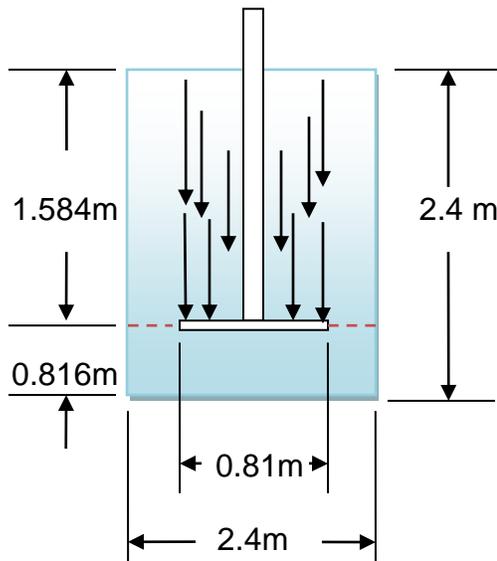


Figura 33. Fuerza del abono orgánico sobre el sistema propulsor

En primer lugar es necesario calcular el volumen de columna de fluido (abono orgánico) que esta sobre el agitador o sistema propulsor (ecuación 41).

$$V_f = (A_{prop})(h_{prop}) \quad (41)$$

$$P_h = \frac{F_f}{A_{prop}} = \rho g h_{prop} \quad (42)$$

Donde:

V_f : Volumen del fluido sobre el sistema propulsor

h_{prop} : Altura de la columna del fluido sobre el propulsor

F_f : Fuerza del fluido sobre los sobre el sistema propulsor

De la ecuación 41 y los datos de la figura 38, se obtiene:

$$V_f = \left[\frac{\pi(0.81 \text{ m})^2}{4} \right] (1.584 \text{ m}) = 0.82 \text{ m}^3$$

Despejando la fuerza del fluido sobre el propulsor de la ecuación 42 resulta que:

$$F_f = \rho g V_f \quad (43)$$

$$F_f = \left(990 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (0.82 \text{ m}^3) = 7964 \text{ N} = 7.964 \text{ kN}$$

En este caso el rodamiento sólo está sometido a fuerzas estáticas de origen axial F_z representadas por el conjunto motorreductor y el peso del fluido sobre el propulsor. Por otra parte, como el eje de agitado no está sometido a cargas transversales o radiales F_x , se despreciarán estas fuerzas en los rodamientos.

Calculo de la capacidad de carga estática equivalente F_{es} ²⁵

$$F_{es} = C_1 F_x + C_2 F_z \quad (44)$$

Donde:

²⁵MORING VIRGILF.; Diseño de elementos de máquina. Universidad de North Carolina. p. 442 - 443

- F_x : Carga radial
- F_z : Carga de empuje o axial
- C_1 y C_2 : Constantes que vienen dadas en los catálogos y que dependen del tipo de cojinete.

Datos

$C_1 = 0.6$ y $C_2 = 0.5$; Para un rodamiento rígido de bolas de una sola hilera profunda²⁶.

$$F_{motorreductor} = 510.12 \text{ N} \quad (45)$$

Sustituyendo en la ecuación 46, los valores de las ecuaciones 45 y 43, se obtuvo la carga axial que puede soportar el rodamiento (ecuación 46).

$$F_z = F_{motorreductor} + F_f \quad (46)$$

$$F_z = (510.12 + 7964)N = 8474.12 \text{ N}$$

Luego reemplazando este valor en la ecuación 44 se tiene:

$$F_{es} = C_1 F_x + C_2 F_z$$

²⁶MORING VIRGILF.; Diseño de elementos de máquina. Universidad de North Carolina. p. 442

$$F_{es} = (0.5)(8474.12 \text{ N}) = 4237.06 \text{ N} \approx 4.237 \text{ kN}$$

Se selecciono un rodamiento rígido de bolas con soporte de brida cuadrada (tipo chumacera) de diámetro interior 38.1mm y capacidad de carga est tica de 18kN²⁷.

4.4.7 Cálculo de las vigas y selección del perfil de ala ancha

El objetivo del cálculo y la selección del perfil de viga es evitar que estas no fallen bajo una carga dada, garantizando buena resistencia, estabilidad de la estructura mientras se selecciona un perfil económico.

Datos

Material de la viga : Acero A-36

$$S_y = \tau_y = 250 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_u = 400 \text{ MPa}$$

$$L_{viga} = 2.684 \text{ m}$$

$$n = 2$$

Entonces el esfuerzo cortante admisible es:

$$n = \frac{\tau_y}{\tau_{adm}}$$

²⁷ FAG; Catalogo WL 41 520/3 SB. p. 516

$$\tau_{adm} = \frac{\tau_y}{n} = \frac{250 \text{ MPa}}{2}$$

$$\tau_{adm} = 125 \text{ MPa}$$

Y, el esfuerzo normal admisible viene dado por:

$$n = \frac{\sigma_u}{\sigma_{adm}} \rightarrow \sigma_{adm} = \frac{400 \text{ MPa}}{2}$$

$$\sigma_{adm} = 200 \text{ MPa}$$

Entonces, se calculo la carga estática centrada con la siguiente información

Datos

$$P_{Rodamiento} = 9 \text{ N}$$

$$P_{Motorreductor} = 510.12 \text{ N}$$

$$P_f = F_f = 7964 \text{ N}$$

$$P_{Eje de agitado} = 120 \text{ N}$$

$$P_{Impulsor} = 80 \text{ N}$$

$$P_{placa soporte} = 792 \text{ N}$$

$$P_{Viga} = \left[\left(\frac{P_{Rodam} + P_{Motorred} + P_{Eje de agitado} + P_{Impulsor} + P_f + P_{Placa sopt}}{2} \right) \right] \text{ N} \quad (47)$$

Reemplazando en la ecuación 47 los valores de las cargas anteriores se obtuvo el siguiente resultado.

$$P_{Viga} = \left(\frac{(9 + 510.12 + 120 + 80 + 7964 + 792)}{2} \right) = 4738 \text{ N}$$

$$P_{Viga} \approx 4.738 \text{ kN}$$

Luego se procedió a calcular las cargas distribuidas que actúan sobre una de las vigas reemplazando los siguientes datos en la ecuación 48.

Datos

$$P_{Pasamanos} = 339.2 \text{ N}$$

$$P_{Piso} = 309.41 \text{ N}$$

$$6P_{Angulo\ soporte} = 249 \text{ N}$$

$$L_{Viga} = 2.684 \text{ m}$$

$$P_{distribuida} = \left[\left(\frac{P_{Pasamanos} + P_{Piso} + 6P_{Angulo\ soporte}}{2(L_{Viga})} \right) \right] \text{ N} \quad (48)$$

$$P_{distribuida} = 167.22 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Procedimos hacer uso del software MDSOLIDS 3.5 y obtuvimos como resultado el momento flector máximo y la fuerza cortante máxima producidas en una de las vigas de soporte del sistema agitador como se puede observar en el anexo 21.

$$M_{m\acute{a}x} = 3328 \text{ Nm} \quad V_{m\acute{a}x} = 2592$$

- Cálculo del módulo elástico de la sección (S):

Para $M_{m\acute{a}x} = 3328 \text{ Nm}$ y $\sigma_{adm} = 200 \times 10^6 \text{ Pa}$, el mínimo S aceptable es:

$$S_{m\acute{i}n} = \frac{M_{m\acute{a}x}}{\sigma_{adm}}$$

$$S_{m\acute{i}n} = \frac{3328 \text{ Nm}}{200 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} = (1.664 \times 10^{-5}) \text{ m}^3 \times \frac{\text{in}^3}{(0.0254)^3} = 1.015 \text{ in}^3$$

- Elección del perfil de ala ancha (W):

$$S > S_{m\acute{i}n}$$

Tabla 13. Lista de perfiles W

Perfil	$S_{perfil}(\text{in})^3$
W8x10	7.81
W6x15	9.72
W6x12	7.31
W5x19	10.2

W5x16	8.51
W4x13	5.46

Fuente: MOTT ROBERT L.; Diseño de elementos de máquinas. University of Dayton. México, 2006. Apéndice A-33 (tabla A16-3)

Tabla 14. Dimensiones de la viga en pulgadas y en milímetros

Partes de la viga	Dimensiones (in)	Dimensiones (mm)
Peralte (A_T)	4.160	105.66
Patín (b)	4.060	103.124
Espesor del alma (t_A)	0.280	7.112
Espesor del patín (t_P)	0.345	8.763

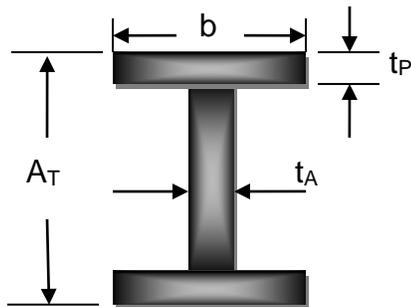


Figura 34. Designación de dimensiones del perfil de viga W

Se seleccionó el perfil W4x13 por ser el más liviano y económico como se muestra en la tabla 13.

- Evaluación del perfil W4x13 bajo esfuerzo cortante:

Se debe cumplir $\tau_{m\acute{a}x} < \tau_{adm}$. El $\tau_{m\acute{a}x}$ se presenta en la sección A, B donde existe $|V_{m\acute{a}x}|$. (Ver figura 40)

$$A_{Alma} = A_T \times t_A$$

$$A_{Alma} = (4.16 \text{ in} \times 0.28 \text{ in}) = 1.165 \text{ in}^2$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{|V_{m\acute{a}x}|}{A_{Alma}} = \frac{2592 \text{ N}}{7.516 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 3.449 \text{ MPa}$$

Con lo que se cumple $\tau_{m\acute{a}x}(3.449 \text{ MPa}) < (125 \text{ MPa})\tau_{adm}$, y el perfil seleccionado supera la prueba de cortante.

➤ Evaluación del perfil W4x13 bajo esfuerzo normal en la unión ala-alma:

En dicho punto se debe verificar que $\sigma_{m\acute{a}x} < \sigma_{adm}$, en la sección $L_{viga}/2$ donde el momento flector es máximo.

$$L_{viga}/2 \left\{ \begin{array}{l} M_{m\acute{a}x} = 3328 \text{ Nm} \\ V = 2368 \text{ N} \end{array} \right.$$

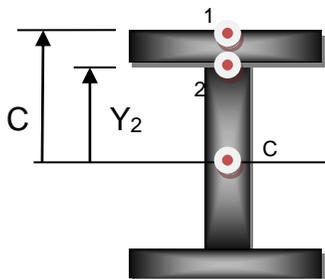


Figura 35. Puntos de esfuerzos en un perfil W

Esfuerzo normal en el punto 1:

$$\sigma_1 = \frac{M_{m\acute{a}x}}{S_{perfil}} = \frac{3328 \text{ Nm}}{8.947 \times 10^{-5} \text{ m}^3}$$

$$\sigma_1 = 37.2 \text{ MPa}$$

Esfuerzo normal en el punto 2:

$$\sigma_2 = \frac{Y_2 \times \sigma_1}{C} = \left(\frac{0.044 \text{ m} \times 37196826 \text{ N/m}^2}{0.0528 \text{ m}} \right)$$

$$\sigma_2 = 31 \text{ MPa (Compresi3n)}$$

Esfuerzo cortante en el punto 2:

$$\tau_2 = \frac{V}{A_{Alma}} = \left(\frac{2368 \text{ N}}{7.516 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \right)$$

$$\tau_2 = 3.15 \text{ MPa}$$

Estado de esfuerzo en el punto 2:

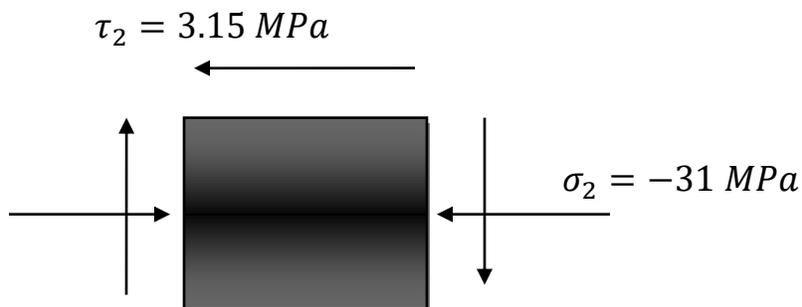




Figura 36. Estado de esfuerzos en la unión ala-alma (punto 2 de la figura 35)

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_x \times \sigma_y}{2} = \frac{-31 \text{ MPa} + 0}{2} = -15.5 \text{ MPa}$$

$$R = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \sqrt{\left(-\frac{31}{2}\right)^2 + (3.15)^2}$$

$$R = 15.82 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_{med} + R = (-15.5 + 15.82) = 0.32 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min} = \sigma_{med} - R = (-15.5 - 15.82) = -31.32 \text{ MPa}$$

En el punto 2 se verifico que:

$$|\sigma_{adm}|(200 \text{ MPa}) > |\sigma_{min}|(31.32 \text{ MPa})$$

Por lo tanto el perfil de viga seleccionada cumple con los requerimientos de dise\u00f1o.

4.4.8 Calculo de la placa soporte

La placa soporte es un elemento en el cual va soportado el motorreductor, el cual se acopla a este por medio de tornillos.

En este caso se utilizó el software MDSOLIDS 3.5 para calcular el momento flector máximo.

Datos

Material de la placa : Acero A-36

$$S_y = 250 \text{ Mpa}$$

$$\rho_{Acero} = 7800 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$L_{Placa} = 0.90 \text{ m}$$

$$M_{Flector} = 1960.07 \text{ Nm}$$

$$n = 3$$

Cargas estáticas transversales que soportar la placa soporte.

$$P_{Rodamiento} = 9 \text{ N}$$

$$P_{Motorreductor} = 510.12 \text{ N}$$

$$P_f = F_f = 7964 \text{ N}$$

$$P_{Eje de agitado} = 120 \text{ N}$$

$$P_{Impulsor} = 80 \text{ N}$$

Ecuación de carga total sobre la placa soporte

$$P_{\text{Sobre la placa soporte}} = [(P_{\text{Rodamiento}}) + (P_{\text{Motorreductor}}) + (P_{\text{Eje de agitado}}) + (P_{\text{Impulsor}}) + (P_f)] \quad (49)$$

Entonces, reemplazando los datos en la ecuación 49 se obtuvo:

$$P_{\text{Sobre la placa soporte}} = 8683 \text{ N} \approx 8.683 \text{ kN}$$

Luego se ingreso la carga sobre la placa soporte en el software MDSOLIDS 3.5 con el fin de hallar el momento flector máximo que produce esta carga como se muestra en la figura 37.

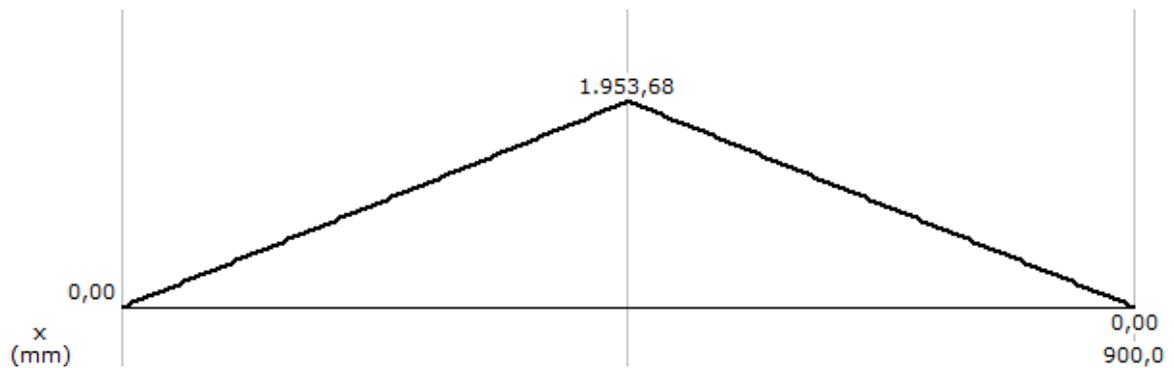


Figura 37. Diagrama de momento flector para la placa soporte

Fuente:Software MDSolids 3.5

Sustituyendo en la ecuación 31 el momento flector máximo, se halló el espesor requerido para la placa soporte como se aprecia a continuación.

$$e = \sqrt{\frac{6(3)(1954 \text{ Nm})}{(0.9 \text{ m})(250 \times 10^6 \text{ N/m}^2)}}$$

$$e = 12.5 \text{ mm} \approx 12.7 \text{ mm}$$

$$e = 1/2 \text{ in}$$

Sustituyendo el valor del $e = 12.7 \text{ mm}$ en la ecuación 50, se obtuvo como resultado el volumen de la placa soporte así:

$$V_{\text{Placa soporte}} = (L_{\text{Placa}})^2(e) \quad (50)$$

$$V_{\text{Placa soporte}} = (0.9 \text{ m})^2(0.0127 \text{ m}) = 0.01029 \text{ m}^3$$

Sustituyendo el resultado de la ecuación 50 y la densidad del acero obtuvimos como respuesta la masa de la placa soporte la cual se puede observar en la ecuación 51.

$$m_{\text{placa soporte}} = \rho_{\text{Acero}} \times V_{\text{Placa soporte}} \quad (51)$$

$$m_{\text{placa soporte}} = \left[\left(7850 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) (0.01029 \text{ m}^3) \right] = 80.77 \text{ Kg}$$

Donde:

$m_{\text{placa soporte}}$: Masa de la placa soporte

ρ_{Acero} : Densidad del acero²⁸

$V_{Placa\ soporte}$: Volumen de la placa

Después se utilizó la ecuación 52 para hallar la carga que soporta la placa soporte.

$$P_{placa\ soporte} = m_{placa\ soporte} \times g \quad (52)$$

$$P_{placa\ soporte} = (80.77\ Kg \times 9.81\ m/s^2) = 792\ N$$

4.5 ETAPA 3. SELECCIÓN DEL MOTORREDUCTOR, DEL RECIPIENTE DE AGITADO Y MODELADO DEL SISTEMA

Como el abono orgánico es un fluido con mucho material sólido, se requiere de un motor que cumpla con las exigencias de fuerza. Estos sistemas de agitado generalmente trabajan a la intemperie por lo que es necesaria la utilización de un motor cerrado que soporte las condiciones ambientales donde operara.

El tanque de agitado seleccionado es abierto, de forma circular y el material de diseño es el concreto.

La unidad reductora que irá acoplada al motor como una sola unidad es de eje hueco y transmisión por engranes rectos para mayor fuerza y resistencia.

²⁸ GERE, M. J. y GOODNO, J. B.; Mecánica de materiales. México, 2006. Séptima edición. Apéndice H (tabla H.1 Pesos y densidad específica); p.991

A continuación podemos ver las características de selección del motor eléctrico y el reductor de velocidad.

4.5.1 Selección del motor eléctrico

Se selecciona un motor eléctrico cerrado de fuerza con las siguientes características.

➤ Datos del motor

Marca: SEW EURODRIVE

Potencia: 3 HP

Velocidad: 1750 rpm

Voltaje: 220 V

Corriente (I):10 A

Frecuencia: 60 Hz

Número de fases: 1

Peso: 12 Kg

4.5.2 Selección del reductor de velocidad

Se selecciona un reductor de velocidad con las siguientes características.

➤ Datos del reductor de velocidad

Marca: SEW EURODRIVE

Rpm: 90

FS: 1.25

Par de torsión: 169 Nm

Potencia de diseño P_d o de entrada máxima (kW): 3 HP

Lubricante: SHELL OMALA 220

Datos

$$FS_1 = 1.25$$

$$FS_2 = 1 \quad (\text{Ver anexo 12 y 13})$$

$$FS = (FS_1)(FS_2) \quad (53)$$

Donde:

FS : Factor de seguridad total

FS_1 : Factor de seguridad asociado al tipo de carga y tiempo de trabajo del dispositivo (horas)

FS_2 : Factor de seguridad asociado a las intermitencias del dispositivo (Ej:cantidad de accionamientos).

Reemplazando los factores de seguridad FS_1 y FS_2 respectivamente en la ecuación 53 se obtuvo la ecuación 54.

$$FS = [(1.25)(1)] = 1.25 \quad (54)$$

Así, hallamos el factor de seguridad total que requiere el reductor de velocidad.

➤ Otros parámetros para la selección

Par de torsión de salida (Nm) = 169 Nm

Potencia de diseño $P_d = 2.237$ kW

Frecuencia de giro a la entrada (N_1) = 1750 rpm

Frecuencia de giro a la salida (N_2) = 90 rpm

Relación de reducción (i) = 19.44

Factor de seguridad total (FS) = 1.25

Reemplazando el valor de la ecuación 54 y la potencia de diseño en kW del ítem de parámetros de selección en la ecuación 55, se tuvo como resultado la potencia equivalente **PE** para el reductor.

$$PE = (P_d \times FS) \quad (55)$$

$$PE = (2.237 \text{ kW})(1.25) = 2.80 \text{ kW} \approx 3 \text{ HP}$$

En la práctica, es difícil que una unidad de reducción realice su trabajo en condiciones ideales. Por lo tanto la potencia nominal o potencia máxima requerida por el sistema agitador (P_d), se multiplicado por un el factor de servicio total (**FS**), a fin de obtener la potencia requerida equivalente para el dispositivo tal como se muestra en la ecuación 55.

Nota: se adquieren el motor y el reductor ensamblados como un motorreductor.

4.5.3 Diseño del tanque de agitado

Para el diseño del tanque de agitado, se decidió utilizar el modelo ilustrado en la figura 39 por facilidad de construcción, economía y sobre todo buena funcionalidad en el mezclado.

Los modelos que se aprecian en la figura 38 son sin embargo muy utilizados en fincas ganaderas, pero ambos cuentan con errores de diseño dado que el recipiente de base esférica mostrado en la figura 38(a) presenta estancamiento de las partículas sólidas en el fondo, y el modelo de la figura 38(b), de igual manera presenta estancamiento pero en las esquinas del fondo, donde las corrientes chocan y se devuelven contra el rodete del agitador.

En efecto, el diseño seleccionado que se muestra en la figura 39, presenta una base plana que evita que las partículas del abono se queden en el fondo y cuenta con radios en los bordes que permiten que las corrientes fluyan libremente mejorando la presencia de trayectoria axial y la suspensión de partículas sólidas del abono orgánico. Finalmente, la fabricación de estos radios en las bases evitará concentración de esfuerzos ocasionados por las fuerzas de las partículas del flujo del fluido.

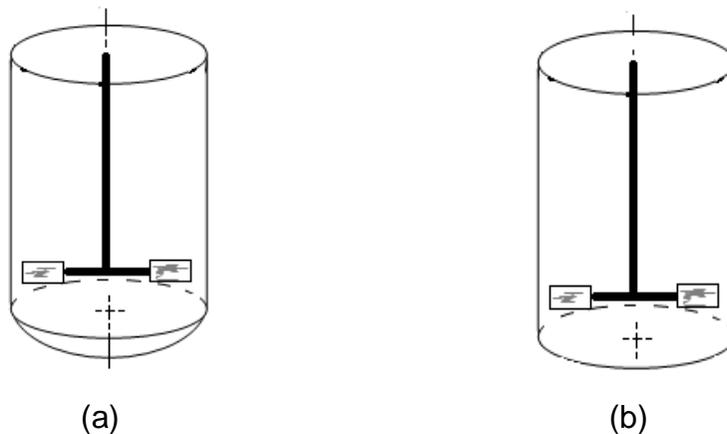


Figura 38. Recipientes de agitación: (a) cilíndrico de base esférica, (b) cilíndrico de base plana

La figura 38(a) presenta las siguientes características:

- Mayor facilidad de penetración de las corrientes del fluido.
- Esta forma geométrica permite un menor consumo de energía y tiempo de agitación.
- Recipiente cilíndrico de agitación abierto.
- Acumulación de sedimentos y estancamientos de las corrientes en el fondo.
- Difícil fabricación.
- Alto costo de fabricación.

La figura 38(b) presenta las siguientes características:

- Menor facilidad de penetración de las corrientes del fluido.
- Este recipiente por su geometría requiere un mayor consumo de potencia del sistema y mayor tiempo de agitado.
- Los rincones escarpados retienen partículas sólidas.
- Recipiente cilíndrico de agitación abierto.
- Fácil fabricación.
- Bajo costo de fabricación.

La tabla que se presenta a continuación permite saber en qué régimen se encuentra el abono orgánico dentro del recipiente de agitado.

Con el número de Reynolds N_{Re} obtenido en la ecuación 7 y la tabla 15, podemos decir que la mezcla dentro del recipiente se encuentra en régimen transitorio.

Tabla 15. Número de Reynolds para fluidos dentro de un recipiente de agitado

Fuente: MACCABE WARREN L., SMITH JULIAN C., HARRIOTT PETER.;

Régimen laminar	$N_{Re} < 10$
Régimen de transición	$10 < N_{Re} < 10^4$
Régimen turbulento	$N_{Re} > 10^4$

Operaciones Unitarias en Ingeniería Química; McGraw-Hill.; Madrid; p. 164

4.4.3.1 Capacidad del tanque de agitado

Es el volumen de abono orgánico total que se puede almacenarse dentro del recipiente.

Es importante que a la hora de almacenar el fluido en el tanque este guarde una proporción 1:1 en lo que concierne los parámetro de diámetro del tanque y la altura del líquido como se muestra en la tabla 12 columna 3.

➤ Volumen total del tanque

$$V_{Total\ recip} = \frac{\pi(d_1^2)(h_T)}{4} \quad (56)$$

$$V_{Total\ recip} = 13.57\text{m}^3 = 13571\text{L}$$

Donde:

$V_{Total\ recip}$: Volumen total del tanque de agitado

d_1 : Diámetro del tanque

h_T : Altura total del tanque

➤ Volumen de abono orgánico en el tanque

Reemplazando los valores de la tabla 12 en la ecuación 57 se obtuvo el volumen total que ocupa el abono orgánico.

$$V_{Total\ abono\ orgánico} = \frac{\pi(d_1^2)(h_1)}{4} \quad (57)$$

$$V_{Total\ abono\ orgánico} = 10.857m^3 = 10857\ L$$

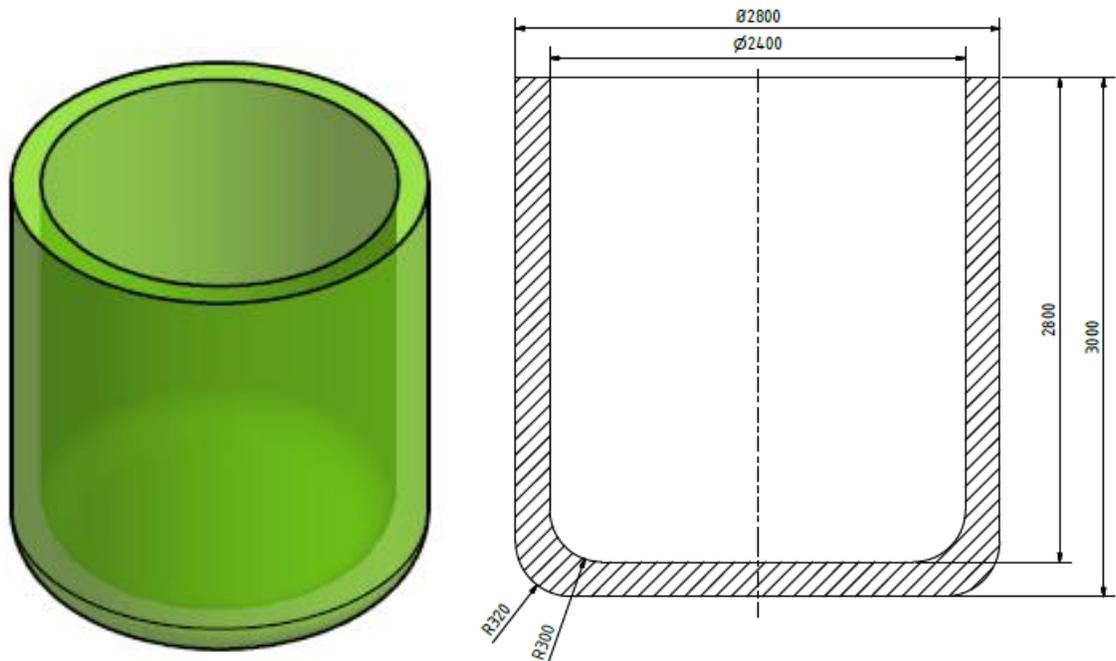


Figura 39. Recipiente de agitado cilíndrico de base plana con radios en las esquinas.

5. PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO (PMP)

5.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA EL SISTEMA AGITADOR

5.1.1 Descripción

Este sistema está compuesto por un agitador, un tanque de agitado provisto de placas deflectoras, de una estructura soporte y plataforma de seguridad.

Ver plano N° 2014-00. Anexo 27

5.1.2 Procedimiento del PMP

Para un buen mantenimiento se deben tener en cuenta los siguientes pasos:

- Para realizar los servicios de mantenimiento, de reparación, de ajuste o de comprobación del sistema agitador, asegúrese de que el interruptor principal haya sido desconectado y este bloqueado en posición de apagado.
- No toque ningún mecanismo de la máquina cuando esta se encuentre en movimiento.
- Los trabajos de reparación deben ser efectuados por personas preparadas y competentes.
- Para la limpieza del motorreductor evitar la utilización de productos que contengan agentes corrosivos.
- Utilizar el lubricante sugerido por el fabricante del reductor: SHELL OMALA 220.

Es de suma importancia contar con un PMP, ya que facilita hacer un seguimiento funcional de la máquina. Por consiguiente, permite tener la máquina en buenas

condiciones de seguridad y mayor disponibilidad durante el proceso. De otra parte, el PMP ayuda a detectar con anticipación anomalías para corregirlas en tiempo oportuno y evitar las fallas que puedan llegar a presentarse. En el anexo 26 se puede apreciar el PMP para el sistema agitador.

6. ANALISIS DE COSTOS

Se toman en cuenta los costos directos e indirectos a fin de determinar el costo total de la fabricación del sistema agitador.

Los costos directos comprenden:

- Materiales directos
- Elementos normalizados y maquinado
- Montaje

Los costos indirectos comprenden:

- Materiales indirectos
- De ingeniería
- Otros.

6.1 COSTOS DIRECTOS

6.1.1 Costos de materiales directos

Comprende los materiales necesarios para la construcción del sistema agitador.
Ver tabla 16.

Tabla 16. Costo de materiales directos

DESCRIPCIÓN ELEMENTO	MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (COP)	PRECIO TOTAL (COP)
Amarre placa deflectora	Varilla corrugada Acero A36	16	7400	7400
Eje de agitado Long. 6m D=48.3 mm Epared=5.08	TuberíaSchedul e 80 Acero 1045	1	83566	83566
Espiga de sujeción (mecanizado)	Eje calibrado	1	75000	75000
Placa soporte 90X90 Cm	Lamina A36	1	365400	365400
Pasamanos D=42.2mm Epared=3.56 Long.6m	Tubería Schedule 40 Acero A36	2	68181	136362
Estructura techo	Varilla corrugada A36	1	45000	45000
Tapa	Acero 1045	1	2500	2500
Buje propulsor	Acero 1045			152200
Propulsor	Acero 1045	1	85000	85000
Viga W4X13 log. 2684 mm	Acero A36	2	138121	276242
Malla tipo rombo 9 m x 3 Acero al carbono (Piso)	Lamina perforada Acero A36	1	874640	874640
Tanque de agitado (concreto) con placa deflectora	Concreto	1		3250800
TOTAL COSTOS				5354110

Fuente:Ferretería FERROSVEL S.A.S – Medellín, Colombia. 2014

6.1.2 Costos de elementos normalizados

Son aquellos elementos que se comercializan y no necesitan ser modificados para usarse²⁹.

Tabla 17. Costo de elementos normalizados

DESCRIPCIÓN ELEMENTO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (COP)	PRECIO TOTAL (COP)
Motor eléctrico 3 hp 1 Fase 1750 RPM	1	871612	871612
Reductor de velocidad	1	2552000	2552000
Rodamiento 6205	2	20000	40000
Tornillo inox. Cabeza hexagonal M12 X 35 UNF	4	980	3920
Tuerca inoxidable M12	4	320	1280
Arandela de presión inoxidable M12	4	260	1040
Arandela plana inoxidable	4	220	880
TOTAL COSTOS			3470732

Fuente: Varios

6.1.3 Costos de montaje

Estos costos están relacionados con la mano de obra necesaria para realizar el montaje y puesta en marcha del sistema agitador.

Para esta labor se requiere de 3 personas durante 5 horas aproximadamente. El costo de la hora-hombre para este trabajo es de 1200000 (COP). Ver tabla 18.

²⁹ ERAZO SORIA, Pablo F, BENÍTEZ VISUETE, Ricardo J.; Diseño y construcción de una mezcladora industrial para la elaboración de vino de frutas con capacidad de 2000 litros; Quito; p. 131

Tabla 18. Costos de montaje

HORAS DE TRABAJO	NÚMERO DE TRABAJADORES	ESPECIALIDAD	COSTO POR HORA (COP)	COSTO TOTAL(COP)
5	3	Mecánico	6250	31250
		Electromecánico	6250	31250
		Oficial de obra civil	5470	27350
TOTAL COSTOS				89850

6.1.4 Costos directos totales

Se indica la cantidad total de los costos en la tabla 19.

Tabla 19. Costos directos totales

COMPONENTES DE LOS COSTOS DIRECTOS	VALOR (COP)
Costos de materiales directos	5354110
Costos de materiales normalizados	3470732
Costos de montaje	89850
TOTAL COSTOS	8914692

6.2 COSTOS INDIRECTOS

6.2.1 Costos de materiales indirectos

Los costos de materiales indirectos están relacionados con los consumibles durante el proceso de fabricación y montaje. Tabla 20.

Tabla 20. Costos de materiales indirectos

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO	PRECIO
	AD	UNITARIO	TOTAL (COP)
		(COP)	
Soldadura West Arco E6011 1/8"/ Kg	1	9860	9860
Disco de corte	10	2641	26410
Disco de desbaste	3	3311	9933
Lija agua premier A-80	10	612	6120
Lija agua premier A-150	12	567	6804
Thiner común / Galón	3	16500	33000
Pintura anticorrosiva/ Galón	4	52300	209200
Pintura / Galón amarilla (para el piso)	1	57448	57448
Pintura Epoxipoliamida /Galón	3	86456	259368
Catalizador Epoxipoliamida/ Galón	3	37290	111870
Estopa industrial /Kg	1	6800	6800
Cintaaislante super SCOTH 33/ Rollo	1	12000	12000
TOTAL COSTOS			748813

Fuente:Ferretería Tornillos y Abrasivos S.A.S – Medellín, Colombia. 2014

6.2.2 Costos de ingeniería

Para el sistema agitador, se estima unos costos de ingeniería del 20% del costo total de la máquina.

6.2.3 Otros

Estos costos están relacionados con la logística de transporte de materiales y personas involucradas en el montaje. Se estima un valor de 170000 (COP).

6.2.4 Costos indirectos totales

En la tabla 21 se muestran dichos costos.

Tabla 21. Costos indirectos totales

COMPONENTES DE LOS COSTOS INDIRECTOS	VALOR (COP)
Costos de materiales indirectos	748813
Costos de ingeniería	1966701
Otros	170000
TOTAL COSTOS	2885514

6.3 COSTOS TOTAL DEL SISTEMA AGITADOR TIPO VERTICAL DE PALETAS PLANAS INCLINADAS PARA MEZCLA DE ABONO ORGANICO

Este ítem comprende la sumatoria de los costos totales directos y los costos totales indirectos.

En la tabla 22 se muestra el costo total del sistema agitador.

Tabla 22. Costo total del sistema agitador

COMPONENTES DEL COSTO TOTAL	VALOR (COP)
Costos directos	8914692
Costos indirectos	2885514
TOTAL COSTOS	11800206

7. CONCLUSIONES

- El diseño realizado en comparación con el sistema ordinario cuenta con elementos de seguridad industrial que permiten el cuidado de los operadores del sistema como se ve en el plano N° 2014-00 del anexo 27, contrario a lo evidenciado en la fotografía del anexo 20.
- El sistema agitador diseñado, por su configuración geométrica tiene un 10.96% de menos carga del fluido $F_f = 7.964 \text{ kN}$. Mientras que el diseño existente presenta una carga $F_f = 72.64 \text{ kN}$, lo cual influye directamente en un menor consumo de energía, que en conclusión se refleja en la reducción de costos y un mayor ciclo de vida útil de la máquina. Ver anexo 24; figura 44.
- La tabla 29 muestra que el agitador diseñado tiene un consumo de energía eléctrica de un 53.1% menor comparado con el sistema agitador que se muestra en la tabla 30. Lo que en pesos (\$) significa que el agitador diseñado se ahorra un poco más de la mitad de dinero por costos de energía.
- Se encontraron varias ventajas del diseño realizado sobre el sistema existente. Ver la tabla comparativa del anexo 23.
- El agitador actual no cuenta con placas deflectoras, por lo cual, se genera un flujo rotacional (figura 27; p. 63), esto debido a la fuerza centrífuga que

actúa sobre el líquido que gira. Este tipo de flujos circulares generan grandes esfuerzos sobre el eje del agitador, los apoyos, rodamientos y soldaduras, lo que a menudo conduce a la destrucción del sistema. Mientras que el agitador rediseñado a partir de la norma DIN 28131, por contar con placas deflectoras, elimina los remolinos evitando así el deterioro del sistema.

- Con el diseño del Plan de Mantenimiento Preventivo **PMP** para el sistema agitador, se obtendrá un mejor control en cuanto a estado de los componentes del sistema y recambio de piezas que facilitan el inventario y control de costos para el Departamento de mantenimiento. Gracias a la implementación del PMP el equipo podrá operar en condiciones óptimas, que como consecuencia posibilitan un mayor ciclo de vida útil de la máquina en general. Todo esto se resume en la minimización de recambios por averías e intervenciones del personal de mantenimiento o terceros, es decir, disminuirían los costos de mantenimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

NORMA TECNICA COLOMBIANA. NTC 1486 de 2011.

NORMA TECNICA COLOMBIANA. NTC 5613 de 2008.

UHL V., GRAY J.; Mixing.; Theory and Practice; Academic Press Inc.; Estados Unidos; 1966.

GEANKOPLIS CHRISTIE J.; Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias; University of Minnesota; México; Tercera edición; 1998.

MACCABE WARREN L., SMITH JULIAN C., HARRIOTT PETER.; Operaciones Unitarias en Ingeniería Química; McGRAW-HILL; Madrid.

VIAN A., OCÓN J.; Elementos de Ingeniería Química; Aguilar S.A.; Quinta edición; España; 1976.

PERRY R.; Manual del Ingeniero Químico; McGRAW-HILL; Séptima edición; España; 2001; p.18

ANSÓ SONIA., BARGEE., DEMMING S.; Ampliación de Fenómenos de Transporte. Estudio Teórico Experimental de la Agitación. AMF.

UNIVERSIDAD CARLOS III. Practicas de Procesos Fluidotérmicos. Medida de la Viscosidad de Fluidos. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Área de Mecánica de Fluidos; p.5 - 8.

MANUAL SEW EURODRIVE. Reductores y motorreductores. Edición 07/2006; p. 46

FAIRES, V. M.; Diseño de elementos de máquina. Universidad de North Carolina; p. 442 - 443

MOTT, R. L.; Diseño de elementos de máquinas. University of Dayton.México, 2006; p. 546

NORTON, R.; Diseño de Maquinas. México: PRENTICE-HALL, 1999.

SHIGLEY, J. y MISCHKE, C.; Diseño en Ingeniería Mecánica. México: McGraw-Hill, 1991.

FOX R. y ALAN, M.; Introducción a la mecánica de fluidos. México:McGRAW-HILL, 1989. Segunda Edición.

MOTT, R. L.; Mecánica de fluidos. Universidad de Dayton. México: PEARSON EDUCACION., 2006; Sexta edición;p. 27 - 28 y 38,40.

TREYBAL, R. E.; Operaciones de transferencia de masa. Universidad de Rhode Island. México: McGRAW-HILL. Segunda edición.

BEER, F. y JOHNSTON, E. R.; Mecánica de materiales. Colombia:McGRAW-HILL, 1981. Primera Edición.

FAG; Catalogo WL 41 520/3 SB; p. 516

INTERMEC; Catalogo. Estándares de cuñas y cuñeros (Chavetas y chaveteros).

CODIACERO; Catalogo. Redondos corrugados. GRUPO SABER

CODIACERO; Catalogo. Platinas y cuadrados. GRUPO SABER

GUNTZBURGER, Yoann.; Une Méthode Expérimentale d'Évaluation Globale du Pompaged'unAgitateur. La Thèse Professionnelle en Maitrise es Science Appliquées. Montréal.: École Polytechnique de Montréal. Département de Génie Chimique.

ERAZO SORIA, Pablo F, BENÍTEZ VISUETE, Ricardo J.; Diseño y construcción de una mezcladora industrial para la elaboración de vino de frutas con capacidad de 2000 litros. Trabajo de grado de Ingeniería Mecánica. Quito.: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Mecánica.

REY, S. F.; Manual de mantenimiento industrial de la empresa. 2001.

CLAPAM, Curso Superior de Mantenimiento Industrial. 2000, Vol. 1

LANDIN MARISCAL, G.; Tratamiento excretas cerdos. En: Tecnologías disponibles para reducir el potencial contaminante de las excretas de granjas porcícolas. México:FAO, 2007. p.2

ANEXOS

ANEXO 1. Variables del ambiente dentro del laboratorio IUPB e instrumentos para el cálculo de la viscosidad dinámica del abono orgánico.

LOCALIZACIÓN

Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de química del Instituto Universitario Pascual Bravo ubicado en la ciudad de Medellín, Antioquia, ubicado a una altitud de 1538 m.s.n.m, con una temperatura de 22.5 °C y se tomó como aceleración gravitacional 981 Cm/s².

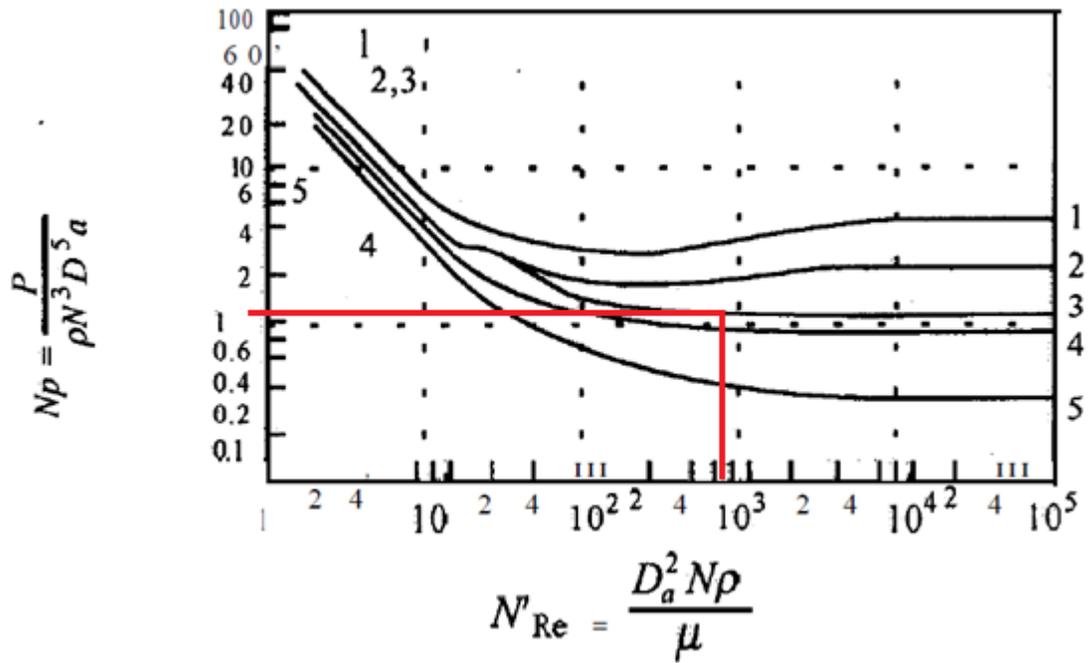
MATERIALES Y EQUIPOS

En la tabla 23 se pueden apreciar los materiales y equipos más importantes utilizados en la prueba de laboratorio y durante el proceso de diseño.

Tabla 23. Materiales y equipos

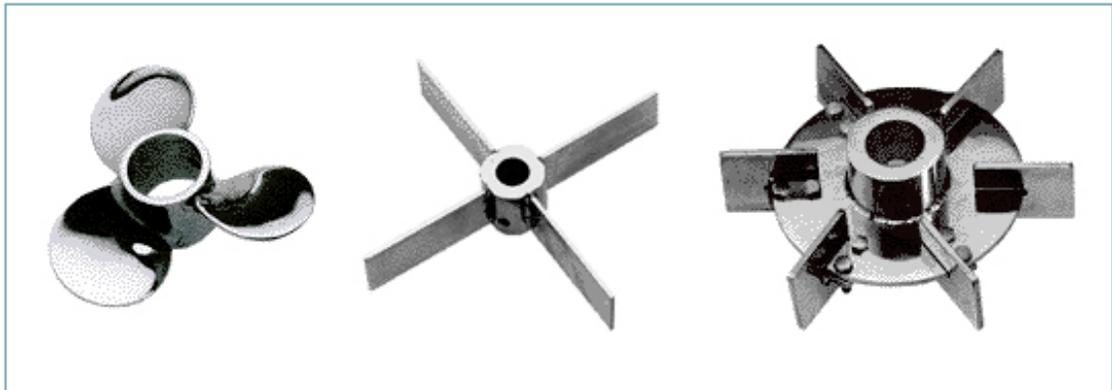
Materiales	Unid.	Materiales	Unid.
Aerómetro universal Cal. 0.700 – 2.000	1	Embudo de vidrio	1
Balanza electrónica	1	Embases plásticos	3
Calibrador Mitutoyo	1	Esfera metálica $\varnothing = 8$ mm	1
Cámara fotográfica	1	Imán	1
Cronómetro CASIO	1	Inventor 2014	1
Cinta métrica	1	Probeta graduada 250 ml	1
Embudo plástico	1	Tubo de vidrio $\varnothing = 1$ Cm y Long= 1 m	1

ANEXO 2. Relación entre N_p y el N_{Re} para diferentes tipos de agitadores. Con placas deflectoras

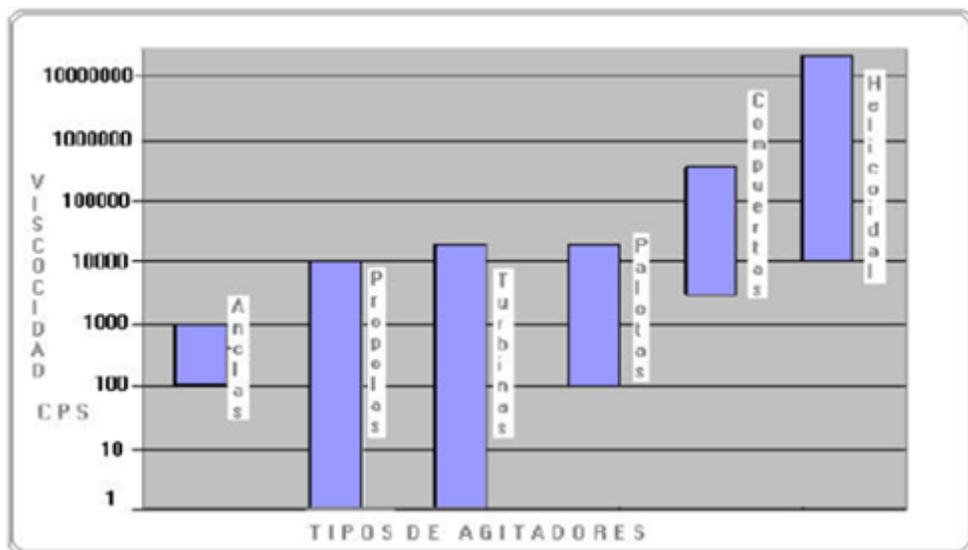


Fuente: GEANKOPLIS CHRISTIE J.; Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias; University of Minnesota; México; tercera edición; 1998, p. 165.

ANEXO 3. Principales tipos de impulsores para fluidos de baja o media viscosidad:
 (a) propela o hélice marina; (b) palas; (c) turbina de Rushton de 6 palas.



ANEXO 4. Rango de viscosidades para agitadores



ANEXO 5. Propulsores principales para agitadores

ANEXO 6. Fotografía de un motor eléctrico cubierto de purín



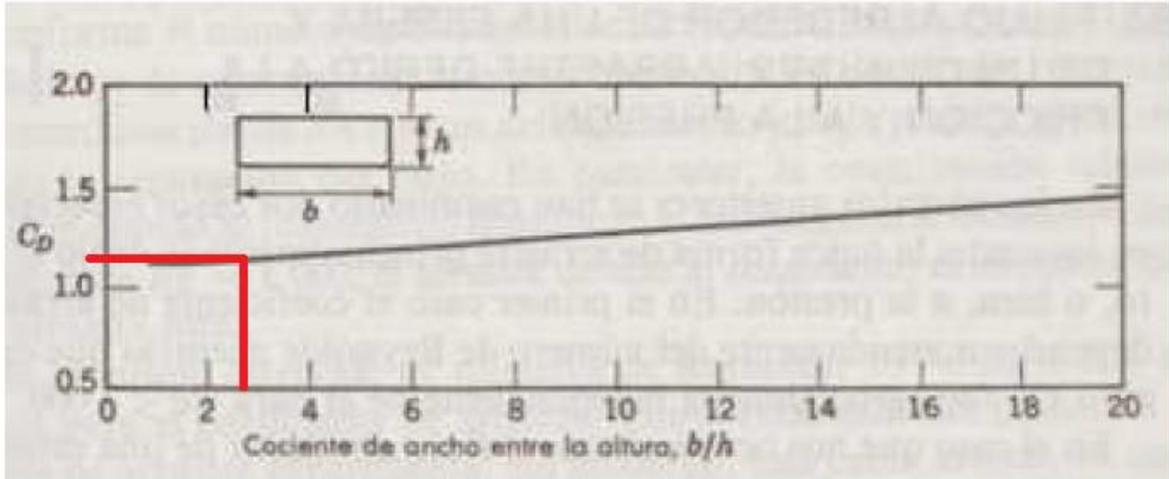
Fuente: Finca Villa Amparo

ANEXO 7. Fotografía de un sistema agitador de una finca ganadera en San Antonio de Prado

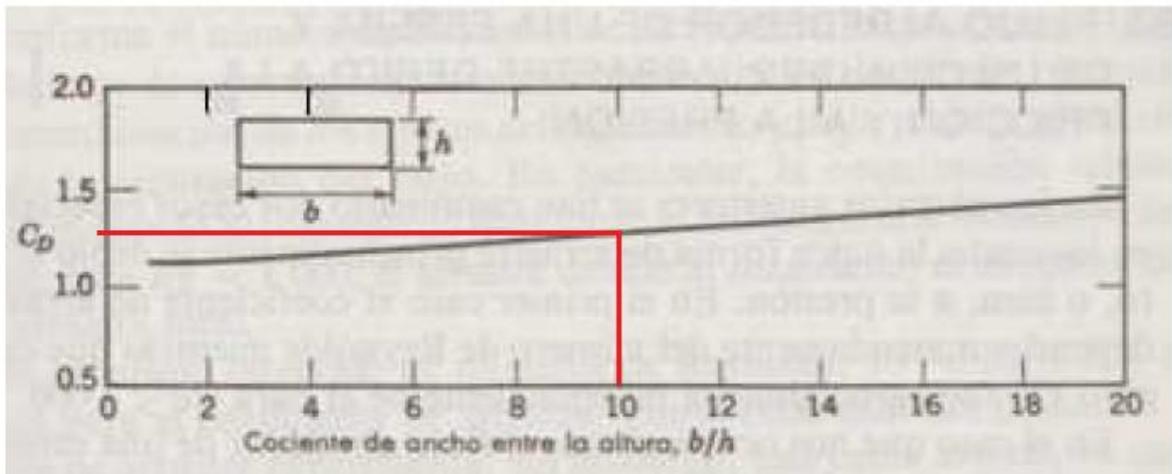


Fuente: Finca Proseguir

ANEXO 8. Relación entre C_D y la geometría del área de la paleta plana a 45°



ANEXO 9. Relación entre C_D y la geometría del área mojada de la placa deflectora



Fuente: FOX R., ALAN M.; Introducción a la mecánica de fluidos; McGraw-Hill; Segunda Edición; México; 1989; p. 427

ANEXO 10. Propiedades mecánicas aproximadas de algunos aceros

Material		Resistencia de fluencia en tracción S_y (0.2%)		Esfuerzo último en tracción S_u		Elongación (en 2 in)	Dureza Brinell
SAE/AISI	Estado	ksi	MPa	ksi	MPa	%	HB
1010	Laminado en caliente	26	179	47	324	28	95
	Laminado en frío	44	303	53	365	20	105
1016 **	Laminado en caliente	40	275	57	390	25	160
	Estirado en frío (calibrado)	54	370	78	540	10	200
1020 *	Laminado en caliente	30	207	55	379	25	111
	Laminado en frío	57	393	68	469	15	131
	Recocido	43	296	60	414	38	121
1030	Laminado en caliente	38	260	68	469	20	137
	Normalizado @ 1650 °F	50	345	75	517	32	149
	Laminado en frío	64	441	76	524	12	149
	Templado y revenido @ 1000 °F	75	517	97	669	28	255
	Templado y revenido @ 800 °F	84	579	106	731	23	302
	Templado y revenido @ 400 °F	94	648	123	848	17	495
1035 *	Laminado en caliente	40	276	72	496	18	143
	Laminado en frío	67	462	80	552	12	163
1040	Laminado en caliente	42	290	76	524	18	149
	Normalizado @ 1650 °F	54	372	86	593	28	170
	Laminado en frío	71	490	85	586	12	170
	Templado y revenido @ 1200 °F	63	434	92	634	29	192
	Templado y revenido @ 800 °F	80	552	110	758	21	241
	Templado y revenido @ 400 °F	86	593	113	779	19	262
1045 *	Laminado en caliente	45	310	82	565	16	163
	Laminado en frío	77	531	91	627	12	179
1050	Laminado en caliente	50	345	90	621	15	179

**ANEXO 11. Propiedades mecánicas de la tubería de acero al carbón Schedule 80
– calidad ASTM-A106 GR B**

CALIDADES	Composición Química					Características Mecánicas			
	C	Mn	Si	P	S	Limite	Elásticas	Resistencia a la tracción	
API -5Lx42	0.29	1.35	-	0.04	0.05	42.000 PSI	289 MPA	60.000 PSI	413 MPA
ASTM-A53GRA	0.25	0.9	-	0.05	0.06	30.000 PSI	207 MPA	48.000 PSI	331 MPA
ASTM - A 53 GR B	0.3	1.2	-	0.05	0.06	35.000 PSI	241 MPA	60.000 PSI	413 MPA
ASTM - A 106 GR B	0.3	0.29/106	0.1	0.048	0.058	35.000 PSI	241 MPA	60.000 PSI	413 MPA

DIÁMETRO			Espesor Pared		Peso Nominal		Weigh Class	Schedule
Nominal	Exterior		Pulg.	MM	L/P	Kg/m		
Pulg.	Pulg.	MM						
1/4"	0.54	13.7	0.088	2.24	0.42	0.63	STD	40
1/4"	0.54	13.7	0.019	3.02	0.54	0.8	XS	80
3/8"	0.675	17.2	0.091	2.31	0.57	0.84	STD	40
3/8"	0.675	17.2	0.126	3.2	0.74	1.1	XS	80
1/2"	0.84	21.3	0.109	2.77	0.85	1.27	STD	40
1/2"	0.84	21.3	0.147	3.73	1.09	1.62	XS	80
3/4"	1.05	26.7	0.113	2.87	1.13	1.69	STD	40
3/4"	1.05	26.7	0.154	3.91	1.47	2.2	XS	80
1"	1.315	33.4	0.133	3.38	1.68	2.5	STD	40
1"	1.315	33.4	0.179	4.55	2.17	3.24	XS	80
1 1/4"	1.66	42.2	0.14	3.56	2.27	3.39	STD	40
1 1/4"	1.66	42.2	0.191	4.85	3.00	4.47	XS	80
1 1/2"	1.9	48.3	0.145	3.68	2.72	4.05	STD	40
1 1/2"	1.9	48.3	0.2	5.08	3.63	5.41	XS	80
2"	2.375	60.3	0.154	3.91	3.65	5.44	STD	40
2"	2.375	60.3	0.128	5.54	5.02	7.48	XS	80
2"	2.375	60.3	0.344	8.74	7.46	11.11		160
2 1/2"	2.875	73	0.203	5.16	5.79	8.63	STD	40

ANEXO 12. Factor de servicio FS_1 para selección del tamaño del reductor de velocidad

Naturaleza de la carga	Horas de funcionamiento diarias				
	2	2 - 4	4 - 10	10 - 16	16 - 24
Uniforme	0,75	0,9	1	1,15	1,25
Sobrecargas moderadas	0,95	1,12	1,25	1,4	1,6
Sobrecargas fuertes	1,2	1,5	1,7	1,9	2,2

ANEXO 13. Factor de servicio FS_2 para funcionamiento intermitente del reductor

Número de maniobras/hora	FS_2
≤ 8	1
9 - 20	1,1
21 - 35	1,2
36 - 70	1,3
71 - 125	1,4
126 - 250	1,5

Fuente: Catalogo Martinena. Transmisiones 2014

ANEXO 14. Propiedades mecánicas del acero ASTM A-36

Propiedades Mecánicas				
Esfuerzo Fluencia		Esfuerzo Tracción		Elongación
(Kg / mm ²)	MPa	(Kg / mm ²)	MPa	%
25,5 (mín.)	250 (mín.)	40,8 (mín.)	400 (mín.)	20 (mín.)

Composición Química (Valores típicos)				
% C	% Mn	% Si	% P	% S
≤ 0,26	0,80 - 1,20	≤ 0,40	≤ 0,04	≤ 0,05

Mínimo Radio Interior de Plegado en Frío (**)		
Espesor E (mm.)		
Hasta 20 mm. (incl.)	Sobre 20 mm. hasta 25 mm. (incl.)	Sobre 25 mm. hasta 50 mm. (incl.)
1,5 X E	1,5 X E	1,5 X E

ANEXO 15. Tabla de especificaciones de la malla estructural para plataforma

Modelo	Rombo mm	Sección mm	Espesor mm	Peso Teórico Kg/m ²
PR-1000	34 x 135	6.9	3.4	9.76
PR-1500	34 x 135	6.6	4.7	14.6
PR-1570	51 x 152	7.8	6.4	15.3
PR-2000	34 x 135	7.5	5.5	19.5
PR-2100	36 x 102	7.5	6.4	20.8
PR-2500	34 x 135	8.3	6.4	24.4

ANEXO 16. Propiedades y especificaciones dimensionales de la varilla corrugada

Propiedades Mecánicas

Límite de fluencia: Mínimo 400 MPA 60.000 P.S.I. 24 KgF/mm ² Máximo 540 MPA 78.000 P.S.I. 55 KgF/mm ²	Resistencia a la tracción Mínimo 550 M.P.A. 80.000 P.S.I. Alargamiento Mínimo 18% (Distancia entre marcas 200 mm.)
---	---

Dimensiones Nominales y Tolerancias máximas de las barras corrugadas

DESIGNACIÓN		DIAMETRO	AREA DE SELECCIÓN	PERIMETRO	DISTANCIA PROM. MAX.	ALTURA MAX. RESALTES	ANCHO MÁX. DE VENAS	MASA POR METRO LINEAL	TOLERANCIA EN LONG.	TOLERANCIA EN PESO	
No.	Pulg.	mm.	mm ²	mm.	mm.	mm.	mm.	Kg/M.	mm.	Lote %	Indiv. %
3	3/8	9.53	71.40	30.00	6.70	0.42	3.60	0.57	-0.00	4	6
									+1.25		
4	1/2	12.70	129.00	39.90	8.90	0.51	4.80	1.00	-0.00	4	6
									+1.25		
5	5/8	15.90	200.00	49.90	11.10	0.63	6.00	1.56	-0.00	4	6
									+1.25		
6	3/4	19.10	284.00	59.80	13.30	0.95	1.20	2.25	-0.00	4	6
									+1.25		
7	7/8	22.20	387.00	69.80	15.60	1.11	8.40	3.06	-0.00	4	6
									+1.25		

Fuente: Catalogo CODIACERO

ANEXO 17. Propiedades mecánicas del concreto

Propiedad	Peso normal	Peso ligero	Autocompactable
Resistencia a compresión, f_c , MPa	16.0 – 24.7	10.8 – 26.0	22.0 – 27.1
Módulo de elasticidad, E_c , MPa	8430 – 14750	6700 – 10790	8900 – 11780
Resistencia a tensión diametral, f_b , MPa	1.55 – 2.20	1.14 – 1.76	1.58 – 1.98
Resistencia a flexión, f_r , MPa	2.32 – 3.75	1.43 – 3.29	2.27 – 2.48
Peso específico (seco), γ , kN/m ³	18.8 – 20.3	15.2 – 18.3	18.9

ANEXO 18. Tabla de chaveteros y chavetas estándar en pulgadas de sección cuadrada.

Diámetro del eje (pulg)	Anchura y profundidad del cuñero (pulg)	Cuña de sección cuadrada (pulg)	Diámetro del prisionero (pulg)
1/2 a 5/8	1/8 x 1/16	1/8 x 1/8	3/16
5/8+ a 7/8	3/16 x 3/32	3/16 x 3/16	3/16
7/8+ a 1-1/4	1/4 x 1/8	1/4 x 1/4	1/4
1-1/4+ a 1-3/8	5/16 x 5/32	5/16 x 5/16	5/16
1-3/8+ a 1-3/4	3/8 x 3/16	3/8 x 3/8	3/8
1-3/4+ a 2-1/4	1/2 x 1/4	1/2 x 1/2	1/2
2-1/4+ a 2-3/4	5/8 x 5/16	5/8 x 5/8	5/8
2-3/4+ a 3-1/4	3/4 x 3/8	3/4 x 3/4	5/8
3-1/4+ a 3-3/4	7/8 x 7/16	7/8 x 7/8	3/4
3-3/4+ a 4-1/2	1 x 1/2	1 x 1	3/4
4-1/2+ a 5-1/2	1-1/4 x 5/8	1-1/4 x 1-1/4	7/8
5-1/2+ a 6-1/2	1-1/2 x 3/4	1-1/2 x 1-1/2	1
6-1/2+ a 7-1/2	1-3/4 x 7/8	1-3/4 x 1-3/4	1-1/4
7-1/2+ a 9	2 x 1	2 x 2	1-1/4
9+ a 11	2-1/2 x 1-1/4	2-1/2 x 2-1/2	1-1/4

Fuente: Catalogo INTERMEC

ANEXO 19. Tabla de dimensión de platinas para los propulsores

MEDIDAS H x B	Kg./m.	Kg./unid. 6m.	unid/paq. 6m.	AREA cm.2
1/8 x 1/2	0.32	1.92	560	0.40
1/8 x 5/8	0.40	2.40	450	0.50
1/8 x 3/4	0.48	2.88	375	0.60
1/8 x 1	0.63	3.78	280	0.81
1/8 x 1.1/4	0.79	4.74	225	1.01
1/8 x 1.1/2	0.95	5.70	180	1.21
1/8 x 2	1.27	7.62	140	1.61
1/8 x 2.1/2	1.58	9.48	112	2.01
1/8 x 3	1.90	11.40	91	2.42
3/16 x 1/2	0.48	2.88	375	0.60
3/16 x 5/8	0.60	3.60	300	0.76
3/16 x 3/4	0.71	4.26	240	0.91
3/16 x 1	0.95	5.70	180	1.21
3/16 x 1 1/4	1.19	7.14	150	1.51
3/16 x 1 1/2	1.43	8.58	120	1.81
3/16 x 2	1.90	11.40	90	2.42
3/16 x 2 1/2	2.38	14.28	75	3.02
3/16 x 3	2.85	17.10	60	3.63
3/16 x 4	3.80	22.80	45	4.84
1/4 x 1/2	0.64	3.84	280	0.81
1/4 x 5/8	0.79	4.74	225	1.01
1/4 x 3/4	0.95	5.70	180	1.21
1/4 x 1	1.27	7.62	140	1.61
1/4 x 1.1/4	1.59	9.54	110	2.02
1/4 x 1.1/2	1.90	11.40	90	2.42
1/4 x 2	2.53	15.18	70	3.23
1/4 x 2.1/2	3.17	19.02	56	4.03
1/4 x 3	3.80	22.80	45	4.84
1/4 x 4	5.07	30.42	34	6.45

Fuente: Catalogo CODIACERO

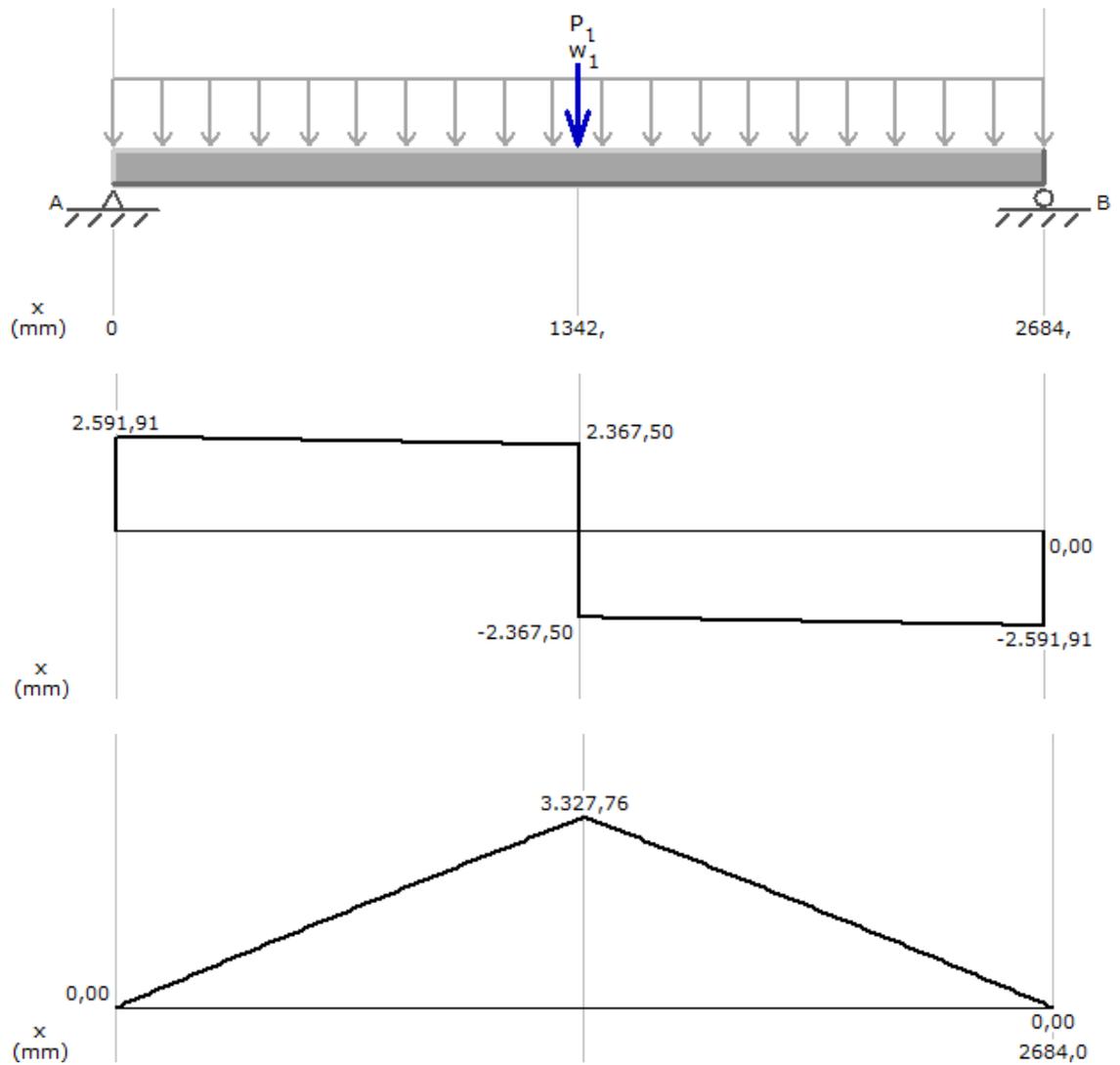
ANEXO 20. Fotografías que muestra la inseguridad con que trabaja el personal de mantenimiento en la estructura de un sistema agitador de una finca ganadera ubicada a las afueras de San Antonio de Prado.



Fuente:Finca Proseguir

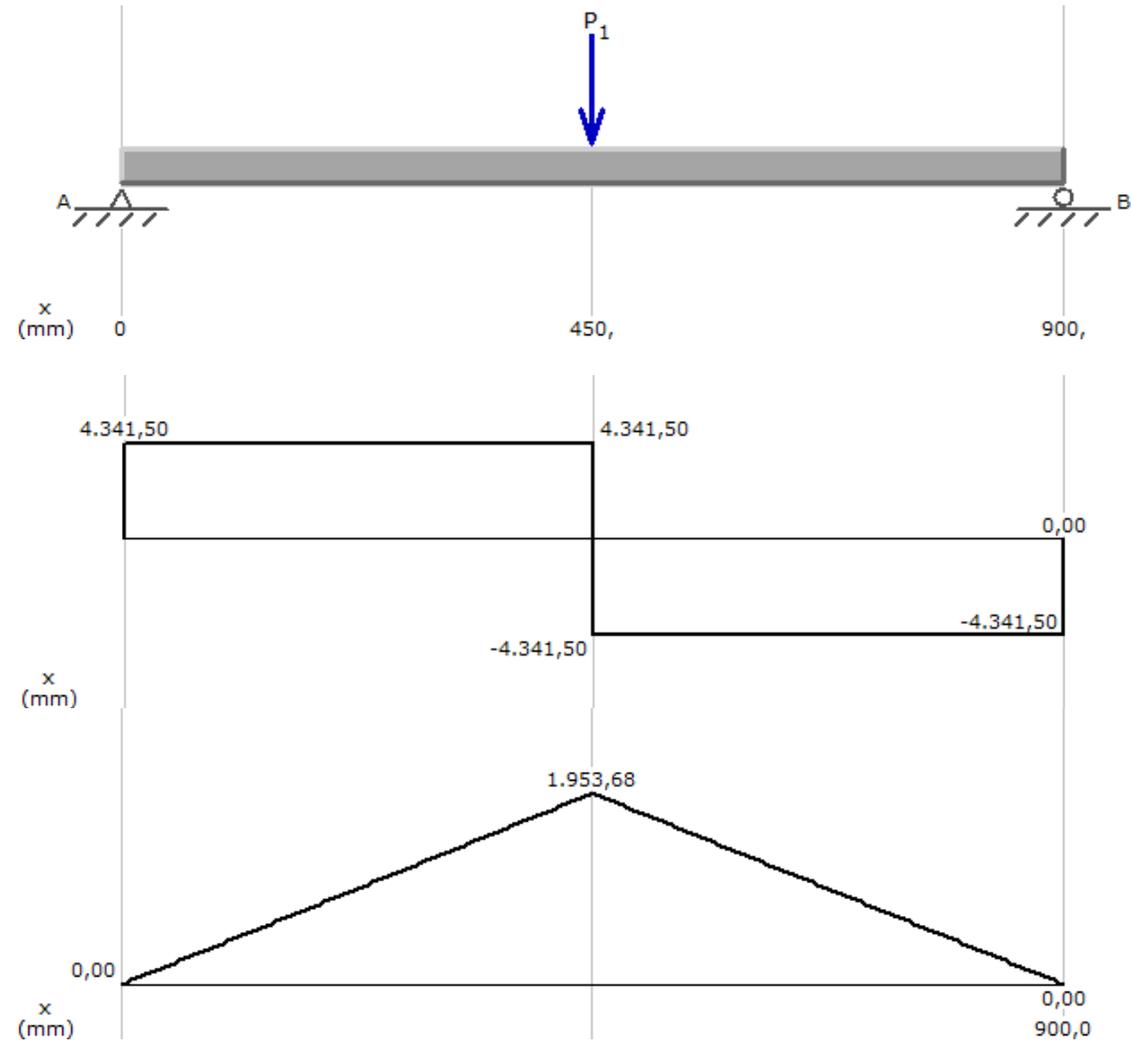


ANEXO 21. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector de la viga



Fuente: Software MDSolids 3.5

ANEXO 22. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector de la placa deflectora



Fuente: Software MDSolids 3.5

ANEXO 23. Cuadro comparativo del agitador que opera actualmente Vs el agitador diseñado

SISTEMA AGITADOR ACTUAL	SISTEMA AGITADOR ESTANDARIZADO DIN 28131 TIPO VERTICAL DE PALAS INCLINADAS A 45°
No existen planos de diseño	Cuenta con planos de diseño
No tiene un PMP	Tiene un PMP
No existe información técnica sobre el procedimiento de diseño (Ej: cálculo de propiedades reológicas y cálculos por resistencia de los componentes estructurales)	Se puede consultar la información del proceso de cálculo e información técnica.
No cuenta con un análisis de costos que facilite su futura fabricación.	Tiene un análisis de costos.
No ofrece seguridad y facilidad de mantenimiento al personal de mantenimiento. Ver anexo 20; p. 148-149	Ofrece seguridad y facilidad de mantenimiento. Ver plano No. 2014-00; p.153
No cuenta con radios en los bordes de la base del tanque por lo que el fluido se estanca al igual que las partículas sólidas.	Cuenta con radios en el fondo del tanque que excitan la formación de flujo axial longitudinal (paralelo al eje de agitado). Ver figura 6 plano No. 2014-01; p. 154
No tiene placas deflectoras por lo cual los vórtices no pueden ser destruidos (figura 27)	Sistema provisto de placas deflectoras que evitan la generación de flujo circulatorio y presencia de remolinos o vórtices. Ver figura 28.
Cuenta con un sistema propulsor de ángulos soldados a traslape al eje de agitado anclado por medio de una cruceta al fondo del tanque.*	Sistema propulsor a una altura del fondo del tanque de 84.6 cm, evitando así la presencia de un ángulo de torsión indeseable. Además soporta menos presión hidrostática por parte de la mezcla
Presenta un eje de agitado muy largo, que llega hasta el fondo del recipiente.**	Eje de agitado más corto, que evita el exceso de vibraciones.
No cuenta con arranque directo con bobina a 220V y térmico, para la protección del motor	Cuenta con arranque directo y térmico

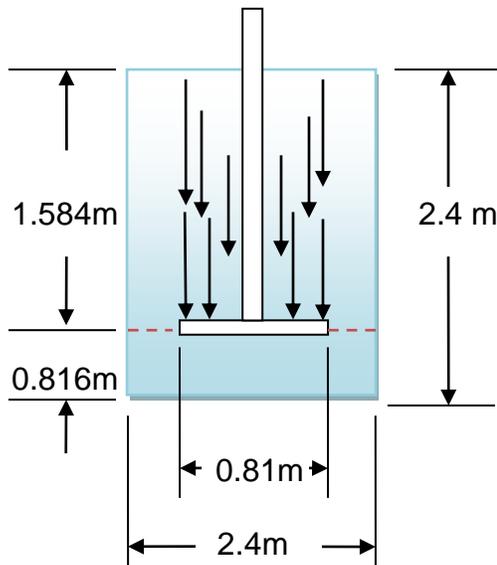
*Al sedimentarse el abono orgánico, este se acumula en la parte plana del ángulo (sistema propulsor), como si fuera poco la presión hidrostática es mayor por encontrarse en el fondo del recipiente. Al momento de encendido del motor el sistema agitador debe vencer por consiguiente la fuerza de arrastre o fricción que

ejerce la capa solida (sedimentos) y todo el peso del fluido, ocasionándose un gran momento de torsión en el eje de agitado y un gran consumo energético del motor al momento del arranque.

**La longitud de un eje y la magnitud del momento torsor T , están directamente relacionados con el ángulo de torsión, el cual dependiendo de los valores de T , y la longitud puede ocasionar deformaciones mínimas o de gran significancia dentro del diseño.

ANEXO 24. Carga del fluido sobre el sistema agitador diseñado y el existente

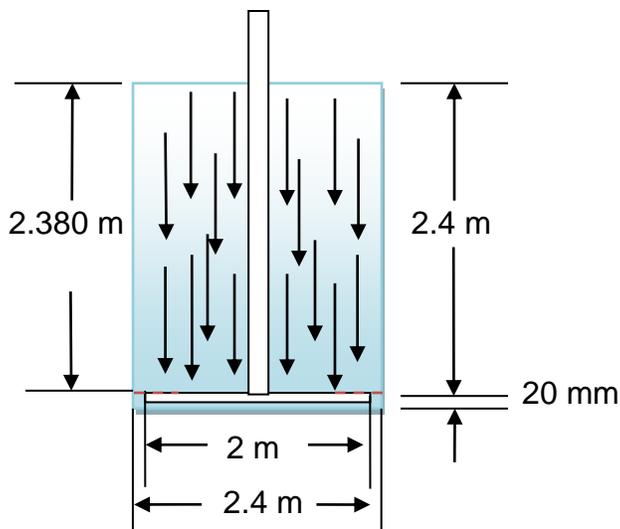
Figura 44. Fuerza del fluido sobre dos sistemas de agitación: (a) Sistema agitador rediseñado, (b) Sistema agitador existente



(a)

De la ecuación 43, se tiene que

$$F_f = 7.964 \text{ kN}$$



(b)

Reemplazando los datos de la figura (b) en la ecuación 43 se obtuvo:

$$F_f = 72.64 \text{ kN}$$

ANEXO 25. Costo del consumo de energía eléctrica

Tabla 25. Consumo de energía eléctrica del agitador diseñado

SISTEMA AGITADOR TIPO VERTICAL DE PALAS INCLINADAS A 45°	POTENCIA (kW)	TIEMPO (h)	E _{eléct} (kW-h)
1	1.585	6	9.51

$$\text{Costo consumo } E_{elect} = E_{elect} \times \text{Valor}_{elect}$$

$$\text{Costo consumo } E_{elect} = (9.51 \text{ kWh}) \left(\frac{\$442.704}{\text{kWh}} \right) = \$ 4210$$

Tabla 26. Consumo de energía eléctrica del agitador existente

SISTEMA AGITADOR ACTUAL	POTENCIA (kW)	TIEMPO (h)	E _{eléct} (kW-h)
1	2.984	6	17.904

$$\text{Costo consumo } E_{elect} = E_{elect} \times \text{Valor}_{elect}$$

$$\text{Costo consumo } E_{elect} = (17.904 \text{ kWh}) \left(\frac{\$442.704}{\text{kWh}} \right) = \$ 7926.2$$

ANEXO 26. Plan de Mantenimiento Preventivo (PMP)

ANEXO 27. Planos

