

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

"Diseño de una unidad portátil de potabilización de agua para zonas de  
desastre"

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por:

Álvaro Fernando Cruz Álava

María Alejandra Mejía Ricaurte

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2016

# AGRADECIMIENTOS

A Dios, por guiarme durante toda mi vida.

A mis padres, Alvaro y Eva, por todo su esfuerzo y por motivarme durante mi carrera universitaria.

A mi familia, por su apoyo incondicional.

A mis amigos, por las invaluable experiencias compartidas.

A Alejandra, por su entrega durante este proyecto y ser parte importante de mi vida.

Álvaro Fernando Cruz Álava

# AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mis padres Marco Vinicio y María Lorena, por haberme dado la confianza y apoyo en todo momento para concluir mi carrera universitaria.

A mis compañeros con los que compartí aula de clase, por brindarme su ayuda para seguir adelante.

A mi compañero Álvaro, por luchar junto conmigo por un mismo objetivo.

María Alejandra Mejía Ricaurte

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Álvaro Fernando Cruz Álava

María Alejandra Mejía Ricaurte

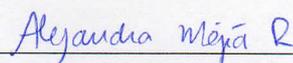
Ph.D. Juan Manuel Peralta Jaramillo

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



Alvaro Fernando Cruz Álava

Estudiante



María Alejandra Mejía Ricaurte

Estudiante



Ph. D. Juan Manuel Peralta Jaramillo

Director

## RESUMEN

El agua potable es un recurso indispensable para la salud e higiene de los seres humanos, cuya distribución se vuelve crítica cuando se afronta una catástrofe, teniendo en cuenta que se debe asegurar que las personas afectadas por alguna situación de este tipo reciban diariamente una cantidad mínima de 15 litros de agua potable. Basado en esto, se estableció como objetivo principal el diseño de una planta potabilizadora con una capacidad de 10 m<sup>3</sup>/h que pueda ser trasladada hacia las zonas de desastre, teniendo como único requerimiento que sea instalada cerca de una fuente de agua dulce. Con la finalidad de obtener una planta compacta, se diseñó un tanque rectangular en concordancia con el “Manual de Recipientes a Presión” (Megyesy, 1992) donde se llevan a cabo los tres primeros procesos de la planta (mezcla rápida o coagulación, mezcla lenta o floculación y sedimentación).

En el caso de las cámaras de mezcla, se calculó el volumen de cada una basado en tiempos de detención recomendados en la revista de la AWWA y el caudal de operación de la planta. Para la selección de los motores de los mezcladores mecánicos, se calcularon sus parámetros de operación, basados en los intervalos de gradientes de velocidad recomendados por el CEPIS para cada proceso.

Se diseñó un sedimentador de placas inclinadas que tiene la función de crear un área de contacto tal que las partículas floculadas deslizan por esta, asentándose en el fondo del tanque. Como consecuencia el agua queda clarificada en la superficie y posteriormente es filtrada y desinfectada.

En conclusión, se obtuvo el diseño de una planta portátil para potabilización de agua con una operación flexible, es decir que puede regular los gradientes de velocidad en cada cámara de mezcla y suministrar diferentes dosis de químicos para adaptarse a diferentes fuentes de agua.

**Palabras Clave:** Potabilización de agua, portátil, mezcladores, sedimentador, gradiente de velocidad.

## ABSTRACT

*Potable water is essential for health and hygiene of human beings, which distribution becomes critical when facing a disaster, given that it must be ensured a minimum amount of water of 15 liters per day for people facing these type of situations. Based on this, the main objective of this project is to design a water treatment plant was established with a capacity of 10 m<sup>3</sup>/h that can be transported to the disaster areas, with the only requirement of being installed near a source of fresh water.*

*In order to obtain a compact plant, a rectangular tank was designed in accordance with the "Manual de Recipientes a Presión" (Megyesy, 1992) where the main treatments of the plant are carried out (rapid mixing or coagulation, slow mixing or flocculation and sedimentation).*

*In the case of the mixing chambers, the volume of each one is calculated based on its detention time, recommended by the AWWA journal, and the rate of operation of the plant. For the selection of the engines for the mechanical mixers, its operating parameters were calculated, based on the velocity gradients intervals recommended for each process by CEPIS.*

*A parallel plates settler was designed which has the function of creating a contact area such that the floc particles settle at the bottom of the tank, leaving clarified water on the surface, which is then filtered and disinfected.*

*In conclusion, it was obtained the design of a portable plant for water purification with flexible operation, i.e. with adjustable velocity gradients in each mixing chamber and it's capable of deliver different doses of chemicals to suit different water sources.*

**Keywords:** *Water purification, portable, mixers, settler, velocity gradient.*

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XII
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Marco teórico.....	2
1.3.1 Marco legal.....	2
1.3.2 Proceso de potabilización de agua.....	3
1.3.3 Capacidad de la planta.....	5
1.3.4 Procesos aplicados en una planta potabilizadora de agua.....	6
CAPÍTULO 2.....	14
2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO.....	14
2.1 Diseño de forma.....	15
2.2 Planteamiento de alternativas.....	16
2.2.1 Mezclador.....	16
2.2.2 Sedimentador.....	18
2.3 Selección de Alternativas.....	19
2.3.1 Mezclador.....	19
2.3.2 Sedimentador.....	23
2.4 Diseño del sedimentador.....	25

2.5	Diseño de los tanques .....	27
2.6	Diseño de los elementos de agitación .....	33
2.6.1	Agitador mecánico de turbina .....	34
2.6.2	Agitador tipo paleta de eje vertical .....	37
CAPÍTULO 3.....		41
3.	RESULTADOS.....	41
3.1	Sedimentador .....	41
3.2	Sistema de mezcla rápida o coagulación .....	42
3.3	Sistema de mezcla lenta o floculación.....	44
3.4	Tanque de mezclado y sedimentación .....	45
3.5	Selección de equipos auxiliares .....	48
3.6	Estimación de costos.....	51
3.6.1	Costos directos .....	52
3.6.2	Costos indirectos .....	54
3.6.3	Costos totales .....	54
CAPÍTULO 4.....		55
4.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....	55
4.1	Conclusiones .....	55
4.2	Recomendaciones.....	57
BIBLIOGRAFÍA.....		58
APÉNDICES.....		59

## ABREVIATURAS

UNT	Unidad Nefelométrica de Turbidez
UC	Unidad de Color
NTC	Norma Técnica Colombiana
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWWA	American Water Works Association
CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
ONU	Organización de Naciones Unidas
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
RAS	Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico
ASME	American Society of Mechanical Engineers
psi	Libras por pulgada cuadrada
gpm	Galones por minuto
gph	Galones por hora
°C	Grados Celsius
kg	Kilogramo
kW	Kilowatt
Hz	Hertz
Pa	Pascal
s	Segundo
W	Watt
rpm	Revoluciones por minuto
rps	Revoluciones por segundo
lb	Libra
V	Voltio
m	Metro
mm	Milímetro
ft	Pie
in	Pulgada

## SIMBOLOGÍA

$V_{sc}$	Velocidad crítica de sedimentación [ $m^3/m^2/día$ ]
$V_o$	Velocidad ascendente de partículas [ $cm/s$ ]
$\theta$	Ángulo de inclinación de placas [ $^\circ$ ]
$l$	Altura de la placa de sedimentación [ $mm$ ]
$d$	Espaciamiento entre placas [ $mm$ ]
$L_r$	Relación entre altura de la placa y espaciamiento
$\nu$	Viscosidad cinemática del agua [ $m^2/s$ ]
$R_h$	Radio hidráulico [ $mm$ ]
$b$	Ancho de placa de sedimentación [ $mm$ ]
$C$	Número de canales de sedimentación
$N_p$	Número de placas de sedimentación
$V$	Volumen de tanque [ $m^3$ ]
$Q$	Caudal [ $m^3/h$ ]
$t_d$	Tiempo de detención [ $s$ ]
$L$	Largo del tanque [ $mm$ ]
$B$	Ancho del tanque [ $mm$ ]
$H$	Alto del tanque [ $mm$ ]
$t$	Espesor de paredes del tanque [ $mm$ ]
$G_e$	Gravedad específica del fluido
$W$	Carga distribuida [ $lbin$ ]
$S_y$	Esfuerzo de fluencia del material [ $MPa$ ]
$S$	Módulo de resistencia [ $cm^3$ ]
$E$	Módulo de elasticidad del material [ $psi$ ]
$m_t$	Masa total del tanque [ $kg$ ]
$l_v$	Separación máxima entre vigas [ $mm$ ]
$N_v$	Número de vigas
$M$	Momento flector [ $Nm$ ]
$N$	Factor de seguridad
$\sigma_p$	Esfuerzo permisible [ $MPa$ ]
$P_v$	Potencia por unidad de volumen [ $W/m^3$ ]

G	Gradiente de velocidad [s <sup>-1</sup> ]
$\beta$	Relación de viscosidad del fluido
P	Potencia [HP]
J	Ancho de deflectores [mm]
f	Distancia entre deflector y pared [mm]
H <sub>a</sub>	Altura de nivel de agua en tanque coagulador [mm]
E <sub>a</sub>	Distancia entre paleta y el fondo del tanque [mm]
w	Altura de paleta de turbina Rushton [mm]
g	Ancho de paleta de turbina Rushton [mm]
D <sub>a</sub>	Diámetro de turbina Rushton [mm]
D <sub>t</sub>	Largo del tanque de coagulación [mm]
$\rho$	Densidad del fluido de trabajo [kg/m <sup>3</sup> ]
n	Número de revoluciones por segundo del agitador [rps]
K	Constante del tipo de agitador y la geometría del tanque
N <sub>F</sub>	Número de Froude
A <sub>p</sub>	Área de cada paleta [m <sup>2</sup> ]
A <sub>T</sub>	Área transversal del tanque [m <sup>2</sup> ]
C <sub>D</sub>	Coefficiente de arrastre
A	Área de la paleta floculador [m <sup>2</sup> ]
r	Distancia desde la paleta al eje de rotación [mm]
L <sub>p</sub>	Longitud de la paleta floculador [mm]
a	Ancho de la paleta floculador [mm]
T <sub>t</sub>	Torque total [Nm]
F	Fuerza aplicada sobre la paleta [N]
I	Inercia [cm <sup>4</sup> ]
$\sigma_a$	Esfuerzo alternante [MPa]
$\sigma_m$	Esfuerzo medio [MPa]
S <sub>ut</sub>	Esfuerzo último a la tracción [MPa]
S <sub>e</sub>	Límite de resistencia a la fatiga [MPa]
k <sub>a</sub>	Factor de superficie
k <sub>b</sub>	Factor de tamaño
k <sub>c</sub>	Factor de carga
k <sub>d</sub>	Factor de temperatura

$k_e$	Factor de confiabilidad
$L_p$	Largo de la paleta [m]
$M_a$	Momento flector alternante [Nm]
$M_m$	Momento flector medio [Nm]
$T_a$	Par de torsión alternante [Nm]
$T_m$	Par de torsión medio [Nm]
$l_e$	Largo del eje [mm]

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Canaleta Parshall.....	8
Figura 1-2. Retromezclador mecánico.....	8
Figura 1-3. Floculadores de tabiques. ....	10
Figura 1-4. Floculador de eje vertical. ....	11
Figura 1-5. Esquema de un floculador hidromecánico. ....	11
Figura 2-1. Diagrama de flujo para el diseño de planta potabilizadora de agua.....	14
Figura 2-2. Diseño de forma de la planta potabilizadora de agua. ....	15
Figura 2-3. Representación de velocidades de las partículas entre placas paralelas. ...	26
Figura 2-4. Placas paralelas inclinadas. ....	27
Figura 2-5. Valores de $\alpha$ para tanques rectangulares.....	29
Figura 2-6. Esquema de un tanque con elementos rigidizadores.....	30
Figura 2-7. Distribución de fuerzas sobre las paredes del tanque.....	31
Figura 2-8. Esquema de la fuerza aplicada sobre la base del tanque.....	32
Figura 2-9. Esquema de Turbina Rushton.....	35
Figura 2-10. Relaciones geométricas entre tanque mezclador y agitador.....	36
Figura 2-11. Esquema del agitador. ....	38
Figura 3-1. Distribución interna del tanque de mezclado y sedimentación.....	46

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites aceptables de calidad del agua para filtración rápida completa. ....	4
Tabla 2. Tratamientos empleados según el nivel de calidad del agua cruda. ....	5
Tabla 3. Gradientes de velocidad recomendados para las mezclas. ....	7
Tabla 4. Clasificación de los mezcladores para coagulación. ....	9
Tabla 5. Clasificación de los floculadores. ....	10
Tabla 6. Clasificación de sedimentadores según su flujo. ....	12
Tabla 7. Ponderación de criterios de evaluación. ....	20
Tabla 8. Evaluación de las alternativas. ....	21
Tabla 9. Evaluación de las alternativas. ....	22
Tabla 10 . Ponderación de criterios de evaluación. ....	24
Tabla 11 . Evaluación de las alternativas. ....	24
Tabla 12. Sistemas seleccionados para los respectivos procesos. ....	25
Tabla 13. Tiempos de detención recomendados para las mezclas. ....	28
Tabla 14. Determinación del número de elementos rigidizadores. ....	30
Tabla 15. Posición de los elementos rigidizadores. ....	30
Tabla 16. Valores de $\beta$ para diferentes temperaturas. ....	34
Tabla 17. Relaciones geométricas entre el tanque y la turbina. ....	35
Tabla 18. Valores de K para diferentes anchos de placas deflectoras. ....	37
Tabla 19. Valores de $C_D$ para diferentes relaciones geométricas de las paletas. ....	39
Tabla 20. Factor de eficiencia aplicado a floculadores. ....	40
Tabla 21. Parámetros de entrada para el sedimentador. ....	41
Tabla 22. Selección del espaciamiento entre placas adecuado. ....	41
Tabla 23. Resultados de las placas del sedimentador. ....	42
Tabla 24. Dimensiones del tanque de mezcla rápida. ....	42
Tabla 25. Dimensionamiento de agitadores mecánicos tipo paleta. ....	43
Tabla 26. Parámetros de operación de la mezcla rápida. ....	43
Tabla 27. Dimensiones del tanque de mezcla lenta. ....	44
Tabla 28. Geometría del floculador mecánico. ....	44
Tabla 29. Parámetros de operación para la mezcla lenta. ....	45
Tabla 30. Cálculo del espesor de la pared del tanque en cada sección. ....	46
Tabla 31. Cálculo del perfil del elemento rigidizador. ....	47
Tabla 32. Cálculo de vigas para el soporte del tanque. ....	47

Tabla 33. Características del motor para la mezcla rápida.....	48
Tabla 34. Características del motor para la mezcla lenta.....	48
Tabla 35. Características de variadores de frecuencia.....	49
Tabla 36. Características del reductor de velocidad.....	49
Tabla 37. Características del filtro. ....	50
Tabla 38. Características de bomba dosificadora.....	50
Tabla 39. Características de la bomba de alimentación.....	51
Tabla 40. Características del generador eléctrico. ....	51
Tabla 41. Costos de los equipos auxiliares. ....	52
Tabla 42. Costos de los materiales. ....	53
Tabla 43. Costos directos totales. ....	53
Tabla 44. Costos indirectos. ....	54
Tabla 45. Costo total del proyecto. ....	54

## ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Componentes de la planta potabilizadora de agua
- PLANO 2 Tanque rectangular
- PLANO 3 Turbina Rushton
- PLANO 4 Agitador de paletas
- PLANO 5 Ejes de floculación y coagulación
- PLANO 6 Placas de sedimentación
- PLANO 7 Ensamble de la planta potabilizadora de agua
- PLANO 8 Distribución sobre plataforma de 20 ft

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema

La Organización de Naciones Unidas (ONU, 2010) reconoce que “el derecho al agua potable y el saneamiento es un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos”.

En el Ecuador el 16 de abril del 2016, a causa del movimiento sísmico acontecido, el suministro de agua potable tanto en zonas urbanas como rurales se interrumpió producto de fisuras y rupturas en el sistema de abastecimiento de este servicio básico. Por lo tanto, la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos se vio en la obligación de distribuir agua a las zonas afectadas, principalmente en las provincias de Esmeraldas y Manabí, donde el sismo repercutió con mayor intensidad.

Debe señalarse que, entre las necesidades de las zonas afectadas, se identifica la falta de agua potable que fue atendida a través de distintas estrategias logísticas y humanitarias, no obstante la distribución del agua potable representó una gran inversión de recursos económicos.

En este contexto, cabe señalar la importancia de diseñar un equipo portátil para la potabilización de agua, que no dependa de una conexión a la red de distribución eléctrica, con un diseño simple usando materiales existentes en el mercado nacional. Asimismo, el funcionamiento del equipo deberá incorporar principios mecánicos e hidráulicos que garanticen la calidad del líquido vital a fin de que ante eventos naturales catastróficos puedan ser utilizados inmediatamente. En el ámbito económico deberá ser de costo asequible, y en relación a los aspectos técnicos, sus características permitirán el uso efectivo en sectores que no cuenten con agua segura.

El diseño de una unidad portátil implica un beneficio social ya que coadyuva con la mitigación y/o remediación de los impactos generados por desastres naturales, donde el servicio de agua potable es una de las primeras necesidades en ser restringida o interrumpida.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Diseñar una planta portátil potabilizadora de agua para abastecer a las zonas afectadas por desastres naturales o comunidades que carecen del servicio.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Calcular los parámetros de operación y la geometría de los elementos de las cámaras de mezclado de la planta potabilizadora, asegurando gradientes de velocidad recomendados.
- Diseñar el tanque donde se llevan a cabo los procesos de mezcla y sedimentación, de modo que su estructura resista la presión hidrostática ejercida.
- Dimensionar el sedimentador, de manera que al final del proceso se obtenga agua clarificada.
- Seleccionar los equipos auxiliares requeridos para la operación de la planta potabilizadora.

## **1.3 Marco teórico**

### **1.3.1 Marco legal**

La Constitución Ecuatoriana (2008), en el marco de los derechos del Buen Vivir, declara que el agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida. Por otra parte, la Asamblea Nacional de la República del Ecuador garantiza este derecho mediante la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y

Aprovechamiento del Agua. En este contexto legal, el proyecto planteado encaja con la visión del marco legal citado.

Adicionalmente, los procesos de potabilización del agua están regulados a través de la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE) 1108 del Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), la cual establece que el agua, que se considera apta para el consumo humano, debe cumplir con los parámetros de calidad establecidos.

### **1.3.2 Proceso de potabilización de agua**

El agua cruda, que se encuentra disponible en la naturaleza, debe ser sometida a procesos físico-químicos para garantizar su potabilización y por consiguiente liberarla de microorganismos patógenos y sustancias perjudiciales para la salud. Se puede obtener agua potable por medio de plantas potabilizadoras, las cuales se clasifican según el tipo de proceso empleado en plantas de filtración rápida y plantas de filtración lenta, que se diferencian por la capacidad del filtro empleado (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente [CEPIS], 2004).

Las plantas de filtración rápida se denominan así porque los filtros que la componen operan a altas velocidades. A su vez, se subdividen en plantas de filtración rápida completa y filtración directa.

- **Plantas de filtración rápida completa:** usualmente es la más empleada cuando se trabaja con agua cruda con bajos niveles de calidad, como se muestra en la Tabla 1. Los procesos que emplean para potabilizar el agua son: mezcla rápida, mezcla lenta, sedimentación, filtrado y desinfección.

**Tabla 1. Límites aceptables de calidad del agua para filtración rápida completa.**

Parámetros	90% del tiempo	80% del tiempo	Esporádicamente
Turbiedad (UNT <sup>1</sup> )	< 1000	< 800	< 1500; si excede, considerar pre sedimentación
Color (UC <sup>2</sup> )	< 150	< 70	
NMP <sup>3</sup> de coliformes termotolerantes/100 mL	< 600		Si excede de 600, se debe considerar pre desinfección

Fuente: (CEPIS, 2004).

- **Filtración directa:** este método se aplica únicamente para aguas con turbiedad hasta 250 UNT y color hasta 60 UC, por lo tanto es empleado cuando se capta agua proveniente de represas o embalses. Los procesos involucrados son una mezcla rápida seguida de una filtración.

En contraste, las plantas de filtración lenta operan con tasas hasta 100 veces menores a las de filtración rápida. Se constituyen únicamente de filtros pero dependiendo de la calidad del agua pueden requerir procesos adicionales tales como: desarenado, pre-sedimentación, sedimentación, filtración en grava, entre otras.

La selección de un sistema o planta de potabilización dependerán de las propiedades del agua cruda y por ende los procesos a emplear, tal como se muestra en la Tabla 2.

<sup>1</sup> Unidad Nefelométrica de Turbidez: unidad empleada para medir la turbidez de un líquido.

<sup>2</sup> Unidad de color: unidad empleada para caracterizar el color verdadero de un fluido.

<sup>3</sup> Número Más Probable

**Tabla 2. Tratamientos empleados según el nivel de calidad del agua cruda.**

Parámetros	Análisis según		Nivel de calidad de acuerdo al grado de polución			
	Norma técnica NTC	Standard Method ASTM	1. Fuente aceptable	2. Fuente regular	3. Fuente deficiente	4. Fuente muy deficiente
DBO 5 días	3630					
Promedio mensual mg/L			≤ 1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 4	>4
Máximo diario mg/L			1 - 3	3 - 4	4 - 6	>6
Coliformes totales (NMP/100 mL)						
Promedio mensual		D-3870	0 - 50	50 - 500	500 - 5000	> 5000
Oxígeno disuelto mg/L	4705	D-888	≥ 4	≥ 4	≥ 4	< 4
PH promedio	3651	D 1293	6.0 - 8.5	5.0 - 9.0	3.8 - 10.5	
Turbiedad (UNT)	4707	D 1889	< 2	2 - 40	40 - 150	≥ 150
Color verdadero (UPC)			< 10	10 - 20	20 - 40	≥ 40
Gusto y olor		D 1292	Inofensivo	Inofensivo	Inofensivo	Inaceptable
Cloruros (mg/L - Cl)		D 512	< 50	50 - 150	150 - 200	300
Fluoruros (mg/L - F)		D 1179	< 1.2	< 1.2	< 1.2	> 1.7
<b>GRADO DE TRATAMIENTO</b>						
- Necesita un tratamiento convencional			NO	NO	Si, hay veces (ver requisitos para uso FLDE : literal C.7.4.3.3)	SI
- Necesita unos tratamientos específicos			NO	NO	NO	SI
- Procesos de tratamiento utilizados			(1) = Desinfección + Estabilización	(2) = Filtración Lenta o Filtración Directa + (1)	(3) = Pretratamiento + [Coagulación + Sedimentación+ Filtración Rápida] o [Filtración Lenta Diversas Etapas] + (1)	(4) = (3) + Tratamientos específicos

Fuente: (CEPIS, 2004).

### 1.3.3 Capacidad de la planta

El Proyecto Esfera fue creado por un grupo de organizaciones no gubernamentales y el Movimiento Internacional de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja, con la finalidad de elaborar la “Carta Humanitaria y normas mínimas para la respuesta humanitaria”, el cual indica que en caso de desastre natural se debe suministrar a cada persona afectada mínimo 15 litros de agua potable por día.

De ahí que, para una planta en operación continua, se requieren 8.33 m<sup>3</sup>/h para abastecer con 20 litros diarios a una población de 10000 personas. Sin embargo, la NTE INEN 2655 establece que la capacidad hidráulica de la planta debe ser entre 10% y 25% mayor a la requerida, por lo tanto, se define para nuestro estudio una capacidad de 10 m<sup>3</sup>/h.

#### **1.3.4 Procesos aplicados en una planta potabilizadora de agua**

Una planta de potabilización de agua es una estructura o instalación dedicada a la producción de agua apta para el consumo humano. En este proyecto se aplicará el proceso de filtración rápida completa, debido que permite operar con diferentes fuentes de agua cruda. Los procesos involucrados se describen a continuación:

##### **Prueba de jarras**

La prueba de jarras es una herramienta que permite determinar la cantidad de coagulante a suministrar al agua cruda según su calidad para desestabilizar las partículas en suspensión. También permite determinar el gradiente de velocidad en las etapas de mezcla rápida y mezcla lenta.

##### **Mezclado**

Es el proceso mediante el cual se produce una mezcla homogénea entre los químicos agregados y el agua cruda. La adición de los químicos tiene como finalidad obtener partículas en suspensión de mayor tamaño que faciliten la clarificación del agua, lo cual se logra operando con un gradiente de velocidad adecuado en cada fase del proceso.

Se define como gradiente de velocidad a las variaciones de velocidad de las partículas dentro de un flujo, producidas por cambios de dirección, rotación y traslación del mismo. Según la NTE INEN 2655 este parámetro refleja la intensidad de agitación de una masa líquida inducida por métodos mecánicos o hidráulicos y debe ser tomado en cuenta para el diseño.

El proceso de mezclado consiste de dos fases, primero se aplica una mezcla rápida y luego una mezcla lenta, con diferentes gradientes de velocidad establecidos por el CEPIS [Tabla 3].

**Tabla 3. Gradientes de velocidad recomendados para las mezclas.**

Proceso	Gradiente de velocidad
Mezcla rápida	700 a 1000 s <sup>-1</sup>
Mezcla lenta	15 a 70 s <sup>-1</sup>

Fuente: (CEPIS, 2004).

### **a) Coagulación o Mezcla rápida**

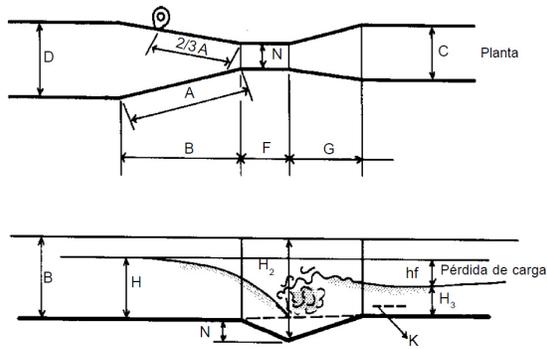
Es la etapa en la cual se agrega coagulante al agua cruda con el objeto de desestabilizar químicamente las partículas en suspensión o coloides, para facilitar su aglomeración. Comúnmente se usan tres tipos de sales: sulfato de aluminio, sulfato de aluminio amoniacal, cloruro de polialuminio, siendo la primera la más usada en las plantas potabilizadoras de agua debido a su bajo costo y uso sencillo.

El coagulante y el agua a tratar deben estar sujetos a una mezcla rápida para homogenizar los fluidos. El coagulante debe entrar en contacto con las partículas en suspensión antes de completar su reacción química, la cual ocurre en una fracción de segundo.

La mezcla rápida se puede clasificar en dos grupos, según la forma en la que interactúa el agua con el coagulante y se las describe a continuación:

#### **Mezclador de flujo de pistón**

Los coagulantes se adicionan en un punto determinado por el que se hace pasar una masa de agua, donde se genera una fuerte turbulencia con la finalidad de producir la mezcla. Como ejemplo se puede mencionar la Canaleta Parshall, cuya configuración se muestra en la Figura 1-1.



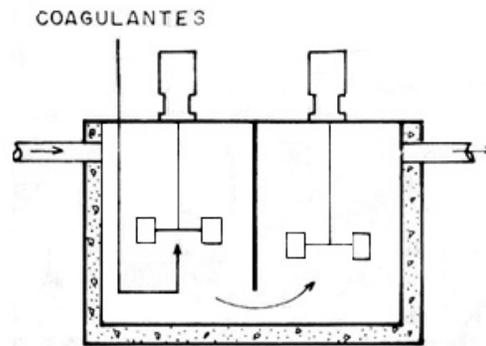
**Figura 1-1 Canaleta Parshall.**

Fuente: (CEPIS, 2004).

### Retromezcladores

En este tipo de mezcladores, el agua es retenida en una cámara por un tiempo de detención determinado en el cual se inyecta el coagulante, y luego se mezcla por efecto de algún sistema que genere turbulencia.

Un ejemplo de este mecanismo se muestra en la Figura 1-2.



**Figura 1-2. Retromezclador mecánico.**

Fuente: (Arboleda, 2000).

La clasificación detallada de los dos grupos mencionados se muestra en la Tabla 4, la cual se realiza según la configuración interna de los mezcladores y sus características.

**Tabla 4. Clasificación de los mezcladores para coagulación.**

Clasificación	Tipos	Descripción
Mezcladores de flujo de pistón	Resalto hidráulico	Canal rectangular con cambios abruptos de sección.
	Canaleta Parshall	Canaleta con cambio rápido de pendiente y constricción o garganta.
	Vertederos	Canaleta con diferencia de alturas.
	Estáticos de inserción	Emplean elementos en forma de hélices dentro de un tubo.
	Dispersores	Tubos perforados insertados en el flujo de agua.
Retromezcladores	Hidráulico	Inyecta un fluido dentro de otro en estado estático.
	Mecánico	Emplea turbinas o paletas rotatorias dentro de un tanque.

Fuente: (Arboleda, 2000).

### **b) Floculación o Mezcla lenta**

En esta etapa se da la aglomeración de partículas en suspensión, que junto con una mezcla lenta permite la formación de flóculos con la finalidad de aumentar su tamaño y que su peso específico sea superior al del agua para, posteriormente, lograr la sedimentación de dichas partículas.

La mezcla lenta se realiza durante un tiempo de detención mucho mayor al de coagulación, mientras que su gradiente de velocidad es menor, lo que favorece a la aglomeración de partículas.

Los floculadores pueden ser clasificados de acuerdo a la energía que usan para realizar la mezcla, siendo aquellos descritos en la Tabla 5.

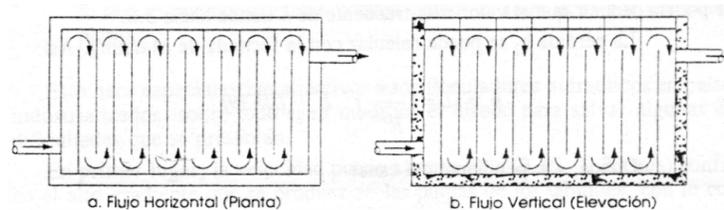
**Tabla 5. Clasificación de los floculadores.**

Según energía de agitación	Según sentido del flujo	Descripción	Nombre
Hidráulicos	Flujo horizontal	Con tabiques de ida y regreso	De tabiques
	Flujo vertical	Con tabiques arriba y abajo del tanque	
		Con codos en el fondo que proyectan el agua hacia arriba	
		Con entrada lateral al tanque	Cox
Mecánicos	Rotatorios	De paletas de eje horizontal o vertical	De paletas
		De turbinas horizontales o verticales	De turbinas
	Reciprocantes	Rejas o cintas oscilantes	Reciprocantes
Hidromecánicos	Flujo horizontal	De turbina Pelton y paletas horizontales	Hidromecánicos

Fuente: (Arboleda, 2000).

### Floculadores Hidráulicos

Son aquellos que aprovechan la energía cinética del fluido al pasar por un conducto, en cuyo recorrido existen cambios bruscos de dirección, de esta manera se producen vórtices que favorecen a la mezcla. Un ejemplo característico es el floculador de tabiques, como los que se muestran en la Figura 1-3.

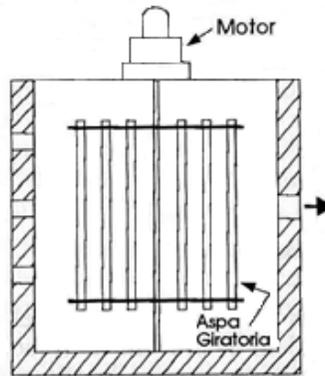


**Figura 1-3. Floculadores de tabiques.**

Fuente: (Arboleda, 2000).

### Floculadores Mecánicos

Tienen el mismo principio que los floculadores hidráulicos, a diferencia que estos emplean dispositivos mecánicos, tales como agitadores de paletas. En la Figura 1-4 se observa un floculador de eje vertical con sus partes principales.

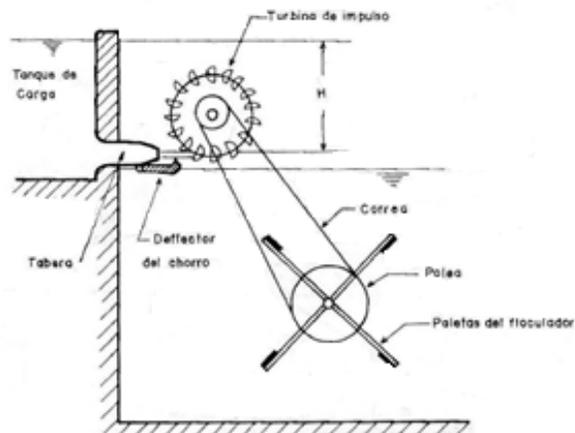


**Figura 1-4. Floculador de eje vertical.**

Fuente: (Arboleda, 2000).

### Floculadores Hidromecánicos

Este tipo de floculador permite transformar energía hidráulica en mecánica empleando una turbina Pelton, a su vez conectada por una polea a un agitador de paletas. Un esquema de este tipo de floculadores se muestra en la Figura 1-5.



**Figura 1-5. Esquema de un floculador hidromecánico.**

Fuente: (Arboleda, 2000).

### c) Sedimentación

Posterior al proceso de floculación, se transfiere el agua al tanque de sedimentación, donde las partículas se asientan en el fondo por efecto de la gravedad, dejando como resultado agua clarificada. Asimismo, los lodos acumulados al fondo del tanque deben ser evacuados para evitar comprometer la calidad del agua potable.

En la Tabla 6, se describen brevemente los tipos de sedimentadores según el sentido del flujo.

**Tabla 6. Clasificación de sedimentadores según su flujo.**

Sentido del flujo	Característica	Esquema
Horizontal	Ingreso del agua por la parte lateral del tanque y salida por el lado opuesto.	
Vertical	Ingreso del agua por la parte superior del tanque y asentamiento de lodos en la parte inferior.	
Inclinado	Los lodos se escurren sobre unas placas inclinadas hacia el fondo del tanque, y se recolecta el agua clarificada en la parte superior del mismo.	

Fuente: (CEPIS, 2004).

#### **d) Filtración**

Es el proceso mediante el cual se emplean capas de diferentes medios filtrantes dispuestos en serie, para remover partículas de densidad muy cercana a la del agua y que no han podido ser retenidas durante el proceso de sedimentación. Por otra parte, estos filtros pueden contener capas de grava, carbón activado y arena.

#### **e) Desinfección**

Durante este proceso se trata el agua a nivel biológico mediante el suministro de una dosis de cloro con la finalidad de eliminar microorganismos patógenos como bacterias, virus y protozoarios. La gran ventaja de la desinfección de agua por medio de cloración es el efecto residual que se logra, así como también su bajo costo y fácil aplicación.

Existen otros métodos de desinfección tales como radiación ultravioleta, ebullición, desinfección solar, entre otros.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

Para el diseño de la planta potabilizadora de agua, se llevó a cabo una serie de pasos que inició desde la búsqueda de información, planteamiento de posibles soluciones, selección de alternativas hasta determinar el diseño del producto final, como se muestra a continuación.

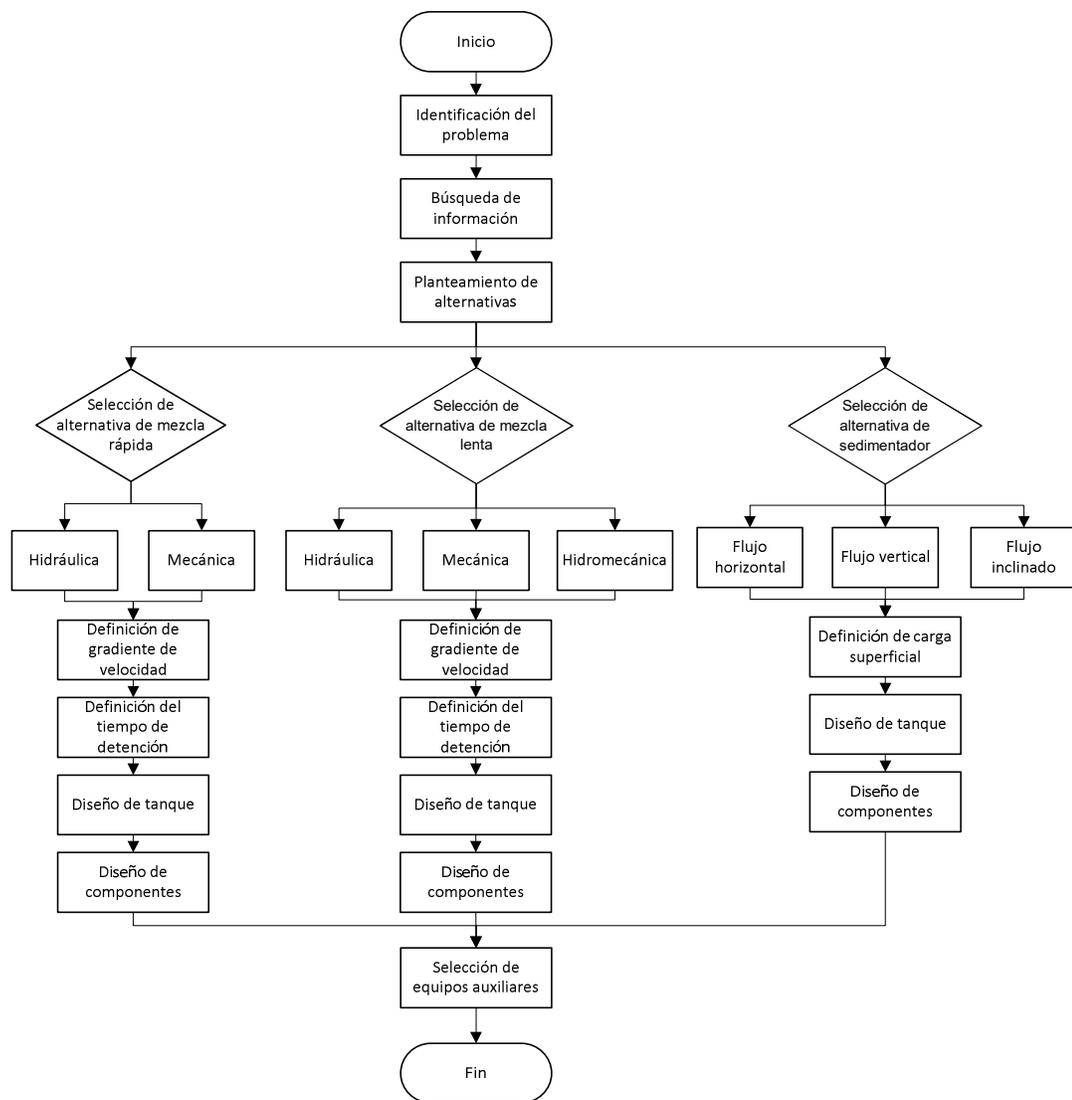


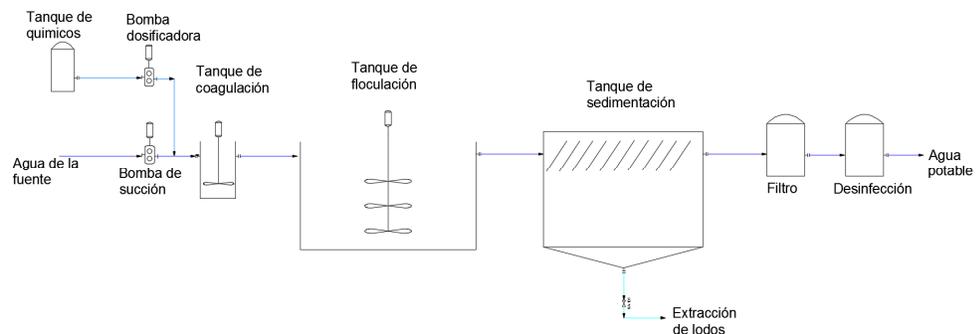
Figura 2-1. Diagrama de flujo para el diseño de planta potabilizadora de agua.

Fuente: Elaboración propia.

## 2.1 Diseño de forma

Para empezar con el diseño de la planta de potabilización es necesario establecer las siguientes condiciones:

- La planta se alimenta de agua cruda obtenida de alguna fuente superficial por lo que es necesario utilizar una bomba de succión.
- El proceso de coagulación se realizará en un tanque, que dispondrá una bomba dosificadora encargada de inyectar la dosis de químico al agua cruda para posteriormente mezclarse bajo una fuerte agitación.
- En el proceso de floculación, la mezcla se realizará en un tanque de mayor tamaño al utilizado en la etapa previa, además la agitación deberá ser de menor intensidad.
- En el siguiente proceso se retiene el agua para que las partículas se sedimenten en el fondo del tanque, donde se colocará una válvula para extraer los lodos acumulados durante la operación.
- Para trasladar el fluido de un tanque a otro, se empleará el principio de vasos comunicantes, es decir que se aprovecha el flujo natural del agua sin necesidad de ser impulsada por una fuente externa.



**Figura 2-2. Diseño de forma de la planta potabilizadora de agua.**

Fuente: Elaboración propia.

## 2.2 Planteamiento de alternativas

En el proceso de tratamiento de agua hay algunas etapas por las que debe pasar el fluido antes de ser apta para su consumo. A continuación, se exponen las diferentes alternativas que existen para los mezcladores y sedimentadores. Se hará mayor énfasis en estos procesos, dado que de ellos depende el adecuado funcionamiento de la unidad potabilizadora.

### 2.2.1 Mezclador

#### **Alternativa A. Mezcladores hidráulicos**

##### Ventajas

- No consumen energía eléctrica, puesto que aprovechan la energía cinética y potencial durante el recorrido del fluido.
- No poseen partes móviles, por lo que su operación y mantenimiento son simples.
- Este tipo de instalación tiene mayor capacidad de producción de agua.
- Bajo costo de operación.

##### Desventajas

- Los cambios de dirección para generar gradientes de velocidad, producen pérdidas hidráulicas.
- El caudal de operación no puede ser variado sin afectar la velocidad del flujo, a causa de que tienen secciones constantes.
- El gradiente de velocidad no se puede controlar fácilmente.
- Requieren mayor espacio para su instalación.
- Presentan complejidad para su ensamblaje.

#### **Alternativa B. Mezcladores Mecánicos**

##### Ventajas

- Permiten regular la velocidad de agitación, es decir que pueden trabajar con gradientes de velocidad variables y en consecuencia, presentan flexibilidad al momento de tratar agua con diferentes niveles de turbiedad.

- Son sistemas compactos.
- Los tanques de mezcla presentan facilidad para su mantenimiento.

#### Desventajas

- Probabilidad de producir cortocircuitos, a causa del paso directo de agua al siguiente proceso sin el mezclado adecuado.
- Requiere una persona encargada para controlar la velocidad de rotación del mezclador.
- Requiere electricidad para su operación.
- Mantenimiento periódico a los elementos mecánicos.

#### **Alternativa C. Mezcladores hidromecánicos**

##### Ventajas

- El gradiente de velocidad puede regularse en relación al nivel al agua en el tanque de carga.
- No emplea energía eléctrica.
- Bajo costo de operación.

##### Desventajas

- El costo de implementación es elevado.
- El mezclador es dependiente de otros mecanismos.
- El mantenimiento debe ser riguroso, sobre todo en la tobera de inyección para evitar obstrucciones.

Para realizar el proceso de coagulación o mezcla rápida, se puede emplear la Alternativa A o la Alternativa B, que corresponden a los mezcladores hidráulicos y mecánicos respectivamente. Por otra parte, para el proceso de floculación o mezcla lenta se emplean las alternativas A, B y C.

## 2.2.2 Sedimentador

### **Alternativa A.** Sedimentador de flujo horizontal

#### Ventajas

- Su configuración interna es simple.

#### Desventajas

- Requiere un tiempo de asentamiento mayor a 4 horas.
- Son tanques de gran tamaño.

### **Alternativa B.** Sedimentador de flujo vertical

#### Ventajas

- Los flóculos retenidos en la parte inferior del tanque tienden a comportarse como filtros de flujo ascendente.
- Complementa al proceso de floculación, además de sedimentar las partículas.

#### Desventajas

- Debido a la fuerza del fluido, los flóculos pueden ser arrastrados a los canales de recolección.
- Exige un tiempo de detención en la cámara entre 1 a 2 horas.

### **Alternativa C.** Sedimentador de flujo inclinado

#### Ventajas

- Poseen una serie de placas inclinadas que aumentan el área de contacto superficial con los flóculos, permitiendo un diseño compacto.
- Operan con tiempos de retención bajos (menor a una hora), por lo que permite que los flóculos se asienten con mayor rapidez.
- No pierde efectividad frente a variación de la carga de entrada.

#### Desventajas

- El número de componentes es variable en relación con la capacidad de la planta.

## 2.3 Selección de Alternativas

Una vez analizadas las alternativas para cada sistema, se desarrolla la matriz de decisión con el fin de determinar el diseño más conveniente para cada proceso. Por otra parte, la alternativa seleccionada debe cumplir con los requisitos de ser parte de un sistema compacto y portátil.

### 2.3.1 Mezclador

#### Mezcla Rápida

Los criterios de evaluación a analizar para este proceso son los siguientes:

- **Costo de operación:** son las demandas requeridas por el sistema que involucren un desembolso de dinero, en este caso, el consumo de energía eléctrica, químico coagulante y de desinfección.
- **Flexibilidad de operación:** se refiere a la capacidad del sistema a trabajar con fuentes de agua dulce de diferentes niveles de turbiedad, sin afectar el producto final.
- **Mantenibilidad:** es la propiedad que indica el nivel de dificultad que presenta el sistema para ser conservado en buenas condiciones de operación.
- **Demanda de espacio:** es el área superficial que requiere el sistema para su instalación.
- **Facilidad de fabricación:** hace referencia al esfuerzo y tiempo que deben ser empleados para la producción de elementos necesarios para el sistema.

Para definir el peso de cada criterio de evaluación, se procede a comparar un criterio con otro, con la finalidad de reflejar su relevancia para la selección de la mejor alternativa. Para el análisis se ha impuesto las siguientes calificaciones:

- Cuando se considera que el criterio A tiene mayor relevancia que el criterio B, se coloca "1" en el cuadro.
- Cuando se considera que el criterio A tiene igual relevancia que el criterio B, se coloca "0.5" en el cuadro.

- Cuando se considera que el criterio A tiene menor relevancia que el criterio B, se coloca “0” en el cuadro.
- Se asigna un recuadro negro al comparar los mismos criterios, que equivale a un valor de “1”.

La ponderación de cada criterio es obtenida al asignarle una calificación, acorde a lo anteriormente descrito; posteriormente se procede a sumar horizontalmente cada criterio, y finalmente se divide la calificación del criterio para la calificación total, tal como se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7. Ponderación de criterios de evaluación.**

Criterio B \ Criterio A	Costo de operación	Flexibilidad de operación	Mantenibilidad	Demanda de espacio	Facilidad de fabricación	$\Sigma$	Ponderación
	Costo de operación	Flexibilidad de operación	Mantenibilidad	Demanda de espacio	Facilidad de fabricación		
Costo de operación		0	0.5	0	1	2.5	0.17
Flexibilidad de operación	1		1	0.5	1	4.5	0.30
Mantenibilidad	0.5	0		0	0.5	2	0.13
Demanda de espacio	1	0.5	1		1	4.5	0.30
Facilidad de fabricación	0	0	0.5	0		1.5	0.10
Total						15	1.00

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar en la Tabla 7, que los criterios de mayor relevancia para la mezcla rápida son la flexibilidad de operación y la demanda de espacio, ya que estos se deben apegar a los objetivos planteados. Una vez obtenida la ponderación, se asigna una calificación a cada criterio de las alternativas propuestas. Las calificaciones se encuentran dentro de un intervalo del 1 al 4, y se representan de la siguiente manera:

- Muy Bueno = 4
- Bueno = 3
- Regular = 2
- Malo = 1

Posteriormente, se multiplica la calificación asignada por la ponderación de cada criterio de evaluación para realizar la sumatoria de los resultados obtenidos en cada alternativa, como se muestra en la Tabla 8. De esta manera se obtiene una calificación global sobre 4 que va a permitir comparar las alternativas propuestas. Recordando que la Alternativa A se refiere a mezcladores hidráulicos y la Alternativa B a mezcladores mecánicos.

**Tabla 8. Evaluación de las alternativas.**

Criterio de evaluación	% Ponderación	Alternativa A	Alternativa B
Costo de operación	17%	4	1
Flexibilidad de operación	30%	1	4
Mantenibilidad	13%	3	2
Demanda de espacio	30%	1	4
Facilidad de fabricación	10%	2	4
<b>Calificación sobre 4</b>		<b>1.87</b>	<b>3.23</b>

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se selecciona la alternativa con la mayor calificación, es decir la Alternativa B, que corresponde a mezclador mecánico [Tabla 8].

### Mezcla lenta

Para este proceso se emplean los mismos criterios de evaluación que en la mezcla rápida, por lo que la ponderación de los criterios de evaluación y el sistema de calificación no varían. Se debe tener presente que existe una alternativa adicional que debe ser evaluada. Entonces se realiza la calificación de cada alternativa (ver Tabla 7), asignando una calificación entre 1 y 4, siendo 1 “Malo” y 4 “Muy bueno”:

Recordando las alternativas para los floculadores, se tiene lo siguiente:

Alternativa A. Floculadores hidráulicos

Alternativa B. Floculadores mecánicos

Alternativa C. Floculadores hidromecánicos

**Tabla 9. Evaluación de las alternativas.**

Criterio de evaluación	% Ponderación	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
Costo de operación	17%	4	1	4
Flexibilidad de operación	30%	1	4	2
Mantenibilidad	13%	3	2	2
Demanda de espacio	30%	1	4	2
Facilidad de fabricación	10%	2	4	1
<b>Calificación sobre 4</b>		<b>1.87</b>	<b>3.23</b>	<b>2.24</b>

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 9, la alternativa con mayor puntaje es la B, que corresponde a floculadores mecánicos. Cabe recalcar que por la necesidad de obtener un diseño que permita atender emergencias, debe ser compacto y que pueda trabajar con diferentes fuentes de agua dulce.

El sistema de mezcla mecánico resultó ser la mejor opción a pesar de que el mantenimiento de sus elementos y el consumo de energía eléctrica representan un costo adicional.

### 2.3.2 Sedimentador

A continuación se exponen los criterios de evaluación para la selección de los sedimentadores:

- **Flexibilidad de operación:** se refiere a la capacidad del sistema a trabajar con diferentes cargas de entrada.
- **Mantenibilidad:** es la propiedad que indica el nivel de dificultad que presenta el sistema para ser conservado en buenas condiciones de operación.
- **Demanda de espacio:** es el área superficial que requiere el sistema para su instalación.
- **Facilidad de fabricación:** hace referencia al esfuerzo y tiempo que deben ser empleados para la producción de elementos necesarios para el sistema.

Se empleará el método ponderado y el mismo sistema de calificación para la selección de la mejor opción de sedimentadores, como se muestra en la Tabla 10.

Recordando las alternativas para sedimentadores:

Alternativa A. Sedimentador de flujo horizontal

Alternativa B. Sedimentador de flujo vertical

Alternativa C. Sedimentador de flujo inclinado

**Tabla 10 . Ponderación de criterios de evaluación.**

Criterio A \ Criterio B	Flexibilidad de operación	Mantenibilidad	Demanda de espacio	Facilidad de fabricación	$\Sigma$	Ponderación
	Flexibilidad de operación	Mantenibilidad	Demanda de espacio	Facilidad de fabricación		
Flexibilidad de operación		1	0.5	1	3.5	0.35
Mantenibilidad	0		0	1	2	0.2
Demanda de espacio	0.5	1		1	3.5	0.35
Facilidad de fabricación	0	0	0		1	0.10
<b>Total</b>					10	1.00

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 11 . Evaluación de las alternativas.**

Criterio de evaluación	% Ponderación	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
Flexibilidad de operación	35%	2	2	4
Mantenibilidad	20%	2	3	2
Demanda de espacio	35%	1	3	4
Facilidad de fabricación	10%	4	3	2
<b>Calificación sobre 4</b>		<b>1.85</b>	<b>2.65</b>	<b>3.40</b>

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 11 se observa que la Alternativa C posee mayor calificación de acuerdo a los criterios de evaluación planteados, es decir el sedimentador de placas paralelas.

Finalmente, los sistemas seleccionados para cada proceso se muestran a continuación.

**Tabla 12. Sistemas seleccionados para los respectivos procesos.**

Proceso	Sistema	Descripción
Coagulación	Mecánico	Turbina, eje vertical
Floculación	Mecánico	Paletas, eje vertical
Sedimentación	Flujo inclinado	Placas paralelas inclinadas

Fuente: Elaboración propia.

## 2.4 Diseño del sedimentador

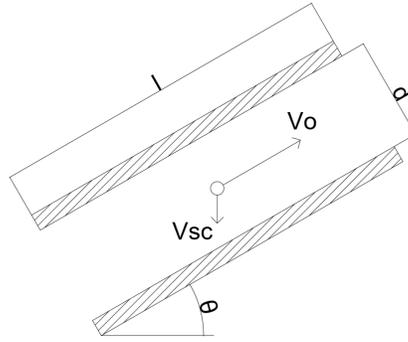
Para el dimensionamiento de este equipo, se tomó como referencia la norma NTE INEN 2655 y el “Manual de Tratamiento de Aguas” (Perez, 1981). En el caso de sedimentadores de flujo inclinado, se debe determinar las dimensiones y el número de placas a utilizar para efectuar la sedimentación de las partículas, y por consiguiente la clarificación del agua.

El primer parámetro a determinar es la velocidad crítica de sedimentación de las partículas ( $V_{sc}$ ), que indica la velocidad vertical con la que estas se asientan y se la obtiene realizando pruebas de jarras del agua a tratar. En el caso de no poder realizar la prueba, se debe utilizar una velocidad de diseño de 20 [ $m^3/m^2/día$ ] que asegura la sedimentación de partículas con mayor velocidad a la mencionada, tales como arena y partículas orgánicas (Arboleda, 2000).

La velocidad ascendente ( $V_o$ ) de las partículas a sedimentar, entre dos placas paralelas, se determina con la ecuación 1.

$$V_o = V_{sc}(\sin \theta + L_r \cos \theta) \quad (1)$$

Siendo  $\theta$  el ángulo de inclinación de las placas respecto a la horizontal, el cual debe estar entre 40 y 60° y  $L$  la altura de la placa.



**Figura 2-3. Representación de velocidades de las partículas entre placas paralelas.**

Fuente: Elaboración propia.

El espaciamiento entre placas ( $d$ ) no debe ser mayor a 100 [mm] y la relación  $L_r$  debe tener mínimo un valor de 15.

$$L_r = l/d \quad (2)$$

El flujo que pasa a través de las placas paralelas debe ser laminar para evitar arrastrar los lodos que se asientan sobre las mismas. Por lo tanto se recomienda que el fluido opere bajo valores de Reynolds ( $Re$ )  $< 500$ .

$$Re = \frac{4V_o R_h}{\nu} \quad (3)$$

Donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática del agua, que varía con la temperatura y  $R_h$  se refiere al radio hidráulico de la sección por la que fluye el agua. Dicha sección es rectangular ya que está formada por el ancho de la placa ( $b$ ) y el espaciamiento entre placas.

$$R_h = \frac{bd}{2(b+d)} \quad (4)$$

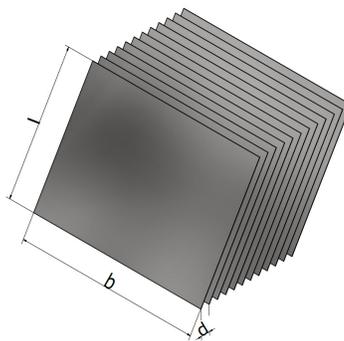
Desarrollando la ecuación 1 para una longitud útil relativa, donde el fluido es completamente laminar, se tiene que:

$$V'_o = V_{sc}(\text{sen } \theta + (L_r - 0.058 R_e) * \text{cos } \theta) \quad (5)$$

Una vez determinada la velocidad adecuada del fluido, se debe determinar el número de canales ( $C$ ) necesarios para trabajar con el caudal de operación ( $Q$ ).

$$C = \frac{Q}{bV_0d} \quad (6)$$

Considerando que el canal se forma colocando dos placas de forma paralela, entonces es evidente que finalmente el número de placas ( $N_p$ ) que se necesita colocar en el tanque es igual a  $C + 1$ .



**Figura 2-4. Placas paralelas inclinadas.**

Fuente: Elaboración propia.

En el fondo del sedimentador se debe colocar una tolva por donde se extraen los lodos, es decir las partículas floculadas ya asentadas, la misma que debe tener una inclinación entre  $45^\circ$  y  $60^\circ$ .

## 2.5 Diseño de los tanques

Según el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), los tanques para los diferentes procesos pueden ser de sección circular o cuadrada. En el presente proyecto se diseñarán tanques de paredes planas por su facilidad de fabricación y aprovechamiento de espacio. Además, con la finalidad de obtener un diseño modular, el fluido debe pasar de un tanque a otro aprovechando la pared contigua entre ellos.

La capacidad de cada tanque debe ser calculada determinando un tiempo de detención y el caudal de operación. A continuación, se muestran los tiempos

de detención recomendados por la revista de la American Water Works Association (AWWA) para la mezcla rápida y lenta.

**Tabla 13. Tiempos de detención recomendados para las mezclas.**

<b>Mezcla rápida</b>	30 segundos
<b>Mezcla lenta</b>	30 minutos

Fuente: (Hudson & Wolfner, 1967).

Para determinar el volumen del tanque  $V$  [ $m^3$ ], es necesario conocer previamente el caudal  $Q$  [ $m^3/s$ ] y el tiempo de detención  $t_d$  [s]

$$V = Q * t_d \quad (7)$$

Por lo tanto, las dimensiones de los lados del tanque se obtienen con la ecuación 8.

$$V = L * H * B \quad (8)$$

Donde: L: largo del tanque [m], H: altura del tanque [m], B: ancho del tanque [m].

Por otro lado, es necesario tener en consideración que la presión hidrostática representa un problema por motivo que las paredes sufren esfuerzos de flexión, por lo tanto el espesor de las paredes y los elementos rigidizadores se calcularán siguiendo las recomendaciones establecidas en el "Manual de Recipientes a Presión" (Megyesy, 1992), basado en el código de la Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos, ASME por sus siglas en inglés, en su Sección VIII, División 1.

En el manual se indica que para tanques cuyo volumen sea menor a  $30 \text{ ft}^3$  no se requerirán elementos rigidizadores y el espesor de las paredes ( $t$ ) se lo calcula a través de la ecuación 9. Por otro lado, cuando el volumen es superior a dicho valor se emplea la ecuación 10.

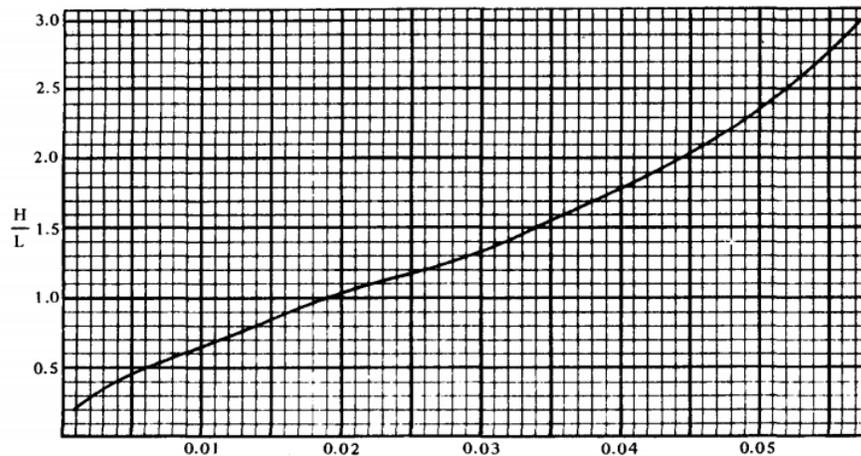
$$t = 2.45L \sqrt{\frac{0.036\alpha G_e H}{S_y}} \quad (9)$$

$$t = 2.45L \sqrt{\frac{\alpha_n P_n}{S_y}} \quad (10)$$

Donde:  $G_e$  es la gravedad específica del fluido, seleccionando para nuestro caso un valor de 1.6, asumiendo que el tanque esta contenido completamente por lodo.  $S_y$ , es el esfuerzo de fluencia del material de la plancha con la que se va a diseñar el tanque [psi].  $\alpha$  depende de la relación  $H/L$ , y se lo determina empleando la Figura 2-5. El subíndice 'n' presente en la ecuación 10 se refiere al número de secciones delimitadas por dos elementos rigidizadores colocados a una distancia  $h_n$ , como se muestra en el ejemplo esquemático de la Figura 2-6.

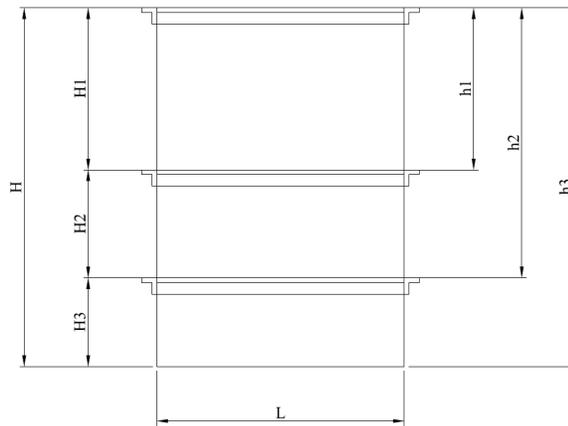
La presión hidrostática  $P_n$  [psi], es aplicada sobre cada sección del tanque y se la calcula empleando la ecuación 11.

$$P_n = \frac{0.036G_e(h_{n-1} - h_n)}{2} \quad (11)$$



**Figura 2-5. Valores de  $\alpha$  para tanques rectangulares.**

Fuente: (Megyesy, 1992).



**Figura 2-6. Esquema de un tanque con elementos rigidizadores.**

Fuente: (Megyesy, 1992).

La Tabla 14 indica el número de rigidizadores que deben ser considerados en función de la altura del tanque.

**Tabla 14. Determinación del número de elementos rigidizadores.**

H (in)	60 – 84	84 - 120	120 – 156	> 156
Numero de rigidizadores	2	3	4	5

Fuente: (Megyesy, 1992).

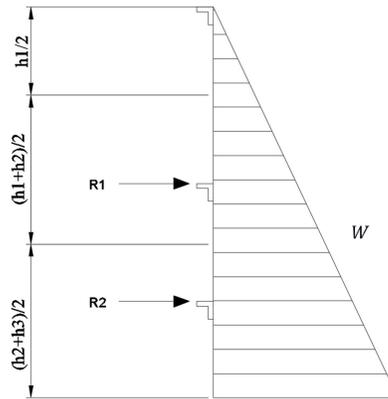
Es así, que para definir la distribución de los elementos rigidizadores se toma en cuenta la cantidad a colocar y la altura total del tanque. En la Tabla 15 se determina la separación de cada uno, respecto a la parte superior del tanque ( $H_n$ ).

**Tabla 15. Posición de los elementos rigidizadores.**

Numero de rigidizadores	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$
2	0.60 H	0.40 H	-	-	-
3	0.45 H	0.30 H	0.25 H	-	-
4	0.37 H	0.25 H	0.21 H	0.17 H	-
5	0.31 H	0.21 H	0.18 H	0.16 H	0.14 H

Fuente: (Megyesy, 1992).

En la Figura 2-7 se muestra el diagrama de la carga distribuida ( $W$ ) ejercida sobre las paredes del tanque y las reacciones ( $R$ ) de los rigidizadores, las cuales pueden ser calculadas empleando las ecuaciones 12 y 13.



**Figura 2-7. Distribución de fuerzas sobre las paredes del tanque.**

Fuente: (Megyesy, 1992).

$$W = \frac{0.036G_e h^2}{2} \quad (12)$$

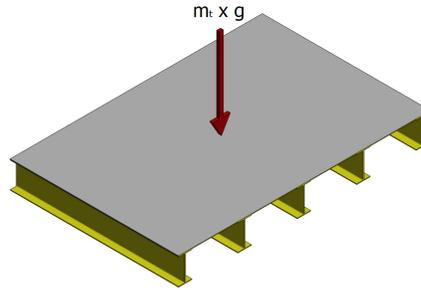
$$R = 0.7W \quad (13)$$

Continuando con el análisis y con el objetivo de seleccionar el perfil del elemento rigidizador, se debe calcular la inercia mínima ( $I_{min}$ ) que soporte la presión hidrostática sin sobrepasar la deflexión permitida por ASME, donde  $E$  es el módulo de elasticidad del material [psi].

$$I_{min} = 1.25 \frac{RL^3}{E} \quad (14)$$

Es necesario que el tanque se apoye sobre vigas, por lo que la selección se hará en base al peso del tanque con el líquido en su interior a la máxima capacidad. Es así que la masa del tanque se determina en función del volumen ( $V_1$ ) y la densidad del acero ( $\rho_a = 7850$  [kg/m<sup>3</sup>]). Dado que se asume que el tanque está contenido por lodo, se emplea una densidad ( $\rho_d$ ) de 1600 [kg/m<sup>3</sup>] y se calcula la masa total aplicada sobre las vigas ( $m_t$ ).

$$m_t = \rho_a V_1 + \rho_d V_2 \quad (15)$$



**Figura 2-8. Esquema de la fuerza aplicada sobre la base del tanque.**

Fuente: Elaboración propia.

La separación máxima entre las vigas ( $l_v$ ) se determina empleando la ecuación 16. Este valor sirve para determinar el número de vigas que se van a emplear.

$$l_v = 1.254t \sqrt{\frac{S_y}{0.036G_e H}} \quad (16)$$

Donde:  $S_y$  es el esfuerzo de fluencia del material [psi],  $G_e$ : gravedad específica del fluido y  $H$  la altura total del tanque [ft].

Finalmente, para seleccionar el tipo de viga se hace necesario determinar previamente el momento y el esfuerzo aplicados sobre la misma.

El momento  $M$  estará relacionado con el número de vigas ( $N_v$ ), la masa total del tanque ( $m_t$ ),  $g$  es la gravedad [ $9.8 \text{ m/s}^2$ ] y el ancho del tanque ( $B$ ).

$$M = \frac{m_t g B}{2N_v} \quad (17)$$

El esfuerzo permisible se determina a través de el esfuerzo de fluencia del material ( $S_y$ ) y un factor de seguridad.

$$\sigma_p = \frac{S_y}{N} \quad (18)$$

Por lo tanto el módulo de resistencia S de la viga es la relación entre el momento y el esfuerzo.

$$S = \frac{M}{\sigma_p} \quad (19)$$

## 2.6 Diseño de los elementos de agitación

Para la mezcla rápida o coagulación se utilizará un agitador mecánico de turbina y para la mezcla lenta o floculación se trabajará con agitador de paletas con eje vertical. Los requerimientos de potencia y velocidad de los agitadores son determinados con la finalidad de seleccionar un motor adecuado para el sistema. Es importante resaltar que la diferencia entre la mezcla rápida y la lenta es su gradiente de velocidad, el cual es un parámetro que indica el grado de agitación del fluido en una mezcla.

El diseño del sistema permitirá a un operador variar el gradiente de velocidad dentro del rango descrito anteriormente en la Tabla 3, graduando la velocidad de rotación del motor. Este parámetro se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$G = \beta \sqrt{P_v} \quad (20)$$

Donde:

$P_v$  es la potencia por unidad de volumen [g-cm/s-cm<sup>3</sup>].

G es gradiente de velocidad [s<sup>-1</sup>].

$\beta$  es un factor que depende de la viscosidad ( $\mu$ , [g<sub>m</sub>/cm-s]) del fluido y se lo calcula a partir de la ecuación 21. Este factor se tabula en función de la temperatura del fluido (ver Tabla 16).

$$\beta = \sqrt{\frac{981}{\mu}} \quad (21)$$

Conociendo la magnitud de los gradientes de velocidad recomendados para cada proceso, el volumen del tanque y la viscosidad del fluido, se puede despejar la potencia (P) que debe ser suministrada al agua para producir la

agitación tanto en la mezcla rápida como en la mezcla lenta. Entonces la potencia viene expresada como sigue:

$$P = \left(\frac{G}{\beta}\right)^2 * V \quad (22)$$

Siendo, V el volumen del tanque [cm<sup>3</sup>].

En la Tabla 16 se muestran los valores de  $\beta$  para distintas temperaturas del agua.

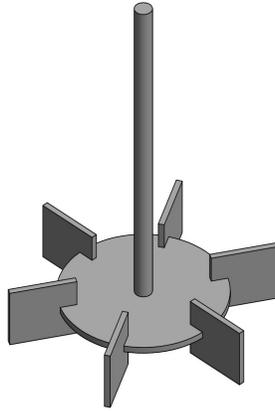
**Tabla 16. Valores de  $\beta$  para diferentes temperaturas.**

Temperatura °C	$\beta$	Temperatura °C	$\beta$	Temperatura °C	$\beta$
1	238.00	11	277.50	21	315.28
2	242.00	12	281.40	22	319.12
3	246.00	13	284.56	23	322.96
4	250.00	14	289.00	24	326.80
5	253.00	15	292.70	25	330.64
6	258.00	16	296.08	26	334.48
7	261.00	17	299.92	27	338.32
8	265.90	18	303.76	28	342.16
9	269.20	19	307.60	29	346.00
10	273.60	20	311.80	30	350.17

Fuente: (Arboleda, 2000).

### 2.6.1 Agitador mecánico de turbina

En el diseño se emplea una turbina tipo Rushton, que consta de un disco con 6 paletas (Figura 2-9) para impulsar el fluido radialmente dentro del tanque y producir la mezcla. Este tipo de agitador fue seleccionado debido a que permite trabajar a altas velocidades y en regímenes turbulentos.



**Figura 2-9. Esquema de Turbina Rushton.**

Fuente: Elaboración propia.

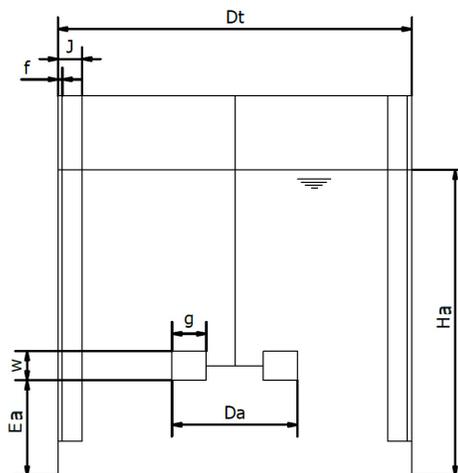
Con la finalidad de asegurar una buena mezcla entre el químico coagulante y el agua cruda, se sugieren unas relaciones geométricas entre el tanque y el agitador mecánico, como se muestra a continuación.

**Tabla 17. Relaciones geométricas entre el tanque y la turbina.**

$D_t / H_a$	1.00
$W / D_a$	0.20
$f / D_t$	0.02
$D_a / D_t = E_a / D_t$	0.33
$g / D_a$	0.25
$J / D_t$	0.10

Fuente: (Arboleda, 2000).

Donde las dimensiones del tanque y de la turbina [mm], se muestran en la Figura 2-10.



**Figura 2-10. Relaciones geométricas entre tanque mezclador y agitador.**

Fuente: (Arboleda, 2000).

J: Ancho de deflectores.

f: Distancia entre extremo de deflector y pared de tanque.

Ha: Altura de nivel de agua.

w: Altura de paleta.

Ea: Distancia entre extremo inferior de paleta y el fondo del tanque.

g: Ancho de paleta.

Dt: Diámetro del tanque.

Da: Diámetro de la turbina.

Por otra parte, la ecuación 23 relaciona la potencia de los mezcladores mecánicos con las fuerzas de viscosidad e inercia, representadas por el número de Reynolds y Froude respectivamente.

$$P = K\rho n^3 D_a^5 (N_R)^P (N_F)^q \quad (23)$$

P representa la potencia suministrada al agitador [W].

$\rho$  es la densidad del fluido de trabajo [kg/m<sup>3</sup>].

n es el número de revoluciones por segundo del agitador [rps].

Da es el diámetro del agitador [m].

K es una constante que depende del tipo de agitador y la geometría del tanque.

$N_R$  es el número de Reynolds.

$N_F$  es el número de Froude.

$p$  y  $q$  son factores que dependen del régimen del fluido.

Considerando que para la mezcla se requiere que el fluido se encuentre en régimen turbulento, entonces los valores  $p$  y  $q$  tendrán un valor de cero. Por lo tanto, la ecuación de potencia quedaría de la siguiente manera:

$$P = K\rho n^3 D^5 \quad (24)$$

El valor de  $K$  se lo obtiene a partir de la Tabla 18.

**Tabla 18. Valores de  $K$  para diferentes anchos de placas deflectoras.**

$N_R$	$J/D_t$		
	0.17	0.10	0.04
100	3.5	3.5	3.6
1000	4.8	4.3	3.9
>10000	6.9	6.0	4.05

Fuente: (Arboleda, 2000).

Continuando con el análisis, al igualar las ecuaciones 22 y 24, se determina la velocidad de rotación del agitador dentro del fluido de trabajo.

Para una mayor explicación del análisis realizado en este trabajo, el cálculo del espesor de la paleta se desarrolla en el Apéndice A1, donde se modela cada paleta como un elemento de sección transversal rectangular en voladizo sometido a una carga en su extremo libre a una distancia  $r$  [m]. Además, el diseño del eje del agitador se muestra en el Apéndice A3.

### 2.6.2 Agitador tipo paleta de eje vertical

Este tipo de agitador consta de paletas verticales paralelas al eje, como se puede apreciar en la Figura 2-11. Es funcional para trabajar a bajas velocidades y con fluidos viscosos que requieren bajo esfuerzo cortante.



**Figura 2-11. Esquema del agitador.**

Fuente: Elaboración propia.

Para el diseño, se toma como referencia la norma NTE INEN 2655, que indica lo siguiente:

- Las paletas correspondientes a un mismo plano tendrán su área inferior al 20% de la sección transversal de la unidad, con la finalidad de evitar la rotación de la masa de agua.
- La distancia entre paletas debe ser superior o igual a 0.1 [m].
- La relación entre el diámetro del rotor formado por dos brazos y el lado de la cámara, estará comprendido entre 0.8 y 0.9.
- El ancho de las paletas estará comprendido entre 50 [mm] y 150 [mm].
- La relación largo/ancho óptima de las paletas está comprendida entre 15 a 20.

Complementando lo anteriormente escrito con el análisis realizado por el autor Arboleda (2000), se indica que la distancia entre los extremos de los agitadores se suele hacer mayor a 600 [mm] y el espacio entre ellos y el fondo del tanque entre 150 [mm] y 300 [mm]. Mientras que el CEPIS establece que la velocidad periférica de la paleta más alejada del eje de rotación debe ser menor a 0.75 [m/s] para evitar desintegrar los flóculos que han sido formados.

El área de cada paleta ( $A_p$ ) se la calcula a partir de la ecuación 25, considerando que esta sea un 20% del área transversal del tanque ( $A_T$ ) y  $n_p$  el número de paletas escogido para el floculador.

$$A_p = \frac{0.2A_T}{n_p} \quad (25)$$

Empleando la ecuación 22 y los gradientes de velocidad recomendados en la Tabla 3, se obtiene la potencia que debe disipar el agitador. Luego, con la ecuación 26 se calcula la velocidad de rotación del sistema.

$$P_d = \frac{12600C_D(1 - K_f)^3 \sum Ar^3}{75} n^3 \quad (26)$$

$C_D$ : coeficiente de arrastre definido en la Tabla 19.

$n$ : velocidad de rotación [rps].

$A$ : área de la paleta [ $m^2$ ].

$r$ : distancia desde la paleta al eje de rotación [m].

$K_f$ : constante de proporcionalidad entre la velocidad periférica de rotación de las paletas y la velocidad de rotación del líquido.

**Tabla 19. Valores de  $C_D$  para diferentes relaciones geométricas de las paletas**

$L_p/a$	$N_R$	$C_D$
1	$>10^3$	1.16
5	$>10^3$	1.20
20	$>10^3$	1.50
$\infty$	$>10^3$	1.95

Fuente: (Arboleda, 2000).

Donde:

$L_p$ : longitud de la paleta [m].

$a$ : ancho de la paleta [m].

$N_R$ : número de Reynolds.

Según Fair (1956), para el factor  $K_f$  presente en la ecuación 26, se toma un valor de 0.25 cuando se establece un equilibrio en el fluido.

Finalmente, la potencia que debe suministrar el motor se la obtiene realizando el producto entre la potencia disipada ( $P_d$ ) y un factor de eficiencia definido en la tabla a continuación.

**Tabla 20. Factor de eficiencia aplicado a floculadores.**

<b>Floculadores horizontales</b>	3 – 5
<b>Floculadores verticales</b>	2 – 4

Fuente: (Arboleda, 2000).

Al igual que en la sección 2.6.1, se debe determinar el espesor de paleta y diseñar el eje del agitador, como se muestra en el apéndice A2 y A3 respectivamente.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Sedimentador

Para el diseño del sedimentador, se deben proporcionar como datos de entrada el caudal de operación, las dimensiones de las placas a emplear y el ángulo de inclinación seleccionado. Se utilizó la viscosidad del agua a una temperatura de 20° C. Estos parámetros son resumidos en la tabla a continuación.

**Tabla 21. Parámetros de entrada para el sedimentador.**

<b>Caudal (Q)</b>	10 m <sup>3</sup> /h
<b>Ancho de la placa (b)</b>	1700 mm
<b>Altura de la placa (l)</b>	1200 mm
<b>Espesor de la placa (e)</b>	3 mm
<b>Ángulo de inclinación (θ)</b>	60°
<b>Velocidad crítica de sedimentación (V<sub>sc</sub>)</b>	20 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día

Fuente: Elaboración propia.

Al aplicar las ecuaciones y condiciones de la sección 2.5, se pueden obtener diferentes resultados tras variar el espaciamiento (d) entre las placas. Se realizó un proceso de prueba y error mostrado en la Tabla 22, donde se selecciona el espaciamiento que brinde un menor error de  $V_o$  y cumpla con el requerimiento de que el flujo sea laminar ( $Re < 500$ ).

**Tabla 22. Selección del espaciamiento entre placas adecuado.**

<b>d (cm)</b>	<b>L<sub>r</sub></b>	<b>V<sub>o</sub> (cm/s)</b>	<b>Re</b>	<b>V<sub>o</sub>' (cm/s)</b>	<b>Error</b>
5	24,000	0,298	291,129	0,380	0,082
6	20,000	0,252	294,875	0,285	0,034
7	17,143	0,218	298,617	0,216	0,002
8	15,000	0,194	302,354	0,164	0,029
9	13,333	0,174	306,088	0,123	0,051
10	12,000	0,159	309,816	0,090	0,069

Fuente: Elaboración propia.

Luego de determinar la separación placas, se procede a dimensionar sedimentador, cuyos resultados se muestran en la Tabla 23.

**Tabla 23. Resultados de las placas del sedimentador.**

<b>Separación entre placas (d)</b>	70 mm
<b>L<sub>r</sub></b>	17.14
<b>Número de Reynolds (Re)</b>	299
<b>Número de canales (C)</b>	11
<b>Número de placas (N<sub>p</sub>)</b>	12

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Sistema de mezcla rápida o coagulación

Para el diseño del tanque de coagulación, se estableció un tiempo de detención de 45 segundos para establecer su volumen. Luego, aplicando la ecuación 9 se determinó el espesor de las paredes del tanque.

Se asumió que el fluido contenido en el tanque de coagulación es, en su totalidad, lodo con una densidad de 1600 kg/m<sup>3</sup>. El material seleccionado para la construcción del tanque es acero A-36, debido a que es un acero estructural.

Las dimensiones del tanque para la mezcla rápida se muestran en la Tabla 24.

**Tabla 24. Dimensiones del tanque de mezcla rápida.**

<b>Volumen</b>	0.125 m <sup>3</sup>
<b>Largo</b>	500 mm
<b>Ancho</b>	500 mm
<b>Altura</b>	500 mm
<b>α (Ha/D<sub>t</sub> = 1)</b>	0.019
<b>Esfuerzo de fluencia</b>	36000 psi
<b>Factor de corrosión</b>	1/16 in (1.59 mm)
<b>Espesor de paredes</b>	2.54 mm

Fuente: Elaboración propia.

Se seleccionó una plancha de acero A-36 de 3 mm de espesor para las paredes del tanque. Debido a que su volumen es menor a 30 ft<sup>3</sup>, no se requerirán elementos rigidizadores sobre las paredes.

Para el dimensionamiento del agitador mecánico tipo Rushton, se usaron las relaciones geométricas detalladas en la sección 2.6.1, y se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 25. Dimensionamiento de agitadores mecánicos tipo paleta.**

Dimensiones	Magnitud
Ha	500 mm
D <sub>t</sub>	500 mm
D <sub>a</sub>	165 mm
w	33 mm
f	10 mm
g	41 mm
E <sub>a</sub>	165 mm
J	50 mm

Fuente: Elaboración propia.

Una vez definido el volumen del tanque, es posible calcular los parámetros de operación del sistema de mezcla rápida, es decir la potencia del motor y la velocidad de rotación. Considerando que la potencia del motor se calcula multiplicando la potencia total disipada por un factor de servicio que esta entre 2 y 4 (Arboleda, 2000).

Considerando los rangos aceptables de gradiente de velocidad para la mezcla rápida (700 a 1000 s<sup>-1</sup>), se calcula el valor mínimo y máximo de velocidad de rotación de la mezcla rápida.

**Tabla 26. Parámetros de operación de la mezcla rápida.**

<b>Gradiente de velocidad</b>	1000 s <sup>-1</sup>	700 s <sup>-1</sup>
<b>Potencia disipada por el mezclador</b>	0.15 HP	0.08 HP
<b>Factor de servicio</b>	3.25	
<b>Potencia requerida por el motor</b>	0.5 HP	0.26 HP
<b>Velocidad de rotación</b>	251 rpm	318 rpm

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros de operación mostrados en la Tabla 26 son necesarios para determinar el motor a utilizar para la agitación. En este caso se requiere un motor de 0.5 HP a 1800 rpm, conectado a un variador de frecuencia para reducir la velocidad dentro del rango de operación (entre 251 y 318 rpm).

Los resultados en el Apéndice A1 y A3 muestran, respectivamente, que el espesor de las paletas de la turbina es de 4 mm y el eje de la misma es de 30 mm de diámetro, ambos de acero AISI 304.

Además, las dimensiones del tanque y los parámetros de operación del agitador fueron empleados para realizar una simulación de la mezcla en el software VisiMix Turbulent SV (ver Apéndice C). Los resultados obtenidos fueron favorables dado que se aseguró un flujo turbulento dentro del tanque y se homogeneizó la mezcla en 12 segundos, que es un tiempo mucho menor al tiempo de detención del fluido dentro de la cámara de mezcla (45 segundos).

### 3.3 Sistema de mezcla lenta o floculación

Para el proceso de floculación se estableció un tiempo de detención de 30 minutos, con el cual se calculó el volumen requerido para la cámara de mezcla lenta, cuyas dimensiones se muestran en la Tabla 27.

**Tabla 27. Dimensiones del tanque de mezcla lenta.**

<b>Largo</b>	1700 mm
<b>Ancho</b>	1700 mm
<b>Altura</b>	1650 mm
<b>Volumen para mezcla lenta</b>	5.20 m <sup>3</sup>
<b>Tiempo de detención real</b>	31.2 min

Fuente: Elaboración propia.

Cumpliendo con las restricciones establecidas en la sección 2.6.2, se calcularon las dimensiones de las paletas del floculador y su distribución dentro del tanque.

**Tabla 28. Geometría del floculador mecánico.**

<b>Número de paletas</b>	6
<b>Área total de paletas</b>	0.09 m <sup>2</sup>
<b>Largo de paletas</b>	1370 mm
<b>Ancho de paletas</b>	70 mm
<b>Separación entre paletas</b>	150 mm

Fuente: Elaboración propia.

Luego, tomando en cuenta los gradientes de velocidad recomendados para la mezcla lenta en la Tabla 3, se obtuvieron los parámetros de operación mínimos y máximos del mezclador.

**Tabla 29. Parámetros de operación para la mezcla lenta.**

<b>Gradiente de velocidad</b>	70 s <sup>-1</sup>	15 s <sup>-1</sup>
<b>Velocidad angular</b>	9.46 rpm	3.39 rpm
<b>Velocidad periférica</b>	0.62 m/s	0.21 m/s
<b>Potencia disipada por el floculador</b>	0.0290 HP	0.0013 HP
<b>Factor de servicio</b>	4	
<b>Potencia requerida por el motor</b>	0.12 HP	0.005 HP

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 29 muestran que para el accionamiento del agitador se va a emplear un motor eléctrico de 1/3 HP a 1800 rpm. Dado que la velocidad de rotación es muy baja, se va a emplear un reductor mecánico con índice de reducción de 60 para obtener una velocidad de salida de 30 rpm y luego el variador de frecuencia permite variarla entre los 3 y 10 rpm requeridos.

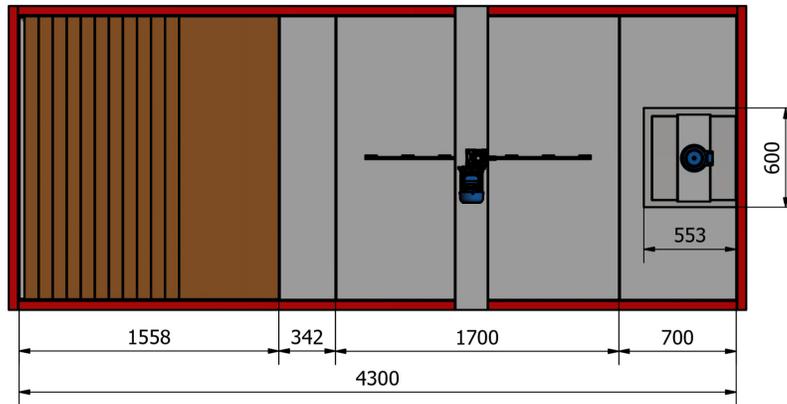
Se calculó el espesor mínimo que deben tener las paletas para evitar fallas al ser sometidas a las cargas del proceso, considerando que el material seleccionado fue la madera Chanul, que se caracteriza por ser resistente al agua. Para este análisis se empleó la carga aplicada sobre la paleta más cercana al eje, como se describe en el Apéndice A2, donde se obtuvo un espesor de 6 mm para la paleta.

En el Apéndice A3 se realizó el diseño del eje del agitador, obteniendo un diámetro externo de 40 mm.

### **3.4 Tanque de mezclado y sedimentación**

El largo total del tanque se lo obtiene a través de conocer el largo del tanque de mezcla rápida, mezcla lenta y sedimentador colocados en serie. Estos procesos se separan colocando pantallas paralelas, que tienen la función de evitar cortocircuitos, es decir que el agua pase de un proceso a otro sin haber cumplido el tiempo de detención requerido.

Tomando en consideración que el largo total del tanque es 4300 mm, como se muestra en la Figura 3-1, se obtiene un volumen total de 13.16 m<sup>3</sup> (465 ft<sup>3</sup>). Al ser un volumen superior a 30 ft<sup>3</sup>, el tanque va a requerir elementos rigidizadores que, según la Tabla 14, se deben disponer 3 de ellos sobre la cara externa de las paredes del tanque.



**Figura 3-1. Distribución interna del tanque de mezclado y sedimentación.**

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 15 indica que se deben colocar estos elementos a una distancia de 1080 mm (0.60 H), por lo tanto el tanque queda dividido en dos secciones por el rigidizador. Posteriormente se calcula el espesor de pared en cada sección.

**Tabla 30. Cálculo del espesor de la pared del tanque en cada sección.**

	1	2
<b>P<sub>n</sub></b>	1.22 psi	3.27 psi
<b>H<sub>n</sub> / L</b>	0.40	0.27
<b>α<sub>n</sub></b>	0.004	0.002
<b>t<sub>n</sub></b>	3.98 mm	4.59 mm

Fuente: Elaboración propia.

Se toma el promedio de los espesores calculados y se le adiciona un factor de corrosión de 1/16" (1.59 mm), lo que da como resultado un espesor de 5.87 mm. Por lo tanto, se emplearán planchas de acero A36 de 6.35 mm de espesor para las paredes del tanque.

**Tabla 31. Cálculo del perfil del elemento rigidizador.**

<b>W</b>	52.07 lb/in
<b>E</b>	$30 \times 10^6$ psi
<b>I</b>	$329 \text{ cm}^4$

Fuente: Elaboración propia.

El perfil seleccionado como rigidizador del tanque debe tener una inercia mayor a la calculada en la Tabla 31, por esto se empleará una viga UPN 120 (inercia:  $364 \text{ cm}^4$ ).

Finalmente, debido a que el fondo del tanque no puede asentarse en el piso por la presencia del conjunto de tolvas en uno de sus extremos, deben colocarse perfiles estructurales para poder apoyarse sobre alguna base o estructura. Para la selección del perfil, se debe calcular el peso total del mismo y determinar el número de vigas que serán colocadas, para obtener el módulo de resistencia requerido.

Se considera que el volumen del tanque de acero sobre las vigas es de  $0.13 \text{ m}^3$ , el volumen máximo del fluido es de  $8.13 \text{ m}^3$ , y recordando que sus densidades son  $7850 \text{ kg/m}^3$  y  $1600 \text{ kg/m}^3$  respectivamente, por lo que la masa total ( $m_t$ ) es de aproximadamente  $14900 \text{ kg}$ .

La separación máxima que debe haber entre las vigas de soporte del tanque es igual a  $748 \text{ mm}$ , considerando un espesor del fondo del tanque de  $6.35 \text{ mm}$ . Dado que el fondo del sedimentador contiene un conjunto de 4 tolvas, se toma en cuenta únicamente un largo aproximado de  $2700 \text{ mm}$  y los resultados se muestran en la tabla a continuación.

**Tabla 32. Cálculo de vigas para el soporte del tanque.**

<b>Número de vigas (<math>N_v</math>)</b>	5
<b>Separación entre vigas (<math>l_v</math>)</b>	600 mm
<b>Momento flector aplicado</b>	24767 Nm
<b>Material</b>	Acero A-36
<b>Módulo de resistencia requerido (<math>S</math>)</b>	$397 \text{ cm}^3$

Fuente: Elaboración propia.

De manera que, se seleccionó una viga HEB 180 (módulo de resistencia: 426 cm<sup>3</sup>).

### 3.5 Selección de equipos auxiliares

En esta sección se realizará la selección de los equipos que son requeridos en algunas de las etapas de la planta, cuyas características se muestran en el Apéndice B.

#### Motores eléctricos

En la sección 3.2 y 3.3 se establecieron las condiciones de la mezcla rápida y mezcla lenta, respectivamente. Para la selección de los motores, se debe tomar en consideración la máxima potencia requerida en cada sistema y la velocidad de rotación de los mismos. Las características del motor seleccionado para la mezcla rápida se muestran en la Tabla 33.

**Tabla 33. Características del motor para la mezcla rápida.**

<b>Proceso</b>	Mezcla rápida	
<b>Marca</b>	ABB	
<b>Tipo</b>	M2QA 71 M4A	
<b>Potencia</b>	0.5 HP	
<b>Velocidad de rotación</b>	1800 rpm	
<b>Tensión de alimentación</b>	220 V trifásico	

Fuente: ABB.

En la Tabla 34 se muestran las características del motor seleccionado para la mezcla lenta.

**Tabla 34. Características del motor para la mezcla lenta.**

<b>Proceso</b>	Mezcla lenta	
<b>Marca</b>	ABB	
<b>Tipo</b>	M2QA 71 M4A	
<b>Potencia</b>	0.33 HP	
<b>Velocidad de rotación</b>	1800 rpm	
<b>Tensión de alimentación</b>	220 V trifásico	

Fuente: ABB.

### Variador de frecuencia

El variador de frecuencia es un dispositivo que permite regular velocidades de rotación del motor mediante el control de la frecuencia de la onda de corriente que alimenta al equipo. Dado que una de las características de los agitadores de esta planta es operar con gradientes de velocidad variables dentro de un rango óptimo, por lo que fue necesario seleccionar variadores de frecuencia.

**Tabla 35. Características de variadores de frecuencia.**

<b>Marca</b>	Siemens	
<b>Tensión de alimentación</b>	220 V monofásico	
<b>Modelo</b>	Sinamics V 20	
<b>Rango de potencia</b>	0.5 HP	

Fuente: Siemens.

### Reductor de velocidad

Se seleccionó un reductor de velocidad para el proceso de mezcla lenta, debido a que la velocidad de rotación del agitador es mucho menor a la nominal del motor y una reducción tan significativa empleando únicamente un variador de frecuencia, implicaría un incremento significativo en la temperatura de operación del motor.

**Tabla 36. Características del reductor de velocidad.**

<b>Marca</b>	Bonfiglioli	
<b>Modelo</b>	W75	
<b>Tipo</b>	Angular de engranajes cónicos	
<b>Índice de reducción</b>	60	
<b>Diámetro de agujero de salida</b>	30 mm	

Fuente: Bonfiglioli.

### Filtro

Para este proceso se seleccionó un filtro de carbón activado debido a su gran capacidad de adsorción del olor, color y sabor del agua, y también por su característica de retener las partículas que no se lograron filtrar en la

sedimentación. Se seleccionó un cabezal automático para poder programar las operaciones del filtro y de esta forma evitar la intervención de un operador.

**Tabla 37. Características del filtro.**

<b>Marca Estructura</b>	Pentair	
<b>Dimensiones</b>	35 x 165 cm	
<b>Capacidad</b>	12 m <sup>3</sup> /h	
<b>Cabezal</b>	Automático	
<b>Diámetro de entrada</b>	2 in	

Fuente: Helisa.

### Bomba dosificadora

Se seleccionó una bomba dosificadora cuya capacidad le permita suministrar las dosis para la coagulación (sulfato de aluminio) y la desinfección (hipoclorito de sodio o cloro líquido).

Según la norma INEN 2655, la dosis máxima de sulfato de aluminio debe ser de 15 mg/l que corresponde aproximadamente a 0.03 gph, mientras que la dosis mínima de hipoclorito de sodio debe ser de 2 mg/l. Las características del equipo seleccionado se muestran en la tabla a continuación.

**Tabla 38. Características de bomba dosificadora.**

<b>Marca</b>	Walchem / Iwaki	
<b>Modelo</b>	EZB11 D1 - VC	
<b>Caudal máximo</b>	0.6 gph	
<b>Presión máxima</b>	150 psi	
<b>Tipo</b>	Bomba de diafragma	
<b>Conexión de entrada</b>	3/8"	
<b>Conexión de salida</b>	3/8"	

Fuente: Walchem / Iwaki.

### Bomba de alimentación

Para el suministro de agua cruda hacia la planta, se requiere una bomba que cumpla con el caudal de operación y además se estableció como un criterio de selección que sea capaz de impulsar el fluido a un cabezal mayor a 5 metros.

**Tabla 39. Características de la bomba de alimentación.**

<b>Marca</b>	Ebara	
<b>Modelo</b>	CDX 200/156	
<b>Caudal de operación</b>	50 gpm	
<b>Cabezal de operación</b>	16 m	
<b>Potencia</b>	1.5 HP	
<b>Conexión entrada</b>	1 ½"	
<b>Conexión salida</b>	1"	

Fuente: Ebara.

### Generador eléctrico

Los equipos antes seleccionados requieren una fuente de electricidad para poder operar, la capacidad requerida es de aproximadamente 2.2 kW. Las características del generador seleccionado se muestran a continuación.

**Tabla 40. Características del generador eléctrico.**

<b>Marca</b>	Special Solutions	
<b>Modelo</b>	SSG3000	
<b>Combustible</b>	Gasolina	
<b>Capacidad</b>	3 kW	
<b>Voltaje</b>	110/220	
<b>Frecuencia</b>	50/60 Hz	

Fuente: Special Solutions.

## 3.6 Estimación de costos

Una vez definidos los materiales necesarios para la construcción de la planta y seleccionados los equipos que se van a emplear para su funcionamiento, es necesario cuantificar la inversión asociada al proyecto. A continuación se describen los costos directos e indirectos involucrados.

### 3.6.1 Costos directos

Estos costos se definen como los gastos que puedan ser cuantificados de una forma más precisa y necesarias para el desarrollo del proyecto, en este caso para la implementación de una planta potabilizadora de agua, donde se va a requerir equipos, materiales y costos relacionados a la construcción.

**Equipos:** son dispositivos que se utilizan para la operación de la planta.

**Tabla 41. Costos de los equipos auxiliares.**

Ítem	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
1	Bomba Ebara 50 gpm 1,5 HP	2	\$ 477,32	\$ 954,64
2	Motor ABB 0,5 HP 1800 rpm	1	\$ 112,80	\$ 112,80
3	Motor ABB 0,33 HP 1800 rpm	1	\$ 104,19	\$ 104,19
4	Reductor angular Bonfiglioli i = 60	1	\$ 473,69	\$ 473,69
5	Variador de frecuencia Siemens	2	\$ 300,00	\$ 600,00
6	Bomba dosificadora Iwaki 2 gph	2	\$ 527,63	\$ 1.055,26
7	Filtro Pentair 12 m <sup>3</sup> /h - cabezal automático	1	\$ 3.477,00	\$ 3.477,00
8	Generador de electricidad a diésel	1	\$ 800,00	\$ 800,00
<b>Subtotal</b>				<b>\$ 7.577,58</b>
<b>IVA (14 %)</b>				<b>\$ 1.060,86</b>
<b>Total</b>				<b>\$ 8.638,44</b>

Fuente: Elaboracion propia.

**Costos de construcción:** son los materiales consumibles empleados, tales como electrodos, disco de corte, disco de pulir, entre otros; y además la mano de obra empleados para el ensamblaje de la planta, que fue cotizado en \$3000,00. El costo de materiales para las conexiones eléctricas y la mano de obra no están considerados en este proyecto.

**Materiales:** son los elementos que se necesitan para fabricar los tanques de mezcla y sedimentación, los cuales se enlistan en la Tabla 42.

**Tabla 42. Costos de los materiales.**

Ítem	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
1	Plancha A36 (2440 x 6000 x 6,35 mm)	4	\$ 510,84	\$ 2.043,36
2	Plancha A36 (1220 x 2440 x 3 mm)	12	\$ 43,46	\$ 521,52
3	Viga UPN 120 (6000 mm)	4	\$ 80,40	\$ 321,60
4	Viga HEB 180 (12000 mm)	1	\$ 645,12	\$ 645,12
5	Platina A36 (40 x 12,7 x 3000 mm)	1	\$ 5,53	\$ 5,53
6	Canal U (200 x 6000 x 4 mm)	1	\$ 35,67	\$ 35,67
7	Retazo de plancha AISI 304 (161 x 82 x 4 mm)	1	\$ 1,00	\$ 1,00
8	Barra redonda AISI 304 (50.8 x 3000 mm)	1	\$ 210,50	\$ 210,50
9	Paleta Chanul (1370 x 70 x 6 mm)	6	\$ 1,30	\$ 7,80
10	Tubería y accesorios PVC	1	\$ 50,00	\$ 50,00
11	Pintura epóxica (5 galones)	2	\$ 590,14	\$ 1.180,28
<b>Subtotal</b>				<b>\$ 5.022,38</b>
<b>IVA (14 %)</b>				<b>\$ 70313</b>
<b>Total</b>				<b>\$ 5.725,51</b>

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el costo total directo que se necesita para la elaboración de la planta, se obtiene sumando el valor total de los tres rubros descritos anteriormente, como se muestra en la Tabla 43.

**Tabla 43. Costos directos totales.**

<b>Costos directos</b>	
Materiales	\$ 5.725,51
Equipos	\$ 8.638,44
Construcción	\$ 3.000,00
<b>Total</b>	<b>\$ 17.363,95</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.6.2 Costos indirectos

Son aquellos gastos que no se pueden atribuir con precisión en la fabricación del producto. Para el desarrollo de este proyecto se van a considerar los siguientes rubros:

**Costo de ingeniería:** corresponde a la mano de obra especializada, que se encarga del diseño de la planta.

**Imprevistos:** se considera un 2% de los costos directos que están destinados a cubrir necesidades fuera de lo planificado o pagos realizados frente a eventos fortuitos.

**Tabla 44. Costos indirectos.**

Costos indirectos	
Costo de ingeniería	\$ 4.000,00
Imprevistos	\$ 347,28
<b>Total</b>	<b>\$ 4.347,28</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.6.3 Costos totales

Este valor corresponde a la suma de los costos directos e indirectos, que se obtuvieron en la Tabla 43 y 44, respectivamente. Se puede concluir que el costo total para este proyecto es de \$ 21.711,23 como se detalla a continuación en la siguiente tabla.

**Tabla 45. Costo total del proyecto.**

Costos totales	
Costos directos	\$ 17.363,95
Costos indirectos	\$ 4.347,28
<b>Total</b>	<b>\$ 21.711,23</b>

Fuente: Elaboración propia.

# CAPÍTULO 4

## 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La propuesta de diseño puede ser considerada como una alternativa viable para proveer agua potable a zonas afectadas por desastres naturales. Por otra parte, la capacidad de la planta y su diseño compacto, además, le permite ser empleada en zonas rurales donde no exista abastecimiento de este recurso, considerando que el número de personas abastecidas disminuiría debido a que en condiciones normales, el consumo diario de agua potable por persona es de aproximadamente 100 litros. Asimismo, por ser un sistema portátil, con la característica de poder variar las dosis de químicos y los gradientes de velocidad dentro de las cámaras de mezcla, le permite ser trasladado y adaptarse a diferentes fuentes de agua.

Adicionalmente, en trabajos futuros se podría estudiar la posibilidad de emplear energías renovables para accionar los diferentes equipos de la planta, con la finalidad de tener un funcionamiento completamente autónomo, es decir que no dependa de otros medios para suplir su demanda eléctrica.

### 4.1 Conclusiones

- En cumplimiento con el objetivo general del proyecto, se diseñó una planta portátil potabilizadora de agua con una capacidad de 10 m<sup>3</sup>/h, que permitirá abastecer diariamente con 20 litros a 10000 personas que se encuentren en situaciones de emergencia.
- El componente principal de la planta es el tanque rectangular donde se llevan a cabo los procesos de mezcla y sedimentación, para el cual, se realizó un diseño modular en el que se aprovecha el principio de vasos comunicantes, empleando únicamente bombas para el ingreso del agua cruda al sistema y a la entrada del filtro. Las dimensiones del tanque serán 4.3 x 1.7 x 1.8 metros, pero se debe considerar una altura adicional por el conjunto de tolvas dispuestas debajo del sedimentador. La planta puede ser transportada

dentro de un contenedor de 20 pies sin techo, cuyas dimensiones internas son de 5.9 x 2.34 x 2.40 m, ya que este le permite a la carga sobrepasar su altura, además permite el paso de la luz solar, evitando la proliferación de hongos en zonas oscuras y además favoreciendo la oxigenación del agua.

- Por medio de la simulación del proceso de coagulación, se verificó que el tiempo de detención seleccionado (45 segundos) es suficiente para asegurar una mezcla homogénea. Se obtuvo que el fluido dentro de este tanque es sometido a un régimen turbulento, con un número de Reynolds de 90900, y en 12 segundos el químico se dispersa completamente dentro del agua. Los parámetros de operación de la turbina Rushton y sus relaciones geométricas con el tanque son los que definen el gradiente de velocidad de la mezcla, el cual debe estar entre 700 y 1000  $s^{-1}$ , que se logra al regular la velocidad de salida del motor entre 250 y 318 rpm.
- Para la mezcla lenta, se empleó un reductor mecánico acoplado al eje del motor para fijar la velocidad de salida en 30 rpm. Se empleó además un variador de frecuencia para regular la velocidad del floculador entre 3 y 10 rpm.
- El sedimentador fue diseñado a una velocidad crítica de 20  $m^3/m^2/día$ , requiriendo 12 placas paralelas separadas 7 cm. El número de Reynolds del flujo de agua entre las placas es aproximadamente 300. Las partículas que no se logran sedimentar son retenidas por el filtro de carbón activado, previo a la desinfección del agua empleando una dosis de cloro.
- La inversión estimada para los materiales de construcción de la planta, equipos auxiliares, mano de obra y costo de ingeniería da un valor de \$21.711,23, el cual es un costo accesible considerando la capacidad de abastecimiento de la planta. Además, su tiempo de construcción y puesta en marcha es menor al tiempo que tomaría importar un sistema de similares características, lo cual es una ventaja al momento de manejar una emergencia.

## 4.2 Recomendaciones

- A pesar de que ciertos parámetros de operación de la planta pueden ser configurados, no se debe dejar la planta operando sin supervisión. Es necesaria la intervención de un operador que cumpla con las siguientes funciones: determinar la velocidad de rotación en cada mezclador por medio de pruebas de jarras, programar el cabezal automático del filtro para que efectúe periódicamente el retrolavado y regular la dosis de químico coagulante y cloro.
- Es importante efectuar un análisis del agua de la fuente ya que dependiendo de las sustancias que contenga podrían ser requeridos procesos adicionales, tal como la aireación, cuando se necesita eliminar gases y metales disueltos en el agua.
- Las vigas en el fondo del tanque deben ser asentadas sobre una base o estructura, de tal forma que el conjunto de tolvas debajo del sedimentador queden a unos 30 cm del piso para facilitar la manipulación de la válvula de descarga de lodos.
- Debido a que el filtro representa un alto rubro dentro de los costos analizados, se podrían abaratar costos reemplazando el cabezal automático por uno manual, no obstante el operador de la planta debe encargarse también del retrolavado.
- Se recomienda que los lodos evacuados luego del proceso de sedimentación sean analizados para determinar su posible aplicación o el debido tratamiento para evitar la contaminación del medio ambiente.
- Finalmente, se recomienda que los beneficiarios del agua producida por la planta la consuman 30 minutos después de su distribución, debido a que es el tiempo que requiere el cloro para eliminar los microorganismos presentes en el agua.

# BIBLIOGRAFÍA

- Arboleda, J. (2000). *Teoría y Práctica de la Purificación del agua*. Bogotá: Mc Graw Hill.
- Asamblea Nacional de la República del Ecuador. (2014). *Ley de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua*. Quito: Constitución de la República del Ecuador.
- Baque, M. (2001). *Diseño de un sistema de floculación de paletas giratorias para una planta de potabilización de agua*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mexico D.F.: Mc Graw Hill.
- Castillo, V. (2013). *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos*. Santiago de Chile: Universidad del Bío Bío.
- CEPIS. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano*. Lima.
- Hudson, & Wolfner. (1967). Design of Mixing and Flocculating Basins. *AWWA Journal*, 1257-1267.
- Letterman, R., Quon, J., & Gemmill, R. (1973). Influence of rapid mix-parameters on flocculation. *Journal AWWA*, 716-722.
- Megyesy, E. F. (1992). *Manual de recipientes a presión, diseño y cálculo*. Mexico D.F.: Grupo Noriega Editores.
- Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable. (2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico*. Bogotá.
- Nisbett, B. &. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mexico D.F.: McGraw Hill.
- NTE INEN 1108. (2014). *Agua potable, requisitos*. Quito: Norma técnica ecuatoriana.
- NTE INEN 2655. (2012). *Implementación de plantas potabilizadoras prefabricadas en sistemas públicos de agua potable*. Quito.
- Parlatore, A. (1972). Misturadores e floculadores mecanizados. *Revista DAE*, 61-92.
- Perez, J. A. (1981). *Manual de Tratamiento de Aguas*. Medellín: Universidad Nacional.
- Pullaguari, S. (2015). *Diseño y construcción de un tanque rectangular de 400 [m<sup>3</sup>/día] para un sistema de tratamiento de aguas residuales modalidad electrocoagulación para la empresa Yakupro CIA. LTDA*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

# **APÉNDICES**

**APÉNDICE A: CÁLCULOS REPRESENTATIVOS**

**APÉNDICE B: FICHAS TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS**

**APÉNDICE C: SIMULACIÓN DE LA MEZCLA**

**APÉNDICE D: PLANOS**

## **APÉNDICE A**

### **CÁLCULOS REPRESENTATIVOS**

**A1: Cálculo de espesor de paleta de mezclador tipo Rushton**

**A2: Cálculo de espesor de paleta y brazo del floculador**

**A3: Diseño de los ejes para los mezcladores**

### A1. Cálculo de espesor de paleta de mezclador tipo Rushton

El torque total se obtiene con la sumatoria del torque producido por cada paleta. En la figura a continuación se muestra el esquema de una paleta del mezclador, a la cual se le aplica una carga en su extremo libre producto del torque aplicado.

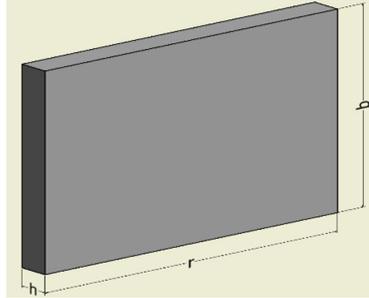


Figura A1-1. Esquema de la paleta.

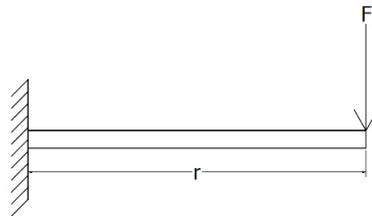


Figura A1-2. Diagrama de fuerza aplicada a la paleta de la turbina.

Luego, teniendo en cuenta que la potencia de un elemento en movimiento de rotación viene dada por el torque total aplicado multiplicado por la velocidad angular, se puede hallar la carga aplicada ( $F$ ) sobre las paletas. Siendo  $T_t$  el torque total [Nm] y  $\omega$  la velocidad angular [rad/s].

$$P = T_t * \omega$$

$$F = \frac{T_t}{6r}$$

Se debe asumir un factor de seguridad ( $N$ ) para el análisis estático y de esta manera establecer una relación entre el esfuerzo permisible ( $\sigma_p$ ) y el esfuerzo de fluencia del material ( $S_y$ ).

$$N = \frac{S_y}{\sigma_p}$$

Con el valor de esfuerzo permisible, se puede despejar el espesor mínimo de la paleta, tal que no falle debido al momento flector aplicado sobre la misma.

$$\sigma_p = \frac{Mc}{I}$$

M: momento flector aplicado [Nm]

Para sección rectangular la inercia I [m<sup>4</sup>] es bh<sup>3</sup>/12.

En este caso, el momento flector máximo se lo calcula a partir de la siguiente ecuación.

$$M = Fr$$

Por otra parte, se deberán aplicar criterios de fatiga para determinar si el espesor asumido es adecuado para evitar fallas de este tipo en las paletas. Es importante diseñar el mezclador para vida infinita dado que es indeseable cambiar la turbina en intervalos de tiempo relativamente cortos. De modo que se aplica el criterio de Goodman modificado para este cálculo, que viene expresado en la siguiente ecuación:

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

Donde  $\sigma_a$  y  $\sigma_m$ , esfuerzo alternante y medio respectivamente, tienen la misma magnitud debido a que es un esfuerzo repetido y son iguales al esfuerzo aplicado sobre la paleta ( $\sigma_p$ ).

$S_{ut}$  y  $S_e$ , esfuerzo último a la tracción y límite de resistencia a la fatiga respectivamente, dependen del material. N es el factor de seguridad para fatiga.

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

$$S_e' = 0.5 S_{ut}$$

Al valor de  $S_e'$  se le multiplican unos factores de modificación. A continuación se enlistan dichos factores y la forma en la que se los estima.

- Factor de superficie:  $k_a = aS_{ut}^b$

Los valores de a y b que dependen del acabado dado al material, en este caso se va a emplear los valores que corresponden a un elemento maquinado, por lo tanto a es igual a 4.51 y b es igual a -0.265.

- Factor de tamaño:  $k_b = 1.24d^{-0.107}$

La ecuación antes descrita se aplica para un eje rotatorio, por lo tanto se debe encontrar el diámetro efectivo para una sección rectangular, de la siguiente forma:

$$d_e = 0.808\sqrt{hb}$$

Siendo h la altura y b el ancho de la sección, en mm.

- Factor de carga: para cargas de flexión,  $k_c = 1$ .
- Factor de temperatura: a temperatura ambiente,  $k_d = 1$ .
- Factor de confiabilidad: para una confiabilidad del 99.9%,  $k_e = 0.753$ .

Bajo estas condiciones, se analizaron las paletas de la turbina aplicando un análisis estático y el criterio de fatiga de Goodman modificado, para calcular el espesor mínimo de las paletas.

**Tabla 1. Características de la turbina.**

<b>Material seleccionado</b>	Acero AISI 304
<b>Esfuerzo de fluencia (<math>S_y</math>)</b>	276 MPa
<b>Resistencia a la tracción (<math>S_{ut}</math>)</b>	568 MPa
<b>Torque total aplicado</b>	11.2 Nm
<b>Carga aplicada sobre cada paleta</b>	22.4 N
<b>Espesor calculado de las paletas</b>	3.49 mm
<b>Factor de seguridad por fatiga</b>	1.22

## A2. Cálculo de espesor de paleta y brazo del floculador

Las paletas tienen dos apoyos fijos en sus extremos y una carga en el centro de la misma, provocada por el torque aplicado al sistema, como se muestra en la figura a continuación.

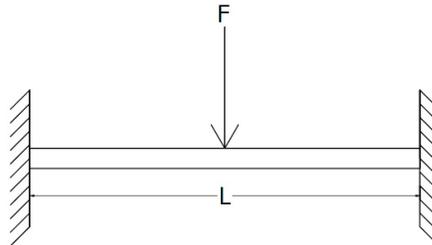


Figura A2-1. Esquema de la aplicación de la carga a la paleta

Para este cálculo se va a emplear la fuerza de roce producida por el líquido sobre la paleta en movimiento, que se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_r = C_D A_p \rho \frac{(2\pi r n (1 - K_f))^2}{2}$$

Siendo:  $C_D$  el coeficiente de arrastre de 1.5 obtenido de la Tabla 19,  $A_p$  el área de la paleta [ $m^2$ ],  $\rho$  la densidad del fluido [ $kg/m^3$ ],  $r$  es la distancia de la paleta al eje de rotación [ $m$ ],  $n$  la velocidad de rotación del floculador [ $rps$ ] y la  $K_f$  la constante de proporcionalidad de velocidades ( $K_f$  se considera 0.25 en estado de equilibrio).

Se puede notar que la mayor carga se aplica sobre la paleta más alejada al eje de rotación (aproximadamente a 0.62 [ $m$ ]), por lo tanto ese fue el caso analizado en esta sección.

Empleando la densidad del lodo (1600 [ $kg/m^3$ ]) y la máxima velocidad de rotación (0.16 [ $rps$ ]), se obtuvo una fuerza de roce.

$$F_r = (1.5)(0.09)(1600) \frac{(2\pi(0.62)((1 - 0.25))^2}{2}$$

$$F_r = 23.86 \text{ N}$$

El momento flector máximo para un elemento con un apoyo en cada extremo y carga central se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$M = \frac{F_r L_p}{8}$$

Siendo  $L_p$  el largo de la paleta (1.37 [m]). Por lo tanto, el momento máximo es igual a 4.09 [Nm]. Luego, se calcula el esfuerzo permisible con un factor de seguridad de 4, empleando como material madera Chanul, cuyo esfuerzo de fluencia ( $S_y$ ) es de 55.7 MPa. Se seleccionó esta madera por su resistencia al agua.

$$\sigma_p = \frac{S_y}{N} = 13.93 \text{ MPa}$$

Se considera a la paleta como un elemento de sección rectangular cuyo módulo de resistencia  $S$  es igual a:

$$S = \frac{1}{6} b h^2$$

Donde  $b$  es el ancho de la paleta (70 [mm]) y  $h$  es el espesor de la paleta.

El módulo  $S$  se lo obtiene empleando el momento flector aplicado y el esfuerzo permisible.

$$S = \frac{M}{\sigma_p} = \frac{4.09}{13.93 \times 10^6} = 1.06 \text{ cm}^3$$

El espesor mínimo de las paletas es de 5.07 mm, pero por facilidad se va a emplear un espesor de 6 mm

En este caso no se analizan las paletas con criterios de fatiga debido a que están fabricadas por un material económico, que puede ser reemplazado fácilmente en caso de alguna falla.

Adicional a este análisis, se analiza el brazo de sección rectangular que sujeta a las paletas por medio de pernos y a su vez se fijan al eje por medio de una abrazadera para transmitir el movimiento rotatorio. Se consideran como elementos en voladizo sometidos a las cargas transmitidas desde las paletas, por lo tanto se emplea el mismo análisis de la paleta en el Apéndice A1.

En las tablas a continuación se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 2. Dimensionamiento de los brazos del floculador.**

Material	Acero A-36
Esfuerzo de fluencia	250 MPa
Factor de seguridad	4
Esfuerzo permisible	62.5 MPa
Módulo de resistencia requerido	0.33 cm <sup>3</sup>
Dimensiones del perfil seleccionado	1 ½" x ½"

### A3. Diseño de los ejes para los mezcladores

El eje del sistema de agitación debe estar diseñado para soportar los esfuerzos de flexión y torsión que se generan cuando el agitador desplaza el fluido, y considerando que este se encuentra sometido a esfuerzos repetitivos.

En el texto "Diseño en ingeniería mecánica de Shigley" (Budynas & Nisbett, 2008) se indica el cálculo de diámetro de ejes sometidos a cargas de flexión y torsión como se muestra a continuación:

$$d_e = \left( \frac{16N}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

Donde  $\eta$  es factor de seguridad,  $M_a$  y  $M_m$  son momentos flector alternante y medio,  $T_a$  y  $T_m$  son pares de torsión alternante y medio,  $K_f$  y  $K_{fs}$  factores de concentración de esfuerzo.

Se consideró que el eje está sometido a esfuerzos de flexión y torsión constantes, por lo que  $M_m$  y  $T_a = 0$  y la ecuación se reduce a:

$$d_e = \left( \frac{16N}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [3(K_{fs} T_m)^2]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

El momento torsor se lo obtiene con los parámetros de operación del agitador, donde  $P$  es la potencia del motor y  $\omega$  la velocidad de rotación.

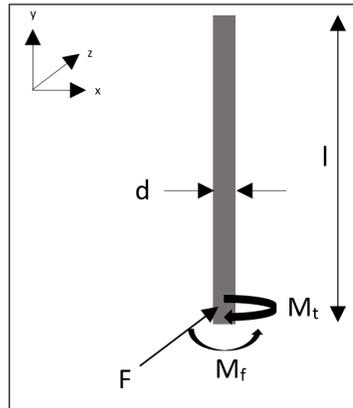
$$T_m = P/\omega$$

Para el cálculo de la fuerza aplicada sobre el eje se aplica la siguiente ecuación, donde  $r$  es la distancia de la paleta más lejana al eje.

$$F = T/r$$

Al multiplicar dicha fuerza por la distancia desde su punto de aplicación hasta el apoyo ( $l_e$ ), da como resultado el momento flector alternante.

$$M_a = Fl_e$$



**Figura A3-1. Diagrama de fuerzas sobre el eje.**

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el diseño del eje del sistema de mezcla rápida o coagulación, donde se consideró  $r = Da/2 = 82,5$  mm y longitud del eje de 600 mm.

**Tabla 3. Diseño de eje para sistema de mezcla rápida.**

<b>Material seleccionado</b>	Acero AISI 304
<b>Esfuerzo de fluencia (<math>S_y</math>)</b>	276 MPa
<b>Resistencia a la tracción (<math>S_{ut}</math>)</b>	568 MPa
<b>Factor de seguridad</b>	3
<b>Momento flector (<math>M_{max}</math>)</b>	81.45 Nm
<b>Momento torsor (<math>T_m</math>)</b>	11.19 Nm
<b>Límite de resistencia a la fatiga (<math>S_e</math>)</b>	143.7 MPa
<b>Diámetro de eje</b>	26.08 mm

Finalmente, se diseñará el eje de este sistema de longitud 434 mm, 30 mm de diámetro y material acero AISI 304.

Para el sistema de floculación, se diseñó el eje con cambio de sección para asegurar la correcta sujeción de los brazos de paletas, por lo que concentradores de esfuerzos deben ser considerados en este caso. La distancia de la paleta más lejana al eje es 700 mm y el eje de longitud 1800 mm. En este caso, la carga se aplica a la mitad del largo de la paleta, es decir a 900 mm del apoyo.

**Tabla 4. Diseño de eje para sistema de mezcla lenta.**

<b>Material seleccionado</b>	Acero AISI 304
<b>Factor de concentración de esfuerzo por fatiga de flexión (<math>K_f</math>)</b>	2.54
<b>Factor de concentración de esfuerzo por fatiga de torsión (<math>K_{fs}</math>)</b>	2.08
<b>Factor de seguridad</b>	3
<b>Momento flector (<math>M_{a_{max}}</math>)</b>	17 Nm
<b>Momento torsor (<math>T_{m_{max}}</math>)</b>	44 Nm
<b>Límite de resistencia a la fatiga (<math>S_e</math>)</b>	114.96 MPa
<b>Diámetro de eje sección mayor (<math>D</math>)</b>	40 mm
<b>Diámetro de eje sección menor (<math>d</math>)</b>	36 mm

Fuente: Elaboración propia

El eje será elaborado con una barra maciza de acero AISI 304, y tendrá una longitud de 1890 mm y 40 mm de diámetro la sección mayor y 36 mm la menor.

## **APÉNDICE B**

### **FICHAS TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS**

**B1: Motor eléctrico**

**B2: Variador de frecuencia**

**B3: Reductor mecánico**

**B4: Bomba dosificadora**

**B5: Bomba centrífuga**

## B1. Especificaciones técnicas motores ABB.

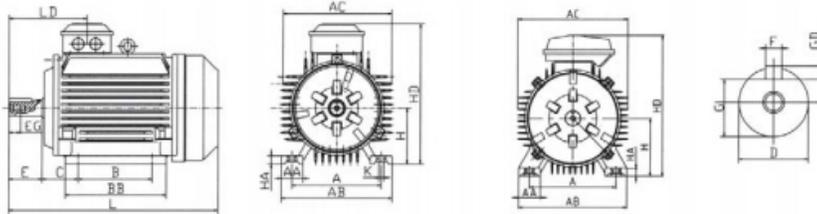
Motores de aplicación general en hierro fundido - 60 Hz.  
 Datos técnicos para motores trifásicos del tipo jaula de ardilla  
 totalmente cerrados y autoventilados  
 IP55 - IC 411 - Aislamiento clase F /  $\Delta T B$  - 220-230/380/440-460V

Potencia		Tipo	r/min	Eficiencia [%]			Factor de potencia			In	Is	Ivacio	Tn	Ts	Tmax	Momento de inercia J=1/4GD2	Peso	Ruido	
[kW]	[HP]			50	75	100	50	75	100										FS
<b>4 polos = 1800 r/min</b>																			
<b>440 V 60 Hz</b>																			
0,25	0,33	M2QA 71 M4A	1679	60,1	66,3	66,9	0,48	0,63	0,72	1,15	0,68	3,2	0,6	1,4	2,2	2,7	0,00053	11	46
0,37	0,5	M2QA 71 M4A	1614	66,2	66,4	62,7	0,62	0,75	0,82	1,15	0,95	4,9	0,6	2,2	1,4	1,7	0,00053	11	46
0,55	0,75	M2QA 71 M4B	1609	69,4	69,2	65,3	0,66	0,78	0,85	1,15	1,3	4,9	0,6	3,3	1,4	1,7	0,00066	11	48
0,75	1	M2QA 80 M4B	1687	69,2	74,8	75,4	0,53	0,67	0,77	1,15	1,7	5,6	1,3	4,2	2,5	2,5	0,00174	17	50
1,1	1,5	M2QA 80 M4B*	1625	74,7	74,7	70,9	0,67	0,80	0,85	1	2,4	5,6	1,3	6,6	1,6	1,6	0,00174	17	50
1,5	2	M2QA 90 S4A*	1644	76,8	77,8	75,0	0,65	0,77	0,82	1	3,1	5,5	1,4	8,7	1,7	1,7	0,00254	21	56
2,2	3	M2QA 100 L4A	1724	80,0	82,7	82,1	0,63	0,74	0,80	1,15	4,4	5,5	2,6	12,2	2,3	2,6	0,00679	32	57
3	4	M2QA 100 L4B	1706	81,1	83,6	83,1	0,72	0,81	0,87	1,15	5,5	6,0	2,8	16,8	2,3	2,6	0,00862	36	57
3,7	5	M2QA 112 M4A	1730	82,6	85,4	85,4	0,61	0,73	0,80	1,15	7,2	6,0	4,4	20,4	2,6	3,0	0,01306	45	60
4,5	6	M2QA 112 M4A	1715	84,3	85,5	84,6	0,67	0,77	0,84	1,15	8,3	4,8	4,4	25,1	2,1	2,4	0,01306	45	60
5,5	7,5	M2QA 112 L4A*	1720	83,5	84,5	83,5	0,71	0,80	0,84	1	10,5	7,0	5,6	35	2,2	2,2	0,01484	49	67
7,5	10	M2QA 132 M4A	1734	86,2	87,9	88,1	0,70	0,79	0,85	1,15	13,2	5,8	5,4	41	2,4	2,6	0,03432	73	82
9,2	12,5	M2QA 132 M4B*	1720	88,0	89,0	88,0	0,73	0,82	0,86	1	16,1	7,0	7,4	59	2,2	2,2	0,03470	75	74
11	15	M2QA 132 M4C*	1720	83,5	84,5	83,5	0,74	0,83	0,87	1	20,2	6,5	8,8	71	2,2	2,2	0,04227	80	76
15	20	M2QA 160 L4A	1755	89,7	91,5	91,6	0,79	0,86	0,89	1,15	23,9	5,0	8,6	81	2,4	2,6	0,09349	137	69
18,5	25	M2QA 160 L4A*	1743	91,0	91,6	91,6	0,83	0,89	0,90	1	29,7	5,0	8,6	102	1,9	2,0	0,09349	137	69
22	30	M2QA 180 L4A	1765	91,4	93,0	93,1	0,81	0,87	0,90	1,15	35,0	5,4	15,1	121	2,4	3,2	0,18046	186	69
30	40	M2QA 180 L4B*	1750	89,0	90,0	90,0	0,79	0,85	0,87	1	50,1	6,5	13,7	116	2,2	2,4	0,10686	147	69
37	50	M2QA 200 L4B*	1780	90,5	91,5	91,5	0,80	0,86	0,88	1,15	60,8	6,5	20,4	187	2,3	2,7	0,20783	200	73
45	60	M2QA 225 M4B	1780	91,6	92,6	92,6	0,81	0,87	0,89	1,15	71,3	6,5	26	231	2,2	2,6	0,29715	277	75
55	75	M2QA 225 M4B	1780	92,0	93,0	93,0	0,80	0,86	0,88	1,15	89,8	7,0	35	338	2,1	2,4	0,62440	351	78
75	100	M2QA 250 M4B*	1780	93,0	94,0	94,0	0,81	0,87	0,89	1	118	7,0	45	461	2,3	2,4	0,91250	485	80
90	125	M2QA 280 M4A	1776	92,6	94,1	94,2	0,79	0,86	0,88	1,15	146	6,4	38	500	2,3	2,9	1,35000	592	81
110	150	M2QA 280 M4B*	1780	97,0	98,0	98,0	0,81	0,87	0,89	1	168	7,2	70	671	2,3	2,8	1,60000	679	82
132	175	M2QA 315 S4A*	1781	94,2	95,0	95,0	0,82	0,88	0,90	1	201	6,3	47	702	1,8	2,4	2,85960	930	83
150	200	M2QA 315 M4A*	1782	94,0	95,1	95,1	0,82	0,88	0,90	1	229	5,3	53	799	1,9	2,4	3,18480	1030	83
190	250	M2QA 315 L4B	1780	94,4	95,3	95,3	0,83	0,89	0,91	1,15	283	6,3	56	1003	1,9	2,3	3,67650	1050	89

## Motores de aplicación general en hierro fundido Dimensionales - Carcasas 71-132

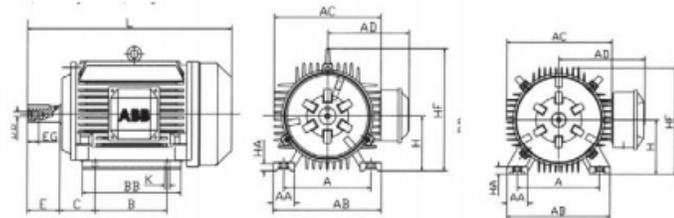
Motor con patas; IM B3 (IM 1001), IM B6 (IM 1011), IM B7 (IM 1061),  
IM B8 (IM 1071), IM V5 (IM 1011), IM V6 (IM 1031)

### Motor trifásico, con patas, caja de bornes arriba



M000090

### Motor trifásico, con patas, caja de bornes a la derecha



Tamaño de carcasa	Polos	A	AA	AB	AC	AD	B	BB	C	D	DB	E	EG
71M	2-6	112	30	145	145	120	90	110	45	14	M5	30	12.5
80M	2-6	125	35	160	165	145	100	135	50	19	M6	40	16
90S	2-6	140	35	175	180	150	100	140	56	24	M8	50	19
90L	2-6	140	35	175	180	150	125	165	56	24	M8	50	19
100L	2-6	160	40	200	205	175	140	180	63	28	M10	60	22
112M	2-8	190	50	235	225	185	140	190	70	28	M10	60	22
132S	2-8	216	55	270	265	205	140	205	89	38	M12	80	28
132M	2-8	216	55	270	265	205	178	240	89	38	M12	80	28

Tamaño de carcasa	Polos	F	G	GD	H	HA	HD	HF	K	L	LD
71M	2-6	5	11	5	71	10	200	-	7	255	100
80M	2-6	6	15.5	6	80	12	225	170	10	285	116
90S	2-6	8	20	7	90	12	240	185	10	310	128
90L	2-6	8	20	7	90	12	240	185	10	335	128
100L	2-6	8	24	7	100	14	275	245	12	380	144
112M	2-6	8	24	7	112	15	290	265	12	380	144
132S	2-6	10	33	8	132	18	335	300	12	465	169
132M	2-6	10	33	8	132	18	335	300	12	505	169

## B2. Especificaciones técnicas variador de frecuencia Siemens.

# SIEMENS

Data sheet for SINAMICS V20



Ordering data

6SL3210-5BB13-7UV0

Client order no. :

Order no. :

Offer no. :

Remarks :

Item no. :

Consignment no. :

Project :

Rated data	General tech. specifications
<b>Input</b>	<b>Power factor <math>\lambda</math></b> 0.72
Number of phases 1 AC	<b>Offset factor <math>\cos \varphi</math></b> 0.95
Line voltage 200 ... 240 V +10 % -10 %	<b>Efficiency <math>\eta</math></b> 0.98
Line frequency 47 ... 63 Hz	
<b>Output</b>	<b>Ambient conditions</b>
Number of phases 3 AC	<b>Cooling</b> convection cooling
Rated voltage 230 V	<b>Installation altitude</b> 1000 m
Rated power 0.37 kW / 0.50 hp	<b>Ambient temperature</b>
Rated current (IN) 2.30 A	<b>Operation</b> 0 ... 60 °C (32 ... 140 °F)
Pulse frequency 2 kHz	<b>Storage</b> -40 ... 70 °C (-40 ... 158 °F)
Output frequency 0 ... 599 Hz	<b>Relative humidity</b>
	<b>Max. operation</b> 95 %
<b>Inputs/ outputs</b>	<b>Communication</b>
<b>Standard digital inputs</b>	<b>Communication</b> USS, Modbus RTU
Number 4	
<b>Digital outputs</b>	<b>Standards</b>
Number as relay changeover contact 1	<b>Compliance with standards</b> CE, cULus, C-tick, KC
Number as transistor 1	<b>CE marking</b> EN 61800-5-1 / EN 60204-1 and EN 61800-3
<b>Analog inputs</b>	
Number 2 (Can be used as additional digital input)	
<b>Analog outputs</b>	
Number 1	
<b>Overload capability</b>	

150 % rated output current during 60 s

# SIEMENS

Data sheet for SINAMICS V20



Ordering data **6SL3210-5BB13-7UV0**

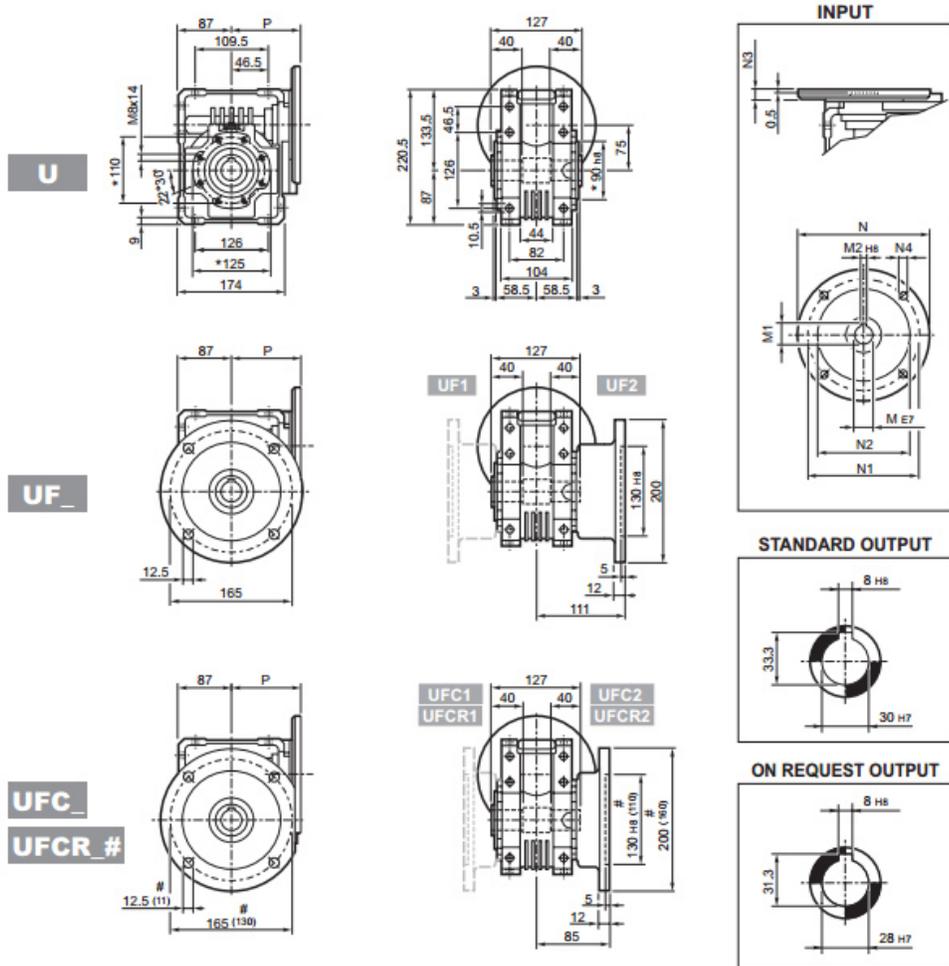
Mechanical data		Connections	
Mounting position	wall mounting / side-by-side design	<b>Max. motor cable length</b>	
Degree of protection	IP20	Shielded	25 m
Size	FSA	Unshielded	50 m
Net weight	1.00 kg		
Width	90.0 mm		
Height	150.0 mm		
Depth	145.5 mm		

## B3. Especificaciones técnicas reductor mecánico Bonfiglioli.

W 75		270 Nm											
	n <sub>2</sub> min <sup>-1</sup>	η <sub>s</sub> %	η <sub>d</sub> %	 IEC	n <sub>1</sub> = 1400 min <sup>-1</sup>				n <sub>1</sub> = 1400 min <sup>-1</sup>				
					M <sub>n2</sub> Nm	P <sub>n1</sub> kW	R <sub>n2</sub> N		M <sub>n2</sub> Nm	P <sub>n1</sub> kW	R <sub>n1</sub> N	R <sub>n2</sub> N	
W 75_7	200	71	90		190	4.4	1080		190	4.4	750	1080	34
W 75_10	140	67	88		230	3.8	1960		230	3.8	750	1960	
W 75_15	93	60	85		250	2.9	2550		250	2.9	750	2550	
W 75_20	70	56	83		250	2.2	3050		250	2.2	750	3050	
W 75_25	56	52	80		250	1.8	3520		250	1.8	750	3520	
W 75_30	47	45	77		270	1.7	3680		270	1.7	750	3680	
W 75_40	35	40	72		255	1.3	4320		255	1.3	750	4320	
W 75_50	28.0	36	68		220	0.95	4930		220	0.95	750	4930	
W 75_60	23.3	33	65		200	0.75	5450		200	0.75	750	5450	
W 75_80	17.5	28	59		180	0.56	6200		180	0.56	750	6200	
W 75_100	14.0	25	55		125	0.33	6200		125	0.33	750	6200	



## W 75...P(IEC)



W 75											
		M	M1	M2	N	N1	N2	N3	N4	P	
W 75	P71 B5	14	16.3	5	160	130	110	11	9	112	9.5
W 75	P80 B5	19	21.8	6	200	165	130	12	11.5	112	9.7
W 75	P90 B5	24	27.3	8	200	165	130	12	11.5	112	9.6
W 75	P100 B5	28	31.3	8	250	215	180	13	12.5	120	9.7
W 75	P112 B5	28	31.3	8	250	215	180	13	12.5	120	9.7
W 75	P80 B14	19	21.8	6	120	100	80	7.5	6.5	112	9.4
W 75	P90 B14	24	27.3	8	140	115	95	7.5	8.5	112	9.4
W 75	P100 B14	28	31.3	8	160	130	110	10	8.5	120	9.5
W 75	P112 B14	28	31.3	8	160	130	110	10	8.5	120	9.5

\* On both sides # Reduced flange

## B4. Especificaciones técnicas bomba dosificadora Iwaki.

# IWAKI

Serie  
EZ

### Bombas dosificadoras electromagnéticas



La serie de bombas dosificadoras electromagnéticas EZ con control de microprocesador ofrece una precisa inyección de productos químicos a un bajo costo. EZ ofrece capacidades hasta 400 MI/Min (6,3 GPH) y una presión máxima de 10 bar (150 PSI). Es simple de operar a través de su teclado de tres botones. La tecnología de 360 impulsos por minuto de la clase E, ofrece una versatilidad inigualable.

La bomba EZB combina la tecnología Walchem con un versátil timer programable. Un control de alimentación por tiempo puede ser programado en ciclos diarios o semanales. La programación semanal puede ser programada en 1 o 2 ciclos semanales con tiempos diarios. El timer diario puede ser ajustado para múltiples días. Los tiempos son ajustados en minutos (0.-999). Con capacidades hasta 200 MI/Min y rangos de presión de hasta 10 bar, la serie EZ-Timer es perfecta para muchas aplicaciones, incluyendo la adición precisa y consistente de biocidas en su sistema de torres de enfriamiento.

La serie E ofrece 4 increíbles bombas: EZ, EW, EK y EHE. La variedad de bombas dentro de la Clase E permite cumplir una gran cantidad de aplicaciones tales como tratamiento de aguas, agricultura, acondicionamiento de aguas, lavado de coches y decenas de otros usos en el campo industrial.

**Rendimiento de alta velocidad** - Las bombas Clase E operan a 360 impulsos por minuto. La mayoría de los productos de la competencia funcionan a 180 impulsos por minuto resultando en un desgaste prematuro del diafragma, un pobre control en la dosificación y una alimentación lenta.

**Cojinete doble** - Todas las bombas Serie E ofrecen cojinete doble. La estructura y el eje están soportados con un cojinete en cada extremo, con lo cual se asegura un movimiento axial correcto, permitiendo a las bombas Serie E operar a 360 Imp/min y extender la vida útil del diafragma.

**Gran rendimiento de la válvula de retención** - El ensamble de las válvulas de retención duales en la succión y descarga ofrecen una precisión sin igual. Maquinado y moldeado de precisión limitan el movimiento de la válvula de bola, asegurando que estas asientan y sellan correctamente con cada impulso. Este diseño de avanzada de la válvula de retención y su rendimiento garantizan un rápido autocebado.

**Alto coeficiente de compresión** - Se ha incrementado el coeficiente reduciendo el volumen interno del cabezal de la bomba y aumentando la longitud de carrera. Esto logra un mejor autocebado y purga y asegura una adecuada operación con productos tales como el hipoclorito de sodio.



# Serie EZ

## Información técnica

**2 Años de Garantía**

Para todas las Bombas Clase E Incluyendo Partes Mojadas

Serie Bomba dosificadora EZ con control de manual de velocidad (ajuste hasta 360 impulsos por minuto)

### Tabla de caudales y presiones

Modelo	Max Capacidad de descarga		Max Capacidad por embolada	Max Presion		Medida conexión tubo
	GPH	ml/min		PSI	MPa	
B11	0,6	38	0,11	150	1,0	3/8
B16	1,0	65	0,18	105	0,7	3/8
B21	1,5	95	0,26	60	0,4	3/8
B31	3,2	200	0,56	30	0,2	1/2
C16	1,3	80	0,22	150	1,0	3/8
C21	2,3	130	0,36	105	0,7	3/8
C31	4,3	270	0,75	50	0,35	1/2
C36	6,3	400	1,17	30	0,2	1/2

**Modulo de control**  
 D = Control manual de velocidad desde 1 hasta 360 impulsos/minuto.  
 T = Modulo de control timer (disponible en bombas EZB-115V solamente)

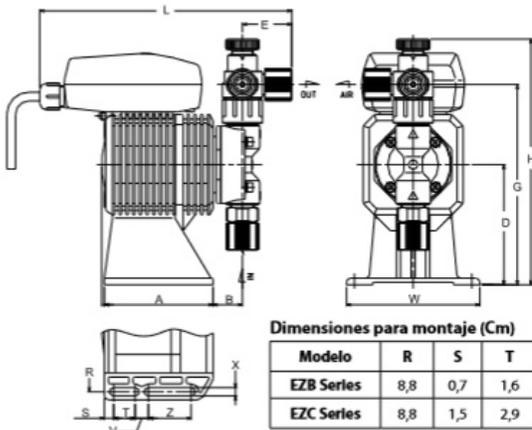
### Materiales partes húmedas

Partes Húmedas	Cabezal de la bomba y conexiones	Diafragma	Válvulas Esféricas	Asientos de Válvulas	Sellos de Válvulas	Junta	Tubo
FC	PVDF	PIFE con respaldo de EPDM	CE	PCTFE	FKM	PIFE	PE
PC	GFRPP		CE	FKM	FKM		
PE	GFRPP		CE	EPDM	EPDM		
VC	PVC		CE	FKM	FKM		
VE	PVC		CE	EPDM	EPDM		
TC	PVDF		CE	FKM	FKM		

### Opciones

- = Válvula de venteo de aire manual standard incluida, excepto en bombas tipo FC.
- = Válvula de venteo de aire automática en lugar de manual. Disponible para los modelos B11, B16, C16 y C21 con partes húmedas VC. El rango de presión se reduce en 35 psi con la válvula.
- = Válvula multi-función de contra-presión y anti-sifón instalada. Disponible para los modelos 11, 16 y 21 con partes húmedas PC, PE, VC, y VE. No disponible con la opción AAVV.

## Dimensiones



### Dimensiones para montaje (Cm)

Modelo	R	S	T	X	Y	Z
EZB Series	8,8	0,7	1,6	0,6	1,0	3,2
EZC Series	8,8	1,5	2,9	0,7	1,5	3,0

Modelo	A	B	E	D	G	H	L	W
EZB	8,1	2,5	3,8 <sup>1</sup>	8,9	17,3 <sup>2</sup>	20,3	19,0	9,9 <sup>3</sup>
EZC	10,4	2,8	3,8 <sup>1</sup>	9,9	18,0 <sup>2</sup>	21,3	20,8	11,7 <sup>3</sup>

Notas para las bombas serie EZ 11, 16 y 21:

- La adición de una válvula multi-función incrementa el largo en 0,93 cm. La adición de una válvula de purga incrementa el largo en 4,03 cm.
- La adición de una válvula multi-función incrementa la altura en 0,55 cm. No hay cambios al adicionar la válvula de purga.
- La adición de una válvula multi-función incrementa la altura de las partes mojadas en 2,94 cm. No hay cambios al adicionar la válvula de purga.

CE: Cerámica Alumina  
 FKM: Fluoro elastómero  
 PE: Polietileno  
 PCTFE: Policloro-trifluoro-etileno  
 PVDF: Polifluoruro de vinilideno  
 EPDM: Monomero de etileno - propileno - deno  
 GFRPP: Polipropileno con relleno de fibra de vidrio  
 PTFE: Poli-tetra-fluoro-etileno  
 PVC: Policloruro de vinilo (traslucido)  
 M-PVC: Policloruro de vinilo maquinado

### Electricidad

EZ	EZB	EZC
50 / 60 Hz, 1 fase	20 Watt (Promedio)	22 Watt (Promedio)
115 VAC ± 10 %	0,8 Amp Máx.	1,2 Amp. Máx.
230 VAC ± 10 %	0,4 Amp. Máx.	0,6 Amp. Máx.

### Peso de transporte (Aprox)

2,7 Kg (6 Lbs)	3,6 Kg (8 Lbs)
----------------	----------------

### Condiciones de operación

Temperatura ambiente: 0° a 50°C (32°F a 122°F)  
 Humedad relativa: 30% hasta 90% sin condensación  
 Temperatura del líquido: 0° a 40°C (32°F a 104°F) para PVC  
 0°C a 60°C (32°F a 140°F) para PP, PVDF y Acero Inoxidable.  
 Debajo de 0°C (32°F) la bomba está limitada a una presión máxima de 70%

Todas las bombas incluyen válvula de venteo manual con excepción del tipo FC. Todas las bombas incluyen una válvula de pie, una válvula de inyección, 6 mts de tubo de polietileno con una pesa de cerámica.



### Certificaciones de Seguridad

La serie de bombas dosificadoras EZ está testeada por WQA y certificadas a NSF/ANSI Std 61.  
 La serie de bombas dosificadoras EZ está testeada por Intertek en los standard UL y CSA.

[www.iwakiAmerica.com](http://www.iwakiAmerica.com)



B5. Especificaciones técnicas bomba Ebara.

CENTRIFUGAL PUMPS

CDX

PERFORMANCE CURVE

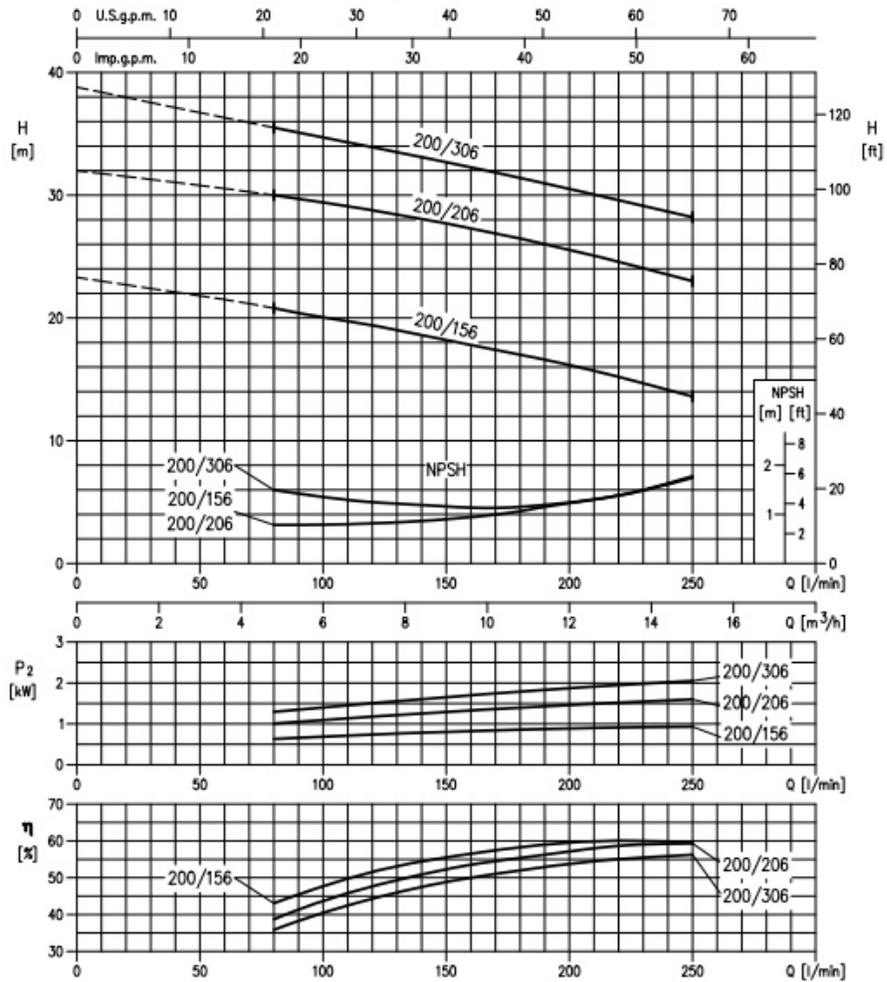
60Hz

Rev. G

CDX 200/156 (1.1 kW) - Impeller diameter = 115 mm

CDX 200/206 (1.5 kW) - Impeller diameter = 132 mm

CDX 200/306 (2.2 kW) - Impeller diameter = 144 mm



Rotation speed = 3450 min<sup>-1</sup>  
 Test standard: ISO 9906 – Annex A

# CENTRIFUGAL PUMPS

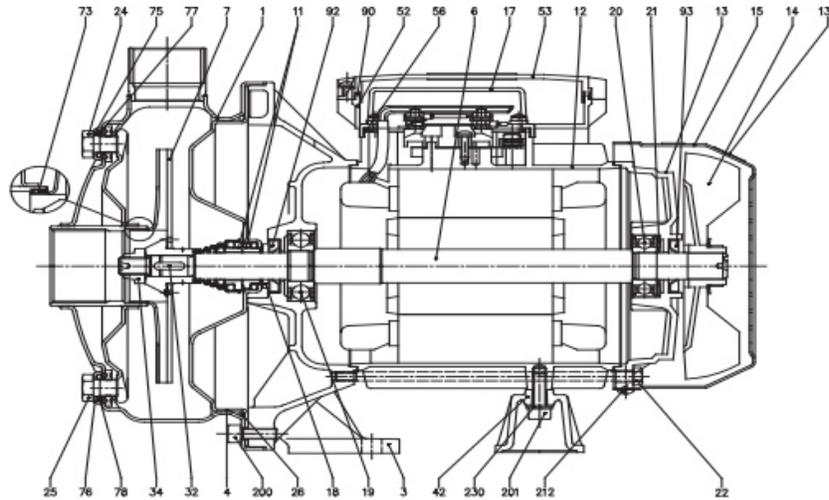
# CDX

## CONSTRUCTION

60Hz

Rev. G

### SECTIONAL VIEW



N°	PART NAME	MATERIAL	Q.TY	N°	PART NAME	MATERIAL	Q.TY
1	Casing	AISI 304 / AISI 316 [7]	1	25	Drain plug	AISI 303 / AISI 316 [7]	1
3	Motor bracket	Aluminium	1	26	O-ring [3]	NBR	1
4	Casing cover	AISI 304 / AISI 316 [7]	1	32	Key	AISI 316	1
6	Shaft with rotor	AISI 303 / AISI 316 [8] (Wet extension)	1	34	Impeller nut	AISI 304 / AISI 316 [7]	1
7	Impeller	AISI 304 / AISI 316 [7]	1	42	Motor support	Aluminium	1
11	Mechanical seal [3]	Carbon/Ceramic/NBR	1	52	Terminal box [1]	ABS class V0	1
12	Motor frame with stator	-	1	53	Terminal box cover [5]	ABS class V0	1
13	Motor cover	Aluminium	1	56	Box gasket	NBR	1
14	Fan	PA	1	73	Casing ring [4]	AISI 304 / AISI 316 [7]	1
15	Fan cover	Fe P04 Zincate	1	75	Washer	AISI 304	1
16	Terminal board	-	1	76	Washer	AISI 304	1
17	Terminal box cover [2]	Aluminium	1	77	O-ring [3]	NBR	1
18	Splash ring	NBR	1	78	O-ring [3]	NBR	1
19	Pump side ball bearing	-	1	90	Terminal box cover gasket [6]	NBR	1
20	Fan side ball bearing	-	1	92	Lip seal	-	1
21	Adjusting ring	Steel C70	1	93	Lip seal	-	1
22	Tie rod	Fe 420 Zincate	4	110	Protector [1]	-	1
23	Capacitor [1]	-	1	200	Screw	Stainless steel A2 UNI7323	8
24	Priming plug	AISI 303 / AISI 316 [7]	1				

[1] Only for single phase

[2] Only for three phase

[3] FPM for CDX H-HS-HW-HSW  
EPDM for CDX E

[4] NBR for CDX 70/076-70/106-70/156

FPM for CDX H-HS-HW-HSW of the CDX 70/076-70/106-70/156

[5] Whit gasket in NBR only for version single phase CDXM 70/076, 70/106, 70/156, 120/106, 120/156, 200/156

[6] Only for version single phase CDXM 120/206, 200/206

[7] Only for "L" version

# CENTRIFUGAL PUMPS

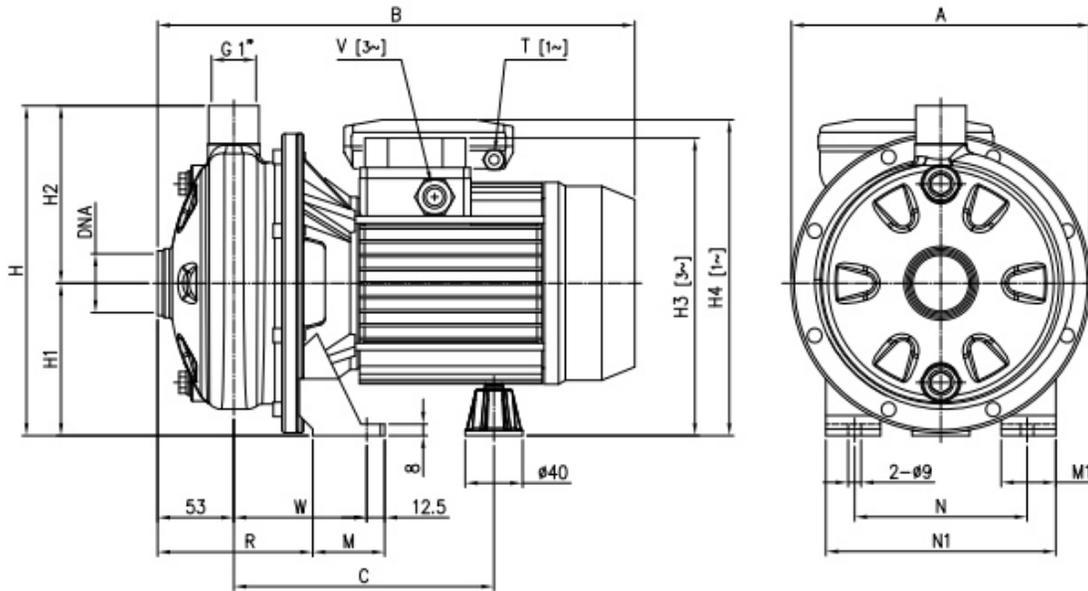
# CDX

## DIMENSIONS AND WEIGHT

60Hz

Rev. G

### PUMP

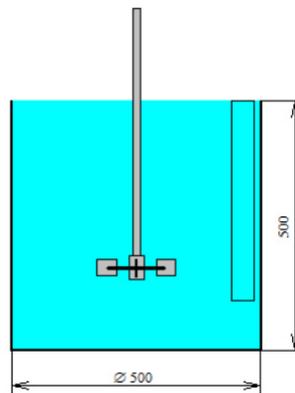


Pump type CDM CDX	Dimensions [mm]																				Weight [kg]		
	A	B			C	H	H1	H2	H3	H4	M	M1	N	N1	R	T	V	W	DNA	[1~]	[3~]	(*)	
	[1~]	[3~]	(*)					[3~]	[1~]						[1~]	[3~]	(*)						
70/076	208	321	320	-	181	229,5	106	123,5	207	216	50	38	120	160	108	PG 11	PG 11	-	92,5	G 1 1/2	8,5	8	-
70/106	208	321	320	320	181	229,5	106	123,5	207	216	50	38	120	160	108	PG 11	PG 11	M16x1.5	92,5	G 1 1/2	9,5	10	10
70/156	208	321	332	332	181	229,5	106	123,5	207	216	50	38	120	160	108	PG 11	PG 11	M16x1.5	92,5	G 1 1/2	11,7	13	13
120/106	208	321	320	320	181	229,5	106	123,5	207	216	50	38	120	160	108	PG 11	PG 11	M16x1.5	92,5	G 1 1/2	9,5	10	10
120/156	208	321	332	332	181	229,5	106	123,5	207	216	50	38	120	160	108	PG 11	PG 11	M16x1.5	92,5	G 1 1/2	11,7	12	12
120/206	208	347	359	372	198,5	229,5	106	123,5	225	249	55	40	140	180	105,5	PG 13.5	PG 11	M20x1.5	95	G 1 1/2	15,3	15	15
200/156	208	321	320	320	181	229,5	106	123,5	207	216	50	38	120	160	108	PG 11	PG 11	M16x1.5	92,5	G 1 1/2	11	11	11
200/206	208	347	359	372	198,5	229,5	106	123,5	225	237	55	40	140	180	105,5	PG 13.5	PG 11	M20x1.5	95	G 1 1/2	15	16	17
200/306	232	-	359	372	198,5	250	118	132	237	-	55	40	140	180	105,5	-	PG 11	M20x1.5	95	G 1 1/2	-	17	18

[1~] = Single phase  
 [3~] = Three phase  
 (\*) Only for IE3 Motors

**APÉNDICE C**  
**SIMULACIÓN DE LA MEZCLA RÁPIDA**

Se empleó la versión libre del software VisiMix Turbulent SV para simular la mezcla rápida entre el sulfato de aluminio y el agua cruda. Para esto, se colocaron las dimensiones de la turbina tipo Rushton y del tanque empleadas en este proyecto, además se debe proporcionar la potencia del motor y la velocidad de rotación del agitador. Dado que la velocidad de rotación es variable dependiendo del gradiente de velocidad que se seleccione, se empleó un valor medio dentro del rango de operación recomendado (285 rpm).



**Figura C-1. Esquema de la cámara de mezcla rápida.**

Los resultados que se buscan obtener es el patrón de mezcla generado por la turbina con los parámetros de operación ingresados, un número de Reynolds mayor a 10000 para asegurar que existe turbulencia y que en el centro del tanque no se produzca un vórtice muy pronunciado dado que es un indicio de que la masa de agua se está moviendo a una misma velocidad alrededor del tanque.

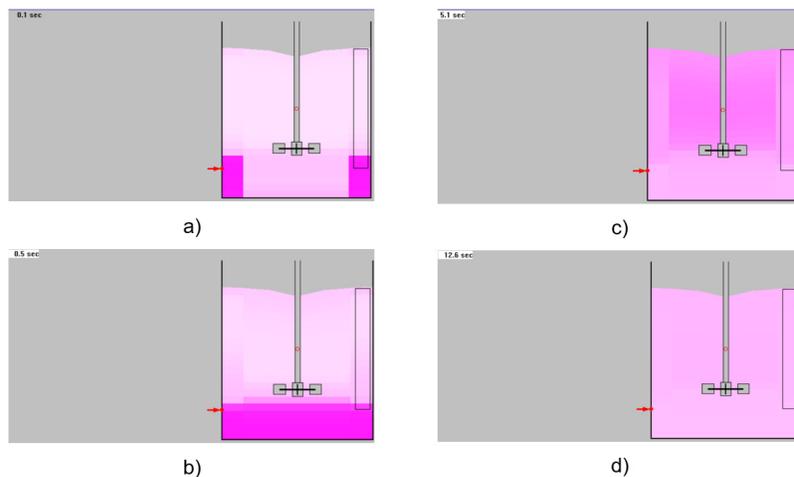


**Figura C-2. Flujo en a) Estado inicial; b) 5 segundos del inicio de la mezcla.**

Las características hidrodinámicas de la mezcla obtenidas fueron, entre otras, un número de Reynolds de 90900 y una profundidad del vórtice de 31.2 mm, lo cual indica que se está produciendo turbulencia durante el mezclado y por consiguiente una buena mezcla.

Como segunda parte de la simulación se proporcionó el caudal de entrada del agua ( $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ), que ingresa al tanque por medio de una tubería colocada a 100 mm del fondo del tanque. Se asignó un caudal del químico coagulante de 0.03 gpm con su ingreso a 150 mm del fondo del tanque, debajo de la turbina.

A continuación se muestran los resultados obtenidos por el software, durante un intervalo de tiempo hasta alcanzar una mezcla homogénea.



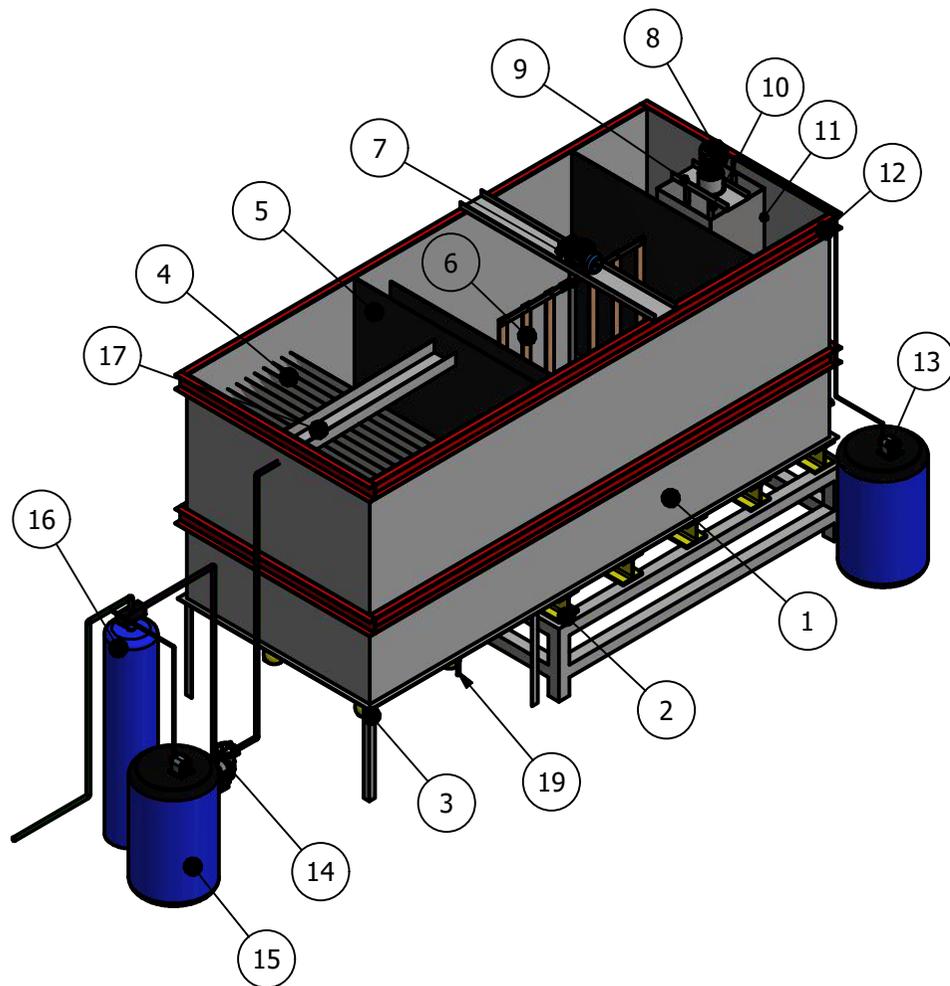
**Figura C-3. Estado de la mezcla en a) 0.1s; b) 0.5 s; c) 5.1 s; d) 12.6 s.**

Fuente: VisiMix Turbulent SV.

Dados los parámetros de operación de la cámara de mezcla rápida de la planta, se obtiene una mezcla homogénea aproximadamente en 12 segundos, notando que se produce una rápida dispersión de químico en fracciones de segundo.

El tiempo de detención para el que fue dimensionado el tanque es de 45 segundos, por lo tanto esto asegura que el químico coagulante suministrado al agua cruda va a tener una dispersión adecuada.

**APÉNDICE D**  
**PLANOS ESQUEMÁTICOS**



LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Tanque	Procesos de coagulación, floculación y sedimentación
2	5	Soporte para base	Perfil HEB 180
3	4	Tolva	Para recolección de lodos
4	12	Placas de sedimentación	Plancha de acero A-36
5	3	Pared divisoria de procesos	Plancha de acero A-36
6	1	Agitador de paletas	Madera Chanul
7	1	Reductor de velocidad	Índice de reducción 60
8	2	Motor eléctrico	0,33 HP y 0,5 HP
9	1	Soporte para motor	Perfil U 200x50
10	1	Turbina Rushton	Acero AISI 304
11	1	Tanque de coagulación	Plancha Acero A-36
12	2	Rigidizador	Perfil UPN 120
13	2	Bomba dosificadora	0,6 gph
14	2	Bomba de succión	50 gpm
15	2	Tanque de químicos	Cloro y sulfato de aluminio
16	1	Filtro	12 m3/h
17	1	Canaleta de recolección	Perfil U 200x50
18	2	Variador de frecuencia	220 V, 0,5 HP
19	4	VALVULA DESCARGA	Válvula de globo 4" diámetro

ELABORADO POR  
ALEJANDRA MEJIA, ALVARO CRUZ

REVISADO POR  
DRA. EMERITA DELGADO

APROBADO POR  
DR. JUAN PERALTA

ESPOL-FIMCP

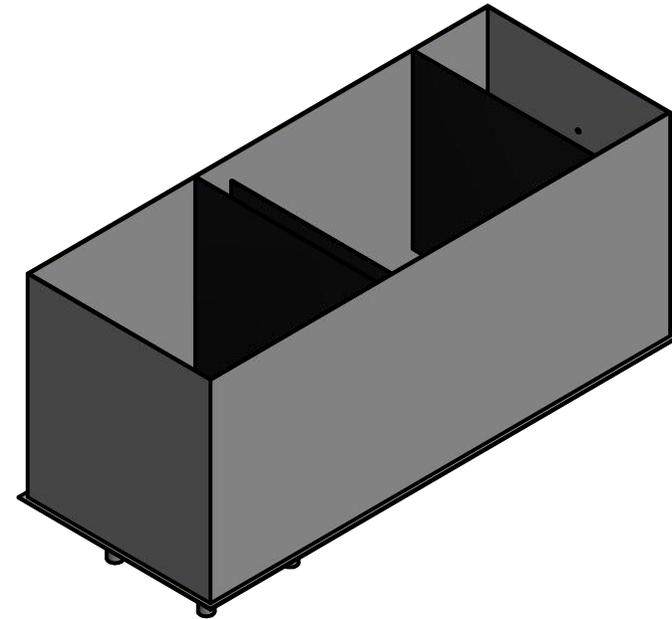
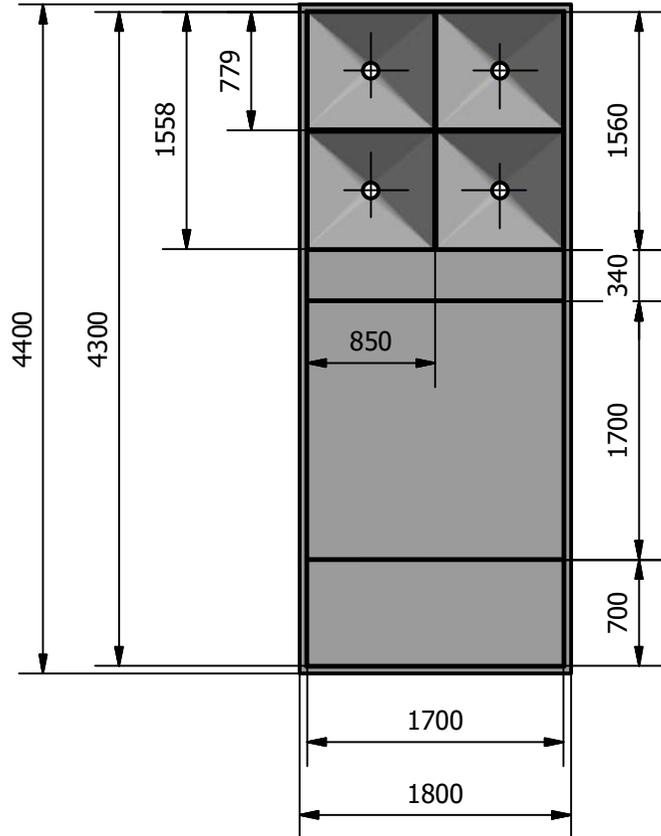
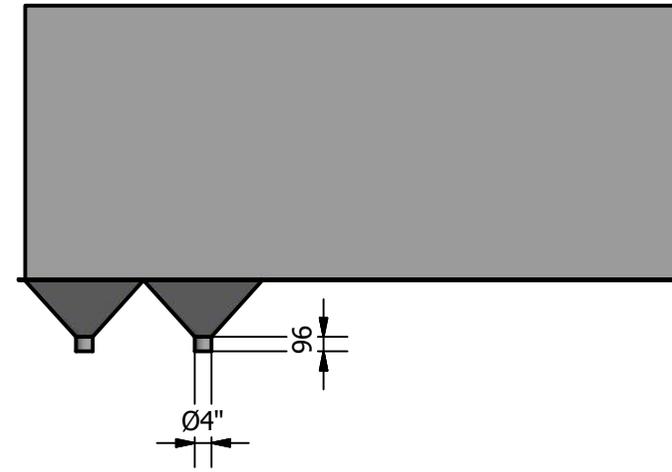
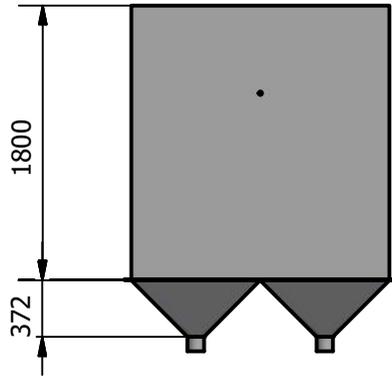
COMPONENTES PLANTA POTABILIZADORA AGUA



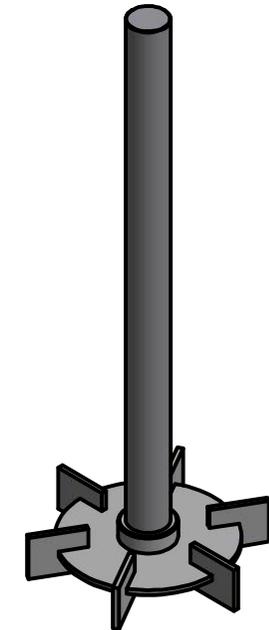
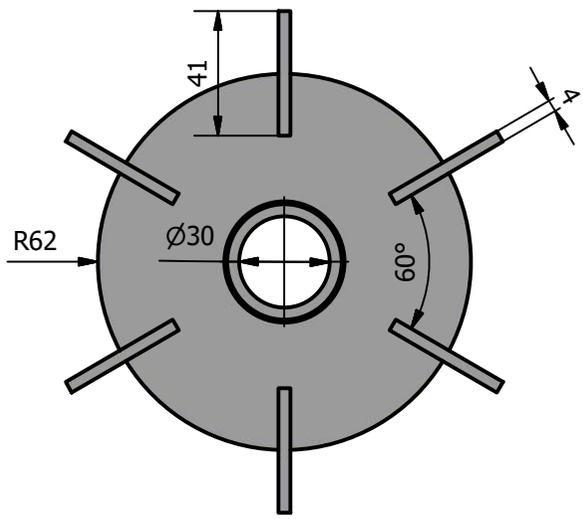
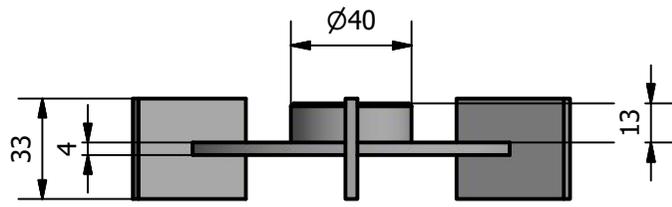
Escala  
1/50

Edición  
1

Hoja  
1/8

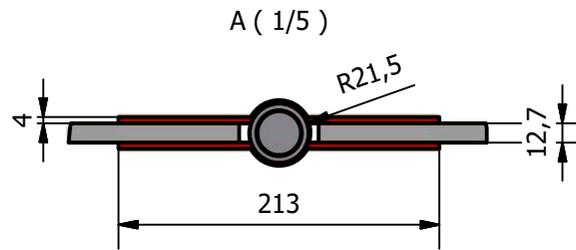
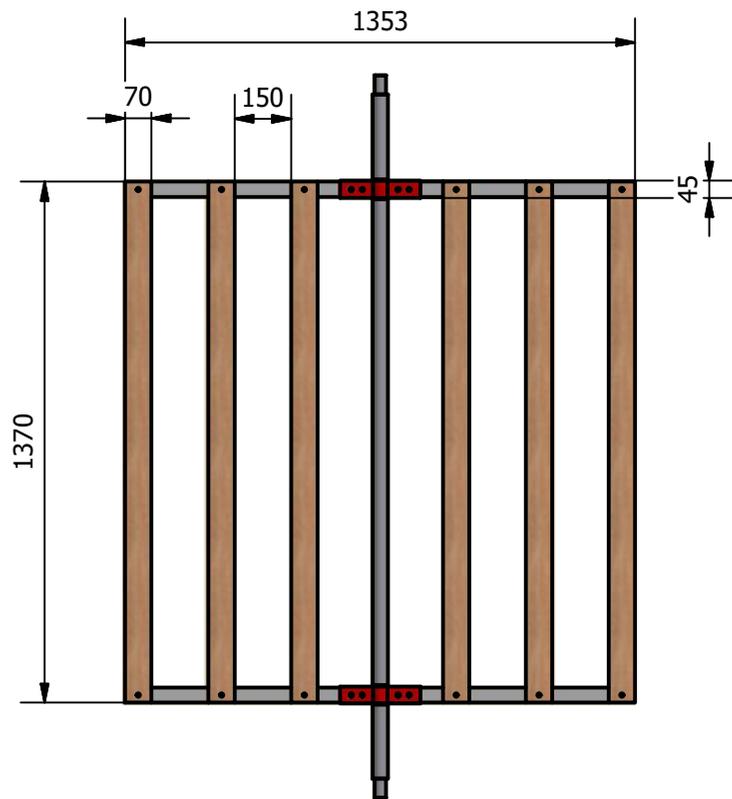


ELABORADO POR ALEJANDRA MEJIA, ALVARO CRUZ	REVISADO POR DRA. EMERITA DELGADO	APROBADO POR DR. JUAN PERALTA	
ESPOL-FIMCP		TANQUE RECTANGULAR	
		 Escala 1/45	Edición 1
		Hoja	2/8

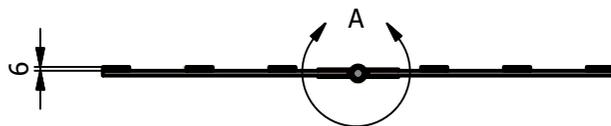
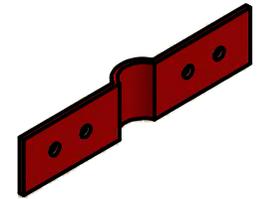


ESCALA 1/5

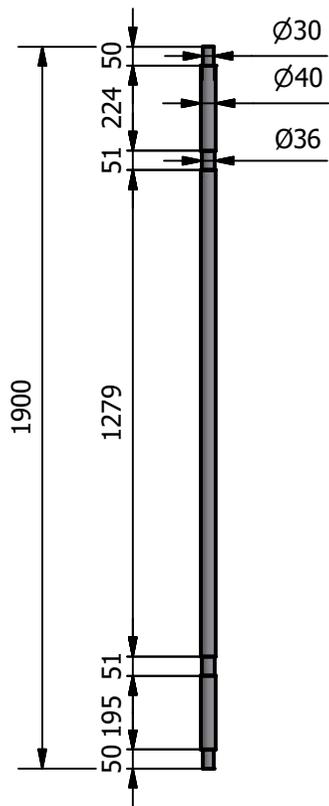
ELABORADO POR ALEJANDRA MEJIA, ALVARO CRUZ	REVISADO POR DRA. EMERITA DELGADO	APROBADO POR DR. JUAN PERALTA	
ESPOL-FIMCP		TURBINA RUSHTON	
		 Escala 1/2,5	Edición 1
		Hoja	3/8



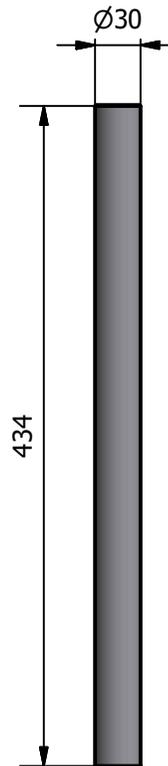
ABRAZADERA (1/5)



ELABORADO POR ALEJANDRA MEJIA, ALVARO CRUZ	REVISADO POR DRA. EMERITA DELGADO	APROBADO POR DR. JUAN PERALTA	
ESPOL-FIMCP		AGITADOR VERTICAL DE PALETAS	
			Escala 1/20

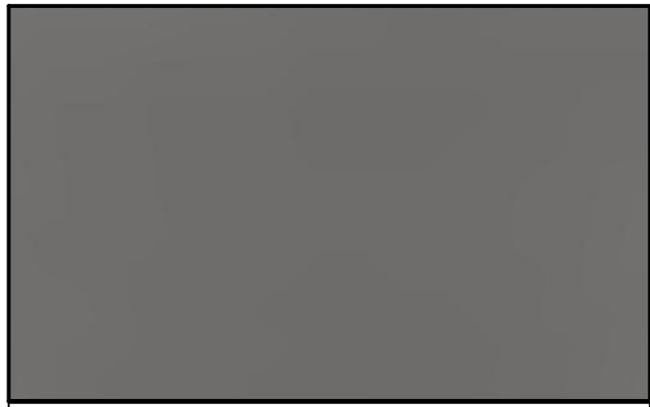


EJE FLOCULACION  
ESCALA 1/20

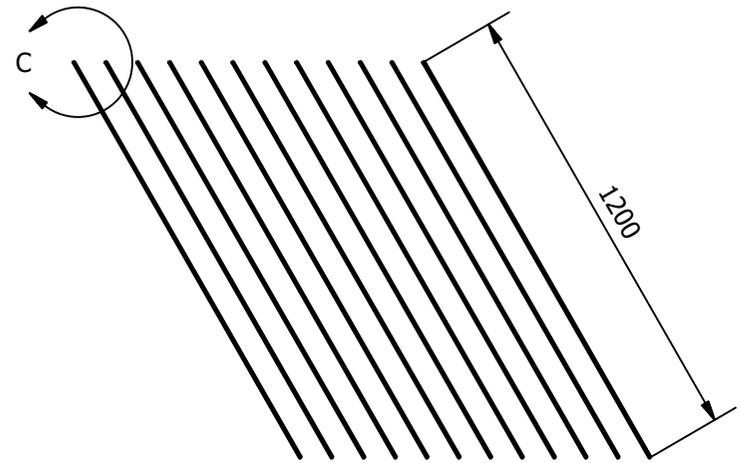


EJE COAGULACION  
ESCALA 1/5

ELABORADO POR ALEJANDRA MEJIA, ALVARO CRUZ	REVISADO POR DRA. EMERITA DELGADO	APROBADO POR DR. JUAN PERALTA		
ESPOL-FIMCP		EJES DE FLOCULACION Y COAGULACION		
			Escala --	Edición 1



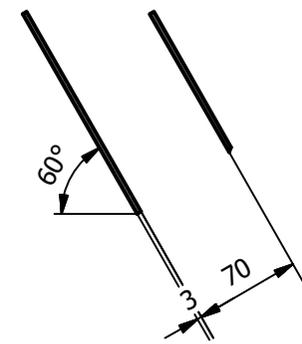
1700



1200

C

C (1:5)

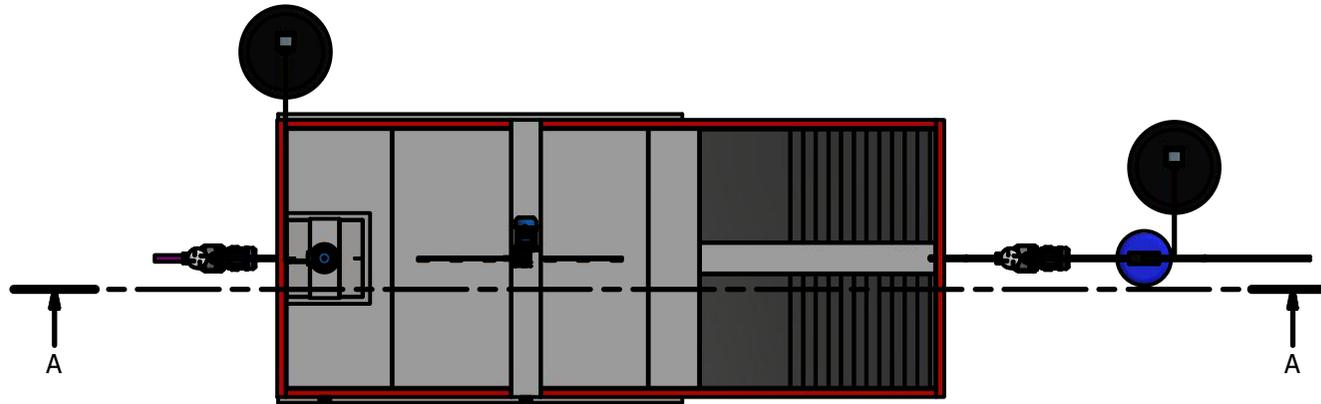
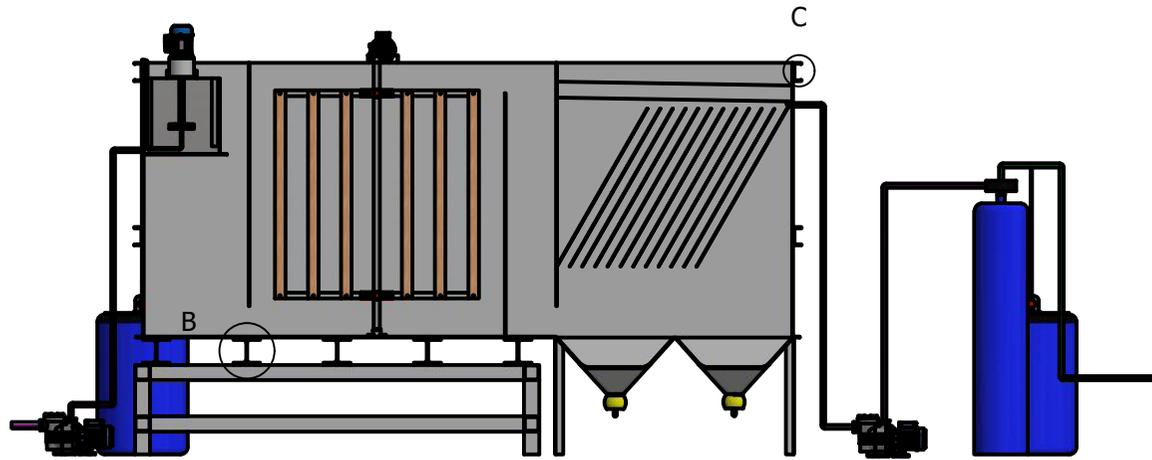


60°

70

ELABORADO POR ALEJANDRA MEJIA, ALVARO CRUZ	REVISADO POR DRA. EMERITA DELGADO	APROBADO POR DR. JUAN PERALTA	
ESPOL-FIMCP		PLACAS DE SEDIMENTACION	
		 	Escala 1/20

A-A ( 1/50 )



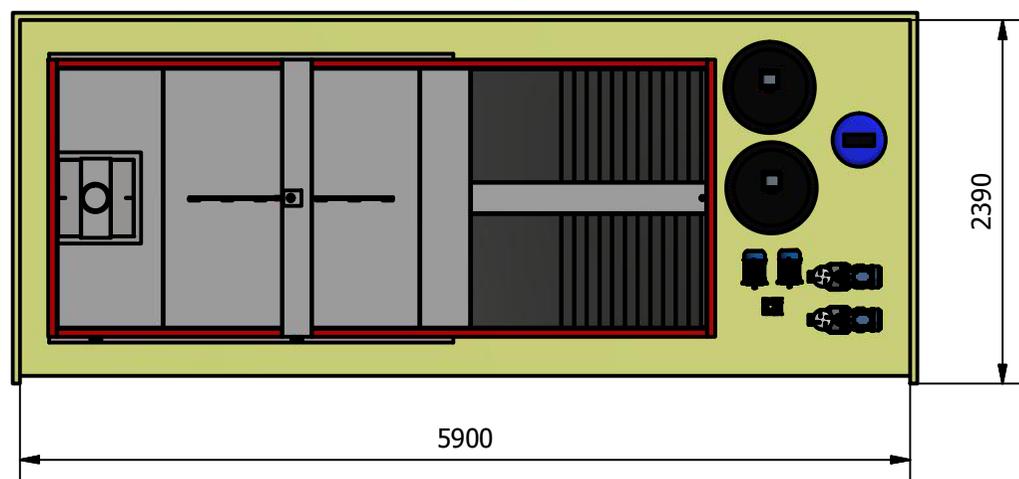
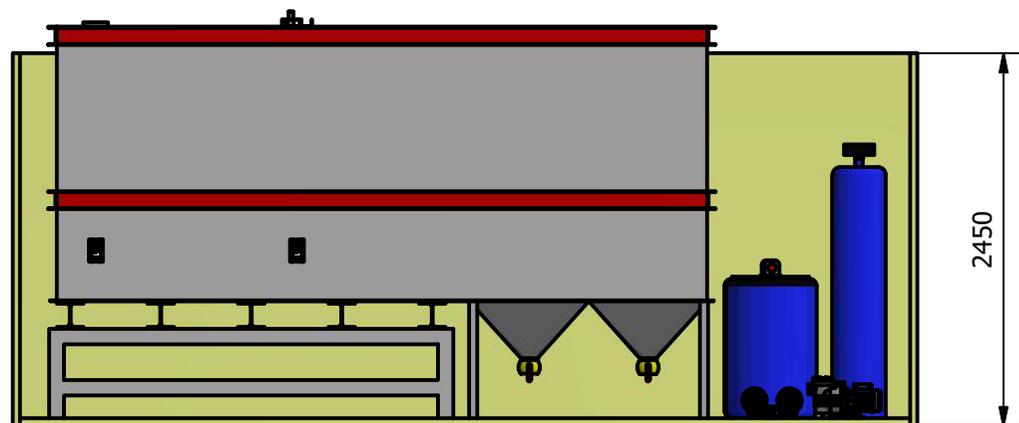
B ( 1/20 )



C ( 1/20 )



ELABORADO POR ALEJANDRA MEJIA, ALVARO CRUZ	REVISADO POR DRA. EMERITA DELGADO	APROBADO POR DR. JUAN PERALTA		
ESPOL-FIMCP		ENSAMBLE PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA		
		 Escala 1/50	Edición 1	Hoja 7/8



ELABORADO POR ALEJANDRA MEJIA, ALVARO CRUZ	REVISADO POR DRA. EMERITA DELGADO	APROBADO POR DR. JUAN PERALTA	
<h1>ESPOL-FIMCP</h1>		DISTRIBUCION SOBRE PLATAFORMA DE 20 FT	
		 Escala 1/50	Edición 1