

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA



**Evaluación del comportamiento de estanques agitados para la homogenización, de una planta clarificadora de agua. Compañía siderúrgica Huachipato.**

Informe de Habilitación Profesional  
presentado en conformidad a los requisitos  
para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:  
**Sr. Jorge Gatica Sánchez.**  
Profesor Co-Guía:  
**Sr. Guillermo Reyes Torres.**

**Milton Alonso Muñoz Muñoz**  
**CONCEPCION – CHILE**  
**2014**

## **RESUMEN**

El objetivo general del proyecto era evaluar las variables del proceso de homogenización en estanques agitados de una planta clarificadora de agua ubicada en la Compañía siderúrgica Huachipato, de la empresa CAP Acero; de modo de generar propuestas que permitan un mejor funcionamiento y disponibilidad de los equipos, reduciendo los costos de operación y mantenimiento.

La metodología utilizada para la realización de este proyecto comenzó con el análisis del diseño y especificaciones de funcionamiento de los equipos, con el fin de verificar si estos cumplían con las necesidades de la planta. Una vez evaluadas estas condiciones, se procedió a proponer modificaciones en el diseño de los equipos y mejoras operativas que satisficieran las necesidades de dicha planta, evaluando los costos de inversión y operación cada modificación.

El análisis anterior dio los siguientes resultados:

- Modificar el estanque T-100 cambiando la configuración de sus deflectores y redondear el contorno del fondo del estanque estas modificaciones tienen un costo estimado de \$809.000; además se recomendó variar la velocidad de agitación ahorrando \$709.560 [año/kW] en energía eléctrica.
- Reemplazar el estanque mezclador, acercar el contenedor del floculante e implementar un sistema de prevención de rebalses; estas modificaciones poseen un costo estimado de \$5.669.671.
- Incorporar una torreta guía en el agitador del estanque T-103 con un costo estimado de \$70.552, además se recomienda mantener su nivel de trabajo sobre el 25% de su capacidad.

Estos resultados son las recomendaciones que se sugirieron implementar como conclusión luego de evaluar los costos de todas las propuestas generadas. Dichos resultados fueron puestos a disposición de la empresa para que eventualmente sean factibles por su parte realizarlas.

**NOMENCLATURA**

Re	: Número de Reynolds
P	: Potencia [W]
$N_i$	: Velocidad del rodete [ $s^{-1}$ ]
$D_i$	: Diámetro del rodete [m]
$H_i$	: Altura del rodete [m]
$S_i$	: Separación entre rodetes [m]
$H_L$	: Altura o profundidad del líquido [m]
$H_T$	: Altura del estanque [m]
$D_T$	: Diámetro del estanque [m]
$\rho$	: Densidad del fluido [ $\frac{kg}{m^3}$ ]
$\mu$	: Viscosidad dinámica [Pa · s]
$\nu$	: Viscosidad cinemática del fluido [ $\frac{m^2}{s}$ ]
$\tau$	: Esfuerzo de corte [ $\frac{N}{m^2}$ ]
$U$	: Velocidad del fluido [ $\frac{m}{s}$ ]
$T_m$	: Tiempo de mezcla [s]
$N_p$	: Número de potencia
$N'_p$	: Número de potencia en régimen turbulento
Q	: Caudal de bombeo [ $\frac{m^3}{s}$ ]
V	: Volumen del líquido [ $m^3$ ]
J	: Ancho deflector [m]
$S_J$	: Separación de la pared al deflector [m]
$H_J$	: Altura del deflector [m]
$h_j$	: Distancia del fondo al deflector [m]
$Vol_{\text{útil}}$	: Volumen útil del estanque [ $m^3$ ]

- $N_{def}^{\circ}$  : Número de deflectores
- $L_{eje}$  : Largo del eje [ $m$ ]
- $D_{eje}$  : Diámetro del eje [ $mm$ ]
- $P_M$  : Potencia del motor [ $kW$ ]
- $P_R$  : Potencia del reductor [ $kW$ ]
- $N_M$  : Velocidad del motor [ $RPM$ ]
- $T$  : Torque [ $N \cdot m$ ]
- $W$  : Ancho del aspa [ $m$ ]
- $L$  : Largo del aspa [ $m$ ]
- $N_{aspas}^{\circ}$  : Cantidad de aspas del agitador
- $N_{rod}^{\circ}$  : Cantidad de rodets
- $k_l$  : Constante de proporcionalidad en régimen laminar
- $P_{req}$  : Potencia requerida [ $kW$ ]
- $F_{aspa}$  : Fuerza ejercida sobre las aspas [ $N$ ]
- $F_{def}$  : Fuerza ejercida sobre los deflectores [ $N$ ]
- $e$  : Espesor [ $mm$ ]

**ÍNDICE**

RESUMEN.....	1
NOMENCLATURA.....	2
INDICE.....	4
<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
<b>II. ANTECEDENTES.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 CAP Acero (Compañía Siderúrgica Huachipato S.A.).....</b>	<b>7</b>
<b>III. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL ACERO.....</b>	<b>8</b>
<b>IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>10</b>
<b>V. OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
<b>VI. METODOLOGÍA.....</b>	<b>13</b>
<b>6.1 Teoría y descripción del sistema, equipos y elementos.....</b>	<b>13</b>
<b>6.1.1 Descripción de la planta clarificadora de agua.....</b>	<b>13</b>
<b>6.1.2 Teoría de la agitación.....</b>	<b>21</b>
<b>6.1.2.1 Fenómeno de agitación y mezcla.....</b>	<b>21</b>
<b>6.1.2.2 Equipo de mezcla.....</b>	<b>23</b>
<b>6.1.2.3 Diseño estándar de turbina.....</b>	<b>29</b>
<b>6.1.2.4 Generalidades de los estanques.....</b>	<b>30</b>
<b>6.1.2.5 Tipos de flujo en estanques agitados.....</b>	<b>30</b>
<b>6.1.2.6 Placas deflectoras.....</b>	<b>31</b>
<b>6.1.2.7 Valorización de la efectividad de la mezcla.....</b>	<b>32</b>
<b>6.1.2.8 Potencia de mezclado.....</b>	<b>34</b>
<b>6.1.2.9 Parámetros característicos en agitadores.....</b>	<b>34</b>
<b>VII. MUESTREO Y DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN.....</b>	<b>37</b>
<b>7.1 Muestreo de densidades.....</b>	<b>37</b>
<b>7.2 Parámetros y variables de operación.....</b>	<b>37</b>
<b>VIII. PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES DE DISEÑO, OPERACIÓN Y REEMPLAZO DE EQUIPOS.....</b>	<b>38</b>
<b>8.1 Análisis de problemas.....</b>	<b>38</b>
<b>8.1.1 Fallas en el estanque ecualizador (T-100).....</b>	<b>38</b>
<b>8.1.2 Fallas en el estanque mezclador (T-101).....</b>	<b>39</b>

<b>8.1.3</b>	Fallas en el pozo de lodos (T-103).....	39
<b>8.2.</b>	Propuestas o mejoras.....	40
<b>8.2.1</b>	Propuestas para el estanque ecualizador (T-100).....	40
<b>8.2.2</b>	Propuestas para el estanque mezclador (T-101).....	46
<b>8.2.3</b>	Propuestas para el pozo de lodos (T-103) .....	51
<b>8.3.</b>	Recomendaciones.....	54
<b>8.3.1</b>	Recomendaciones para el estanque ecualizador.....	54
<b>8.3.2</b>	Recomendaciones para el estanque mezclador.....	54
<b>8.3.3</b>	Recomendaciones para el pozo de lodos.....	55
<b>IX.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	56
<b>X.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	58
<b>XI.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	60
	<b>Anexo 1:</b> Norma ambiental.....	60
	<b>Anexo 2:</b> Plano estanque ecualizador.....	63
	<b>Anexo 3:</b> Plano estanque mezclador.....	64
	<b>Anexo 4:</b> Especificaciones estanque T-100.....	65
	<b>Anexo 5:</b> Especificaciones estanque T-101.....	67
	<b>Anexo 6:</b> Especificaciones estanque T-103.....	68
	<b>Anexo 7:</b> Software Visimix.....	69

## **I. INTRODUCCIÓN**

La empresa CAP Acero, según las normas ambientales (Anexo 1), debe reducir sus emisiones de gases provenientes de los altos hornos, por lo cual los humos generados en la producción de arrabio son lavados a través de unas duchas, obteniéndose así un residuo industrial líquido (RIL) que no puede ser reutilizado ni tampoco puede ser enviado al mar debido a la alta concentración de material particulado y la turbiedad que posee. Es por eso que estos efluentes deben ser tratados con el fin de reducir sus impurezas. Para ello, pasan por una planta clarificadora de agua que reduce los sólidos en suspensión del agua tratada y disminuyen su temperatura, quedando en condiciones de ser reutilizada y apta para descargar el excedente al mar sin perjudicar al ecosistema.

Actualmente dicha planta presenta una serie de problemas en varios estanques, donde los sistemas de agitación no realizan correctamente su función, lo que provoca fallas y rupturas en sus ejes, hélices y motores, desencadenando problemas de funcionamiento y reiteradas fallas en los demás equipos. Las constantes fallas han originado grandes inversiones y pérdidas en los procesos de mantenimiento y reparación. El funcionamiento continuo de esta planta es indispensable para la empresa, debido a que si no cumple con las normas ambientales (Anexo 1), corre el riesgo de ser cerrada toda la compañía.

## **II. ANTECEDENTES**

### **2.1 CAP Acero (Compañía Siderúrgica Huachipato S.A.)**

Desde 1950 el acero en Chile se asocia a la marca CAP Acero, una empresa que cuenta con la tecnología para proveer las soluciones en acero que apoyan el crecimiento del país. Esta desarrolla sus actividades a través de su filial *Compañía Siderúrgica Huachipato S.A.* la cual tiene sus instalaciones ubicadas en la bahía de San Vicente, en la ciudad de Talcahuano, octava región de Chile. Es una industria siderúrgica integrada, única en su tipo en Chile. Esto quiere decir que elabora sus productos a partir de materias primas básicas presentes en la naturaleza, como material de hierro, carbón y caliza, lo que garantiza acero de alta pureza y calidad controlada.

Desde su fundación, la capacidad de producción de la compañía ha ido aumentando, llegando hoy a 1.450.000 toneladas de acero líquido, cubriendo las necesidades de importantes sectores de la economía del país: minería, industria metalmeccánica. Sus productos están presentes en exigentes mercados internacionales.

A la constante capacitación y entrenamiento de sus trabajadores, la empresa suma inversión en tecnología y equipamiento de avanzada, compatibles con un desarrollo sustentable. De este modo, mantiene la excelencia en sus procesos y logra calidad creciente en sus productos en un marco de respeto por el medio ambiente. El Compromiso de la compañía con el medio ambiente queda de manifiesto en acciones e inversiones permanentes que posibilitan su desarrollo sustentable, así como en sus múltiples actividades que benefician directamente al entorno y contribuyen a la sensibilización ambiental de la comunidad.

Dado el compromiso de la empresa por avanzar en el mejoramiento y sustentabilidad de sus procesos, a partir de 2006 cuenta con una Gerencia de Medio Ambiente y Seguridad. Asimismo, ha implementado un Sistema de Gestión Ambiental que le permitió obtener la certificación de la Norma ISO 14001 en noviembre de 2009.

De acuerdo con la normativa vigente, cada uno de los proyectos de inversión de CAP Acero se somete al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) con el fin de asegurar la disminución de los impactos ambientales y hacer partícipes de ellos a la ciudadanía y comunidad.

### III. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL ACERO

La siguiente imagen (Fig. 1) representa un esquema del proceso de obtención del acero.



**Figura 1:** Proceso de obtención del acero.

Tal como se observa en la figura 1, el proceso consta de las etapas descritas a continuación:

- **Preparación de materias primas**

En esta etapa se descargan, clasifican y almacenan las materias primas necesarias para la elaboración del acero, que son básicamente mineral de hierro, caliza y carbón mineral.

- **Planta de Coque**

En unas baterías de 58 hornos, el carbón mineral se somete a un proceso de destilación seca para obtener coque metalúrgico. Como subproducto se obtiene un gas de alto poder calorífico, que se utiliza como combustible industrial en el resto de las instalaciones tales como: planta de cal, alto horno 1, hornos de foso, hornos de planchones, calderas, regeneradores de calor.

- **Altos Hornos**

Son grandes reactores verticales en contracorriente, en que el aire precalentado combustiona coque a elevadas temperaturas para reducir el mineral, fundir la carga y obtener hierro líquido a la forma de arrabio.

- **Desulfurización**

Una vez transportado a la acería, el arrabio se vacía a un recipiente, donde se realiza la eliminación del azufre, mediante la inyección de cal y magnesio. El azufre es retenido en la escoria resultante y las emisiones son capturadas por un limpiador de gases.

- **Acería de convertidores al oxígeno (CONOX)**

En esta fase se refina el arrabio inyectando oxígeno de alta pureza, se ajusta el contenido de carbono y se agregan ferroaleaciones que aportan las características básicas de cada tipo de acero.

- **Colada continua**

A través de moldes de cobre y enfriamiento directo por agua, el acero líquido se solidifica y enfría, para obtener planchones y palanquillas, productos casi terminados que se procesan en las fases de laminación.

- **Laminación**

Las palanquillas son procesadas en los laminadores de barras, donde son sometidas a sucesivas etapas de laminación. Los productos finales son barras rectas y en rollos, lisas y con resaltes, según el uso final que se requiera.

- **Planta clarificadora de agua**

Esta se encuentra ubicada al costado de los altos hornos. Se encarga de tratar el agua proveniente de los lavadores de humos de los altos hornos para su posterior reutilización o descarga al mar. Sus unidades principales son: Estanque equalizador, estanque mezclador, estanque reactor clarificador, torres de enfriamiento, pozo de lodos y prensa de lodos.

Este estudio se enfoca en la planta clarificadora, la cual será presentada con detalle más adelante (Capítulo 6).

#### **IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La planta clarificadora ha tenido dificultades (Tabla 1) en reiteradas ocasiones en equipos que son claves en el funcionamiento de esta, los cuales generan un importante gasto en reparaciones y mantenimiento. La concurrencia de estas fallas ha repercutido en el funcionamiento de todo el sistema, donde se ha disminuido el tiempo entre cada mantenimiento, y la vida útil de algunos equipos. Los equipos y fallas más recurrentes se presentan en la siguiente tabla (Tabla 1):

**Tabla 1:** Principales problemas de los estanques

<b>Ecualizador (T-100)</b>	<b>Mezclador (T-101)</b>	<b>Pozo de lodos (T-103)</b>
-Fallas en el agitador (Rupturas del eje, soporte inferior del eje, aspas del rodete y fallas en el motor)  -Rupturas en la base de los deflectores	-Acumulación de sedimentos en el fondo del estanque  -No se logra obtener una mezcla homogénea entre el RIL y el floculante	-Fallas en el agitador (Rupturas en el soporte del motor, en el eje y fallas en el motor)

Actualmente se aplica mantenimiento correctivo a los estanques y agitadores en estudio; en cambio, a las bombas del sistema se les hace mantenimiento preventivo.

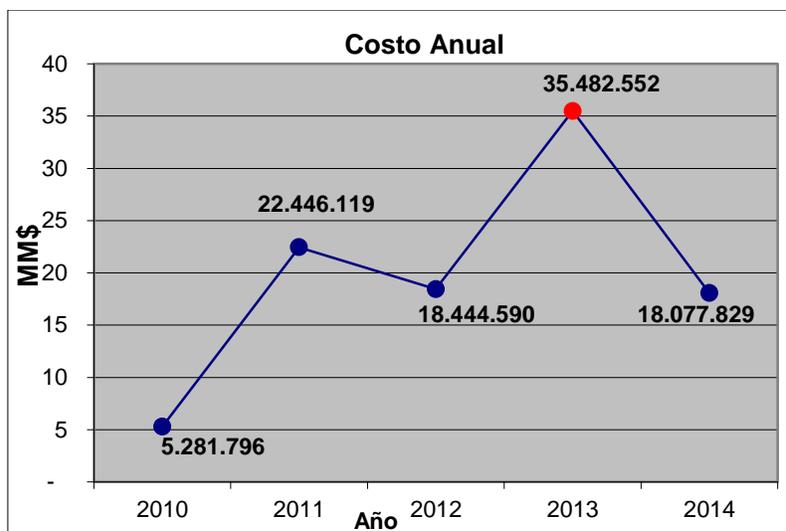
La planta clarificadora está funcionando a media capacidad, debido a que se mantiene un solo alto horno en operación. El estanque T-100 se encuentra fuera de servicio, por lo cual se procede a pasar el efluente a través de un bypass hacia el Mezclador. El eje del agitador del ecualizador se encuentra desmontado, desde la última reparación. (Febrero del 2014).

En la base de datos de la empresa (Software SAP) se encuentra el registro de fallas y reparaciones desde el año 2010. Se efectuó una recopilación de información para los estanques T-100, T-101 y T-103; esta información fue agrupada en la siguiente tabla (Tabla 2) y gráficos (Gráf. 1 y 2).

**Tabla 2:** Costo en mantenimiento y reparación de los estanques.

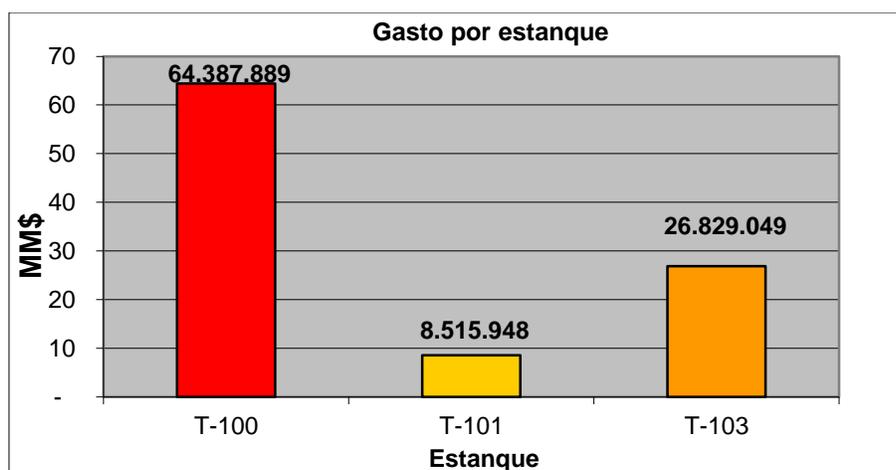
	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>Total equipo</b>
<b>T-100</b>	2.101.524	18.366.317	12.731.019	18.118.228	13.070.802	64.387.889
<b>T-101</b>	86.858	1.964.482	2.286.134	4.099.742	78.732	8.515.948
<b>T-103</b>	3.093.415	2.115.320	3.427.437	13.264.582	4.928.295	26.829.049
<b>Total Año</b>	5.281.796	22.446.119	18.444.590	35.482.552	18.077.829	<b>\$ 99.732.886</b>

En la tabla 2 se puede apreciar que desde el año 2010 hasta el 2014 se han gastado casi 100 millones de pesos en reparaciones de estos tres estanques.



**Gráfico 1:** Costo anual del mantenimiento de los estanques (Período 2010 – 2014).

En el gráfico 1 se puede observar que el año 2013 se hizo el mayor gasto en reparaciones, alcanzando los 35 millones de pesos.



**Gráfico 2:** Costo de mantenimiento para cada estanque (Período 2010 -2014).

En el gráfico 2 se destaca el estanque ecualizador, en el cual se gastan más recursos en reparaciones.

El funcionamiento continuo de la planta clarificadora de agua es indispensable para la compañía siderúrgica Huachipato, ya que si no se controlan las emanaciones de los altos hornos, la empresa corre el riesgo de ser cerrada. Debido a esto y a las altas cifras de dinero que se gastan en mantenimiento, es necesario estudiar el comportamiento de los equipos T-100, T-101 y T-103; identificar las causas de las fallas y proponer mejoras que ayuden a reducir el costo en mantención y reparación de estos equipos, y aumentar así la vida útil del resto de la planta.

## **V. OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

- Describir y evaluar el proceso homogenización en los estanques: Ecuador (T-100), Mezclador (T-101) y Pozo de lodos (T-103), con el fin de generar propuestas que mejoren el funcionamiento y disponibilidad de los equipos, reduciendo los costos de operación y mantenimiento.

### **Objetivos específicos**

- Revisar y analizar las actuales configuraciones, variables y condiciones de operación de los sistemas de agitación, y compararlos con información recopilada de la literatura, para identificar las principales causas de falla.
- Sugerir propuestas de modificación y rediseño en los sistemas de agitación utilizados en la planta.
- Evaluación de costos de operación e inversión implicados en propuestas sugeridas, con el fin de evaluar factibilidad.
- Proponer una metodología de operación de los equipos analizados para obtener un mejor funcionamiento de estos y una mayor disponibilidad de la planta.

## **VI. METODOLOGÍA**

En este capítulo se describe detalladamente el proceso de la planta clarificadora de agua, incluyendo los equipos y elementos que este abarca. A continuación se recopila información de la literatura para evaluar el funcionamiento especificado de la planta clarificadora en relación a la teoría de agitación y mezcla obtenida en la investigación con el fin de identificar las principales causas de falla en los equipos. Una vez evaluadas estas condiciones, se procede a proponer modificaciones operativas y en el diseño de los equipos que mejoren el funcionamiento y disponibilidad de los equipos, luego se realiza una evaluación de costos de inversión y operación de dichas propuestas, con el fin de recomendar aquellas que reduzcan los costos de operación y mantenimiento.

### **6.1 Teoría y descripción del sistema, equipos y elementos**

#### **6.1.1 Descripción de la planta clarificadora de agua**

La planta clarificadora de agua (Fig. 9) se utiliza para clarificar las aguas turbias y/o coloreadas, con el fin de eliminar los sólidos suspendidos, como los compuestos de hierro, aluminio, manganeso y plomo. Está diseñada para tratar  $700 \left[ \frac{m^3}{hr} \right]$  y su objetivo es reducir el contenido de sólidos suspendidos totales, por precipitación de metales, y disminuir la temperatura del fluido para ser reutilizada en los lavadores de gases de altos hornos; el excedente de agua que no es recirculada se envía hacia el mar, es por eso que al final del proceso el efluente deben tener una turbiedad menor a  $26[NTU]$ , un  $PH \approx 7$  y una temperatura menor a  $28^\circ C$ . Estas condiciones son controladas mediante muestras tomadas en la batea de salida de las torres de enfriamiento agua.

Las unidades principales de la planta clarificadora son: ecualizador, mezclador, reactor clarificador, torres de enfriamiento, pozo de lodos y prensa de lodo.

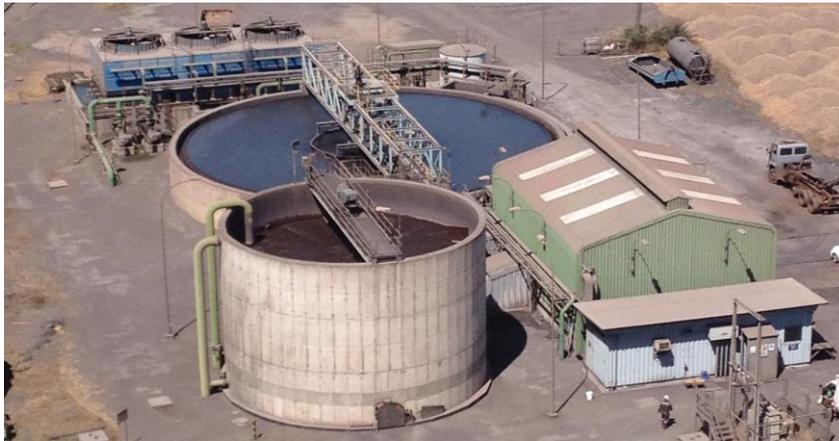
Las aguas provienen de los lavadores de gases de los altos hornos a una temperatura de  $55^\circ C$  y se descargan directamente en el ecualizador, un gran estanque con capacidad de  $1000[m^3]$  encargado de homogenizar el efluente con el fin de alimentar un flujo constante al proceso de clarificación.

Posterior a esto, es enviado al mezclador, un estanque rectangular donde se mezcla el RIL con un floculante, aditivo químico que adhiere las partículas en suspensión del líquido residual, provocando que estas puedan precipitar. Una vez mezclado, pasa hacia el reactor clarificador, donde ocurre el

proceso principal de la planta, en el fondo de este gran estanque decantan los sólidos los cuales son enviados al pozo de lodos.

En el pozo de lodos se almacenan los sólidos decantados en forma de lodo para su posterior paso por la prensa filtro, en la cual se disminuye el contenido de agua en el lodo hasta un 35% en peso, para facilitar su manipulación. El efluente ya clarificado es enviado a tres torres de enfriamiento donde se disminuye la temperatura del fluido a 28°C.

La siguiente imagen (Fig. 2) muestra una vista desde un alto horno hacia la planta clarificadora.



**Figura 2:** Vista aérea de planta clarificadora.

El corazón de la planta es el reactor clarificador (Fig. 3), todos los procesos de la planta dependen de su correcto funcionamiento, por lo cual es preciso describirlo. Este es un gran estanque circular con una capacidad útil de 1932[m<sup>3</sup>], su función es realizar la clarificación del fluido enviado del estanque mezclador, donde al fondo se decantan los sólidos y el efluente clarificado es enviado a las torres de enfriamiento. Está compuesto por: Un rastrillo o rastra (que se aprecia en la Fig.3), el motor que lo mueve, el cual esta acoplado a dos reductores (uno de alta y otro de baja revolución) que giran en un rango entre 0,095 hasta 0,032[RPM]; un agitador de turbina y su respectivo motoreductor, el cual gira en sentido opuesto al de la rastra en un pequeño estanque interior al centro del clarificador, en él se deposita el fluido proveniente del mezclador. Los flóculos precipitados en el fondo del estanque son arrastrados al centro, para luego ser enviados al pozo de lodos. Por otro lado el fluido clarificado es recolectado en un anillo exterior al estanque por medio de rebalse, para luego ser enviado a las torres de enfriamiento.

En la siguiente imagen (Fig. 3) se puede apreciar el estanque clarificador vacío.



**Figura 3:** Estanque clarificador vacío.

La variable más controlada en la planta para evaluar la calidad del agua es la turbidez, por lo cual es necesario definirla. La turbidez o turbiedad, es el grado de dispersión de la luz debido a la presencia de partículas en suspensión. La turbidez se mide en NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez). El instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua. En la planta clarificadora se utiliza un Turbidímetro *Hanna HI93414* (Fig. 4).



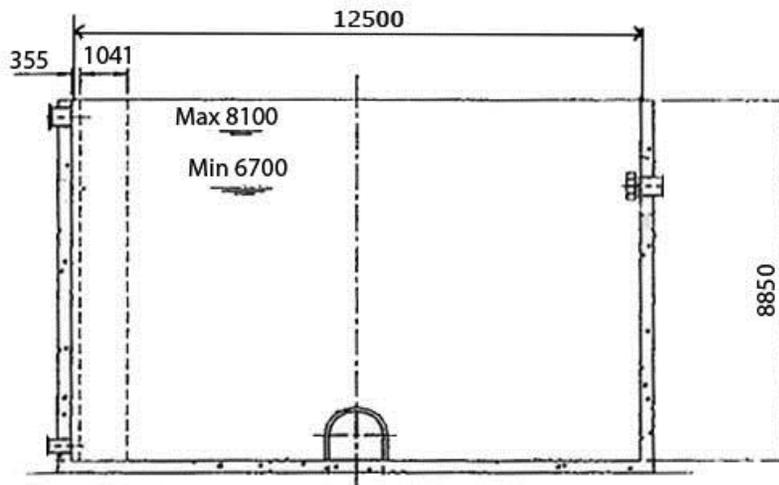
**Figura 4:** Medidor conforme a la EPA de la turbidez y Cloro Libre/total (*Hanna HI93414*).

Una medición de la turbidez puede ser usada para proporcionar una estimación de la concentración de TSS (Total sólidos en Suspensión), el cual obtenido de otra forma es un parámetro tedioso y difícil de medir. Según la Organización Mundial de la Salud, la turbidez del agua para consumo humano no debe superar en ningún caso las 5[NTU], y estará idealmente por debajo de 1[NTU]<sup>14</sup>. Las principales consecuencias de una alta turbidez son que las partículas suspendidas absorben calor de la luz del sol, haciendo que las aguas turbias se vuelvan más calientes, reduciendo la concentración de oxígeno en el agua, impidiendo la supervivencia de algunos organismos por oxígeno y temperatura del medio. También las partículas en suspensión dispersan la luz, a causa de lo cual decrece la actividad fotosintética en plantas y algas, lo que contribuye a bajar más aún la concentración de oxígeno.

Este estudio se enfoca en los estanques críticos que presentan mayor número de fallas (Tabla 2), por lo cual la recopilación de información detallada, análisis y cálculos se centran en los equipos T-100, T-101, T-103 y sus respectivos sistemas de agitación; los cuales se describen a continuación:

**Ecualizador (T-100)** (Anexo 4)

Es un gran estanque (Fig. 5) abierto y circular, de operación continua, hecho de concreto preesforzado, con una capacidad útil de  $1000[m^3]$ . En él se deposita el fluido proveniente del lavador de gases de los altos hornos, los cuales tienen como valor de diseño una densidad de  $1000\left[\frac{kg}{m^3}\right]$  y una viscosidad dinámica de  $0,001[Pa \cdot s]$ , igual al agua. Su función principal es homogenizar las concentraciones de sólidos que posee el RIL entrante, para poder entregar un efluente homogéneo al resto de la planta, y alimentar con un caudal constante al mezclador; también colateralmente se produce una disminución de la temperatura del fluido. En la tabla 3 se describen sus parámetros de operación y dimensiones.



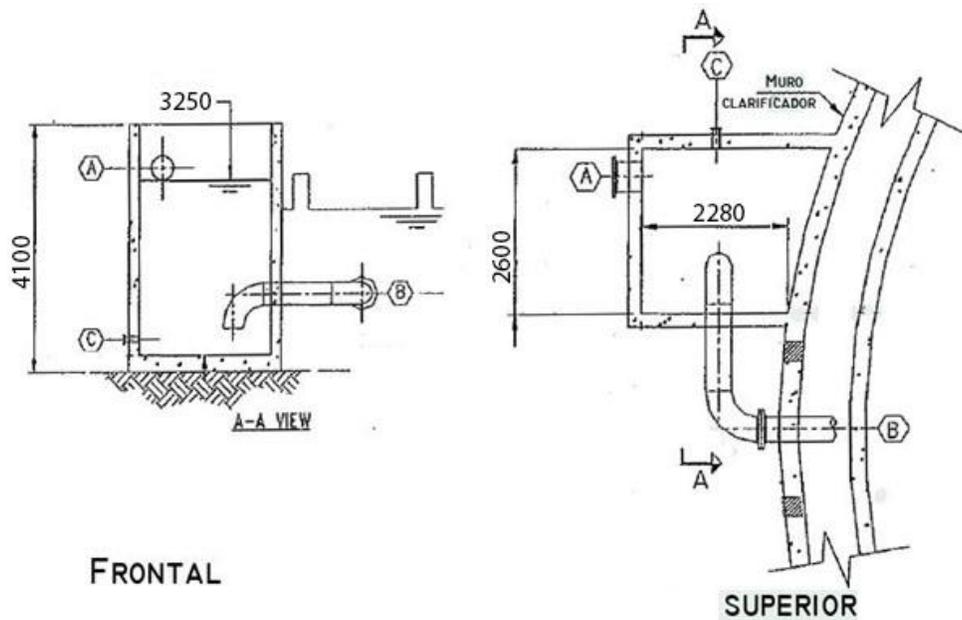
**Figura 5:** Estanque T-100. <sup>15</sup>

**Tabla 3:** Dimensiones y parámetros de operación del estanque T-100, planta clarificadora.

Estanque		Agitador			
$H_T$	8,85[m]	$D_i$	3,01[m]	$P_R$	120,05[kW]
$D_T$	12,5[m]	$H_i$	2,225[m]	$N_M$	1450[RPM]
$V_{\text{útil}}$	1000[m <sup>3</sup> ]	$L_{\text{eje}}$	8,9154[m]	$N_i$	58[RPM]
$N_{\text{def}}^{\circ}$	3	$D_{\text{eje}}$	101,6[mm]	$T$	12.277[N · m]
$J$	1,042[m]	$P_M$	74,57[kW]		

**Mezclador (T-101)** (Anexo 5)

Es un estanque (Fig. 6) rectangular y abierto, de operación continua, construido de concreto preesforzado que colinda con el reactor clarificador, por lo cual posee una pared que adopta la curva de dicho estanque. El mezclador tiene un volumen útil de  $19[m^3]$ . Este estanque se encarga de crear una mezcla homogénea entre el flujo proveniente del equalizador y un aditivo químico floculante; el cual debe ser depositado en el reactor clarificador, donde las partículas sólidas adheridas al floculante comiencen a precipitar. Para el fluido de trabajo se considera una densidad del fluido de  $1010\left[\frac{kg}{m^3}\right]$  y una viscosidad dinámica de  $0,001[Pa \cdot s]$ . En la tabla 4 se describen sus dimensiones y parámetros de operación. El producto químico utilizado como floculante comercial es Optimer® 7196 Plus, tiene una densidad de  $1,06647\left[\frac{kg}{L}\right]$  y su pH varía entre 3 a 5. <sup>15</sup>



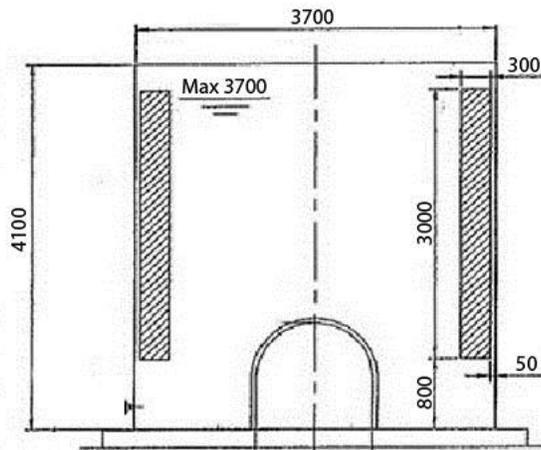
**Figura 6:** Estanque T-101. <sup>15</sup>

**Tabla 4:** Dimensiones y parámetros de operación del estanque T-101, planta clarificadora.

Estanque		Agitador		$P_R$	1,49[kW]
$H_T$	4,1[m]	$D_i$	0,523[m]	$H_i$	1,357[m]
Ancho	2,6[m]	$N_{aspas} - N_{Rod}$	6 - 2	$S_i$	1,143[m]
Largo	2,28[m]	$L_{eje}$	2,96[m]	$N_M$	1.500[RPM]
$V_{\text{útil}}$	$19[m^3]$	$D_{eje}$	38,1[mm]	$N_i$	145[RPM]
		$P_M$	1,118[kW]	$T$	131[N · m]

**Pozo lodos (T-103)** (Anexo 6)

Es un estanque (Fig. 7) circular y abierto, de operación por lotes (Batch); está hecho de acero con una capacidad útil de  $39[m^3]$ . Es el encargado de acumular el lodo, generado a partir de los flóculos precipitados en el clarificador, hasta obtener una cantidad y consistencia ideal [\*] para realizar el prensado de lodos. Para las propiedades físicas de trabajo del líquido se considera una viscosidad dinámica de  $0,00146[Pa \cdot s]$  y una densidad que varía entre los 1250 a  $1450[\frac{kg}{m^3}]$ . En la tabla 5 se describen las dimensiones y parámetros de operación del estanque. Posterior a este proceso, la parte seca es desechada por camiones, mientras que el líquido extraído es devuelto por una línea hacia el mezclador



**Figura 7:** Estanque T-103. <sup>15</sup>

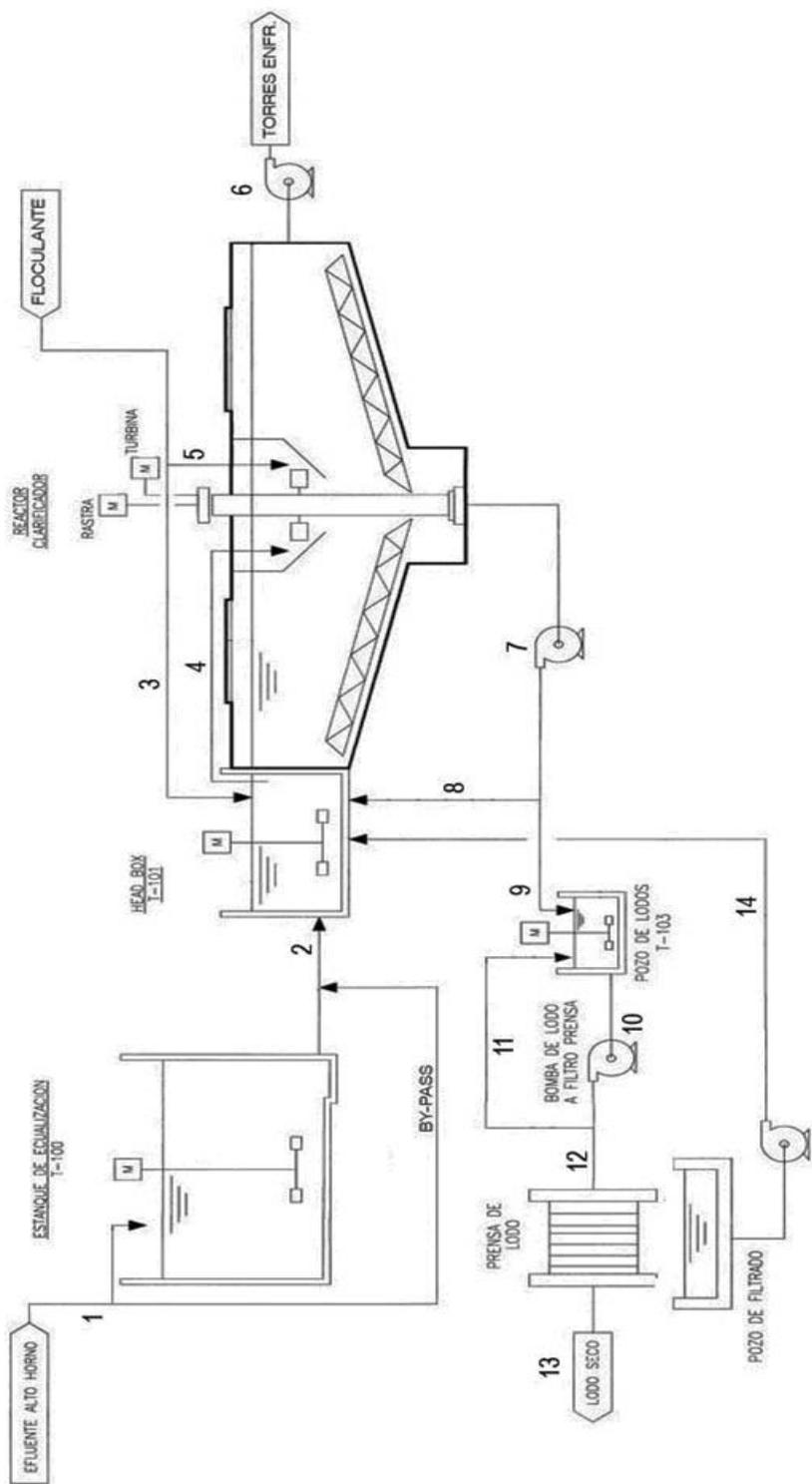
**Tabla 5:** Dimensiones y parámetros de operación del estanque T-103, planta clarificadora.

Estanque		Agitador			
$H_T$	4,1[m]	$D_i$	1,625[m]	$H_i$	1[m]
$D_T$	3,7[m]	$N_{aspas}^o$	3	$N_M$	1.425[RPM]
$V_{\text{útil}}$	39[m <sup>3</sup> ]	$L_{eje}$	3,022[m]	$N_i$	70[RPM]
$N^o_{def}$	4	$D_{eje}$	63,5[mm]	$T$	1.017[N · m]
$J$	0,3[m]	$P_M$	7,457[kW]		
$h_j$	0,8[m]	$P_R$	11,386[kW]		

A continuación se presentan un plano general (Fig. 9) y un diagrama con los flujos de la planta clarificadora (Fig. 8) enfocada en la línea que recorre los 3 estanques a analizar, en la cual se considera el máximo de su capacidad.

\*Cantidad ideal: Sobre 25% del volumen del estanque.

Consistencia ideal: Torque apróx. 25%, rastrillo del clarificador.



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
720	720	1,6	725	0	721,2	3,8	2,5	1,3	2,5	1,2	1,3	0,4	0,9
Entrada AAHH	Entrada Headbox	Floculante	Entrada Reactor	Floculante en reactor	Efluente Clarificado a Torre Enfriamiento	Lodo Clarificador	Lodo Reciclado	A Pozo lodos	P-102	Alivio Reciclado P102	Alimentación prensa lodos	Lodo seco	Filtrado Prensa lodos
													[m <sup>3</sup> /hr]

Figura 8: Flujos operativos de las líneas de la planta clarificadora.

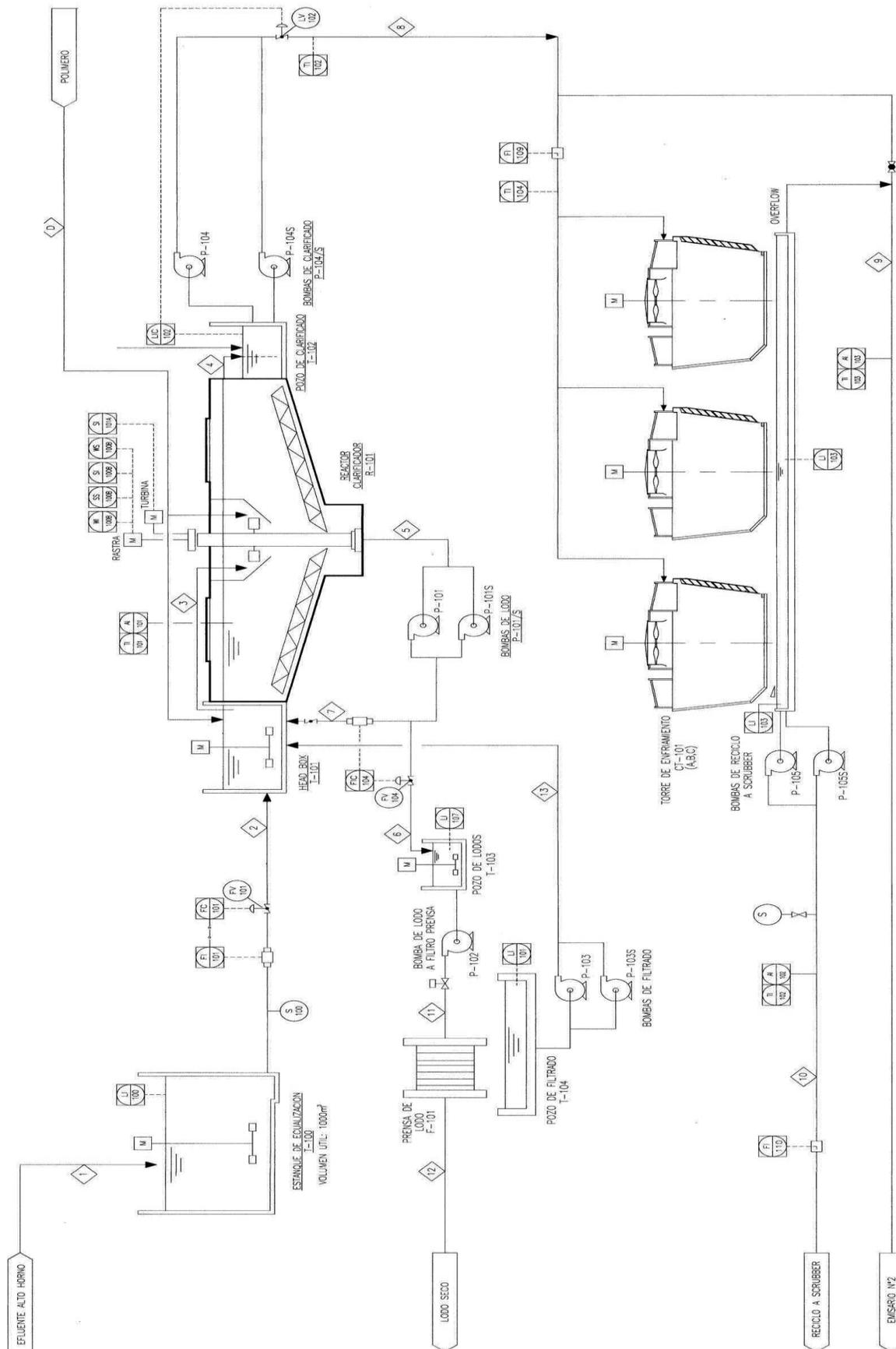


Figura 9: Plano general de la planta clarificadora.

## **6.1.2 Teoría de la agitación**

### **6.1.2.1 Fenómeno de agitación y mezcla**

En muchas operaciones industriales es fundamental una efectiva agitación y mezcla de fluidos para que puedan tener éxito. Es por eso que es preciso dejar bien claro estos conceptos.

Cuando se habla de agitación, se refiere al movimiento de un material de forma inducida, regularmente es en forma circular al interior de un tipo de recipiente. En cambio cuando se habla de mezcla se refiere a una combinación física de dos o más fases inicialmente separadas. Por ejemplo, un estanque lleno con un material simple homogéneo como agua fría, puede ser agitado pero no puede ser mezclado mientras no se le agregue otro material (como agua caliente o partículas sólidas). El término mezcla se aplica a una variedad de operaciones, que varían ampliamente en el grado de homogeneidad de la sustancia mezclada.

Los líquidos, dependiendo de los objetivos de cada proceso, se agitan con distintos propósitos:

- Suspensión de partículas sólidas.
- Mezclado de líquidos miscibles.
- Dispersión de un gas a través de un líquido en forma de pequeñas burbujas.
- Dispersión de un segundo líquido, inmisible con el primero, para formar una emulsión o suspensión de gotas finas.
- Promoción de la transferencia de calor entre el líquido y un serpentín o encamisado.

Este estudio se enfoca en la agitación y mezcla de líquidos, y su propósito es mantener en suspensión las partículas sólidas en líquidos.

Las dos características dominantes en flujo unifásico son la densidad y la viscosidad del fluido. La densidad es la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia <sup>19</sup>:

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

La viscosidad de un fluido es aquella propiedad que determina la cantidad de resistencia opuesta a las fuerzas cortantes a las que está sometido, las cuales se deben primordialmente a las interacciones entre las moléculas del fluido. La viscosidad absoluta o dinámica de un fluido queda definida por la relación <sup>19</sup>:

$$\mu = \frac{\tau}{dU/dy} \quad (2)$$

Los fluidos que siguen la relación (2) se llaman fluidos newtonianos. Otro coeficiente de viscosidad, llamado viscosidad cinemática, viene definido por <sup>19</sup>:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

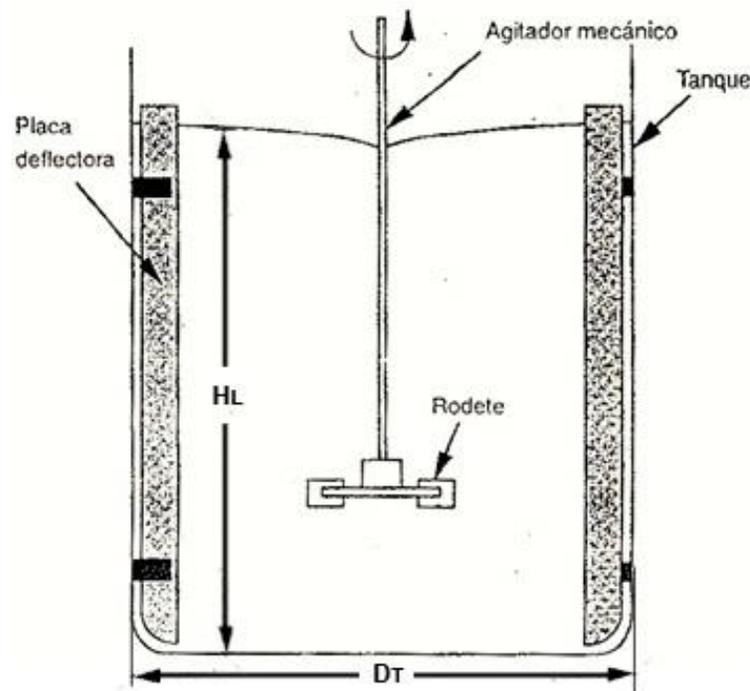
En flujo turbulento, la caída de presión es directamente proporcional a la densidad, de modo que la exactitud de la densidad dependerá de la precisión con que se determine la caída de presión. La viscosidad, por otra parte, es una medida más compleja.

Los sistemas de baja viscosidad funcionan generalmente en flujo turbulento, donde la viscosidad tiene poco o nada de efecto sobre el mezclado o en la caída de presión. Para un sistema, el uso de la viscosidad consiste en calcular un número de Reynolds para determinar si el flujo es laminar o turbulento. Si es flujo turbulento, este no afecta, ya que un error en la viscosidad tendrá un efecto despreciable. En el flujo laminar, sin embargo, la viscosidad es de suma importancia y la caída de presión es directamente proporcional a ella, y por lo general se requiere una precisión menor del 10%.

### 6.1.2.2 Equipo de mezcla

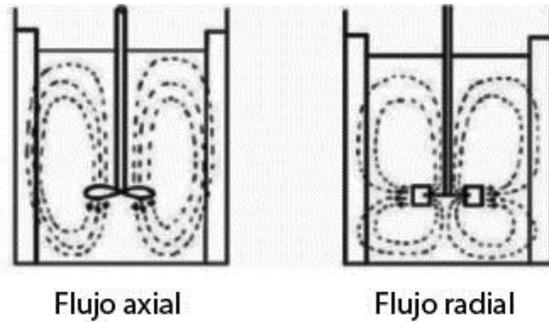
Generalmente la mezcla se realiza en un estanque agitado, estos se construyen comúnmente de forma cilíndrica. La base del estanque en lo posible se debe redondear con el fin de eliminar las esquinas donde las corrientes del fluido no pueden penetrar, y eliminar las zonas muertas o estancadas. La mezcla se realiza utilizando un agitador mecánico instalado sobre el estanque, en el centro de la circunferencia, el cual en su parte inferior lleva conectado un rodete. En algunos casos se diseña el agitador con la entrada por el fondo del estanque, pero esto se debe evitar ya que pueden existir fugas si la junta entre el eje y el suelo del tanque no es perfecta. El agitador es accionado por medio de un motor y a veces conectado a un reductor, según su función lo requiera. El efecto rotatorio del rodete crea un flujo regular, donde el líquido es empujado fuera del rodete, circulando a través del estanque y periódicamente retorna a la región del rodete. Para que exista una mezcla eficaz con un solo rodete, la profundidad del líquido en el estanque (Fig. 10) debe ser <sup>4</sup>:

$$1 \leq \frac{H_L}{D_T} \leq 1,25 \quad (4)$$



**Figura 10:** Configuración típica de un estanque agitado.

Los rodetes o impulsores se dividen en dos clases (Fig. 11). Los de flujo axial, que generan corrientes paralelas al eje del agitador, y los de flujo radial, que generan corrientes en dirección tangencial al eje.

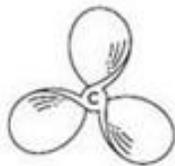


**Figura 11:** Patrones de flujo generados <sup>11</sup>.

Los tres principales tipos de impulsores para líquidos de baja a moderada viscosidad son las hélices, turbinas e impulsores de alta eficiencia <sup>5</sup>.

- **Hélice**

Es un impulsor (Fig. 12) rotatorio de alta velocidad y de flujo axial, utilizado en líquidos de baja viscosidad. Las hélices pequeñas giran entre 1150 y 1750[RPM] (a la misma velocidad del motor) y las de gran tamaño entre 400 y 800[RPM] <sup>5</sup>. El caudal impulsado es conducido en dirección hacia el fondo del estanque, estas corrientes de flujo continúan a través del líquido hasta que chocan con el fondo del estanque. Las aspas cizallan vigorosamente el líquido. Si no hubiera deslizamiento entre el líquido y el agitador, cada revolución de éste provocaría el desplazamiento longitudinal del líquido a una distancia fija. La relación entre esta distancia y el diámetro de la hélice se conoce como paso de la hélice. Una hélice con un paso de 1 se conoce como paso cuadrado.



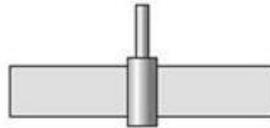
**Figura 12:** Agitador de hélice.

- **Turbinas**

Son agitadores de múltiples y cortas aspas dispuestos en un eje horizontal, que giran a elevadas velocidades. Las aspas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El diámetro del rodete es menor que en el caso de agitadores de paletas, siendo del orden del 30 al 50% del diámetro del estanque <sup>8</sup>.

- **Turbina de palas rectas**

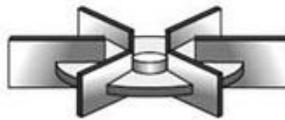
Este propulsor (Fig. 13), también llamado de paletas o canaleta, empuja el fluido en forma radial y tangencial generando corrientes que se desplazan hacia fuera, hasta la pared del tanque, donde se divide el flujo y fluye hacia arriba o hacia abajo. Los agitadores industriales típicos de paletas giran a velocidades comprendidas entre 20 y 150[RPM] <sup>5</sup>.



**Figura 13:** Turbina de palas rectas.

- **Turbina de disco**

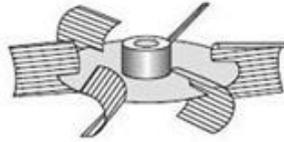
También conocida como turbina Rushton (Fig. 14), con palas múltiples rectas instaladas en un disco horizontal, crea zonas de alta velocidad de corte. Se emplea para dispersar o disolver un gas en el líquido. El gas entra por la parte inferior del eje del rodete, las aletas impulsan las burbujas grandes y las dividen en pequeñas, aumentando el mezclado entre el gas y el líquido <sup>8</sup>.



**Figura 14:** Turbina Rushton.

- **Turbina de disco de pala cóncava**

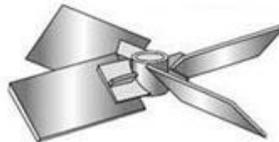
Este impulsor (Fig. 15) se utiliza con frecuencia para la dispersión de gas <sup>5</sup>.



**Figura 15:** Turbina de palas cóncavas (CD-6).

- **Turbina de palas inclinadas**

Este impulsor (Fig. 16) bombea el caudal axialmente hacia el fondo del estanque, tal como lo hace el impulsor de hélice, pero con una velocidad de agitación más lenta. Se emplea cuando la circulación global es importante por ejemplo, para mantener sólidos en suspensión <sup>5</sup>.



**Figura 16:** Turbina de palas inclinadas.

- **Impulsores de alta eficiencia**

Son un nuevo diseño de las turbinas de palas inclinadas, desarrollado para proporcionar un flujo axial más uniforme y un mejor mezclado, además de reducir la potencia requerida para un determinado flujo. Estos impulsores (Fig. 17) son ampliamente usados para mezclar líquidos de baja o moderada viscosidad, pero no se recomiendan para líquidos muy viscosos o para dispersar gases <sup>5</sup>.

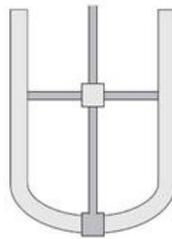


**Figura 17:** Turbina de alta eficiencia (A310).

Los impulsores más adecuados para líquidos muy viscosos son los agitadores de ancla y helicoidales.

- **Agitador de ancla**

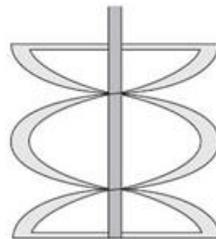
Este agitador (Fig. 18) trabaja a muy poca velocidad, el tamaño de sus aspas debe adaptarse perfectamente al estanque donde está instalado debido a la gran consistencia de los productos que se requieren agitar o mezclar. Proporciona una buena transferencia de calor. Su capacidad de mezcla es pequeña, por lo cual se utiliza cuando no es posible usar ningún otro tipo de agitador<sup>1</sup>. Es recomendado cuando se requiere proporcionar una buena agitación cercana al fondo del estanque y evitar el depósito de partículas sólidas sobre las paredes del recipiente.



**Figura 18:** Agitador de ancla.

- **Agitador Helicoidal**

Este agitador (Fig. 19) se utiliza con fluidos de altamente viscosos (hasta  $25000[Pa \cdot s]$ ) que trabajen en régimen laminar<sup>5</sup>. Sus principales usos son para transferencia de calor y para mezcla de líquidos. Posee el doble de eficacia, que otros agitadores en transmisión de calor y entre 5 a 10 veces mayor en homogenización; ello se debe al movimiento que genera el fluido en su rotación. El diámetro de hélice es muy cercano al diámetro interior del estanque, lo cual proporciona que el fluido tenga movimiento en todas las direcciones.

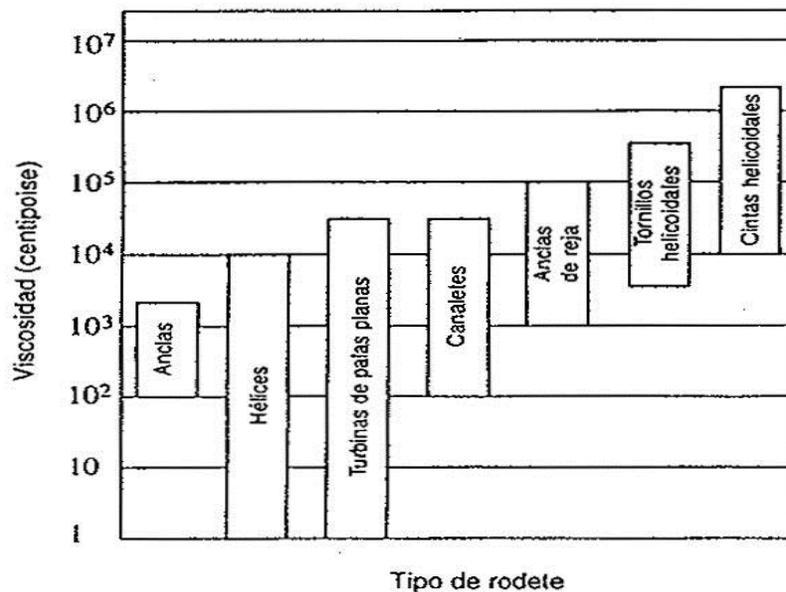


**Figura 19:** Agitador helicoidal.

Los agitadores para altas viscosidades tienen un buen desempeño desde los  $20[\text{Pa} \cdot \text{s}]$  <sup>5</sup>.

La elección del rodete depende de varios factores, entre los que destacan la viscosidad del líquido a mezclar y la sensibilidad del sistema al cizalle mecánico. Para líquidos de baja a media viscosidad, se recomienda la utilización de hélices y turbinas de palas planas <sup>9</sup>.

En el siguiente gráfico (Gráf. 3) se muestran los rangos de viscosidad para el uso de cada tipo de impulsor <sup>9</sup>.

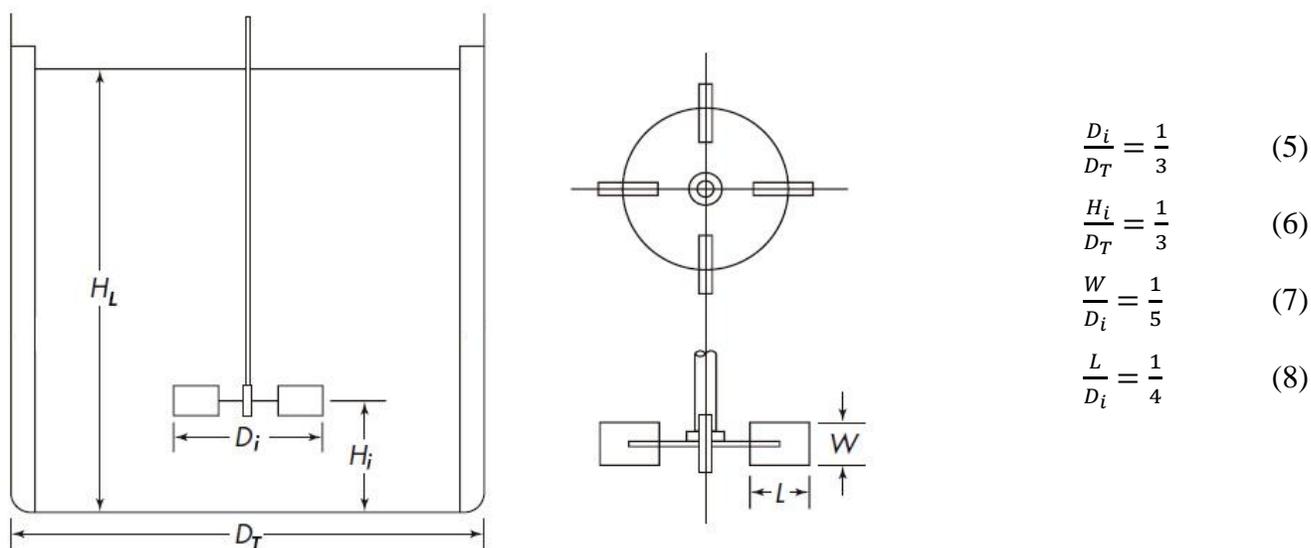


**Gráfico 3:** Intervalos de viscosidad para diferentes rodetes.

En el desarrollo de este trabajo se utilizan impulsores de alta eficiencia, los cuales trabajan en el mismo rango de viscosidad que las turbinas de palas planas.

### 6.1.2.3 Diseño estándar de turbina.

Al momento de diseñar el sistema de agitación de un estanque (Fig. 20) existe un gran número de elecciones sobre el tipo de agitador, ubicación, proporciones del estanque, la cantidad y proporciones de los deflectores además de otros factores. Cada una de estas elecciones afecta directamente al consumo de potencia, la velocidad del agitador y el tiempo de mezclado del sistema. Como punto inicial para el diseño del sistema de agitación, se generaliza utilizando como referencia un agitador de turbina Rushton. Las proporciones típicas son <sup>12</sup>:

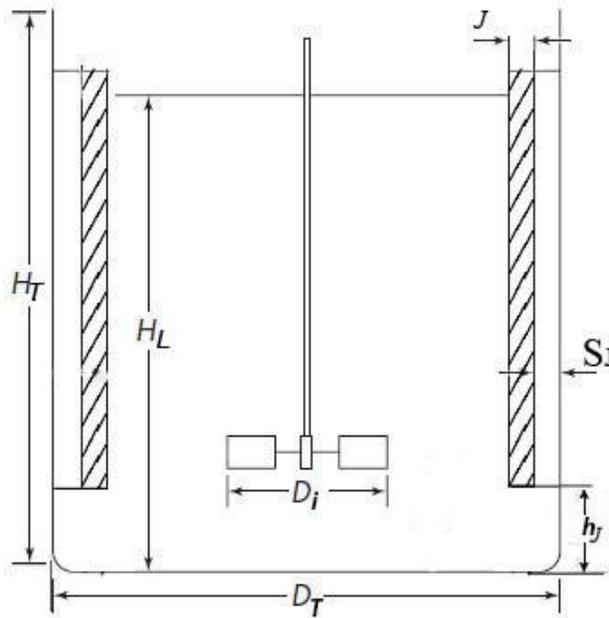


**Figura 20:** Relaciones de proporción típicas de un agitador de turbina en un estanque.

El número general de deflectores es 4<sup>5</sup>. La cantidad de palas del agitador varía entre 4 y 16 pero normalmente se utilizan 6 u 8. Es posible considerar proporciones distintas a las indicadas para dar solución a situaciones especiales. El estándar de proporciones listadas es ampliamente aceptado y su base es acorde a muchas correlaciones publicadas sobre el funcionamiento de sistemas de agitación <sup>12</sup>.

### 6.1.2.4 Generalidades de los estanques

Las proporciones para determinar las dimensiones estándar de un estanque agitado son <sup>4</sup> (Fig. 21):



$$H_T \approx H_L + 10\% \quad (9)$$

$$1 \leq \frac{H_L}{D_T} \leq 1,25 \quad (10)$$

$$J = \frac{D_T}{12} \quad (11)$$

$$S_J = \frac{D_T}{50} \quad (12)$$

$$h_J = \frac{D_i}{2} \quad (13)$$

**Figura 21:** Dimensiones de la configuración de un estanque agitado y sistema de agitación.

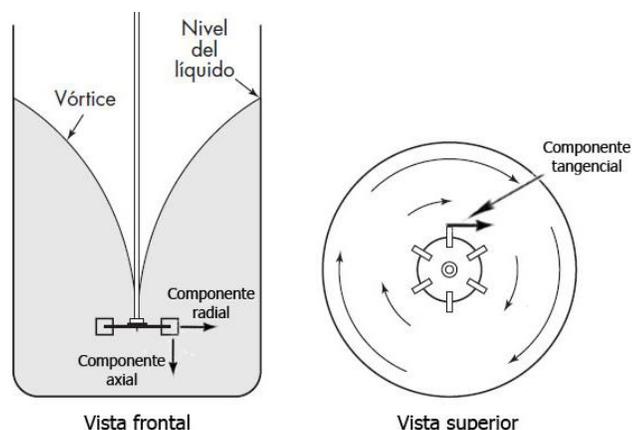
Al igual que en el diseño de turbinas, se pueden considerar dimensiones distintas a las señaladas para cumplir con requerimiento y condiciones especiales del sistema a diseñar.

### 6.1.2.5 Tipos de flujo en estanques agitados

El tipo de flujo existente en un estanque agitado depende del diseño del rodete, de las propiedades del fluido, del tamaño y proporciones geométricas del recipiente y deflectores.

La mayoría de los agitadores son de acción rotatoria, se clasifican en flujo radial o axial dependiendo de la dirección que toma el líquido al salir del rodete, aunque existen también rodetes que presentan ambas características de flujo simultáneamente. Estos movimientos son los responsables de la mezcla del fluido.

La velocidad del líquido en cualquier parte del estanque tiene tres componentes, y su patrón de flujo (Fig. 22) depende de cómo varíen estas componentes de un punto a otro. La primera componente de la velocidad es radial y actúa en dirección perpendicular al eje. La segunda componente es longitudinal o axial, y actúa en dirección paralela al eje. La tercera componente es tangencial o rotacional, y actúa en dirección tangente a la trayectoria circular alrededor del eje.



**Figura 22:** Patrón de flujo turbulento en un estanque agitado sin deflectores.

Este flujo circular del fluido alrededor del eje del agitador es perjudicial y debe evitarse. En un flujo circular, el líquido se mueve como flujo laminar y existe poca mezcla entre el fluido situado a diferentes alturas del estanque; a su vez tiende a formar un vórtice, el cual a elevadas velocidades de rotación puede alcanzar la parte inferior del rodete, provocando tensiones mecánicas en el eje del agitador, en los descansos y en las uniones. En el diseño de sistemas de mezclado, la prevención del flujo circular es indispensable y se consigue generalmente mediante la instalación de deflectores que interrumpen este flujo y crean turbulencias en el fluido.

En la planta clarificadora se utilizan agitadores de acción rotatoria con flujo axial, con el fin de mantener los sólidos en suspensión.

#### **6.1.2.6 Placas deflectoras**

Son láminas verticales unidas a la pared del tanque, las cuales reducen los vórtices del líquido, generalmente es suficiente colocar cuatro deflectores equidistantes. La anchura óptima de estos deflectores depende del diseño del rodete y de la viscosidad del fluido, pero es del orden de  $\frac{1}{10}$  a  $\frac{1}{20}$  veces el diámetro del estanque. Para líquidos de baja viscosidad, los deflectores se colocan perpendicularmente a la pared. También pueden montarse separados de la pared a una distancia de  $\frac{1}{50}$  veces el diámetro del estanque y/o formando un ángulo. Estas disposiciones (Fig. 23) evitan la sedimentación y la formación de zonas estancadas al lado de los deflectores durante la mezcla de sustancias viscosas o con sólidos en suspensión <sup>4</sup>.



**Figura 23:** Disposición de los deflectores.

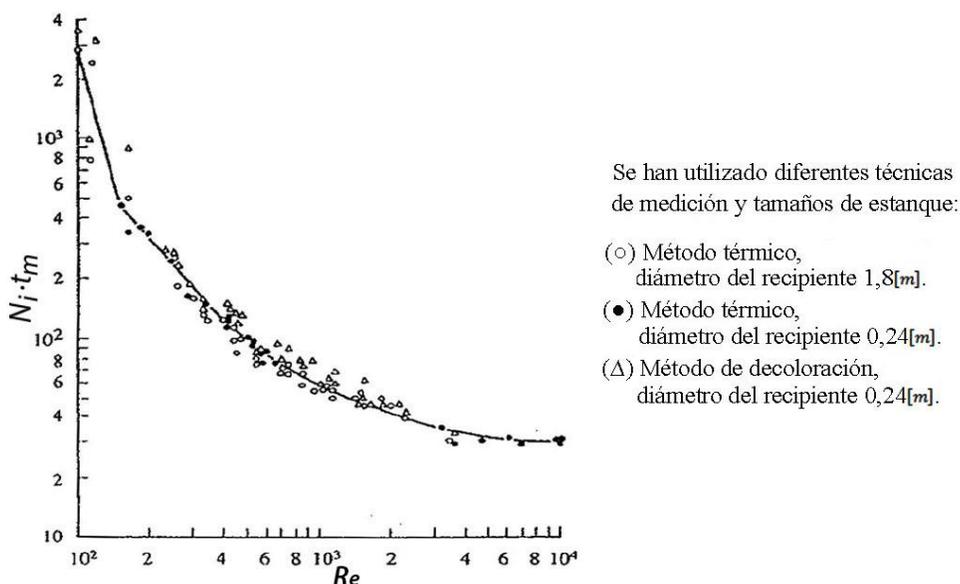
El estanque T-101 al no ser circular no tiene deflectores, debido a que sus esquinas impiden la formación de un patrón circular del flujo que genere vórtices, en cambio los estanques T-100 y T-103 poseen placas deflectoras separadas de la pared. En este trabajo se sugieren algunas modificaciones al respecto (Pág. 51).

#### **6.1.2.7 Valorización de la efectividad de la mezcla**

Para obtener una rápida mezcla en un estanque, el agitador debe generar una buena circulación o macromezcla. La micromezcla (a escala molecular) es también importante, pero generalmente ocurre más rápidamente que la macromezcla. Para valorizar la efectividad de una mezcla, en la mayoría de los casos se realiza midiendo la velocidad del fluido.

El tiempo de mezcla ( $T_m$ ) es un parámetro útil al momento de valorar su efectividad, este corresponde al tiempo necesario para alcanzar un cierto grado de homogeneidad partiendo de un estado completamente segregado. Su concentración puede medirse inyectando un trazador en el estanque en un determinado punto a diferentes tiempos. El tiempo de mezcla puede también determinarse midiendo la temperatura obtenida después de la inyección de una pequeña cantidad de líquido caliente<sup>4</sup>. El tiempo de mezcla depende del grado de homogeneidad, se define como el tiempo transcurrido hasta que la concentración de trazador difiere de la concentración final en no más de un 10% de la diferencia de concentración<sup>4</sup>. Sin embargo, no existe una definición única y universal de tiempo de mezcla.

A continuación (Gráf. 4) se muestran los resultados obtenidos para una turbina Rushton en un estanque con deflectores, los cuales permiten observar la relación entre el tiempo de mezcla y otras variables



**Gráfico 4:** Variación del tiempo de mezcla con el número de Reynolds <sup>10</sup>.

El producto adimensional entre la velocidad del agitador ( $N_i$ ) y el tiempo de mezcla se representa en función del número de Reynolds del rodete. El tiempo de mezcla posee una desviación del 10%. Este producto representa el número de giros del agitador necesarios para homogeneizar el líquido. Para números de Reynolds bajos,  $N_i \cdot T_m$  aumenta de manera significativa, sin embargo, a medida que aumenta el número de Reynolds hasta aproximadamente  $10^2$ ,  $N_i \cdot T_m$  se aproxima a un valor constante que se mantiene a elevados valores de  $Re$ . Para turbinas Rushton, este valor constante puede calcularse mediante la siguiente relación:

$$N_i \cdot T_m = 1,54 \cdot \frac{V}{D_i^3} \tag{14}$$

Entonces, el valor  $N_i \cdot T_m$  a elevados números de Reynolds depende únicamente del tamaño del estanque y del agitador. La relación existente entre  $N_i \cdot T_m$  y  $Re$  para la mayoría de los rodetes es similar a la mostrada (Gráf. 5). El tiempo de mezcla se reduce en proporción directa al aumento de la velocidad de agitación. Para obtener una mezcla rápida y efectiva, el tiempo de mezcla debería ser el menor posible, pero no siempre es factible alcanzar tiempos de mezcla pequeños sin consumir grandes cantidades de energía, debido a que la potencia necesaria para la mezcla depende del diámetro del rodete y de la velocidad de agitación, es por eso que las relaciones entre la potencia necesaria, tiempo de mezcla, tamaño del estanque, propiedades del fluido y otras variables de operación, son necesarias de considerar en el diseño de un sistema de agitación.

La importancia que tiene este aspecto de valorización de la efectividad de mezcla para el desarrollo de este trabajo, son las relaciones matemáticas en la obtención de las tablas 11, 14, 15, 17, 18 y 19.

### **6.1.2.8 Potencia de mezclado**

Generalmente, para mover los rodetes dentro de los recipientes agitados se utiliza energía eléctrica. La potencia necesaria para moverlos a una determinada velocidad, depende de la resistencia ofrecida por el fluido a la rotación del rodete. El roce producido en la caja reductora del agitador y las juntas reducen la energía transmitida al fluido, por lo que la potencia eléctrica consumida por los motores de los agitadores es siempre mayor a la necesaria para la mezcla, y su magnitud depende de la eficacia del mecanismo utilizado. Los costos energéticos de los agitadores representan una parte importante de la economía del proceso.

La potencia de mezcla para fluidos depende de la velocidad del agitador, del diámetro y geometría del rodete y de propiedades del fluido como la densidad y la viscosidad. La relación entre estas variables se expresa generalmente en forma de números adimensionales, como el número de Reynolds del rodete y el número de potencia <sup>4</sup>.

### **6.1.2.9 Parámetros característicos en agitadores**

Estos parámetros son relaciones empíricas que permiten estimar ciertas características del estanque agitado. A continuación se presenta una breve descripción de los conceptos relevantes en el estudio.

- **Número de Reynolds**

Es un parámetro adimensional que representa una medida de la magnitud relativa de los esfuerzos inerciales con respecto a los esfuerzos viscosos. Se calcula de la siguiente manera <sup>8</sup>:

$$Re = \frac{N_i D_i^2 \cdot \rho}{\mu} \quad (15)$$

Si el Re es pequeño, se tiene flujo con una viscosidad dominante, donde la dirección de la velocidad es gobernada por la viscosidad, este recibe el nombre de flujo laminar.

Si el Re es elevado, los efectos viscosos son despreciables frente a los de inercia, excepto en las zonas donde se tenga elevadas velocidades, las partículas se mueven desordenadamente originando un flujo denominado turbulento.

El flujo originado por un agitador, se clasifican según el número de Reynolds como <sup>8</sup>:

- Régimen Laminar:  $Re \leq 10^2$
- Régimen transitorio:  $10^2 < Re \leq 10^3$
- Régimen turbulento:  $Re > 10^3$

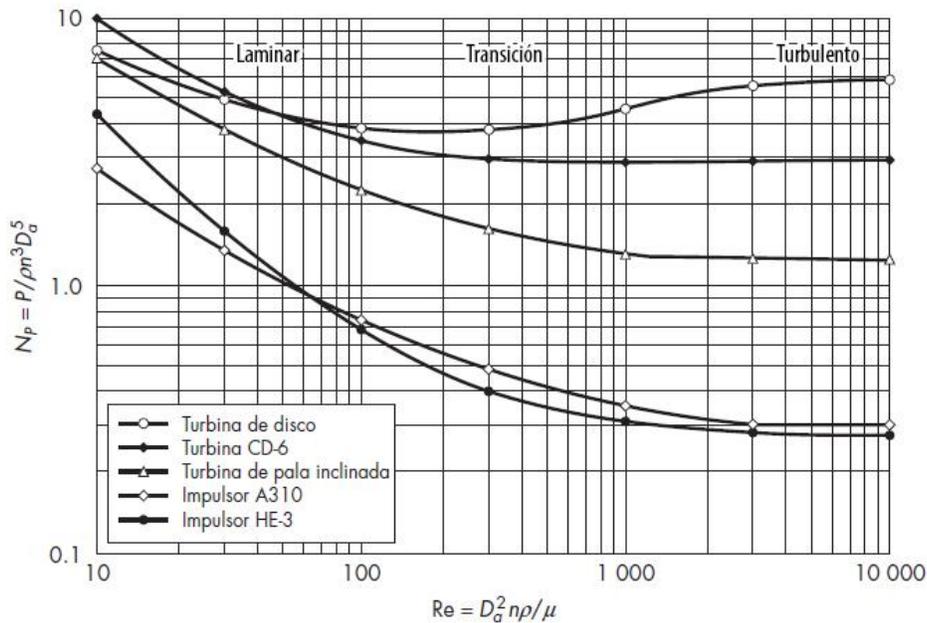
• **Número de potencia**

Es un parámetro adimensional que da una idea de la cantidad total de potencia necesaria para el funcionamiento del agitador. El cálculo se realiza con la fórmula <sup>8</sup>:

$$N_p = \frac{P}{\rho \cdot N_i^3 \cdot D_i^5} \tag{16}$$

La relación entre  $Re$  y  $N_p$  se ha determinado experimentalmente para un amplio intervalo de configuraciones de rodete y estanques. La geometría de los rodetes utilizados en los estanques estudiados corresponde a la del impulsor A310.

En el siguiente gráfico (Gráf. 5) se puede obtener el número de potencia con respecto al número de Reynolds, y el tipo de agitador <sup>5</sup>:



**Gráfico 5:** Número de potencia en función del número de Reynolds para distintos rodetes.

Una vez que se conoce el valor de  $N_p$ , la potencia se calcula a partir de la ecuación anterior, como:

$$P = N_p \cdot \rho \cdot N_i^3 \cdot D_i^5 \tag{17}$$

Para un determinado rodete, la relación general entre  $N_p$  y  $Re$  depende del régimen de flujo existente en el estanque. Pueden identificarse tres regímenes de flujo diferentes:

### **Régimen laminar**

Este corresponde a  $Re < 10^2$  para muchos rodetes, aunque para aquellos agitadores que poseen muy poca separación de la pared (como el mezclador de ancla y el cinta helicoidal) el flujo laminar persiste hasta  $Re = 100$  o incluso superiores. En régimen laminar la potencia requerida para un flujo laminar es independiente de la densidad del fluido <sup>4</sup>:

$$P = k_l \cdot \mu \cdot N_i^2 \cdot D_i^3 \quad (18)$$

### **Régimen turbulento**

El número de potencia en flujo turbulento es independiente del número de Reynolds. Entonces <sup>4</sup>:

$$P = N'_p \cdot \rho \cdot N_i^3 \cdot D_i^5 \quad (19)$$

Donde  $N'_p$  es un valor constante del número de potencia en el régimen turbulento.

Los valores de  $N'_p$  para las turbinas son bastante superiores que para los demás rodetes, lo que significa que las turbinas transmiten más potencia al fluido que los demás diseños. La potencia requerida para el flujo turbulento es independiente de la viscosidad del fluido. El régimen turbulento se encuentra totalmente desarrollado a  $Re > 10^3$  ò  $10^4$  para la mayoría de los rodetes pequeños en recipientes con deflectores <sup>4</sup>. Sin deflectores, no se desarrolla totalmente hasta  $Re > 10^5$ .

### **Régimen de transición**

Se encuentra entre el régimen laminar y el turbulento. La potencia requerida en este caso depende tanto de la densidad como de la viscosidad del fluido. En los estanques agitados no existe generalmente una transición gradual de flujo laminar a flujo turbulento totalmente desarrollado. El régimen de flujo e intervalo de número de Reynolds para el periodo de transición depende de la geometría del sistema.

Las ecuaciones recientemente señaladas muestran la fuerte dependencia entre consumo de potencia, diámetro del agitador y su velocidad. Pequeños cambios en el tamaño del rodete tienen un gran efecto sobre la potencia requerida.

## VII. MUESTREO Y DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN

### 7.1 Muestreo de densidades

Dado que los agitadores y sus parámetros de operación fueron diseñados de acuerdo a los antecedentes recopilados de los planos de la planta<sup>15</sup>, es necesario verificar que los fluidos estén dentro de los valores considerados. Por lo que se realiza un muestreo de la densidad del fluido en los estanques T-100, T-101 y T-103. Se tomaron 3 muestras diarias en 3 días distintos (Tabla 6), para el caso de los estanques T-100 y T-101. En el caso del estanque T-103, solo se pudo tomar muestras en dos días a causa de que fue detenido, puesto que las bombas peristálticas que llenan el estanque necesitaban un cambio de mangueras, las cuales fueron dañadas debido a la abrasión que provoca el lodo que circula en ellas. Los resultados obtenidos son los siguientes:

**Tabla 6:** Muestreo de densidades.

Estanque	Densidad promedio [kg/m <sup>3</sup> ]	Densidad referencia [kg/m <sup>3</sup> ]	Desviación relativa porcentual
<b>T-100</b>	980,6	1.000	1,94%
<b>T-101</b>	989,9	1.010	1,99%
<b>T-103</b>	1.380,44	1.250 – 1.450	2,25%

Puede observarse en la tabla 6 que las densidades medidas son bastante próximas a las especificadas, por lo cual se consideran satisfactorias, el error es de aproximadamente el 2%.

El valor de este parámetro influye directamente en las ecuaciones 15, 16, 17 y 19, por lo que en el caso que fuese un valor distinto al especificado, podría variar el régimen del fluido, como también la potencia requerida para su agitación.

### 7.2 Parámetros y variables de operación

A continuación (Tabla 7) se definen los valores especificados de operación para cada estanque<sup>15</sup> (Anexo 4, 5 y 6), a los cuales se les calculó el tiempo de mezcla (Ec. 14). Estos valores fueron considerados para la evaluación del funcionamiento de los equipos.

**Tabla 7:** Parámetros y variables de operación especificados para cada estanque.

Estanque	D <sub>T</sub>	H <sub>L</sub>	D <sub>i</sub>	H <sub>i</sub>	N <sub>P</sub>	N <sub>i</sub>	P <sub>M</sub>	T	T <sub>m</sub>
<b>T-100</b>	12,5	8,1	3,01	2,225	0,3	58	74,57	12.277	58
<b>T-101</b>	2,6 x 2,28*	3,2	0,52	1,357	2	145	1,12	131	84
<b>T-103</b>	3,7	3,7	1,63	1	0,3	70	7,45	1.017	12
	[m]	[m]	[m]	[m]	[RPM]	[RPM]	[kW]	[N · m]	[s]

\* Medidas estanque rectangular (Largo x Ancho).

## **VIII. PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES DE DISEÑO, OPERACIÓN Y REEMPLAZO DE EQUIPOS.**

En este capítulo se analizan las causas de falla señaladas anteriormente en cada uno de los equipos o elementos utilizados en los estanques, y se proponen mejoras que disminuyan gastos de mantenimiento y que permitan aumentar la disponibilidad de los equipos de la planta clarificadora. Con la finalidad de justificar y/o respaldar las propuestas, se optó por simular, a través del programa “*Visimix Turbulent SV*” (Anexo 7), el comportamiento de los agitadores en los estanques calculando parámetros de mezcla y comparando los valores especificados con los valores de las propuestas, considerando un tiempo de mezclado hasta que se desarrolle completamente la macromezcla y micromezcla en cada caso.

### **8.1. Análisis de los problemas**

En las siguientes tablas se analizan los problemas de cada estanque y se estiman las posibles causas que provocan las reiteradas fallas (Tablas 8, 9 y 10):

#### **8.1.1 Fallas en el estanque ecualizador (T-100)**

**Tabla 8:** Problemas en el ecualizador.

<b>Problema</b>	<b>Posibles causas</b>
<b>Fallas en el agitador</b> Rupturas del eje, soporte inferior del eje, aspas del rodete y fallas en el motor	-Las dimensiones del estanque no cumplen con el diseño estándar de estanques agitados. -El fondo del estanque no posee esquinas redondeadas, provocando acumulación de sedimentos que aumentan la carga ejercida en las aspas y el motor. -La velocidad de agitación del rodete no es la adecuada.
<b>Fallas en los deflectores</b> Rupturas en la base de las placas deflectoras	-La cantidad de deflectores no es la especificada en los manuales de la planta clarificadora. -La altura de los deflectores desde el fondo no es la adecuada.

### 8.1.2 Fallas en el estanque mezclador (T-101)

**Tabla 9:** Problemas en el mezclador.

<b>Problema</b>	<b>Posibles causas</b>
<p><b>Acumulación de lodo y sedimentos en el fondo del estanque</b></p> <p>Lo que provoca que se tapen los ductos generando rebalses y fallas en el agitador.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Al ser un estanque cuadrado, posee muchas esquinas donde las corrientes generadas por el agitador no alcanzan a penetrar.</li> <li>- Cae basura en su interior.</li> </ul>
<p><b>No se logra una mezcla homogénea dentro del estanque.</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El ducto de ingreso del floculante está ubicado sobre el ducto de salida del estanque, por lo que no alcanza a mezclarse con todo el contenido del estanque.</li> <li>- El contenedor del floculante está muy lejos del mezclador, por lo que no se aprovecha su tiempo de reacción.</li> <li>- El rodete es muy pequeño para el tamaño del estanque.</li> </ul>

### 8.1.3 Fallas en el pozo de lodos (T-103)

**Tabla 10:** Problemas en el pozo de lodos.

<b>Problema</b>	<b>Posibles causas</b>
<p><b>Fallas en el agitador</b></p> <p>Rupturas en el soporte del motor, en el eje y fallas en el motor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El descanso del eje no es suficiente para soportar las cargas ejercidas en el rodete, provocando que el eje pierda rectitud.</li> <li>- En ocasiones el agitador deja de tener contacto con el fluido, lo que genera cargas dinámicas y repentinas sobre el sistema de agitación.</li> </ul>

Luego de analizar la información recopilada de la teoría de agitación y mezcla, se consideraron las causas de falla descritas anteriormente (Tabla 8, 9 y 10) para generar propuestas que permitan disminuir la tasa de falla de los equipos. Estas propuestas fueron analizadas en el siguiente punto de este capítulo, comparando las dimensiones y variables de funcionamiento especificadas, con los valores de las modificaciones propuestas mediante las formulas obtenidas de la literatura; para luego ser evaluadas económicamente según su costo de implementación u operación.

## 8.2 Propuestas o mejoras

A continuación se evalúan modificaciones del sistema de agitación de cada estanque, que permitan solucionar las deficiencias que presentan.

### 8.2.1 Propuestas para el estanque ecualizador (T-100)

#### - **Variar velocidad de agitación**

La gran masa de fluido que se debe agitar ejerce presión en las placas deflectoras, aspas del rodete y esfuerzos en el eje; la idea de esta modificación es reducir estas cargas. Por lo que se calcularon los parámetros de agitación utilizando como dato de entrada la velocidad del agitador, y se propone una velocidad de agitación que permita obtener una disminución en las cargas sobre el agitador, sin provocar un aumento significativo <sup>4</sup> en el tiempo de mezcla. El torque se calculó con la siguiente expresión:

$$T = \frac{Pot}{2 \cdot \pi \cdot N_i} \quad (20)$$

En la tabla 11 se comparan los parámetros de operación especificados, con los valores obtenidos a una menor velocidad de agitación.

**Tabla 11:** Valores de los parámetros de agitación.

	$N_i$	$T_m$	$T$	$P_{req}$	$N_p$	$Re$
<b>Especificados</b>	<b>58</b>	58	12.277	67	0,3	$8,75 \cdot 10^6$
<b>Propuesta</b>	<b>52</b>	65	8.861	48	0,3	$7,85 \cdot 10^6$
	[RPM]	[s]	[N · m]	[kW]		

De la tabla 11 se puede ver que con una velocidad de agitación de 52[RPM] se logra disminuir las cargas dinámicas que ejerce el fluido al sistema, y también reducir el gasto energético del motor en 19 [kW], lo que se traduce en un ahorro de aproximadamente \$709.560 anuales/kW; manteniendo una alta turbulencia en el sistema y aumentando el tiempo de mezcla en un 11%.

#### - **Configuración de las placas deflectoras**

Se realizaron simulaciones en el software *Visimix* variando el número de placas deflectoras, y su altura desde el fondo del estanque; conservando las mismas condiciones de operación y propiedades del fluido en cada caso, con el fin de comparar los parámetros obtenidos con iguales condiciones. El software calcula los parámetros de agitación hasta que la mezcla dentro del estanque sea efectiva y completa.

○ **Añadir un deflector al estanque**

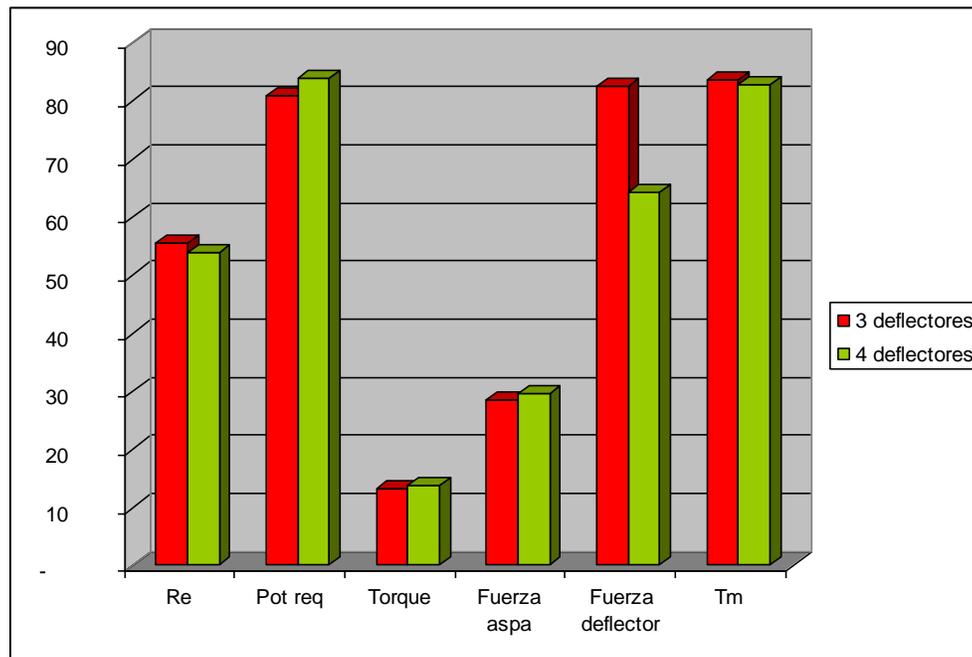
Según la literatura <sup>5</sup>, para que los sistemas de agitación tengan una mezcla efectiva deben poseer una cantidad mínima de cuatro deflectores distribuidos equitativamente. Además en los planos de la planta este estanque aparece con 4 placas deflectoras, en la inspección en terreno se comprobó que este estanque solo cuenta con 3 deflectores.

En la primera simulación se consideran dos casos utilizando como datos de entrada la cantidad de placas deflectoras, arrojando los siguientes resultados (Tabla 12 y Gráf. 6):

**Tabla 12:** Parámetros de agitación para el ecualizador según el número de deflectores.

$N_{def}^o$	3	4	
<b>Re</b>	$56 \cdot 10^5$	$54 \cdot 10^5$	
<b><math>P_{req}</math></b>	80,8	84	[kW]
<b>T</b>	$13,3 \cdot 10^3$	$13,8 \cdot 10^3$	[N · m]
<b><math>F_{aspa}</math></b>	$28,4 \cdot 10^2$	$29,5 \cdot 10^2$	[N]
<b><math>F_{def}</math></b>	$82,6 \cdot 10$	$64,3 \cdot 10$	[N]
<b><math>T_m</math></b>	83,7	82,7	[s]

En la tabla 12 se puede apreciar que al agregar un deflector, disminuye considerablemente la fuerza que se ejerce en los deflectores, en relación al mínimo aumento en el resto de los parámetros.



**Grafico 6:** Diferencia de los parámetros de agitación según el número de deflectores.

Al agregar una placa deflectora al sistema, disminuye la componente rotacional de la velocidad del flujo potenciando la componente longitudinal, esto promueve una mejor mezcla, evitando que se acumulen sólidos precipitados en el fondo. Además reduce la reacción de cada placa deflectora en un 22%, repartiendo la carga ejercida por el fluido en los cuatro deflectores.

Para esta modificación se necesitan reubicar dos placas deflectoras y agregar una cuarta (de dimensiones  $1000 \times 8000 \times 10[mm]$ ), se propone utilizar planchas de acero A42-27ES. El costo estimado de implementar esta modificación es el siguiente (Tabla 13):

**Tabla 13:** Costos de añadir un deflector al estanque T-100.

<b>Materiales</b>	\$ 111.821
<b>Mano de obra</b>	\$ 133.320
<b>Total</b>	<b>\$ 245.141</b>

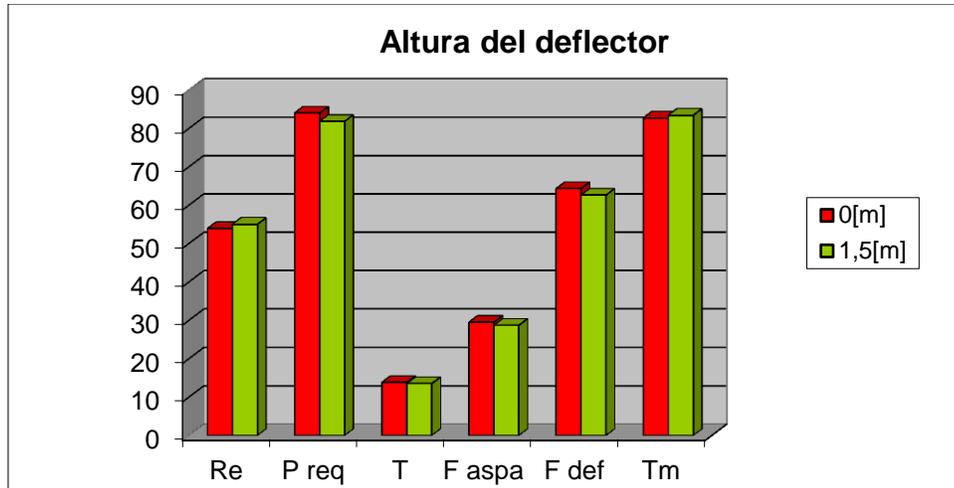
- **Modificar la distancia de las placas deflectoras desde el fondo del estanque.**

Los deflectores han sufrido fracturas en el soporte de la base debido a las altas cargas a las que están sometidos. La configuración especificada no posee separación del fondo del estanque, por lo que se propone una separación de  $1,5[m]$ , según lo que la literatura señala para este estanque <sup>4</sup>.

Para verificar lo anterior se realizó la siguiente simulación considerando como dato de entrada la altura de los deflectores desde el fondo del estanque manteniéndose el resto de las condiciones especificadas, obteniéndose lo siguiente (Tabla 14 y Gráf. 7):

**Tabla 14:** Parámetros de agitación según la distancia de los deflectores hasta el fondo del estanque.

$h_j$	0	1,5	[m]
$Re$	$53,9 \cdot 10^5$	$55 \cdot 10^5$	
$P_{req}$	84	81,8	[kW]
$T$	$13,8 \cdot 10^3$	$13,5 \cdot 10^3$	[N · m]
$F_{aspa}$	$29,5 \cdot 10^2$	$28,7 \cdot 10^2$	[N]
$F_{def}$	$64,3 \cdot 10$	$62,6 \cdot 10$	[N]
$T_m$	82,7	83,4	[s]

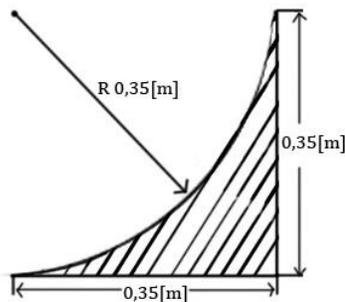


**Grafico 7:** Diferencia de los parámetros de agitación según la distancia de los deflectores al suelo.

De la tabla 14 y el gráfico 7 se puede apreciar que la reducción de la carga ejercida ( $17[N]$ ) sobre los deflectores al efectuar esta modificación, es despreciable (3%), sin embargo se evita el depósito de sólidos cerca de la base de los deflectores mejorando la mezcla del fluido. Por lo tanto lo más significativo de esta modificación es el hecho de reducir el depósito de sólidos en el fondo del estanque. Debido a que esta modificación no ayuda a disminuir las cargas en los deflectores, se optó por no recomendarla.

**- Redondear el contorno del fondo del estanque**

El ecualizador posee fondo plano con bordes rectos, por lo cual se propone redondearlos con el fin de disminuir las cavidades donde las corrientes del fluido no pueden penetrar, y así eliminar las regiones estancadas<sup>4</sup>. Se propone redondear la sección entre el fondo y la pared del estanque con el perfil mostrado en la figura (Fig. 24).



**Figura 24:** Área del relleno para redondear el fondo del estanque.

Se requiere un volumen de  $1,032[m^3]$  de material para rellenar el contorno utilizando hormigón y una estructura de fierros de  $12[mm]$  (de la misma manera que está construido conformado el estanque). Para esta modificación se estiman los siguientes costos (Tabla 15):

**Tabla 15:** Costos para redondear el contorno del fondo del estanque T-100.

<b>Materiales</b>	\$ 456.760
<b>Mano de obra</b>	\$ 106.656
<b>Total</b>	<b>\$ 563.760</b>

- **Nuevo estanque y sistema de agitación.**

En el diseño y construcción de este equipo no se consideraron las medidas estándar de un estanque agitado (Ec. 10), las dimensiones actuales del estanque no optimizan precisamente su funcionamiento, por lo que se decide calcular un nuevo estanque (Anexo 2) y sus parámetros de agitación según las fórmulas y recomendaciones obtenidas de la literatura<sup>12</sup>. Se respetan obviamente las propiedades físicas del fluido contenido en el estanque T-100. Se realizan los cálculos considerando obtener el mismo tiempo de mezcla (Ec. 14) del estanque equalizador, y se conserva el agitador manteniendo los valores de  $N_p$ ,  $P_{req}$  y  $T$ . Para calcular los parámetros se utiliza como dato de entrada la velocidad del agitador, obteniéndose (Fig. 25, Tabla 16 y 17) los siguientes resultados:

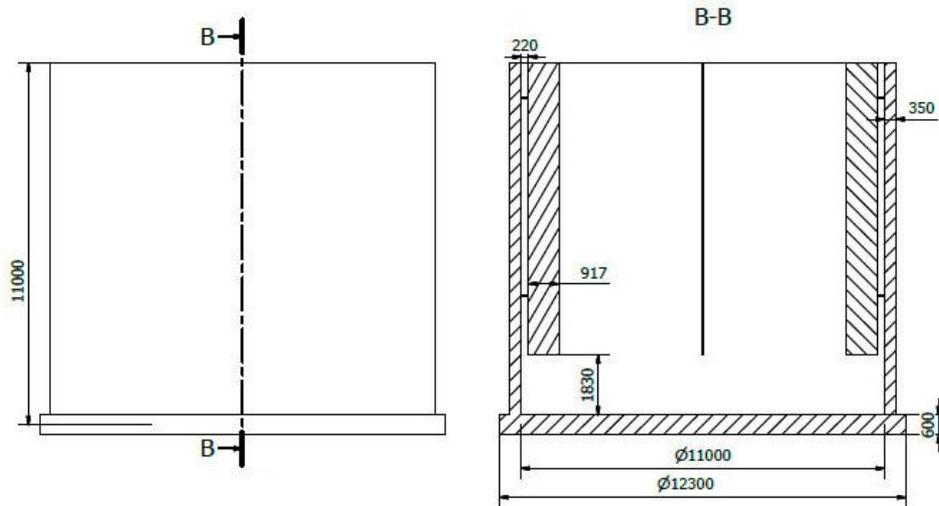
**Tabla 16:** Dimensiones y parámetros de agitación para un estanque de  $1000[m^3]$ .

	$D_T$	$H_L$	$T_m$	$Re$	$N_p$	$N_i$	$P_{req}$	$T$
<b>Especificados</b>	12,5	8,1	58	$8,75 \cdot 10^6$	0,3	<b>58</b>	74,57	12.277
<b>Propuesta</b>	11	10,5	58	$7,17 \cdot 10^6$	0,3	<b>32</b>	30	9.000
	[m]	[m]	[s]		[RPM]	[RPM]	[kW]	[N · m]

En la tabla 16 se puede ver que con la nueva configuración calculada se conserva el mismo tiempo de mezcla (del estanque T-100), tiempo en el cual se asegura una mezcla completa y homogénea del fluido agitado dentro del estanque, según las recomendaciones obtenidas de la literatura<sup>4</sup>. Además se disminuye considerablemente la potencia requerida y el torque ejercido, lo que se traduce en menos cargas para los componentes del sistema de agitación y una reducción del gasto energético.

**Tabla 17:** Dimensiones de los deflectores para estanque de  $1000[m^3]$ .

$N_{def}^o$	$J$	$H_J$	$S_J$	$h_J$
4	0,917	11	0,22	1,83
	[m]	[m]	[m]	[m]



**Figura 25:** Plano del nuevo estanque ecualizador.

Para el cálculo del costo de construcción de un estanque se consideraron las medidas de la Fig. 25. Los materiales a utilizar son: hormigón H-10 para el emplantillado del estanque, hormigón H-30 para la estructura del estanque, fierros en barras de 12 y 16[mm] para la base y paredes del estanque respectivamente. Y para las placas deflectoras se utilizan 5 planchas de acero A42-27ES. Dando como resultado (Tabla 18):

**Tabla 18:** Costos en la construcción del estanque ecualizador.

<b>H-10</b>	\$ 505.450
<b>H-30</b>	\$15.893.565
<b>Fe 12[mm]</b>	\$10.715.674
<b>Fe16[mm]</b>	\$5.216.400
<b>Materiales</b>	\$ 31.825.639
<b>Mano de obra(15%)</b>	\$ 4.773.846
<b>Utilidades (15%)</b>	\$ 4.773.846
<b>Deflectores</b>	\$ 559.108
<b>Total</b>	<b>\$ 41.932.439</b>

Para la implementación de un nuevo ecualizador se estima un valor de \$ 42.000.000.

### 8.2.2 Propuestas para el estanque mezclador (T-101)

#### - **Recubrir el interior del estanque con placas de acero**

Este estanque posee una geometría casi rectangular (Fig. 6), por lo que en sus esquinas existen zonas donde las corrientes de flujo no alcanzan a llegar acumulando sedimentos en estos rincones y evitando que se genere una buena mezcla. Por lo cual se propone recubrir el estanque con placas de acero y cambiar su forma interior aprovechando la estructura del estanque T-101, con el fin de eliminar las zonas muertas de agitación. Se calcularon los siguientes parámetros de agitación (Tabla 19), se redujo el tiempo de mezcla al máximo respetando la capacidad de carga del agitador, por lo cual se consideran los mismos valores de  $N_p$ ,  $P_{req}$  y  $T$  utilizando un diámetro equivalente del estanque de  $2.5[m]$ .

**Tabla 19:** Dimensiones y parámetros de agitación para el estanque T-101 recubierto.

<b>Largo</b>	<b>Ancho</b>	<b>H<sub>T</sub></b>	<b>H<sub>L</sub></b>	<b>D<sub>i</sub></b>	<b>T<sub>m</sub></b>	<b>Re</b>	<b>N<sub>p</sub></b>	<b>N<sub>i</sub></b>	<b>P<sub>req</sub></b>	<b>T</b>
2,6	2,28	4,1	3,7	0,83	48	$7 \cdot 10^5$	2	60	0,8	129
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[s]		[RPM]	[RPM]	[kW]	[N · m]

Redondeando las paredes del estanque se eliminan los sectores donde las corrientes no alcanzan a llegar, esto mejora considerablemente la mezcla<sup>4</sup>. Para recubrir las paredes del estanque se propone utilizar 6 planchas de acero SAE 1010 (de dimensiones  $6000 \times 1000 \times 20[mm]$ ). Para esta modificación se estimaron los siguientes costos (Tabla 20):

**Tabla 20:** Costos de recubrir el interior del estanque T-101.

<b>Materiales</b>	\$ 1.006.395
<b>Mano de obra</b>	\$ 106.656
<b>Total</b>	<b>\$ 1.113.051</b>

#### - **Cubrir la parte superior del estanque**

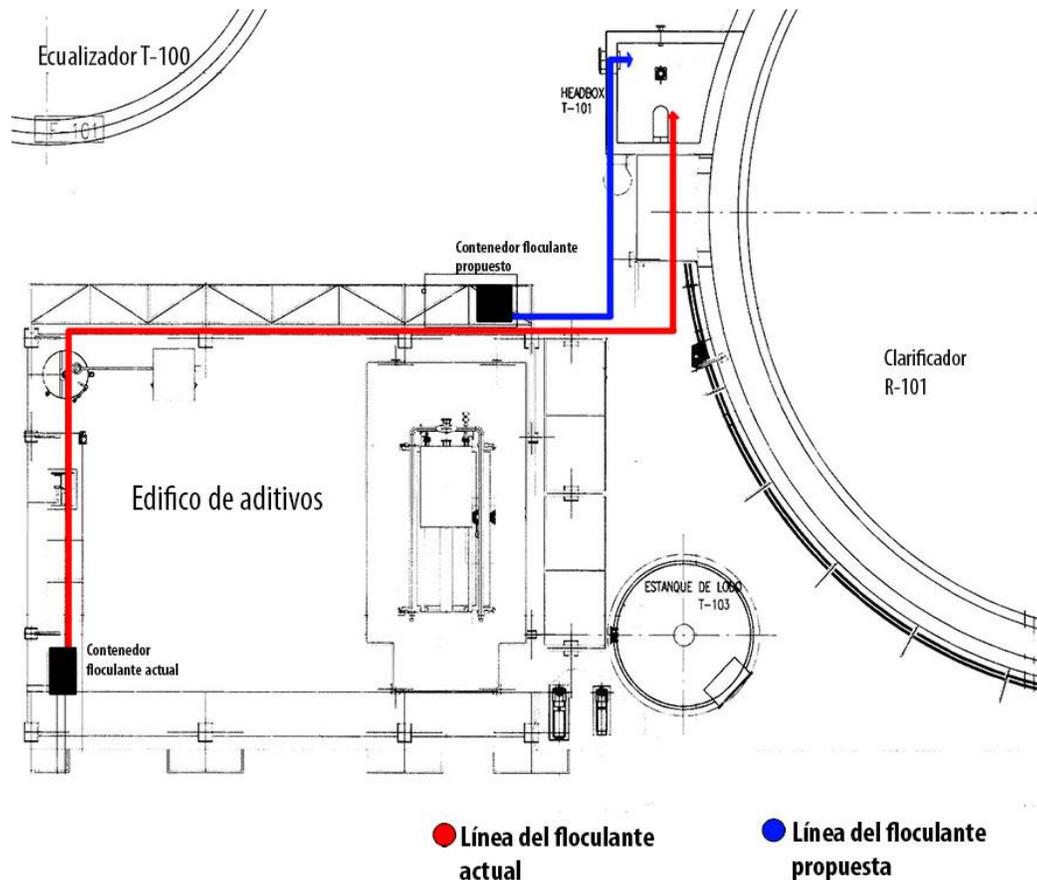
Una gran causal de que en el mezclador se obstruyan los ductos, es que en su interior caiga o arrojen basura, por lo cual se propone instalar una malla galvanizada que evite la introducción de objetos de gran tamaño que obstruyan las vías donde pasa el fluido. Para implementar esta modificación se estimaron los siguientes costos (Tabla 21):

**Tabla 21:** Costos de cubrir la parte superior de estanque T-101.

<b>Materiales</b>	\$ 25.000
<b>Mano de obra</b>	\$ 33.312
<b>Total</b>	<b>\$ 58.312</b>

- **Reubicar el contenedor y línea de entrada del floculante al mezclador.**

Actualmente se utiliza como floculante el producto químico comercial Optimer® 7196 Plus, cuando se instaló la planta se utilizaban tres productos químicos que se mezclaban, estos se almacenaban a un costado del estanque reactor clarificador. Cuando se implementó el uso del nuevo floculante, se situó en un galpón (Fig. 26) para poder proteger de la intemperie el contenedor. Esta distancia provocó que al llegar el floculante al mezclador, se perdiera parte de su tiempo de reacción provocando que al llegar al mezclador solo cierta parte del floculante se adhiriera a las partículas en suspensión, por lo cual se propone acercar el recipiente que contiene el floculante concentrado, a un lugar cercano al estanque mezclador para aprovechar mejor su tiempo de reacción. A su vez se propone modificar la cañería de entrada del floculante que actualmente está situada sobre el ducto de salida. La propuesta plantea desplazar la entrada del floculante sobre la cañería de entrada (proveniente del ecualizador) (Fig. 26), donde promueva una mejor mezcla y el floculante logre adherir las partículas para su posterior precipitado. Para ello se necesitan 16[m] de cañería de acero, de 6[in] de diámetro y 3 codos de 90°.



**Figura 26:** Ubicación del contenedor del floculante y línea de entrada hacia el mezclador.

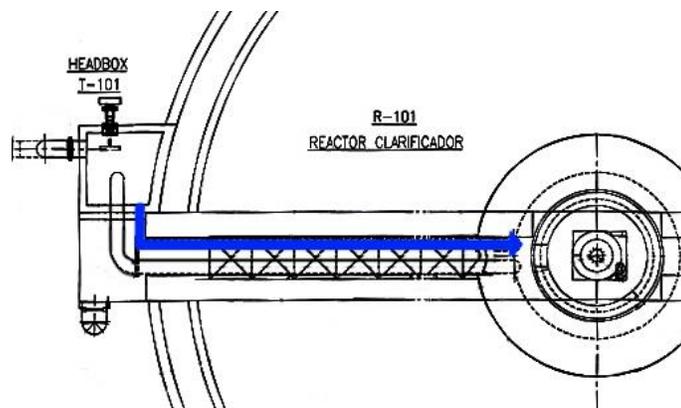
Los costos estimados de esta modificación son los siguientes (Tabla 22):

**Tabla 22:** Costos de modificar la entrada del floculante en el estanque T-101.

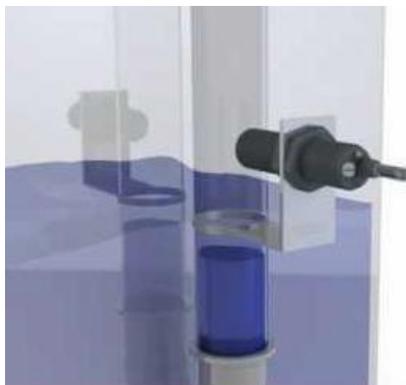
<b>Materiales</b>	\$ 322.767
<b>Mano de obra</b>	\$ 71.104
<b>Total</b>	<b>\$ 393.871</b>

- **Implementar un sistema de prevención de rebalses.**

El estanque mezclador se encuentra apegado al reactor clarificador (comparte una pared que colinda con el anillo del clarificador), por lo cual, cuando los ductos de salida se obstruyen (debido a la acumulación de lodos en el fondo) se rebalsa provocando que el lodo caiga en el anillo del clarificador, esta situación se debe evitar ya que el anillo es el sector donde se va recolectando el fluido libre de sólidos en suspensión. Por esta razón se propone incorporar una tubería de alivio desde el mezclador hasta el interior del clarificador (Fig. 27), lejos del anillo de clarificación, evitando que se derrame fluido con material particulado sobre este. Además instalar un sensor capacitivo (Fig. 28) y una alarma sonora que alerte al operador cuando el nivel del fluido se aproxime a su capacidad máxima (en caso de que la línea de alivio no sea suficiente), para que abra la línea de drenado. Para implementar esta línea se necesitan 17[m] de cañería con 10[in] de diámetro.



**Figura 27:** Línea de alivio del mezclador hacia el clarificador.



**Figura 28:** Sensor de proximidad capacitivo (E2K-X Series)

Para estas modificaciones se estimaron los siguientes costos (Tabla 23):

**Tabla 23:** Costos de implementar un sistema de prevención de rebalses en el estanque T-101.

<b>Materiales</b>	\$ 704.625
<b>Mano de obra</b>	\$ 45.552
<b>Total</b>	<b>\$ 750.187</b>

- **Construir un nuevo estanque mezclador**

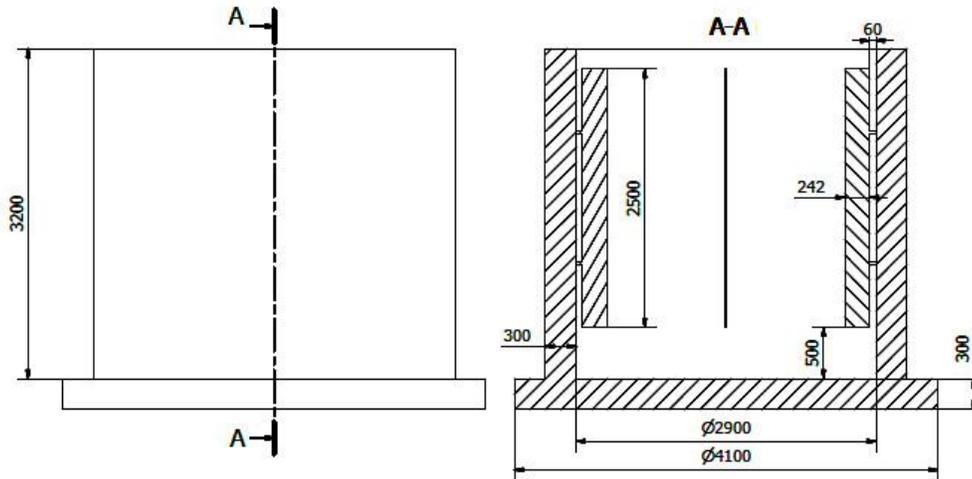
La geometría rectangular de este estanque, no permite que se genere una buena mezcla, debido a sus esquinas y cavidades donde las corrientes de flujo no penetran en todos los rincones<sup>4</sup>. Por esta razón se propone reemplazar el estanque T-101 por uno cilíndrico (Anexo 3) y su rodete, que cumplan con las medidas recomendadas en la literatura<sup>4</sup>. Esta propuesta pretende aprovechar el motor actual y optimizar el tiempo de mezcla respetando la capacidad de dicho motor, por lo que se conservan los valores de  $P_{req}$  y  $T$  utilizados en el estanque T-101; también se respetan las propiedades físicas del fluido contenido en dicho estanque. A continuación se presentan los valores y dimensiones obtenidos (Fig. 29, Tablas 24 y 25) a partir de las fórmulas de las páginas 29 y 30:

**Tabla 24:** Dimensiones y parámetros de agitación para un estanque de  $19[m^3]$  de capacidad.

$D_T$	$H_T$	$D_i$	$H_i$	$T_m$	Re	$N_p$	$N_i$	$P_{req}$	T
2,9	3,2	0,97	0,97	22	$1.415 \cdot 10^6$	0,3	90	0,9	92
[m]	[m]	[m]	[m]	[s]		[RPM]	[RPM]	[kW]	[N · m]

**Tabla 25:** Dimensiones para los deflectores de un estanque agitado de  $19[m^3]$ .

$N_{def}^o$	J	$H_J$	$S_J$	$h_j$
4	0,242	3	0,06	0,5
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]



**Figura 29:** Plano del nuevo estanque mezclador.

Para el cálculo del costo de construcción del estanque se consideraron las medidas de la Figura 29. Los materiales a utilizar son los mismos que se consideraron para la construcción del nuevo estanque equalizador (Págs. 44 y 45). Además se cotizó el valor de una nueva turbina de alta eficiencia de 1[m] de diámetro. Dando como resultado (Tabla 26):

**Tabla 26:** Costos en la construcción del estanque mezclador.

<b>H-10</b>	\$ 49.500
<b>H-30</b>	\$ 1.284.151
<b>Fe 12[mm]</b>	\$455.917
<b>Fe16[mm]</b>	\$467.195
<b>Materiales</b>	\$ 2.256.763
<b>Mano de obra(15%)</b>	\$338.515
<b>Utilidades (15%)</b>	\$ 338.515
<b>Deflectores</b>	\$ 111.821
<b>Rodete</b>	\$1.480.000
<b>Total</b>	<b>\$ 4.525.613</b>

Para la implementación de un nuevo estanque mezclador se estima un costo de \$4.525.613.

### 8.2.3 Propuestas para el pozo de lodos (T-103)

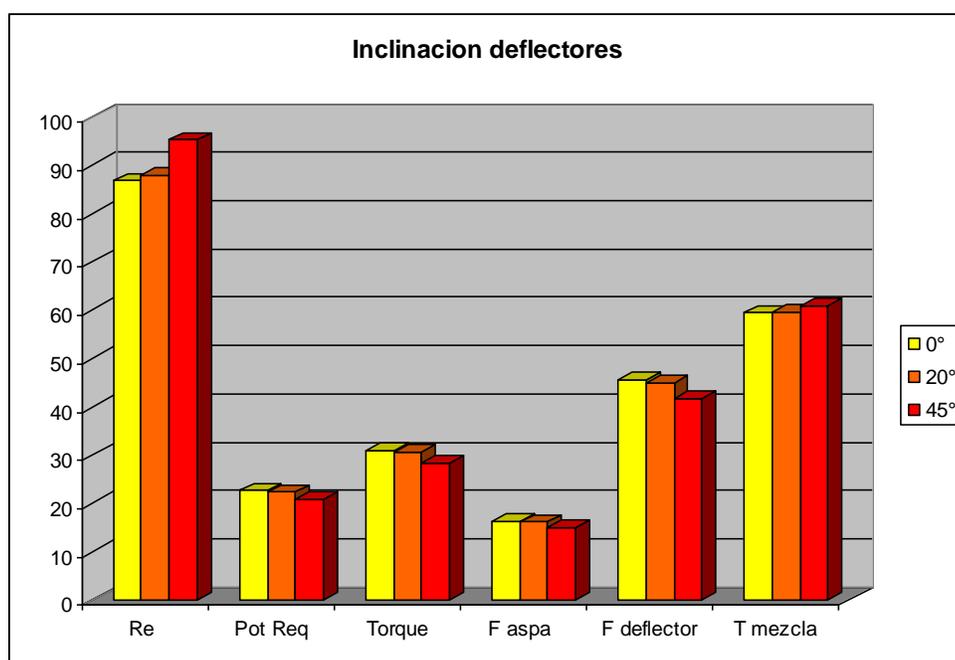
- **Inclinar el ángulo de los deflectores**

En este estanque la viscosidad del lodo es de 1,46[cP] y su densidad varía entre 1250 a 1450  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ , debido a la consistencia del fluido se evaluaron los parámetros de agitación variando el ángulo de inclinación de los deflectores <sup>4</sup>.

Una nueva simulación en el programa “Visimix”, permite calcular algunos parámetros de mezcla variando la inclinación de los deflectores, conservando las mismas condiciones de operación y propiedades del fluido para cada caso. Como datos de entrada se consideró el ángulo de inclinación de los deflectores, dando como resultado (Tabla 27, Gráf. 8):

**Tabla 27:** Parámetros de agitación según la inclinación de los deflectores.

Ángulo inclinación	0°	20°	45°	
<b>Re</b>	86,7 · 10 <sup>4</sup>	87,8 · 10 <sup>4</sup>	95,2 · 10 <sup>4</sup>	
<b>P<sub>req</sub></b>	22,7 · 10 <sup>2</sup>	22,4 · 10 <sup>2</sup>	20,8 · 10 <sup>2</sup>	[kW]
<b>T</b>	310	306	284	[N · m]
<b>F<sub>aspa</sub></b>	164	162	150	[N]
<b>F<sub>def</sub></b>	45,6	45	41,7	[N]
<b>T<sub>m</sub></b>	59,4	59,6	60,8	[s]



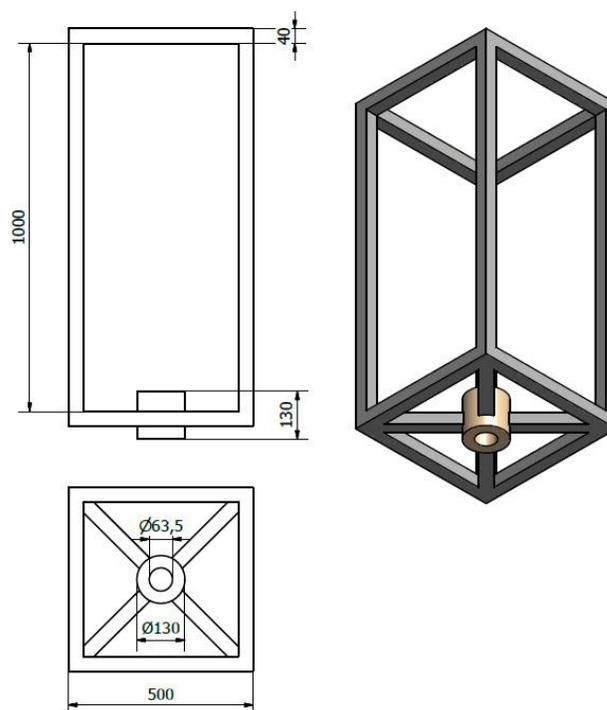
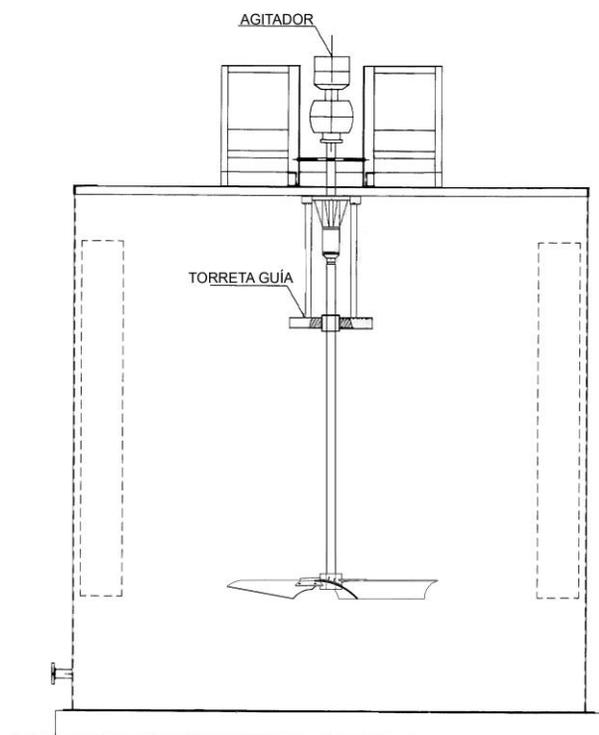
**Gráfico 8:** Parámetros de agitación según ángulo de inclinación de deflectores.

Se puede apreciar, en la tabla 27 y el gráfico 8, que al inclinar los deflectores a  $45^\circ$  aumenta el  $Re$ , promoviendo la mezcla, además disminuye ligeramente el torque y la fuerza ejercida por el fluido en las aspas y los deflectores; también se reduce la potencia requerida lo que se traduce en un menor gasto energético. Debido a que estas variaciones son despreciables, no se considera implementar esta modificación.

- **Agregar una torreta guía al eje del agitador.**

El eje del agitador es el que transmite el movimiento del motor al impulsor, este debe girar perfectamente concéntrico (no deben haber más de  $2[mm]$  entre la punta del eje del agitador y el eje vertical <sup>18</sup>), de lo contrario disminuye considerablemente la eficiencia del agitador, pudiendo dañar y disminuir la vida útil del motor.

Debido a que el eje de este agitador no mantiene su paralelismo durante su operación, se propone instalarle una torreta guía (Fig. 30 y 31) con un buje que sostenga al eje para que este mantenga un giro concéntrico, prolongando la vida útil del motor.



**Figura 30:** Estanque agitado con torreta guía.

**Figura 31:** Plano para torreta guía estanque T-103.

Para la implementación de esta estructura en el eje del agitador, con perfiles cuadrados de acero y un buje de teflón, se estiman los siguientes costos (Tabla 28):

**Tabla 28:** Costos de implementar una torreta guía para el agitador del estanque T-103.

<b>Materiales</b>	\$ 35.000
<b>Mano de obra</b>	\$ 35.552
<b>Total</b>	<b>\$ 70.552</b>

- **Implementar un sistema de alerta para prevenir rebalses.**

Este estanque no tiene una salida continua de lodos, solo se abre su válvula de salida cuando existe en su interior un nivel necesario para accionar la prensa de lodos (sobre el 25% de su capacidad). La entrada depende del flujo que ingresa desde los lavadores de humos de alto horno. Por esta razón se propone implementar una medida de seguridad ante una sobrecarga, instalando un sensor de proximidad capacitivo (Fig. 28) y una alarma sonora que alerte al operador cuando el nivel del estanque se aproxime a su capacidad máxima, para que este abra la válvula de salida e inicie el proceso de prensado.

Para implementar esta medida de seguridad se estiman los siguientes costos (Tabla 29):

**Tabla 29:** Costos de implementar un sistema de prevención de rebalses en el estanque T-103.

<b>Materiales</b>	\$ 97.583
<b>Mano de obra</b>	\$ 10.000
<b>Total</b>	<b>\$ 107.593</b>

### **8.3 Recomendaciones**

#### **8.3.1 Recomendaciones para el estanque ecualizador**

Debido a la alta inversión que implica construir un nuevo estanque ecualizador (\$42.000.000), se recomienda realizar modificaciones al estanque T-100 las cuales son:

- Utilizar cuatro placas deflectoras equidistantes, tal como se aprecia en el diseño de dicho estanque (Anexo 4), para así reducir las cargas sobre cada uno de estos deflectores y promover una mejor mezcla. Implementar esto tiene un costo de \$245.141.
- Redondear el contorno interior del fondo del estanque con el fin de obtener una mezcla homogénea evitando la acumulación de sedimentos en el fondo de este. Además el mantener un flujo homogéneo mejora la vida útil del resto de los equipos de la planta clarificadora. Esta modificación tiene un costo de \$563.760.

Estas modificaciones tienen un costo total estimado de \$809.000.

Se recomienda disminuir la velocidad de agitación a 52[RPM], lo cual reduce las cargas ejercidas sobre el eje del agitador, las aspas del rodete y las placas deflectoras; y con ello también baja el gasto de energía eléctrica en aproximadamente \$709.560 anuales/kW.

#### **8.3.2 Recomendaciones para el estanque mezclador**

La función de este estanque es muy importante para el correcto funcionamiento del resto de los equipos dentro de la planta, por lo cual se recomienda la construcción de un nuevo estanque mezclador cilíndrico con un sistema de prevención de rebalses, este sistema tiene un costo de \$750.187. La inversión inicial (\$4.525.613) es amortiguada por los bajos costos en mantenimiento que requieren los estanques de concreto.

Se recomienda reubicar el contenedor del floculante, a un lugar cercano al estanque mezclador, donde se aproveche mejor su tiempo de reacción, con el fin de que los flóculos precipiten en el estanque clarificador y no en el mezclador. Esta modificación tiene un costo de \$393.871.

Estas modificaciones tienen un costo total estimado total de \$5.669.671.

Con el fin de realizar mantenimiento preventivo, se recomienda realizar purgas y limpieza del fondo del estanque cada 45 días (en cada parada de horno) para eliminar la acumulación de flóculos que se adhieren en el fondo.

### **8.3.3 Recomendaciones para el pozo de lodos**

Para este estanque se recomienda incorporar una torreta guía al agitador que ayude a soportar las cargas que recibe el descanso del motor, evitando que el la flecha del agitador pierda su paralelismo. Esta modificación tiene un costo estimado de \$70.552.

Con el fin de evitar someter el agitador a variaciones de cargas muy violentas (que dañan el eje, las aspas del agitador y el soporte del motor), se debe mantener el rodete siempre en contacto con el fluido. Por lo que se propone mantener el nivel de trabajo del lodo superior al 25% de su capacidad, evitando que el impulsor trabaje en vacío.

Del caudal que ingresa al pozo de lodos desde el clarificador, se recomienda recircular una cierta cantidad hacia el mezclador. Lo cual permite que algunas partículas que no lograron adherirse al floculante lo hagan. Esto proporciona un flujo de entrada al pozo con una consistencia más homogénea facilitando la etapa del prensado. (Una buena consistencia se mide según el valor del torque de la rastra del clarificador, aprox. 25%).

Estas recomendaciones son los resultados obtenidos de la evaluación de costos de implementación e impacto de las distintas propuestas generadas para reducir los costos de operación y mantenimiento de la planta. Dichas propuestas fueron obtenidas del análisis del funcionamiento de la planta clarificadora, el que permitió descubrir las causas de las recurrentes fallas.

## **IX. CONCLUSIONES**

El objetivo general de este trabajo es describir y evaluar el proceso de homogenización en los estanques de una planta clarificadora de agua con el fin de generar propuestas que mejoren el funcionamiento y disponibilidad de los equipos, reduciendo los costos de operación y mantenimiento.

Con el fin de llevar a cabo este objetivo se realizó la recopilación de información bibliográfica y de datos en terreno, lo cual permitió identificar las causas de falla en los equipos. Una de las dificultades más importantes dentro de la investigación, fue la obtención de datos verídicos en terreno ya que muchos sensores y medidores estaban descalibrados o no funcionaban; también había información contradictoria, por ejemplo existían varios planos que señalaban el mismo elemento con diferentes cotas.

Una vez obtenida la información necesaria fue posible sugerir, evaluar y recomendar propuestas tales como:

- Modificar el estanque T-100 cambiando la configuración de sus deflectores, redondear el contorno del fondo del estanque con un costo estimado de \$809.000; y variar la velocidad de agitación ahorrando \$709.560 [año/kW] en energía eléctrica.
- Reemplazar el estanque mezclador, acercar el contenedor del floculante e implementar un sistema de prevención de rebalses con un costo estimado de \$5.669.671.
- Incorporar una torreta guía en el agitador del estanque T-103 con un costo estimado de \$70.552, y mantener su nivel de trabajo sobre el 25% de su capacidad.

Tomando en cuenta estas modificaciones se tiene un gasto general estimado de \$ 6.600.000, y un ahorro aproximado de \$13.700.000 anuales. Los cuales contrastan los casi \$ 100.000.000 invertidos en mantenimiento y reparaciones desde el año 2010 al 2014.

Estas recomendaciones permiten mantener la disponibilidad de la planta y disminuir la tasa de falla de los equipos, reduciendo los costos operación y mantenimiento.

Hay que tener en cuenta que las proporciones de diseño estándar utilizadas para estanques y sistemas de agitación, basan su criterio acorde a muchas correlaciones publicadas sobre el funcionamiento de estos, por lo que los valores obtenidos son ampliamente aceptados. Para obtener información precisa sobre su funcionamiento se debe recurrir al uso de herramientas más sólidas en materia de dinámica de fluidos, tales como los elementos finitos y software de simulación.

El alcance del proyecto tiene como finalidad generar propuestas que permitan un mejor funcionamiento y disponibilidad de los equipos, reduciendo los costos de operación y mantenimiento.

Finalmente, cabe destacar que un buen funcionamiento de la planta clarificadora permite reducir la contaminación, los gastos energéticos y los gastos económicos de la empresa. Por lo que este estudio, contribuye al bienestar de las personas, al medio ambiente y a la empresa.

En resumen creemos que se han cumplido los objetivos planteados al inicio del estudio.

## **X. BIBLIOGRAFÍA**

1. Vian, A., Ocón, J. (1976). *Elementos de ingeniería química*. (5ta ed.). Madrid: Editorial Aguilar, S.A.
2. Perry, R. (1984). *Manual del ingeniero químico*. (6ta ed.): Editorial McGraw-Hill.
3. Foust, A., Wenzel, L., Clump, C., Maus, L., Andersen, L. (2006). *Principios de operaciones unitarias*. (2da ed.). México: Editorial CECSA.
4. Doran, P. (1995). *Principios de ingeniería de los bioprocesos*. (1ra ed.). Zaragoza: Editorial ACRIBIA, S.A.
5. McCabe, W., Smith, J., Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. (7ma ed.). Ciudad de México: Editorial McGraw-Hill.
6. Branan, C. (2002). *Rules of thumb for chemical engineers*. (3ra ed.). USA: Editorial Gulf Professional Publishing.
7. Gómez Cáceres, I. (2007). *Cálculo de estanques para el almacenamiento de agua, análisis comparativo de las normas API 650 y AWWA D-100*. Memoria para optar al título de ingeniero de ejecución en mecánica, Universidad de Talca, Curicó - Chile.
8. Huerto Bujaico, H. (2013). *Estudio del flujo en un tanque agitador vertical del impulsor PTB con superficie libre mediante el programa ANSYS CFX V.14.0*. Tesis para optar al título de ingeniero mecánico, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima – Perú.
9. Holland, F., Chapman, F. (1996). *Liquid mixing and processing in stirred tank*. (ed.). New York: Editorial Reinhold Pub Corp.

10. Hoogendoorn, C., Hartog, A., (1699). *Model studies on mixers in the viscous flow region*.  
Oxford:  
Editorial Pergamon Press Ltd.
11. Guardo, A., (2008). *Simulación de una turbina radial mediante CFD FLUENT*. Tesis para optar el título de ingeniero mecánico. Escuela técnica superior de ingenieros industriales de Barcelona, Barcelona.
12. Rushton JH: Power Characteristics of Mixing Impellers. Part I. Chem. Eng. Prog. 1950, 46(8): 395-404.
13. Capón García, J. (2009). *Diseño de un reactor agitado para poliestireno en masa*. Proyecto fin de carrera (Período pre-Bolonia), Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
14. Robredo, R., Delegado comercial Levante HANNA instruments. *Importancia de la medida de turbidez en inundaciones y lluvias torrenciales*. Obtenido Noviembre 24, 2014, de <http://www.hannainst.es/blog/importancia-de-la-medida-de-turbidez-en-inundaciones-y-lluvias-torrenciales>
15. Catalogo planta clarificadora.
16. Hoja de seguridad floculante, Planta clarificadora.
17. *Manual de soldadura de los aceros inoxidable* ACERIND S.C; Santa Fe – Argentina.
18. EUROMIX - BACHILLER (MEXICO). *Conceptos básicos de agitación*. Obtenido de [www.euromix.com.mx](http://www.euromix.com.mx)[www.bachiller.com](http://www.bachiller.com)
19. Ranald, V., Jack, B., Cheng, L.(1994). *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. (3ra ed.).  
Madrid:  
Editorial McGraw-Hill.

## XI. ANEXOS

### Anexo 1: Norma ambiental



ACERO  
Compañía Siderúrgica Huachipato

LISTADO DE NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE			MA-36-001 Revisión 4 16/01/13	
Calidad	Ambiente	Seguridad	Página 4 de 53	
√	√			
1.19. Dicta e instruye normas de carácter general sobre el procedimiento de fiscalización ambiental	Resolución Exenta N° 769	2012	2012	
1.20. Dicta e instruye normas de carácter general sobre la remisión de los antecedentes respecto de las condiciones, compromisos y medidas establecidas en las resoluciones de calificación ambiental	Resolución Exenta N° 844	2012	2013	
<b>CAPÍTULO 2 LEGISLACIÓN AMBIENTAL</b>				
<b>Sección 2.1. Normas generales de protección ambiental</b>				
2.1.1. Ley de Bases Generales del Medio Ambiente	Ley N° 19.300	1993	1994	
2.1.2. Establece mecanismos de control aplicables a las sustancias agotadoras de la capa de ozono	Ley N° 20.096	2006	2006	
2.1.3. Crea Ministerio, Servicio de Evaluación Ambiental y Superintendencia del Medio Ambiente	Ley N° 20.417	2010	2010	
2.1.4. Declara zona latente por material particulado respirable MP <sub>10</sub> , la zona geográfica comprendida por las comunas de Lota, Coronel, San Pedro de la paz, Hualqui, Chiguayante, Concepción, Penco, Tomé, Hualpén y Talcahuano	Decreto Supremo N° 41	2006	2006	
2.1.5. Reglamento para la dictación de Normas de Calidad ambiental y de Emisión	Decreto Supremo N° 93	1995	1995	
2.1.6. Reglamento que fija el procedimiento y etapas para establecer planes de prevención y de descontaminación	Decreto Supremo N° 94	1995	1995	
2.1.7. Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental	Decreto Supremo N° 95	2001	2002	
<b>Sección 2.2. Normas de protección de las aguas</b>				
2.2.1. Determina materias que requieren autorización sanitaria expresa	Decreto con Fuerza de Ley N° 1	1989	1990	
2.2.2. Ley de navegación	Decreto Ley N° 2222	1978	1978	
2.2.3. Reglamento para el control de la contaminación acuática	Decreto Supremo N° 1	1992	1992	
2.2.4. Norma de Emisión para regulación de contaminantes asociados a descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales	Decreto Supremo N° 90	2000	2001	
2.2.5. Aguas residuales – Métodos de análisis – Parte 1: determinación de pH	NCh 2313/1.Of1995	1995	1996	
2.2.6. Aguas residuales – Métodos de análisis – Parte 2: determinación de la temperatura oficial	NCh 2313/2.Of1995	1995	1996	
2.2.7. Aguas residuales - Métodos de análisis - Parte 3: determinación de sólidos suspendidos totales	NCh 2313/3.Of1995	1995	1996	



LISTADO DE NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE			MA-36-001 Revisión 4 16/01/13	
Calidad	Ambiente	Seguridad	Página 5 de 53	
√	√			

secados a 103°C - 105°C				
2.2.8. Aguas residuales - Métodos de análisis - Parte 6: determinación de aceites y grasas	NCh 2313/6.Of1997	1997	1998	
2.2.9. Aguas residuales - Métodos de análisis - Parte 7: determinación de hidrocarburos totales	NCh 2313/7.Of1997	1997	1998	
2.2.10. Aguas residuales - Métodos de análisis - Parte 11: determinación de cromo hexavalente - Método de espectrofotometría de absorción atómica	NCh 2313/11.Of1996	1996	1997	
2.2.11. Aguas residuales - Métodos de análisis - Parte 13: determinación de molibdeno por espectrofotometría de absorción atómica con llama	NCh 2313/13.Of1998	1998	1999	
2.2.12. Aguas residuales - Métodos de análisis - Parte 14: determinación de cianuro total	NCh 2313/14.Of1997	1997	1998	
2.2.13. Aguas residuales - Métodos de análisis - Parte 19: determinación del índice de fenol - Método espectrométrico de la 4-aminoantipirina después de destilación	NCh 2313/19.Of.2001	2001	2002	
2.2.14. Aguas residuales - Métodos de análisis - Parte 23: determinación de coliformes fecales en medio EC	NCh 2313/22.Of1995	1995	1996	
2.2.15. Aguas residuales - Métodos de análisis - Parte 23: determinación de coliformes fecales en medio A1	NCh 2313/23.Of1995	1995	1996	
2.2.16. Aguas residuales - Métodos de análisis - Parte 28: determinación de nitrógeno Kjeldahl - Método potenciométrico con digestión previa	NCh 2313/28.Of1998	1998	1999	
2.2.17. Aguas residuales - Métodos de análisis - Parte 33: determinación de fluoruro - Método potenciométrico después de destilación	NCh 2313/33.Of1999	1999	2000	
2.2.18. Aguas - Determinación simultánea de bacterias coliformes fecales y E. Coli mediante método de filtración por membrana con m-Colibblue 24	NCh 2972.Of2008	2008	--	

**Sección 2.3. Normas de protección del aire**

2.3.1. Establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP <sub>2,5</sub>	Decreto Supremo N° 12	2011	2011	
2.3.2. Reglamento de calderas y generadores de vapor	Decreto Supremo N° 48	1984	1984	
2.3.3. Establece las Normas de Emisión aplicables a vehículos motorizados medianos.	Decreto Supremo N° 54	1994	1994	
2.3.4. Establece las Normas de Emisión aplicables a vehículos motorizados pesados	Decreto Supremo N° 55	1994	1994	
2.3.5. Norma de Calidad Primaria para material particulado respirable - MP <sub>10</sub>	Decreto Supremo N° 59	1998	1998	
2.3.6. Aprueba Reglamento de estaciones de medición de contaminantes atmosféricos	Decreto Supremo N° 61	2008	2008	



LISTADO DE NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE			MA-36-001 Revisión 4 16/01/13	
Calidad	Ambiente	Seguridad	Página 6 de 53	
√	√			

2.3.7. Establece condiciones para el transporte de carga que indica	Decreto Supremo N°75	1987	1987
2.3.8. Establece Norma de Emisión de hidrocarburos no metálicos para vehículos livianos	Decreto Supremo N° 103	2000	2000
2.3.9. Norma de Calidad Primaria de aire para ozono – O <sub>3</sub>	Decreto Supremo N° 112	2002	2003
2.3.10 Norma de Calidad Primaria para dióxido de azufre – SO <sub>2</sub>	Decreto Supremo N° 113	2002	2003
2.3.11. Norma de Calidad Primaria para dióxido de nitrógeno – NO <sub>2</sub>	Decreto Supremo N° 114	2002	2003
2.3.12. Norma de Calidad Primaria de aire para monóxido de carbono – CO	Decreto Supremo N° 115	2002	2003
2.3.13. Norma de Calidad Primaria de aire para plomo	Decreto Supremo N° 136	2000	2001
2.3.14. Establece la obligación de declarar emisiones que indica	Decreto Supremo N° 138	2005	2005
2.3.15. Establece Normas para evitar emanaciones o contaminantes atmosféricos de cualquier naturaleza.	Decreto Supremo N° 144	1961	1961
2.3.16. Normas sobre emisiones de vehículos motorizados livianos	Decreto Supremo N° 211	1991	1991
2.3.17. Aprueba Reglamento de laboratorios de medición y análisis de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes estacionarias	Decreto Supremo N° 2467	1994	1995

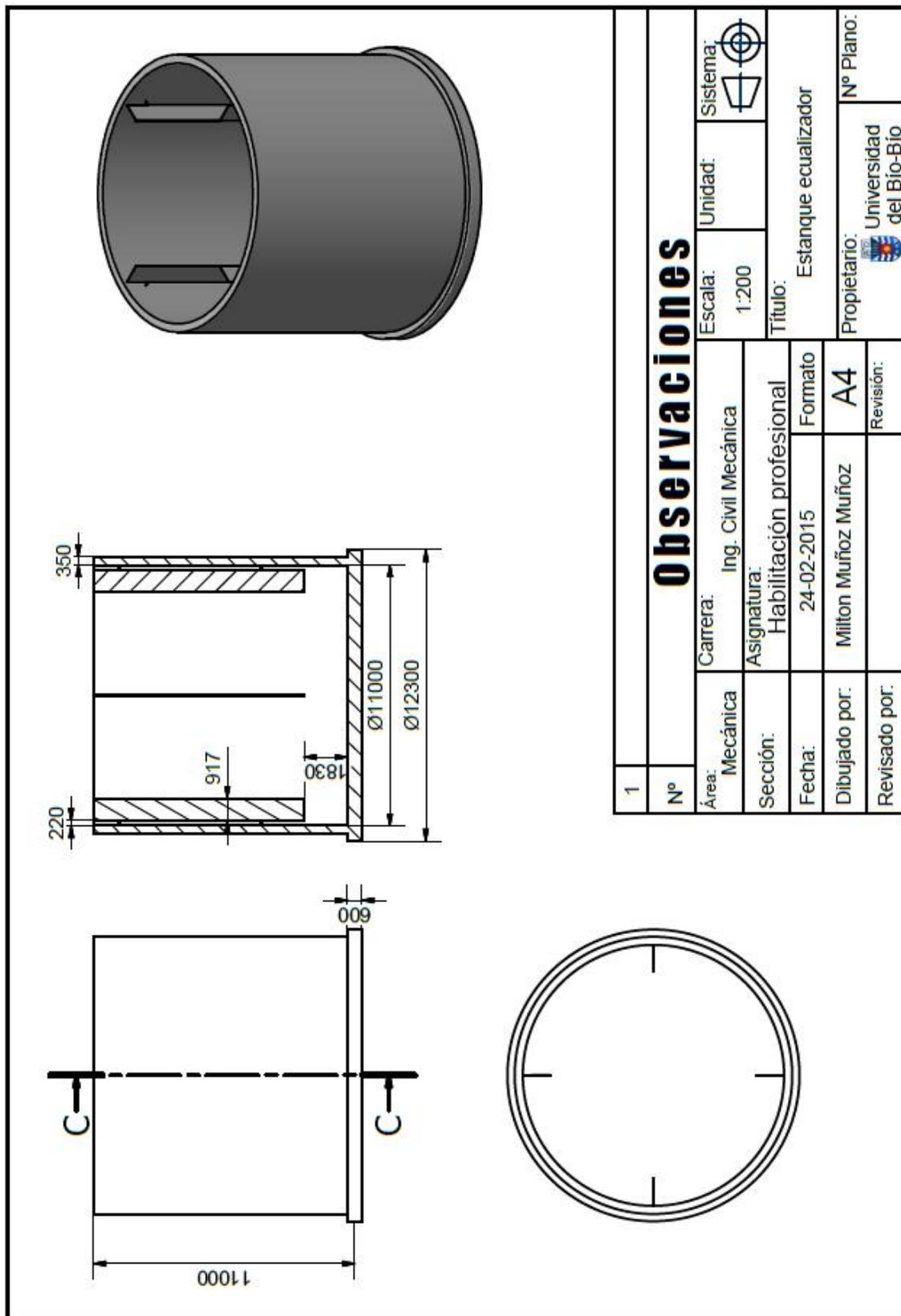
**Sección 2.4. Normas de protección del suelo, flora, fauna y recursos naturales**

2.4.1. Ley de caza	Ley N°19.743	1996	1996
2.4.2. Aprueba Ley General de urbanismo y construcciones	Decreto con Fuerza de Ley N°458	1975	1976
2.4.3. Sustituye Reglamento sobre concesiones marítimas, fijado por Decreto Supremo (M) N° 660 de 1988.	Decreto Supremo N° 2	2005	2006
2.4.4. Fija nuevo texto de Ordenanza General de Ley General de urbanismo y construcciones	Decreto Supremo N° 47	1992	1992
2.4.5. Fija texto refundido, coordinado y sistematizado de Ley N° 18.892 de 1989 y sus modificaciones, Ley General de pesca y acuicultura	Decreto Supremo N° 430	1991	1992
2.4.6. Aprueba Plan Regulador Metropolitano de Concepción	Resolución N° 171	2002	2003
2.4.7. Aprueba Plan Regulador Comunal de Talcahuano	Decreto Alcaldicio N° 247	2006	2006

**Sección 2.5. Regulaciones sobre residuos sólidos peligrosos y no peligrosos**

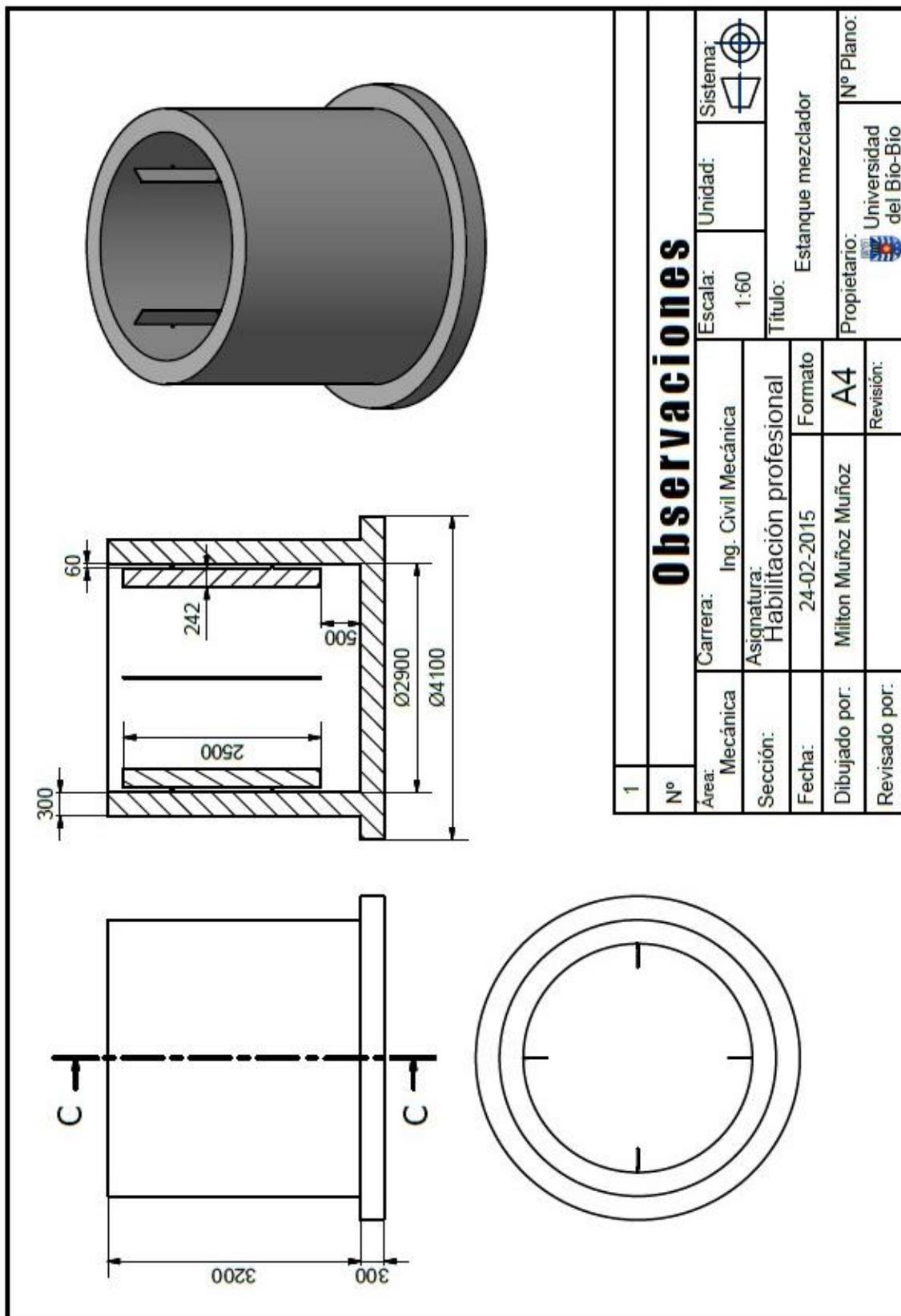
2.5.1. Determina materias que requieren de autorización	Decreto con Fuerza de	1989	1990
---	-----------------------	------	------

Anexo 2: Plano estanque ecualizador



1	<b>Observaciones</b>					
Nº	Escala: 1:200		Unidad:	Sistema:		
Área: Mecánica	Carrera: Ing. Civil Mecánica	Título: Estanque ecualizador		Nº Plano:		
Sección:	Asignatura: Habilitación profesional	Formato: A4		Propietario: Universidad del Bío-Bío		
Fecha: 24-02-2015	Dibujado por: Milton Muñoz Muñoz	Revisión:				
Revisado por:						

**Anexo 3: Plano estanque mezclador**



Anexo 4: Especificaciones estanque T-100.



AGITATOR DATA SHEET

PROJECT	INGENIERIA BASICA PARA PLANTA DE CLARIFICACION DE EFLUENTES	ISS.	BY	CHK	APPR.	DATE	PAGES	P&A PROJECT
		A	AGB	RLM	VCC	Abr-06	1 OF 2	DO-1562
CLIENT	COMPAÑIA SIDERURGICA HUACHIPATO S.A.	B	AGB	RLM	VCC	May-06	DOCUMENT	CONTRACT
		0	FLR	RLM	VCC	Jun-06	1582-DM51-001	

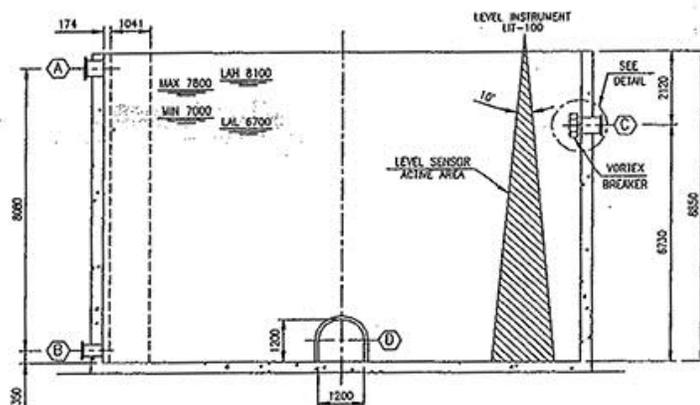
GENERAL		SKETCH (BUNDLE / NOZZLE ORIENTATION)	
TAG NO. <u>A-100</u>	UNITS REQ'D <u>1</u>	(SEE PAGE 2)  DEPTO .22.-ALTOS HORNOS FAC. ALTO HORNO N° 1 Y 2-PLANTA DE CLARIFICACION EQ. AGITADOR TAG: A-100 PARA ESTANQUE ECUALIZADOR T-100 DESC. HOJAS DE DATOS ( 2 HOJAS) PROV. PARES ALVAREZ N° DO1562 CONT. DORR OLIVER BIMCO N° SN OC. FP - 22-2938	
MODEL <u>By Vendor</u>			
OPERATIONAL DATA			
SERVICE <u>Equalization Tank</u>	PRODUCT <u>Blast Furnace Effluent</u>		
DENSITY <u>1000</u> kg/m <sup>3</sup>	VISCOSITY <u>1,0</u> cP		
OPERATION / DESIGN TEMPERATURE <u>55 / 75</u> °C			
MINIMUM / MAXIMUM VOLUME <u>822 / 1000</u> m <sup>3</sup>			
OPERATION FLOW <u>720</u> m <sup>3</sup> /h			
OPERATION <input type="checkbox"/> BATCH <input checked="" type="checkbox"/> CONTINUOUS <input type="checkbox"/> SEMICONTINUOUS			
CONNECTION TYPE <input type="checkbox"/> PORTABLE <input checked="" type="checkbox"/> TOP ENTERING <input type="checkbox"/> SIDE ENTERING <input type="checkbox"/> BOTTOM ENTERING			
AGITATION TYPE <input type="checkbox"/> BLEND <input checked="" type="checkbox"/> SUSPEND SOLIDS <input type="checkbox"/> DISSOLVE <input type="checkbox"/> HEAT EXCHANGE <input type="checkbox"/> DISPERSE GAS <input checked="" type="checkbox"/> OFF-BOTTOM			
AGITATION DEGREE <input type="checkbox"/> MILD <input checked="" type="checkbox"/> MEDIUM <input type="checkbox"/> VIOLENT FOAMING <input type="checkbox"/> YES <input checked="" type="checkbox"/> NO			
VESSEL DATA			
DIAMETER <u>12,5</u> m.	HEIGHT <u>8,85</u> m		
<input checked="" type="checkbox"/> ATMOSPHERIC <input type="checkbox"/> PRESSURIZED <u>psi(design)</u> <u>psi(operation)</u>			
BAFFLES: N° <u>4</u> <input checked="" type="checkbox"/> VERTICAL <input type="checkbox"/> HORIZONTAL SIZE (WxL) <u>1041 x 8500</u> mm			
SHAFT SEAL <input type="checkbox"/> MECHANICAL <input checked="" type="checkbox"/> PACKING LUBRICATION (TYPE) <u>By Vendor</u>			
MAXIMUM OPENING FOR INSTALLING AGITATOR _____ in			
MOTOR DRIVE DATA			
POWER <u>By Vendor</u> kW	VELOCITY <u>By Vendor</u> rpm		
ENCLOSURE <u>TEFC</u>	W / P / Hz <u>380 / 3 / 50</u> Hz		
SERVICE FACTOR <u>1,15</u>	ENVIROMENT <u>Sea Side</u>		
REDUCER <u>By Vendor</u>	RATIO (i) _____		
LUBE <u>By Vendor</u>	OUTPUT RPM _____ rpm		
NOTES			
1.- Blast Furnace Effluent: Water with 700 mg/l of solids content, pH: 3-8. Solids specific gravity 3.5-4.5. 2.- Under laboratory standard jar test the solids are suspended at 200 rpm. 3.- Solids settling velocity: 0.02 m/s.			



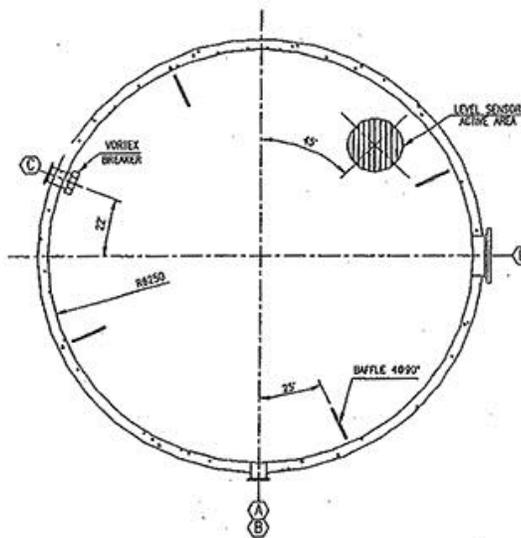
AGITATOR DATA SHEET

PROJECT	INGENIERIA BASICA PARA PLANTA DE CLARIFICACION DE EFLUENTES	ISS.	BY	CHK	APPR.	DATE	PAGES	P&A PROJECT
		A	AGB	RLM	VCC	Abr-06	2 OF 2	DO-1582
CLIENT	COMPAÑIA SIDERURGICA HUACHIPATO S.A.	A	AGB	RLM	VCC	May-06	DOCUMENT	CONTRACT
		0	FLR	RLM	VCC	Jun-06	1562-DM51-001	

SKETCH (BUNDLE / NOZZLE ORIENTATION)



FRONT VIEW



PLAN VIEW

NOTES

Anexo 5: Especificaciones estanque T-101.



AGITATOR DATA SHEET

PROJECT	INGENIERIA BASICA PARA PLANTA DE CLARIFICACION DE EFLUENTES	ISS.	BY	CHK	APPR.	DATE	PAGES	P&A PROJECT
		A	AGB	RLM	VCC	Abr-06	1 OF 1	DO-1562
CLIENT	COMPAÑIA SIDERURGICA HUACHIPATO S.A.	B	AGB	RLM	VCC	May-06	DOCUMENT	CONTRACT
		0	FLR	RLM	VCC	Jun-06	1562-DM51-002	

GENERAL	SKETCH (BUNDLE / NOZZLE ORIENTATION)
TAG NO: <u>A-101</u> UNITS REQ'D <u>1</u> MODEL <u>By Vendor</u>	<p>ELEV. +3.250 ELEV. +2.840 GROUND LEVEL +0.0</p> <p>A-A VIEW</p>
<b>OPERATIONAL DATA</b> SERVICE <u>HEADBOX TANK</u> PRODUCT <u>SOLIDS RICH EFFLUENT</u> DENSITY <u>1010</u> kg/m <sup>3</sup> VISCOSITY <u>1.0</u> cP OPERATION / DESIGN TEMPERATURE <u>55 / 75</u> °C OPERATION / MAXIMUM VOLUME <u>19 / 25</u> m <sup>3</sup> OPERATION FLOW <u>730</u> m <sup>3</sup> /h	
OPERATION <input type="checkbox"/> BATCH <input checked="" type="checkbox"/> CONTINUOUS <input type="checkbox"/> SEMICONTINUOUS CONNECTION TYPE <input type="checkbox"/> PORTABLE <input checked="" type="checkbox"/> TOP ENTERING <input type="checkbox"/> SIDE ENTERING <input type="checkbox"/> BOTTOM ENTERING AGITATION TYPE <input type="checkbox"/> BLEND <input checked="" type="checkbox"/> SUSPEND SOLIDS <input type="checkbox"/> DISSOLVE <input type="checkbox"/> HEAT EXCHANGE <input type="checkbox"/> DISPERSE GAS <input checked="" type="checkbox"/> OFF-BOTTOM AGITATION DEGREE <input type="checkbox"/> MILD <input checked="" type="checkbox"/> MEDIUM <input type="checkbox"/> VIOLENT FOAMING <input type="checkbox"/> YES <input checked="" type="checkbox"/> NO	
<b>VESSEL DATA</b> DIAMETER <u>See Sketch</u> m HEIGHT <u>See Sketch</u> m <input checked="" type="checkbox"/> ATMOSPHERIC <input type="checkbox"/> PRESSURIZED <u>psi</u> (design) <u>psi</u> (operation)	<p>CLARIFIER WALL</p> <p>PLAN VIEW</p>
BAFFLES: · N° <u>NONE</u> <input type="checkbox"/> VERTICAL <input type="checkbox"/> HORIZONTAL SIZE (WxL) _____ SHAFT SEAL <input type="checkbox"/> MECHANICAL <input checked="" type="checkbox"/> PACKING LUBRICATION (TYPE) <u>By Vendor</u> MAXIMUM OPENING FOR INSTALLING AGITATOR _____ in	
<b>MOTOR DRIVE DATA</b> POWER <u>By Vendor</u> kW VELOCITY <u>By Vendor</u> rpm ENCLOSURE <u>TEFC</u> V/ P/ Hz <u>380 / 3 / 50</u> Hz SERVICE FACTOR <u>1.15</u> ENVIROMENT <u>Sea Side</u> REDUCER <u>By Vendor</u> RATIO (I) _____ LUBE <u>By Vendor</u> OUTPUT RPM _____ rpm	
<b>NOTES</b> 1.- Solids Rich Effluent: Water with 2000 mg/l of solids content, pH: 3-8. Solids specific gravity 3.5-4.5. 2.- Under laboratory Jar test the solids are suspended at 200 rpm. 3.- Solids settling velocity: 0.02 m/s.	DEPTO .22.-ALTOS HORNOS FAC. ALTO HORNO N° 1 Y 2-PLANTA DE CLARIFICACION EQ . AGITADOR TAG: A-101 PARA HEAD BOX T-101 DESC. HOJAS DE DATOS ( 1 HOJAS) PROV PARES ALVAREZ N° DO1562 CONT. DORR OLIVER EIMCO N° SN OC. FP - 22-2939

Anexo 6: Especificaciones estanque T-103.



AGITATOR DATA SHEET

PROJECT	INGENIERIA BASICA PARA PLANTA DE CLARIFICACION DE EFLUENTES	ISS.	BY	CHK	APPR.	DATE	PAGES	P&A PROJECT
		A	AGB	RLM	VCC	Abr-08	1 OF 1	DO-1662
CLIENT	COMPAÑIA SIDERURGICA HUACHIPATO S.A.	B	AGB	RLM	VCC	May-08	DOCUMENT	CONTRACT
		0	FLR	RLM	VCC	Jun-08	1662-DM51-003	

GENERAL		SKETCH (BUNDLE / NOZZLE ORIENTATION)	
TAG NO.	A-102	UNITS REQD	1
MODEL	By Vendor		
<b>OPERATIONAL DATA</b>			
SERVICE	SLUDGE HOLDING TANK	PRODUCT	BLAST FURNANCE SLUDGE
DENSITY	1250-1450 kg/m <sup>3</sup>	VISCOSITY	1,48 cP
OPERATION / DESIGN TEMPERATURE	55 / 75 °C		
OPERATION / MAXIMUM VOLUME	- / 38 m <sup>3</sup>		
OPERATION FLOW	3,8 m <sup>3</sup> /h		
OPERATION	<input checked="" type="checkbox"/> BATCH <input type="checkbox"/> CONTINUOUS <input type="checkbox"/> SEMICONTINUOUS		
CONNECTION TYPE	<input type="checkbox"/> PORTABLE <input checked="" type="checkbox"/> TOP ENTERING <input type="checkbox"/> SIDE ENTERING <input type="checkbox"/> BOTTOM ENTERING		
AGITATION TYPE	<input type="checkbox"/> BLEND <input checked="" type="checkbox"/> SUSPEND SOLIDS <input type="checkbox"/> DISSOLVE <input type="checkbox"/> HEAT EXCHANGE <input type="checkbox"/> DISPERSE GAS <input checked="" type="checkbox"/> OFF-BOTTOM		
AGITATION DEGREE	<input type="checkbox"/> MILD <input checked="" type="checkbox"/> MEDIUM <input type="checkbox"/> VIOLENT <input type="checkbox"/> MILD <input type="checkbox"/> FOAMING <input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO		
<b>VESSEL DATA</b>			
DIAMETER	3,7 m	HEIGHT	4,1 m
<input checked="" type="checkbox"/> ATMOSPHERIC <input type="checkbox"/> PRESSURIZED	psi(design) _____    psi(operation) _____		
BAFFLES: N°	4	<input checked="" type="checkbox"/> VERTICAL <input type="checkbox"/> HORIZONTAL	SIZE (WxL) _____ 300 x 3000 mm
SHAFT SEAL	<input type="checkbox"/> MECHANICAL <input checked="" type="checkbox"/> PACKING		
LUBRICATION (TYPE)	By Vendor		
MAXIMUM OPENING FOR INSTALLING AGITATOR _____ in			
<b>MOTOR DRIVE DATA</b>			
POWER	By Vendor	VELOCITY	By Vendor
ENCLOSURE	TEFC	V / P / Hz	380 / 3 / 50 Hz
SERVICE FACTOR	1,15	ENVIROMENT	Sea Side
REDUCER	By Vendor	RATIO (i)	
LUBE	By Vendor	OUTPUT RPM	
NOTES			
1.- Blast Furnance Sludge: 30% of solids content, pH: 3-8. Solids specific gravity 3.5-4.6. 2.- Under laboratory jar test the solids are suspended at 200 rpm. 3.- Settling velocity of particles: 0.02 m/s.		DEPTO. 22.-ALTOS HORNO FAC. ALTO HORNO N° 1 Y 2-PLANTA DE CLARIFICACION EQ. AGITADOR TAG: A-102 PARA POZO DE LODOS T-103 DESC. HOJAS DE DATOS ( 1 HOJAS) 757 0.19.03 PROV PARES ALVAREZ N° DO1562 CONT. DORR OLIVER EIMCO N° SN OC. FP - 22-2940	

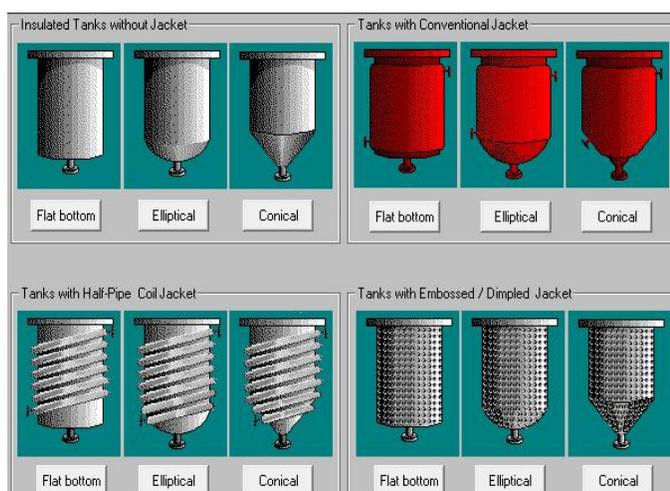
**Anexo 7:** Software Visimix.

**Nombre del software:** *Visimix Turbulent SV 2014* (Low viscosity liquids and multi-phase systems).

**Licencia:** Versión de prueba educacional.

El programa es una herramienta de software único para el modelado matemático de la mezcla en líquidos de baja viscosidad y mezclas multifase. Este proporciona los parámetros de proceso necesarios para el análisis y optimización de la mezcla en estanques y reactores con todos los tipos de impulsores.

Para comenzar a simular con el software se debe ingresar el tipo de estanque (Fig. 32) y las dimensiones de este (Fig. 33):



**Figura 32:** Tipo de estanque.

**TANK WITH FLAT BOTTOM**

Inside diameter  mm

Total tank height  mm

Total volume  l

Level of media  mm

Volume of media  l



**Figura 33:** Propiedades del estanque.

En los casos de los estanques analizados, se seleccionaron estanques aislados de fondo plano sin recubrimiento. Los valores introducidos son: Diámetro interno, altura total del estanque y nivel de trabajo. El volumen total y el volumen de trabajo son calculados por el programa.

Luego de configurar el estanque se procede a seleccionar el tipo de deflector (Fig. 34) y definir sus dimensiones (Fig. 35):

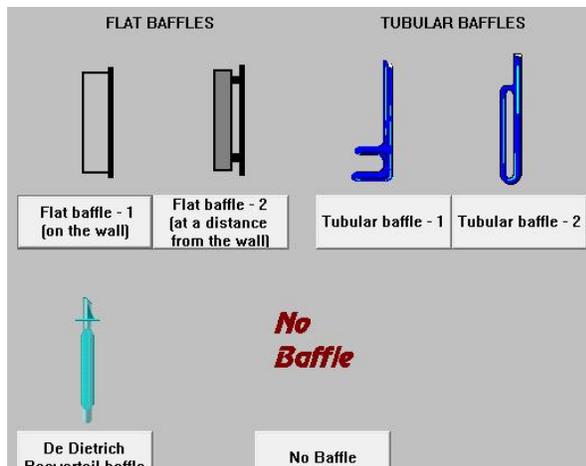


Figura 34: Tipo de deflector.

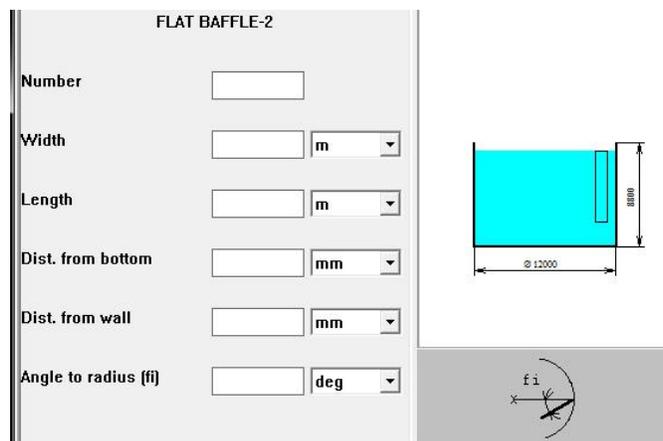


Figura 35: Propiedades de los deflectores.

Para los estanques analizados se seleccionaron deflectores planos separados de la pared. Las dimensiones a introducir son: Número de deflectores, ancho, largo, distancia desde el fondo, distancia desde la pared y ángulo de inclinación.

A continuación de la selección de deflectores, se procede a elegir el tipo de agitador (Fig. 36) e ingresar sus dimensiones (Fig. 37):

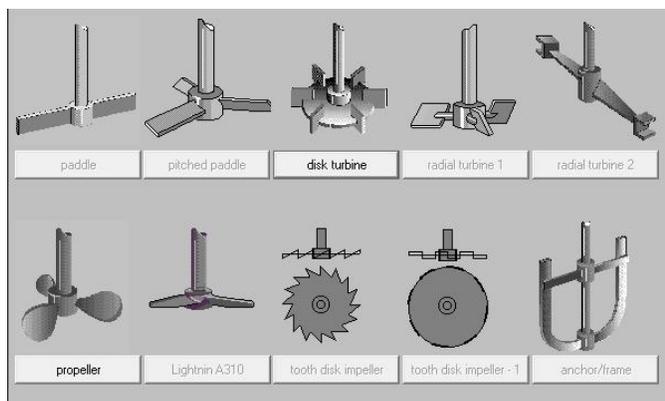


Figura 36: Tipo de agitador.

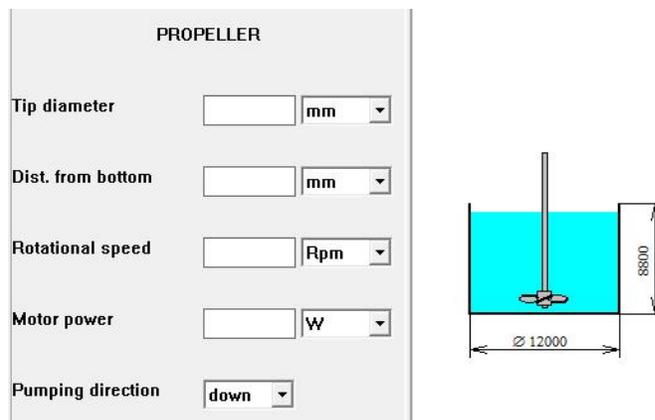


Figura 37: Propiedades del agitador.

Para los estanques analizados se seleccionaron agitadores de flujo axial descendente con un  $N_p = 0.3$ . Las dimensiones a introducir son: Diámetro del rodete, distancia desde el fondo, velocidad de rotación, potencia del motor y dirección de bombeo.

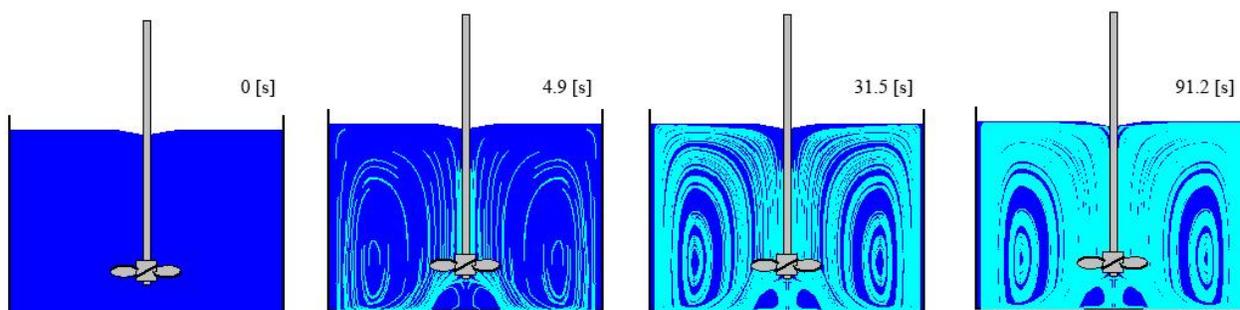
Luego de seleccionar el tipo de agitador, se deben determinar las propiedades físicas del fluido como densidad (Fig. 38) y viscosidad (Fig. 39):

**Figura 38:** Densidad del fluido.

**Figura 39:** Viscosidad del fluido.

Para los estanques analizados (ecualizador y pozo de lodos) se consideraron fluidos newtonianos con densidades de 1000 y 1350  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ , y viscosidades de 1 y 1.49 [cP] respectivamente según las especificaciones de la planta.

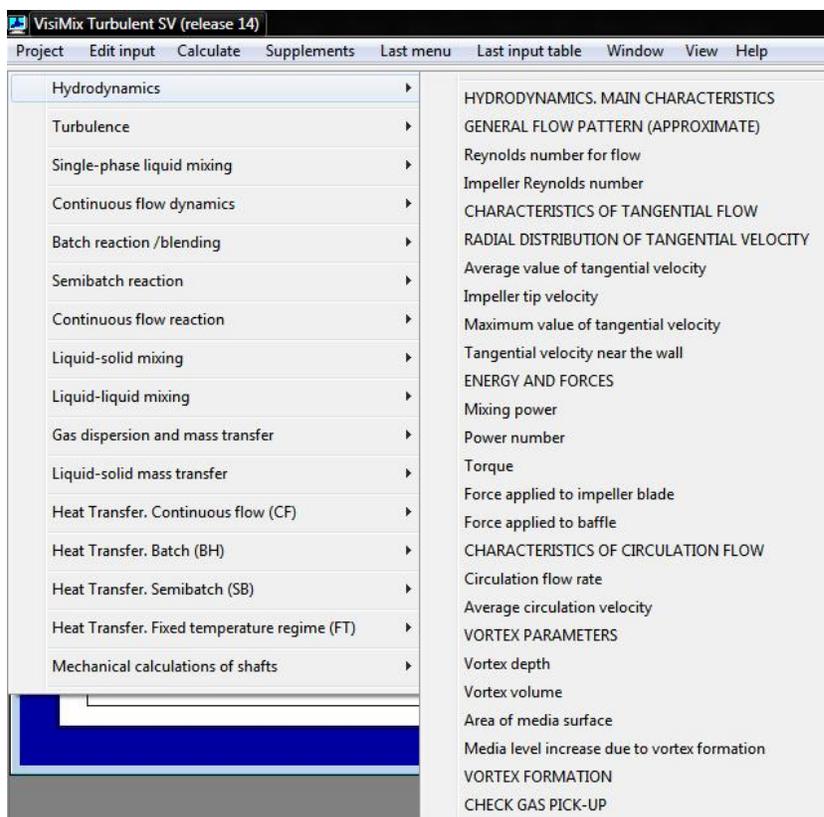
Una vez establecidas las propiedades del estanque, agitador y del fluido se inicia la simulación de la mezcla considerando un tiempo de mezclado hasta que se desarrolle completamente la macromezcla y micromezcla, como se aprecia en la siguiente imagen (Fig. 40):



**Figura 40:** Simulación de un estanque agitado con flujo axial.

En la imagen 40 se puede apreciar la simulación de cómo se agita un fluido en un estanque, en este caso con un  $T_m = 91.2[s]$ .

Luego de efectuar la simulación se pueden obtener los valores de los parámetros hidrodinámicos de agitación como se muestra en la siguiente imagen (Fig. 41):



**Figura 41:** Parámetros hidrodinámicos de agitación (*Visimix Turbulent SV*).

Los valores considerados en los análisis son: Número de Reynolds del impulsor, potencia de mezcla, torque, fuerza aplicada a las aspas del agitador y fuerza aplicada en los deflectores.

Con todos estos valores es posible evaluar el comportamiento del fluido dentro del estanque, y las cargas ejercidas en el impulsor y los deflectores, y así tomar decisiones y proponer mejoras.