



**ESPE**  
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**Diseño de una planta transportable y optimización del proceso de mezcla para la generación de nanopartículas metálicas como proceso de recuperación de suelos cacaoteros contaminados con cadmio**

Perugachi Isizan, Pedro Miguel

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Naranjo Guatemala, Carlos Rodrigo

29 de julio del 2020



### Document Information

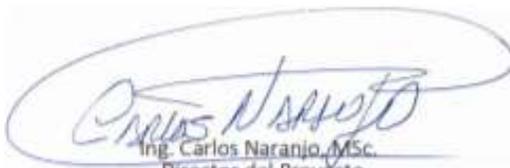
---

**Analyzed document** MIGUEL PERUGACHI-Tesis.docx (D76540190)  
**Submitted** 7/19/2020 6:19:00 AM  
**Submitted by** GARRIDO SANCHEZ JOSE FERNANDO  
**Submitter email** jfgarridos@utn.edu.ec  
**Similarity** 2%  
**Analysis address** jfgarridos.utn@analysis.orkund.com

### Sources included in the report

---

<b>SA</b>	<b>Tesis_Final_REVELO_VALDEZ ESPE-CENCINAT.pdf</b> Document Tesis_Final_REVELO_VALDEZ ESPE-CENCINAT.pdf (D24287488)	 13
<b>W</b>	URL: <a href="https://plastigamawavin.com/contacto/">https://plastigamawavin.com/contacto/</a> Fetched: 7/19/2020 6:21:00 AM	 1
<b>W</b>	URL: <a href="https://hannainst.ec/">https://hannainst.ec/</a> Fetched: 7/19/2020 6:21:00 AM	 1



Ing. Carlos Naranjo, MSc.  
Director del Proyecto



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "Diseño de una planta transportable y optimización del proceso de mezcla para la generación de nanopartículas metálicas como proceso de recuperación de suelos cacaoteros contaminados con cadmio" fue realizado señor Perugachi Isizan, Pedro Miguel el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 20 de Julio de 2020

Director del trabajo de titulación

Ing. Carlos Rodrigo Naranjo Guatemala  
Ci: 1707087084



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Perugachi Isizan Pedro Miguel**, con cédula de ciudadanía N° 1003741780, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Diseño de una planta transportable y optimización del proceso de mezcla para la generación de nanopartículas metálicas como proceso de recuperación de suelos cacaoteros contaminados con cadmio"** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 24 de Julio de 2020

Perugachi Isizan, Pedro Miguel

CC: 1003741780



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Perugachi Isizan Pedro Miguel**, con cédula de ciudadanía N° 1003741780, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"Diseño de una planta transportable y optimización del proceso de mezcla para la generación de nanopartículas metálicas como proceso de recuperación de suelos cacaoteros contaminados con cadmio"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 20 de Julio de 2020

Perugachi Isizan, Pedro Miguel

CC: 1003741780

## **Dedicatoria**

Primero voy a dedicar este trabajo a Dios por permitirme estar en este importante punto de mi carrera, por darme la salud para lograr mis metas.

A mi familia por darme su apoyo incondicional y haberme forjado como la persona que soy actualmente.

A mis amigos con los que he compartido todo este tiempo porque han sido un soporte en los buenos y malos momentos presentados.

Miguel Perugachi

## **Agradecimiento**

Agradezco a Dios por brindarme su apoyo en todos los momentos y otorgarme la fuerza y sabiduría para superar las adversidades presentadas en mi vida.

A mi familia pero especialmente a mi madre por brindarme el apoyo incondicional durante todo este tiempo para alcanzar las metas propuestas.

Al CENCINAT por la confianza recibida para la generación del proyecto de investigación.

A mis docentes y compañeros ya que fueron los que contribuyeron significativamente a lo largo de mi etapa estudiantil.

Miguel Perugachi

## Índice de Contenidos

Dedicatoria .....	6
Agradecimiento .....	7
Índice de Contenidos.....	8
Índice De Tablas .....	12
Índice De Figuras .....	14
Resumen.....	19
Abstract.....	20
Capítulo 1: Generalidades .....	21
Antecedentes.....	21
Justificación e importancia .....	26
Área de influencia .....	27
Objetivos.....	27
Objetivo General.....	27
Objetivos Específicos.....	27
Alcance.....	28
Capítulo 2: Marco Teórico .....	29
Técnicas de remediación de suelos cacaotero.....	29
Metodología para inmovilizar el cadmio .....	30
Factores importantes a considerar en el diseño.....	32
Descripción del proceso.....	32

Elementos necesarios para la generación de nanopartículas metálicas	.34
Reactor con sistema de agitación	.....36
Deflectores	.....37
Impulsores	.....39
Capítulo 3: Diseño Preliminar Y Simulación Del Proceso De Mezcla	.....45
Requerimientos de agitación en los reactores	.....45
Dimensionamiento del Reactor	.....47
Sistema de agitación de la propuesta 1	.....50
Sistema de agitación de la propuesta 2	.....53
Simulación Computacional de la Dinámica de los Fluidos (CFD)	.....58
Geometría del equipo y mallado computacional	.....59
Configuración (Pre-Procesamiento)	.....64
Compilación (Procesamiento)	.....65
Resultados (Post-Procesamiento)	.....67
Selección de la propuesta adecuada	.....72
Análisis del contorno de velocidad $1 \leq \Delta t \leq 60$ segundos	.....73
Análisis de los vectores de velocidad $1 \leq \Delta t \leq 60$ segundos	.....77
Análisis de líneas de corriente (Streamlines) $1 \leq \Delta t \leq 60$ segundos	.....80
Capítulo 4: Diseño Mecánico De La Planta Industrial	.....86
Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)	.....86
Diseño Mecánico del reactor principal	.....89
Diseño del cuerpo cilíndrico del reactor	.....90

	10
Diseño de la cabeza elipsoidal inferior .....	92
Diseño de la tapa superior (Flanged Only Head) .....	95
Soporte del reactor principal .....	97
Aberturas del reactor principal .....	98
Tapa para las sales de hierro (FeCl <sub>3</sub> /FeSO <sub>4</sub> ).....	99
Resumen de diseño del reactor principal .....	101
Diseño Mecánico del reactor de mezcla.....	104
Reactor de mezcla en acero al carbono.....	104
Reactor de mezcla en plástico .....	107
Diseño del sistema de agitación del reactor principal.....	108
Diseño de las placas deflectoras (baffles).....	108
Diseño de las turbinas (RFT y PBT).....	114
Selección del motor .....	116
Selección del variador de frecuencia (VDF) .....	121
Selección del sello mecánico .....	122
Cálculo del diámetro del eje.....	124
Modelo del agitador final del reactor principal .....	127
Diseño del sistema de agitación del reactor de mezcla.....	127
Modelo del agitador final del reactor de mezcla .....	129
Selección de Equipos .....	130
Tanque de almacenamiento y filtro de agua .....	130
Bombas centrífugas.....	131
Generador Eléctrico.....	135

	11
Instrumentación necesaria .....	136
Indicador de presión .....	136
Indicador de temperatura .....	137
Indicador de nivel.....	139
Indicador de pH .....	140
Indicador de Potencial de Oxidación de Reducción (ORP) .....	141
Diseño de la estructura metálica (SKID) .....	142
Selección del material y perfiles para la estructura metálica .....	144
Simulación computacional de la estructura metálica .....	144
Determinación de las tensiones y deformaciones permisibles. ....	149
Conexión de los miembros estructurales .....	151
Capítulo 5: Análisis Económico Y Financiero .....	155
Análisis Presupuestario .....	155
Estudio de proveedores .....	158
Capítulo 6: Conclusiones Y Recomendaciones .....	161
Conclusiones .....	161
Recomendaciones .....	163
Referencias Bibliográficas .....	164
Anexo A. Diagrama de Instrumentación y Tubería (P&Id) .....	168
Anexo B. Planos.....	168
Anexo C. Hojas Técnicas de los Componentes.....	168

## Índice De Tablas

<b>Tabla 1</b> Análisis de cada componente que integra la planta industrial.....	46
<b>Tabla 2</b> Datos de diseño del reactor para la generación de nanopartículas metálicas....	48
<b>Tabla 3</b> Dimensiones del reactor en las dos propuestas.....	49
<b>Tabla 4</b> Dimensiones del sistema de agitación de la propuesta 1.....	51
<b>Tabla 5</b> Dimensiones geométricas del estator.....	52
<b>Tabla 6</b> Dimensiones del sistema de agitación de la propuesta 2.....	55
<b>Tabla 7</b> Dimensiones de las placas deflectoras.....	55
<b>Tabla 8</b> Resumen de las propuestas con sus respectivos parámetros de diseño.....	58
<b>Tabla 9</b> Datos del mallado computacional de la propuesta 1.....	61
<b>Tabla 10</b> Datos del mallado computacional de la propuesta 2.....	62
<b>Tabla 11</b> Parámetros de diseño del reactor principal.....	89
<b>Tabla 12</b> Parámetros principales del cuerpo cilíndrico del reactor.....	92
<b>Tabla 13</b> Variables de la cabeza elipsoidal inferior del reactor.....	94
<b>Tabla 14</b> Variables de la tapa solo brida superior del reactor.....	96
<b>Tabla 15</b> Aberturas que se requieren en el reactor principal.....	99
<b>Tabla 16</b> Opciones de material para diseñar el reactor de mezcla.....	104
<b>Tabla 17</b> Dimensiones del tanque INDELTRO.....	108
<b>Tabla 18</b> Dimensiones de las placas deflectoras.....	112
<b>Tabla 19</b> Parámetros de entrada para la selección del motor.....	116
<b>Tabla 20</b> Características técnicas del VDF CW700.....	122
<b>Tabla 21</b> Parámetros para la selección del sello mecánico.....	122
<b>Tabla 22</b> Especificaciones del sello mecánico Chesterton 442M.....	124

<b>Tabla 23</b> Resumen del dimensionamiento del agitador de mezcla.....	128
<b>Tabla 24</b> Resumen de algunos elementos que integran el agitador de mezcla.....	129
<b>Tabla 25</b> Medidas del tanque de almacenamiento de agua.....	130
<b>Tabla 26</b> Características del filtro de agua. ....	131
<b>Tabla 27</b> Datos de entrada para el cálculo de la bomba A. ....	132
<b>Tabla 28</b> Características de la Bomba TRUPPER.....	133
<b>Tabla 29</b> Bombas centrífugas de la marca AL-RED. ....	134
<b>Tabla 30</b> Listado de cargas eléctricas de la planta.....	135
<b>Tabla 31</b> Especificaciones del manómetro WINTERS PLP. ....	137
<b>Tabla 32</b> Especificaciones del termómetro WINTERS.....	138
<b>Tabla 33</b> Especificaciones del indicador de pH.....	140
<b>Tabla 34</b> Especificaciones del indicador de ORP.....	141
<b>Tabla 35</b> Propiedades mecánicas del Acero A36. ....	145
<b>Tabla 36</b> Propiedades mecánicas y geométricas del perfil tipo C.....	146
<b>Tabla 37</b> Propiedades mecánicas y geométricas del perfil tipo L. ....	146
<b>Tabla 38</b> Fuerzas que va a soportar la estructura metálica. ....	147
<b>Tabla 39</b> Resultados de la simulación de la estructura metálica.....	148
<b>Tabla 40</b> Tamaño mínimo de filete de soldadura.....	152
<b>Tabla 41</b> Elementos que integran la planta para la obtención de nanopartículas .....	153
<b>Tabla 42</b> Costo total estimado de la planta para la obtención de nanopartículas.....	156
<b>Tabla 43</b> Proveedores que se encontraron en el mercado local.....	158

## Índice De Figuras

<b>Figura 1</b> Distribución de tamaño de nanopartículas metálicas.....	24
<b>Figura 2</b> Histograma de nanopartículas obtenidas con agua desmineralizada...25	25
<b>Figura 3</b> Histograma de nanopartículas obtenidas con agua de lluvia.....26	26
<b>Figura 4</b> Diagrama de flujo para la producción de nanopartículas metálicas.....33	33
<b>Figura 5</b> Factores importantes para el diseño de un mezclador.....35	35
<b>Figura 6</b> Elementos que forman un mezclador.....36	36
<b>Figura 7</b> Mezcla en un tanque cilíndrico con deflector.....38	38
<b>Figura 8</b> Diseño de un deflector estándar. ....39	39
<b>Figura 9</b> Patrones de flujo Impulsores axiales (izq.), radiales (der.).....40	40
<b>Figura 10</b> Impulsor de hélices tipo marino. ....41	41
<b>Figura 11</b> Impulsor de turbina con paletas inclinadas (PBT).....42	42
<b>Figura 12</b> Impulsor de tipo hydrofoil.....43	43
<b>Figura 13</b> Impulsor de tipo turbina de flujo radial (RFT). ....44	44
<b>Figura 14</b> Esquema primitivo de los componentes principales que integran la planta para generación de nanopartículas: (1) Reactor principal, (2) Mezclador y (3) Reservorio de agua.....	46
<b>Figura 15</b> Diseño del reactor de la propuesta 1.....50	50
<b>Figura 16</b> Diseño del agitador de la propuesta 1.....52	52
<b>Figura 17</b> Diseño del reactor de la propuesta 2.....54	54
<b>Figura 18</b> Diseño del agitador de la propuesta 2.....56	56
<b>Figura 19</b> Número de Re vs. Número de bombeo en relación D/T.....57	57
<b>Figura 20</b> Geometría de las propuestas en ANSYS CFD.....60	60

<b>Figura 21</b> Condiciones de frontera en las dos propuestas. ....	60
<b>Figura 22</b> Mallado computacional del reactor de la propuesta 1. ....	61
<b>Figure 23</b> Mallado computacional del reactor de la propuesta 2. ....	62
<b>Figura 24</b> Espectro de calidad de oblicuidad y ortogonalidad. ....	63
<b>Figure 25</b> Calidad de malla de las 2 propuestas. ....	63
<b>Figura 26</b> Gráfica de la escala residual de la simulación. ....	66
<b>Figura 27</b> Vectores de velocidad de la propuesta 1 y 2. ....	67
<b>Figura 28</b> Comparación del grado de homogeneización de la mezcla. ....	68
<b>Figura 29</b> Contornos de velocidad de la propuesta 1. ....	69
<b>Figura 30</b> Contornos de velocidad de la propuesta 2. ....	69
<b>Figura 31</b> Líneas de corriente (streamlines) de la propuesta 1. ....	70
<b>Figure 32</b> Líneas de corriente (streamlines) de la propuesta 2. ....	71
<b>Figura 33</b> Energía Cinética Turbulenta de la propuesta 2 y propuesta 1. ....	72
<b>Figure 34</b> Contornos de velocidad para t=1 segundo. ....	73
<b>Figura 35</b> Contornos de velocidad para t=10 segundos. ....	73
<b>Figura 36</b> Contornos de velocidad para t=20 segundos. ....	74
<b>Figura 37</b> Contornos de velocidad para t=30 segundos. ....	74
<b>Figura 38</b> Contornos de velocidad para t=40 segundos. ....	75
<b>Figura 39</b> Contornos de velocidad para t=50 segundos. ....	75
<b>Figura 40</b> Contornos de velocidad para t=60 segundos. ....	76
<b>Figura 41</b> Vectores de velocidad para t=1 segundo. ....	77
<b>Figura 42</b> Vectores de velocidad para t=10 segundos. ....	77

<b>Figura 43</b> Vectores de velocidad para t=20 segundos.....	78
<b>Figura 44</b> Vectores de velocidad para t=30 segundos.....	78
<b>Figura 45</b> Vectores de velocidad para t=40 segundos.....	79
<b>Figura 46</b> Vectores de velocidad para t=50 segundos.....	79
<b>Figura 47</b> Vectores de velocidad para t=60 segundos.....	80
<b>Figura 48</b> Líneas de corriente (streamlines) para t=1 segundo. ....	81
<b>Figura 49</b> Líneas de corriente (streamlines) para t=10 segundos. ....	81
<b>Figura 50</b> Líneas de corriente (streamlines) para t=20 segundos. ....	82
<b>Figura 51</b> Líneas de corriente (streamlines) para t=30 segundos. ....	82
<b>Figura 52</b> Líneas de corriente (streamlines) para t=40 segundos. ....	83
<b>Figura 53</b> Líneas de corriente (streamlines) para t=50 segundos. ....	83
<b>Figura 54</b> Líneas de corriente (streamlines) para t=60 segundos. ....	84
<b>Figura 55</b> Diagrama P&ID de la planta para la generación de nanopartículas. ...	86
<b>Figura 56</b> Recipiente sin anillo de refuerzo.....	91
<b>Figura 57</b> Identificación de variables de una cabeza elipsoidal.....	94
<b>Figura 58</b> Identificación de variables de una tapa solo brida (FOH).....	95
<b>Figura 59</b> Desplazamiento total máxima de la tapa superior. ....	96
<b>Figura 60</b> Esfuerzo resultante por Von-Mises de la tapa superior.....	97
<b>Figura 61</b> Medidas para ángulos como soportes del recipiente.....	98
<b>Figure 62</b> Soportes del reactor principal.....	99
<b>Figura 63</b> Cierre de contenedores para diversas aplicaciones. ....	100
<b>Figura 64</b> Tapa para el ingreso de las sales de hierro.....	100

<b>Figura 65</b>	Tanque de mezcla de 200 litros de plástico.....	107
<b>Figure 66</b>	Punto de aplicación de la fuerza que actúa sobre los deflectores.....	109
<b>Figure 67</b>	CD frente al cociente entre el ancho y la longitud.....	110
<b>Figura 68</b>	Ubicación de las placas deflectoras en el reactor.....	113
<b>Figura 69</b>	Deformación máxima de la placa deflectora.....	113
<b>Figura 70</b>	Turbina de flujo axial. ....	114
<b>Figura 71</b>	Turbina de flujo radial.....	114
<b>Figura 72</b>	Agitador con los 2 tipos de turbinas en el reactor principal.....	116
<b>Figura 73</b>	Número de potencia para distintos impulsores. ....	118
<b>Figura 74</b>	Formas constructivas de motores eléctricos en montaje vertical. ....	119
<b>Figura 75</b>	Motores eléctricos de la marca FELM. ....	120
<b>Figura 76</b>	Dimensiones del motor tipo V1. ....	120
<b>Figura 77</b>	Variador de frecuencia CW700 .....	121
<b>Figura 78</b>	Ubicación del sello mecánico en el reactor.....	123
<b>Figura 79</b>	Sello mecánico 442M partido para mezcladores. ....	123
<b>Figura 80</b>	Representación de las cargas que está sometido el eje.....	125
<b>Figura 81</b>	Esfuerzo resultante por Von-Mises en el eje del agitador.....	126
<b>Figura 82</b>	Agitador del reactor principal.....	127
<b>Figura 83</b>	Esquema del sistema de agitación en el reactor de mezcla. ....	128
<b>Figura 84</b>	Agitador del reactor de mezcla.....	129
<b>Figura 85</b>	Tanque de almacenamiento de agua de 600 litros.....	130
<b>Figura 86</b>	Filtro de agua para el tanque de almacenamiento. ....	131

<b>Figura 87</b> Bomba centrífuga de 1/2 HP marca TRUPPER.....	132
<b>Figura 88</b> Esquema del manifold con el número de salidas.....	133
<b>Figura 89</b> Electrobombas de la marca AL-RED.....	135
<b>Figura 90</b> Generador marca LONCIN modelo LC13000.....	136
<b>Figura 91</b> Manómetro WINTERS PLP. ....	137
<b>Figura 92</b> Termómetro de la marca WINTERS.....	138
<b>Figura 93</b> Medidor de nivel de la marca VALSUM. ....	139
<b>Figura 94</b> Especificaciones de los diferentes tipos de nivel. ....	139
<b>Figura 95</b> Indicador de pH tipo BL931700.....	140
<b>Figura 96</b> Indicador de ORP tipo BL92700. ....	141
<b>Figura 97</b> Distribución preliminar de los equipos en la camioneta.....	142
<b>Figura 98</b> Planta Industrial en AutoCad Plant 3D.....	143
<b>Figura 99</b> Modelo preliminar de la estructura metálica (Skid).....	143
<b>Figura 100</b> Estructura metálica en Inventor 2018.....	145
<b>Figura 101</b> Estructura metálica cargada con los elementos de la planta.....	147
<b>Figura 102</b> Desplazamientos obtenidos en la estructura metálica. ....	148
<b>Figura 103</b> Tensión normal de la estructura metálica. ....	151
<b>Figura 104</b> Esfuerzo cortante máximo de la estructura metálica.....	151
<b>Figure 105</b> Vista frontal de la planta industrial.....	154
<b>Figura 106</b> Vista posterior de la planta industrial.....	154

## Resumen

La generación de nanopartículas para ser aplicadas en biorremediación de suelos contaminados se ha realizado hasta la fecha limitándose a condiciones de laboratorio, sin embargo para realizar aplicaciones de gran impacto se requiere una adaptación a mayor escala del procedimiento. Para lograr este objetivo se ha diseñado una planta industrial transportable para la generación de 300 litros de nanopartículas metálicas. La planeación y la ejecución de la investigación se basó en 4 etapas: a) Detalle del procedimiento de preparación de las nanopartículas metálicas y parámetros de diseño que se utilizarán. b) El análisis de la dinámica computacional de los fluidos (CFD) del reactor principal en el cual se simularon dos propuestas para el sistema de agitación comparando variables como Líneas de flujo, Energía Cinética Turbulenta y Contornos de velocidad de la mezcla. c) El diseño conceptual de la planta y de detalle de los reactores según ASME Sección VIII div. I, incluye selección de equipos e instrumentación. En esta etapa también se diseña la estructura metálica soporte (SKID) la cual garantiza la facilidad en el manejo y la movilización de la planta. d) Estudio de costos y de proveedores a fin de que se pueda construir e implementar la planta dentro de los plazos y presupuesto establecido. Todo el diseño se realizó guiándose en metodologías teóricas y las buenas recomendaciones prácticas, por consiguiente el resultado de cada una de las etapas aporta la suficiente información teórica-técnica para el desarrollo del proyecto.

### Palabras Claves:

- **PLANTA INDUSTRIAL**
- **NANOPARTÍCULAS**
- **DINÁMICA COMPUTACIONAL DE LOS FLUIDOS (CFD)**

### **Abstract**

The generation of nanoparticles to be applied in bioremediation of contaminated soils has been carried out to date limiting itself to laboratory conditions, however, to perform high-impact applications requires a larger-scale adaptation of the procedure. To achieve this goal has been designed a transportable industrial plant for the generation of 300 liters of metallic nanoparticles.

The planning and implementation of the research were based on four stages: a) Detail of the procedure for the preparation of the metallic nanoparticles and design parameters to be used. b) The analysis of the computational fluids dynamics (CFD) of the main reactor in which simulated two proposals for the agitation system for comparing variables such as Flow Lines, Turbulent Kinetic Energy, and Mixing Speed Contours. c) The conceptual design of the plant and detail of the reactors according to ASME Section VIII div. I, include selection of equipment and instrumentation. At this stage, the metallic support structure (SKID) also was designed for guarantees the ease in the handling and mobilization of the plant. d) Study of costs and suppliers with the final that the plant can be built and implemented within the timeframes and budget established. The entire design was carried out guided by theoretical methodologies and good practice recommendations, therefore the result of each of the stages provides sufficient theoretical-technical information for the development of the project.

#### **Key Words:**

- **INDUSTRIAL PLANT**
- **NANOPARTICLES**
- **COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)**

## Capítulo 1: Generalidades

En este capítulo se prevé revisar la necesidad que existe en desarrollar una planta industrial para la elaboración de nanopartículas metálicas como proceso de remediación de suelos cacaoteros contaminados con cadmio. Se menciona la relevancia del trabajo y el área de influencia que se verá beneficiada, así como también se definen los objetivos propuestos y se resalta el alcance del proyecto.

### Antecedentes

Las investigaciones sobre contenidos de cadmio en suelos cacaoteros comienzan en 1992, cuando se cuantifica los contenidos del metal en el sistema suelo-cacao de varias zonas del Ecuador.

En el 2003 se evalúa la presencia de metales contaminantes en los cultivos de exportación: cacao, café, banano, palma africana y la repercusión en su calidad. Se colectaron muestras a 1,0 km de distancia de posibles fuentes de contaminación y los resultados indicaron la presencia de elevados contenidos de cadmio (Cd) en un suelo de la provincia de El Oro (5,25 mg/kg de Cd) y en un suelo de la provincia de Los Ríos (2,08 mg/kg de Cd). Los mayores valores de Cd potencialmente asimilables, fueron encontrados en los suelos de El Oro y Los Ríos con 3,94 y 1,35 mg/kg, respectivamente. En este estudio además se reportó que la secuencia de acumulación del elemento metálico en los tejidos del cacao fue en: raíz > tallo > hojas = cáscara > almendra. (Felix, 2002)

El informe 2007 del Banco Central del Ecuador sostiene que el sector agropecuario para el año 2007 creció en un 4,2%. Esta situación favorable se debe principalmente al incremento del 43% en las exportaciones de cacao. El Ecuador es el primer productor mundial de este cultivo fino y de aroma (produce más del 60% de la

producción mundial), utilizado en la fabricación de chocolates de alta calidad y de tipo gourmet.

Sin embargo, las exportaciones del cacao fino de aroma hacia los mercados Europeos, se ve amenazado por indicios de contaminación de metales pesados como el cadmio (Cd) en las almendras de cacao exportable, en niveles superiores a los permitidos por Normativas alimentarias de la Comunidad Europea. La Unión Europea ha establecido como límite máximo 0,6 mg/kg de cadmio (Cd) en el chocolate a base de cacao por los efectos adversos en los riñones, huesos y sistemas reproductivos de los seres humanos. (Comission European Amending, 2018)

Se considera que las fuentes de contaminación de cadmio pueden provenir de forma natural, mediante las erupciones volcánicas, la mineralización del material parental o inducidas por el hombre (antropogénicas), donde sobresale las explotaciones de minas, quemas de basuras urbanas, uso de lodos urbanos en la agricultura, agroquímicos, gases provenientes de las industrias, quema de combustibles fósiles, entre estos el carbón, contaminación por derivados del petróleo al secar el cacao en carreteras, etc.

En el 2008 con el auspicio de GTZ, COPEI y ANECACAO, se desarrolló el proyecto "Monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas, y alternativas de control". Se detectaron zonas con niveles de Cd que sobrepasan los niveles permisibles. Los contenidos de Cd en el grano fueron mayores valores en la cascarilla comparados con aquellos encontrados en las almendras. (Mite, 2010)

Aunque todavía no están identificadas totalmente las fuentes del cadmio en los suelos cacaoteros de Ecuador, reportan que el metal es de origen antropogénico como resultado del riego de las plantas con aguas ricas en cadmio. Igualmente, indican que el

cadmio se acumula en los 15 cm de profundidad de los suelos donde se siembra del cacao. (Chavez, 2015)

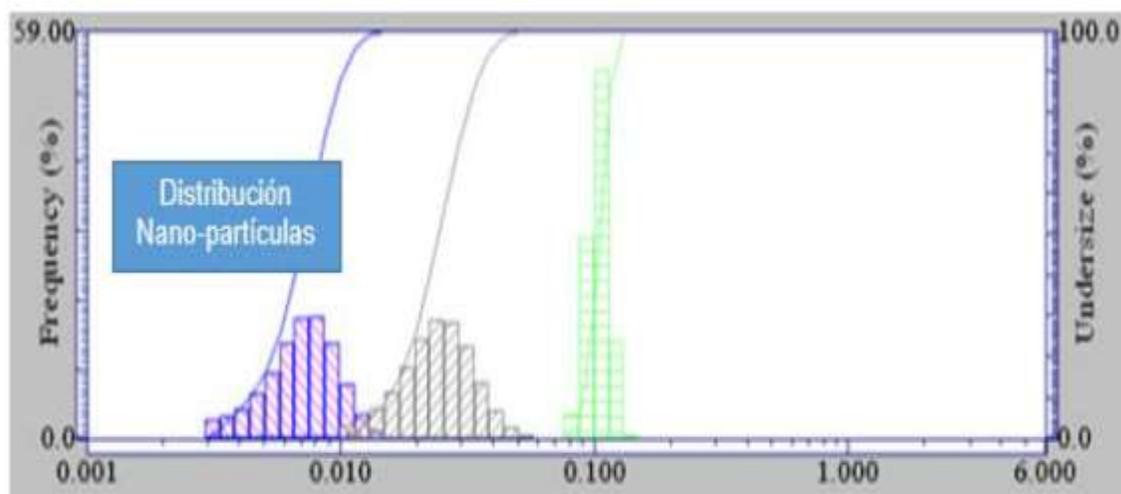
Lo anterior, ha puesto en alerta a los actores del sector, especialmente a los pequeños productores que serían los más afectados por posibles restricciones en este aspecto. Para definir medidas de prevención y remediación se hace uso de técnicas de ingeniería como: técnicas biológicas y químicas mediante la aplicación de nanomateriales o nanopartículas en la recuperación de suelos cacaoteros contaminados, con la finalidad de mitigar la incidencia económica y social que podría provocar inconvenientes en la comercialización del cacao ecuatoriano por los altos índices de contenido de cadmio en la almendra.

Existen varios estudios previos sobre la generación de nanopartículas uno de ellos es la investigación de (García, 2014), en la cual lograron la formación de 3 litros de nanopartículas utilizando instrumentos de laboratorio y aplicando un proceso de generación de hierro cero-valente.

En la Figura 1 se muestra los resultados de la experimentación y se observa que el tamaño de las nanopartículas se encuentran dentro del rango de 0-100 nm con un promedio en su tamaño de 73 nm y una desviación estándar de 22 nm.

**Figura 1**

*Distribución de tamaño de nanopartículas metálicas*



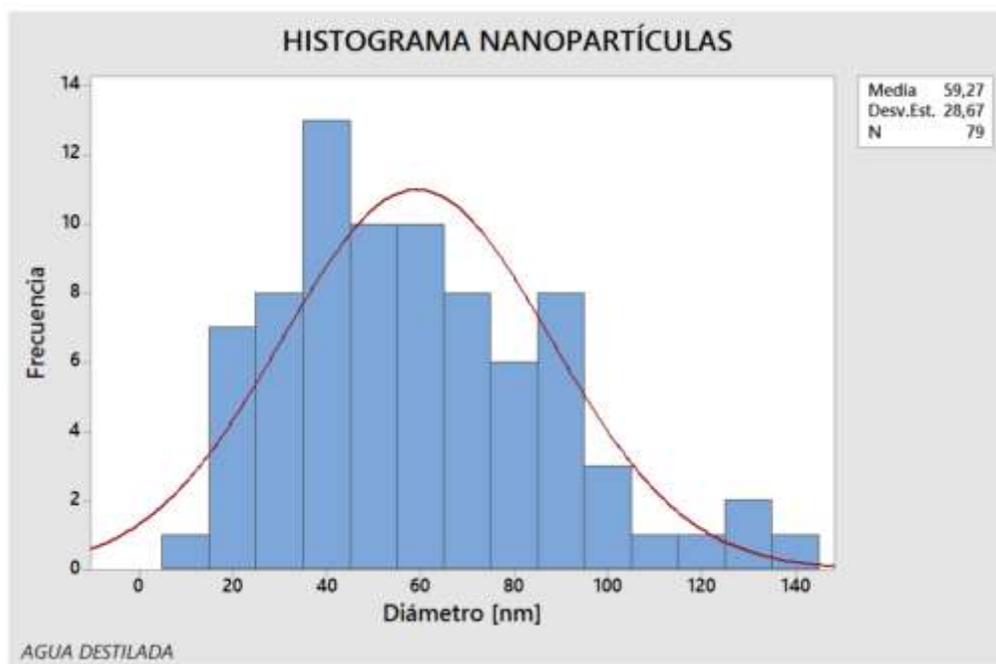
*Nota. Fuente: (García, 2014)*

En la investigación de (Revelo, 2016), utilizando los mismos instrumentos y equipos de laboratorio que se utilizó en la investigación anterior obtuvieron la formación de 4 litros de nanopartículas pero modificaron el sistema de corte, lo cual les hizo obtener mejores resultados en el tamaño de las nanopartículas.

Experimentaron con agua desmineralizada y con agua de lluvia para comparar con la cual se obtiene nanopartículas de mejor tamaño. En la Figura 2 se muestra los resultados de la experimentación con agua desmineralizada y se observa que el tamaño de las nanopartículas se encuentran dentro del rango de 0-140 nm con un promedio en su tamaño de 60 nm y una desviación estándar de 29 nm.

**Figura 2**

*Histograma de nanopartículas obtenidas con agua desmineralizada.*



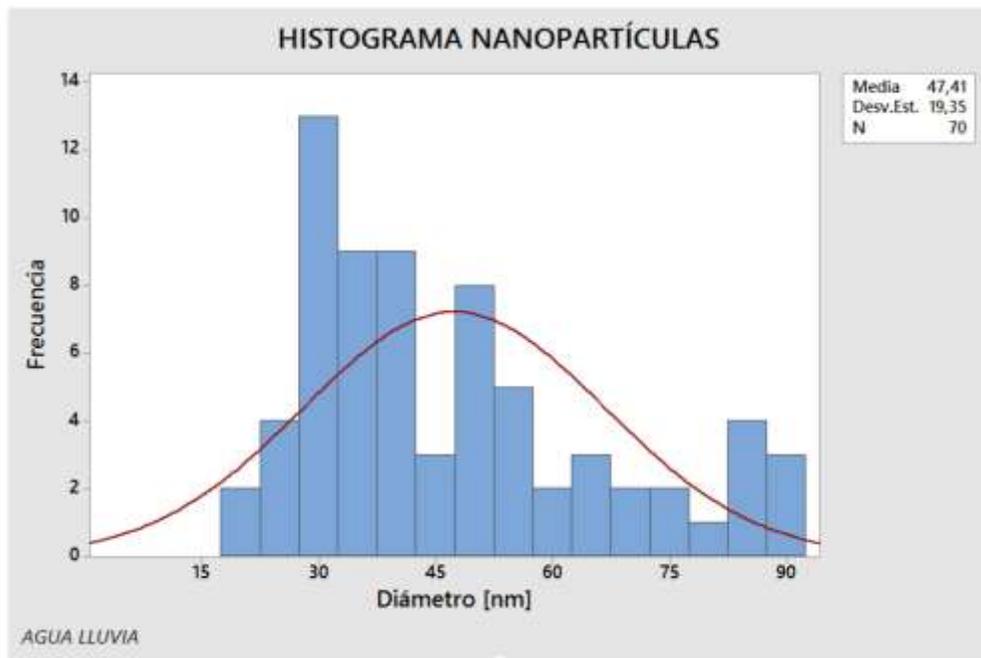
*Nota. Fuente: (Revelo, 2016)*

En la Figura 3 se muestra los resultados de la experimentación con agua de lluvia y se observa que el tamaño de las nanopartículas se encuentran dentro del rango de 0-90 nm con un promedio en su tamaño de 48 nm y una desviación estándar de 20 nm.

Determinaron que los tiempos de mezcla influyeron en la generación de nanopartículas ya que fueron necesarios seis ensayos, para que obtuvieran resultados satisfactorios, también utilizaron el proceso de generación hierro cero-valente.

**Figura 3**

*Histograma de nanopartículas obtenidas con agua de lluvia.*



*Nota.* Fuente: (Revelo, 2016)

### **Justificación e importancia**

En el contexto mencionado anteriormente, es imperativo desarrollar materiales para dosificarlos en los suelos que tienen concentraciones de cadmio mayores al criterio de calidad de suelo. Por tal motivo el proyecto de investigación del CENCINAT propone utilizar las extraordinarias propiedades que tienen las nanopartículas multicomponente para degradar/inmovilizar/reducir contaminantes. (Cumbal L. , 2018)

El procedimiento de preparación de las nanopartículas metálicas perfeccionado en el laboratorio será llevado a un prototipo de campo de mayor escala a fin de demostrar que las nanopartículas mantienen las mismas propiedades, independientemente del volumen de trabajo.

La importancia de la investigación radica en que los estudios realizados para la generación de nanopartículas metálicas hasta la fecha se limitan a volúmenes pequeños y utilizando equipos e instrumentos de laboratorio, sin embargo en esta investigación se va a desarrollar el diseño de una planta industrial para obtener 300 litros de nanopartículas, esto se logrará aplicando los conocimientos ingenieriles que fueron adquiridos a lo largo de la carrera de Ingeniería Mecánica.

### **Área de influencia**

El área de influencia serían las zonas cacaoteras del país como son: El Oro, Los Ríos y Esmeraldas.

### **Objetivos**

#### **Objetivo General.**

Diseñar una planta industrial transportable para la generación de nanopartículas metálicas como método de recuperación de suelos cacaoteros contaminados con cadmio.

#### **Objetivos Específicos.**

- Optimizar el proceso de mezcla de la investigación de (Revelo, 2016) adaptando a un volumen de trabajo de  $0.5 m^3$ .
- Diseñar los componentes que integran la planta industrial, así como también seleccionar equipos e instrumentos necesarios para la generación de nanopartículas.
- Establecer el presupuesto e identificar proveedores para realizar una adecuada inversión económica y de tiempo.

**Alcance**

Cubre el análisis técnico de la dinámica computacional de los fluidos (CFD) del reactor y se realiza la comparación de dos propuestas distintas para el sistema de agitación que permitirá obtener datos para la justificación y validación del diseño del reactor y comparación de algunas variables como: Líneas de flujo, Energía Cinética Turbulenta, para la generación de nano partículas metálicas,

Además se incluye el diseño mecánico, en el cual se elaborará una memoria de cálculo donde consta el diseño conceptual y de detalle de los reactores según ASME Sección VIII div. I, también incluye la elección de equipos e instrumentación adecuada para la obtención de datos de los reactores. En esta etapa también se va a diseñar la estructura metálica soporte (SKID) según la AISC.

La fabricación y las pruebas de campo están fuera del alcance de la presente investigación.

## Capítulo 2: Marco Teórico

### Técnicas de remediación de suelos cacaotero

Existen diferentes tecnologías disponibles para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados, tanto in situ como ex situ. Los métodos comúnmente usados tales como excavación del suelo, encapsulación, lavado, vitrificación, entre otros, no sólo son costosos en términos económicos y energéticos, sino que también suelen ser perjudiciales para el suelo. (Michalkova, y otros, 2014)

La nanorremediación es una tecnología emergente de aplicación in situ que puede emplearse para inmovilizar y/o degradar contaminantes y, por ende, reducir la movilidad y la biodisponibilidad de los mismos. (Rathor, Chopra, & Adhikari, 2017). Las nanopartículas más estudiadas en procesos de descontaminación son las de hierro con valencia cero (nZVI). (Stefaniuk, Oleszczuk, & Ok, 2016)

Según (Mallampati, 2013) reportan el uso de una mezcla de nano-Fe/Ca/CaO, como un tratamiento de inmovilización en suelos contaminados con metales pesados (As, Cd, Cr y Pb) y su separación.

El grupo de investigación de la ESPE ha tratado suelos contaminados con metales pesados provenientes de la minería, empleando nanopartículas multicomponente (FeOx/FeS). En el estudio, todos los metales pesados fueron inmovilizados en la matriz de suelo en valores superiores al 90%. Además, los resultados indican que la inmovilización de los metales tóxicos en el suelo fue exitosa y que éstos no se liberan cuando fluye agua lluvia, agua potable o agua desmineralizada a través del suelo. Sin embargo, la lixiviación de metales pesados es moderada cuando se usa agua acidificada como líquido de extracción. (Cumbal, Ruiz, & Abril, Biosynthesis of Multicomponent Nanoparticles with Extract of Mortiño (*Vaccinium floribundum* Kunth)

Berry: Application on Heavy Metals Removal from Water and Immobilization in Soils., 2018)

### **Metodología para inmovilizar el cadmio**

De acuerdo al proyecto de investigación de “Desarrollo y aplicación de nanomateriales en la recuperación de suelos cacaoteros contaminados con cadmio”, el procedimiento de preparación de las nanopartículas metálicas que fue perfeccionado en el laboratorio será empleado en las aplicaciones en invernadero en conjunto con el tratamiento que haya generado los mejores resultados en la captura de cadmio libre. Estos métodos serán escalados en un prototipo de campo a fin de demostrar que la nueva técnica es más eficaz y rápida comparada con las técnicas convencionales.

Para inmovilizar el cadmio en suelos cacaoteros, es necesario realizar la caracterización físico-química de éstos, la experimentación en el laboratorio de procedimientos para la captura del cadmio y otros metales pesados y la instalación de un prototipo para aplicar las nanopartículas en invernadero y lotes en el campo.

#### **a) Preparación de las nanopartículas multicomponente**

La preparación de las nanopartículas multicomponente (NPsMC) contempla el siguiente procedimiento:

- 1) Mezclar cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) y sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) en relación estequiometría 3:1 respectivamente y añadir agua hasta alcanzar el 94.34% del volumen total de la mezcla, el otro 5.66% es el Boro hidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ ).
- 2) Agitar la solución de cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) y sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) hasta que no exista grumos o partículas sólidas en la mezcla.
- 3) Añadir Boro hidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ ) y/o extractos frutales (cáscara de naranja, mora, mortiño, etc.) como co-reductores en la mezcla principal.

- 4) Purgar el contenido de oxígeno disuelto existente en la mezcla con nitrógeno por aproximadamente 15 minutos.
- 5) Homogenizar la mezcla con una ligera agitación durante aproximadamente media hora a temperatura ambiente.
- 6) La evolución de las nanopartículas será evidenciada por el cambio de coloración en la solución (amarillo-café a negro).

El método para la preparación de nanopartículas multicomponente está fundamentado en la investigación de (Cumbal , Debut, Delgado, Jurado , & Stael, 2015).

#### **b) Aplicación de nanopartículas en la captura del cadmio disuelto en las almendras de cacao**

La investigación se realiza a nivel de invernadero mediante fermentación en compartimentos de cajas Rohan, para mantener la temperatura, se cubrirá con sacos de yute y con frecuencia de 24 horas se removerá la mezcla para homogenizar el proceso de fermentación. Se probarán varias relaciones de nanopartículas y almendras y también se variará el tiempo de contacto entre los dos componentes.

Con los datos de la experimentación en el laboratorio se procederá al diseño, selección de partes y construcción del prototipo conformado por: i) un reactor (plástico o acero inoxidable), ii) sensores de oxígeno disuelto, sulfuro de hidrógeno, presión y temperatura, iii) plataforma para instalar los componentes de la planta y iv) bombas, válvulas y tuberías.

#### **c) Implementación de prototipo para recuperar inmovilizar cadmio en suelos cacaoteros**

Los trabajos en campo comenzarán con la verificación del contenido de cadmio y otros metales pesados en los suelos de los sitios seleccionados. El prototipo se utilizará en tres suelos cacaoteros con elevados contenidos de cadmio y se probarán

varias dosis de nanopartículas en suelos con diferente densidad y fertilidad. Por tal motivo se requiere que el prototipo tenga facilidad de movilización debido a que las pruebas se realizarán en diferentes zonas cacaoteras del país.

### **Factores importantes a considerar en el diseño.**

Se debe establecer los componentes, especificaciones y facilidades que debe prestar la planta industrial para la generación de nanopartículas metálicas.

**Componentes:** Reactor principal, tanque de almacenamiento, reactor de mezcla, motores eléctricos y bombas centrífugas.

**Especificaciones:** Material (acero inoxidable, plástico).

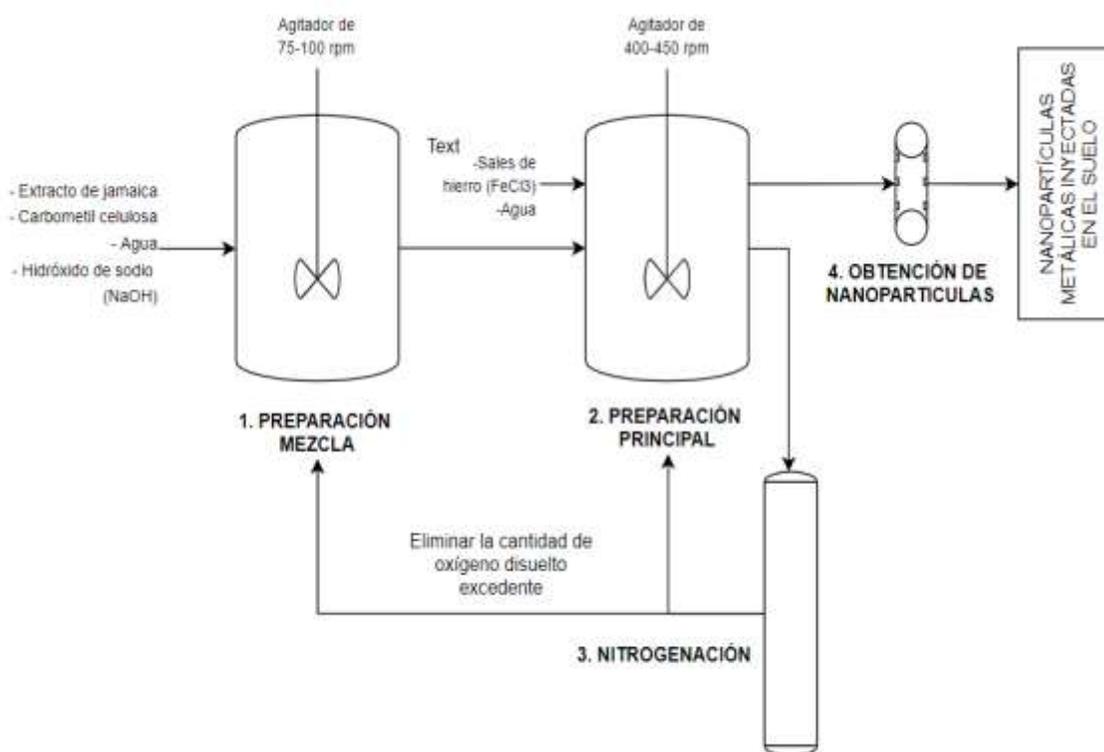
**Facilidades:** Instrumentación para temperatura, presión, pH y oxígeno disuelto, plataforma para instalar los componentes, válvulas, tuberías y transportabilidad de la planta.

### **Descripción del proceso.**

La descripción del proceso está destinada para identificar las entradas, las operaciones, los flujos y los métodos para la producción de nanopartículas.

**Figura 4**

*Diagrama de flujo para la producción de nanopartículas metálicas.*



### **1. Preparación en el Reactor de Mezcla**

El reactor de mezcla se introduce algunos reactivos como extracto de Jamaica, Carbo Metil Celulosa (CMC), Hidróxido de Sodio (NaOH) y agua filtrada que es transportada gracias a una bomba centrífuga desde el tanque de almacenamiento de agua.

El reactor de mezcla contará con un sistema de agitación que va a mezclar de 75-100 revoluciones por minuto y se agitará por aproximadamente 10 minutos con el fin de homogeneizar la mezcla.

### **2. Preparación en el Reactor Principal**

El reactor principal cumple la tarea más importante, ya que se introducen las sales de hierro ( $\text{FeCl}_3$ ) y se aplica el proceso hierro cero valente ( $n\text{Zv}$ ) para la

generación de nanopartículas. Las sales de hierro se combinan con la preparación del reactor de mezcla.

El reactor principal contará con un sistema de agitación que va a mezclar de 400-450 revoluciones por minuto y se agitará por aproximadamente 15 minutos con la finalidad de homogeneizar todos los elementos de la mezcla.

### **3. Nitrogenación**

La nitrogenación se la realiza en el reactor de mezcla y en el reactor principal para eliminar la cantidad de oxígeno disuelto excedente existente en la mezcla para la obtención de nanopartículas metálicas.

### **4. Obtención de nanopartículas metálicas**

En esta etapa las nanopartículas metálicas serán transportadas desde el reactor principal hacia un manifold, mangueras tiene un regulador de flujo para cada una, con la finalidad de realizar la inyección de las nanopartículas variando parámetros de presión y caudal en los suelos cacaoteros contaminados con cadmio.

#### **Elementos necesarios para la generación de nanopartículas metálicas**

Como se mostró anteriormente los elementos principales para la generación de nanopartículas son los mezcladores, por tal motivo para diseñar un mezclador de fluidos que aborde las necesidades específicas del proceso, se debe considerar los siguientes 4 factores.

**Figura 5**

*Factores importantes para el diseño de un mezclador.*



*Nota.* Agitadores Dinámicos

### **Factor # 1 - Tipo y volumen del recipiente**

Esto determina la cantidad de líquido que puede contener el recipiente. Esto es importante porque determinará el tamaño y la posición del mezclador de fluido y su montaje.

### **Factor # 2 - Viscosidad**

Esto es "espesor" o "fricción interna" de su fluido. Es importante porque determinará las configuraciones del impulsor y la potencia que se requiere.

### **Factor # 3 - Gravedad específica**

Esta es la densidad del sólido en comparación con el agua. Es importante porque determinará el tipo de acción de bombeo que se requiere para mezclar adecuadamente su fluido.

### **Factor # 4 - Medio ambiente y proceso**

Esta es la configuración donde tendrá lugar la mezcla. Es importante porque puede determinar el tipo de fuente de energía y acabados.

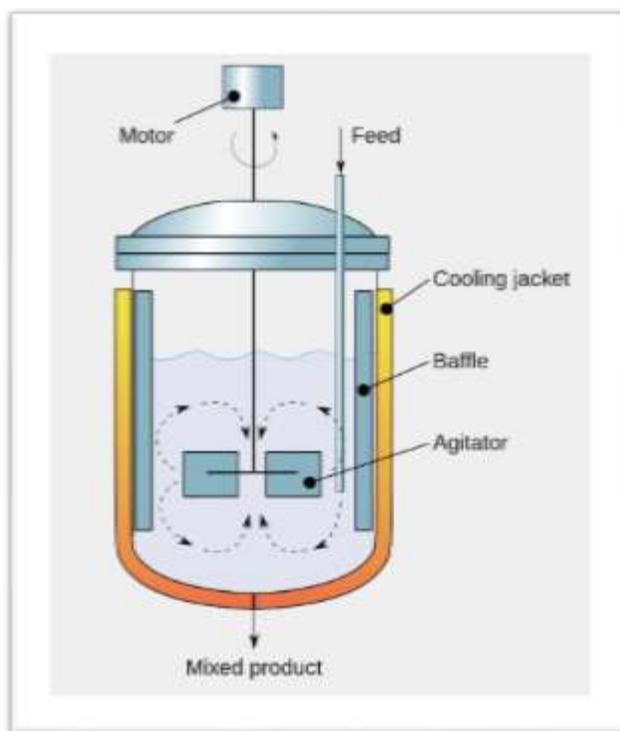
La eficiencia del mezclado depende del tipo de material que se deba mezclar, el diseño del agitador y el reactor, el régimen de mezclado y también la posición del tubo de alimentación y las condiciones de funcionamiento. (Wiley, 2004)

### Reactor con sistema de agitación

En la Figura 6 se presenta una configuración de un reactor común: un tanque cilíndrico con deflector. Si un mezclador está montado en el centro en este recipiente sin deflector, lo que se verá es un patrón de flujo muy ineficiente: las velocidades tangenciales que provienen del impulsor hacen que toda la masa del fluido gire.

### Figura 6

*Elementos que forman un mezclador.*



*Nota.* Agitadores Dinámicos

Hay tres formas de evitar los remolinos, y se los enumeró por preferencia:

1. Instalar deflectores en tanques

2. Montaje en ángulo desplazado de mezcladores
3. Montaje vertical offset de mezcladores

El uso de deflectores o técnicas de montaje descentrado generará cargas desequilibradas que actuarán en el eje del mezclador. Cuando estas cargas desequilibradas se vuelven significativas, se necesita una caja de engranajes y un cojinete agitador de servicio más pesado. Como resultado, el mezclador es más caro.

Los deflectores son la primera opción porque las cargas generadas son mucho menores que si se realiza el montaje descentrado del mezclador. Para tanques menores a 3 metros de diámetro, el montaje descentrado funcionará bien, y el costo adicional asociado con la compensación de la carga desequilibrada es mínimo. Sin embargo, para tanques más grandes, se vuelve costoso ir con el mezclador de servicio pesado, y la instalación de deflectores es más rentable.

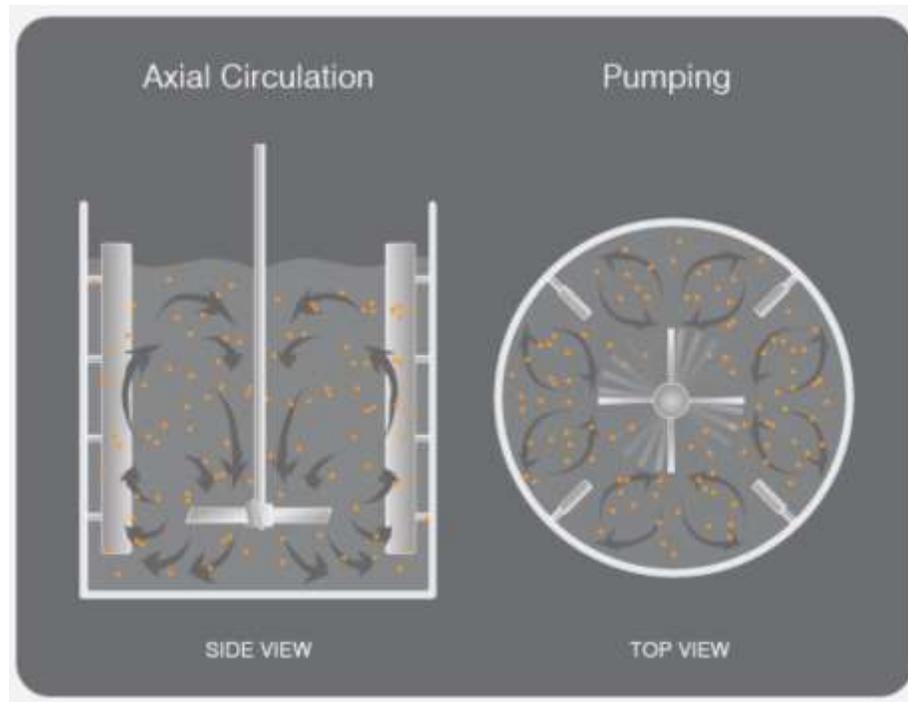
### **Deflectores**

Los deflectores son placas largas y planas que se unen al costado del tanque para evitar remolinos y promover el movimiento de fluido de arriba a abajo. Se usan más comúnmente para mezclas y suspensiones sólidas porque estas aplicaciones a menudo usan tanques verticales y cilíndricos que tienden a crear patrones de remolino, independientemente del tipo de impulsor que se use.

El patrón de flujo ilustrado en la Figura 7 muestra que el uso de deflectores da como resultado una excelente circulación de arriba a abajo y una excelente mezcla radial.

**Figura 7**

*Mezcla en un tanque cilíndrico con deflector.*



**Nota. Agitadores Dinámicos**

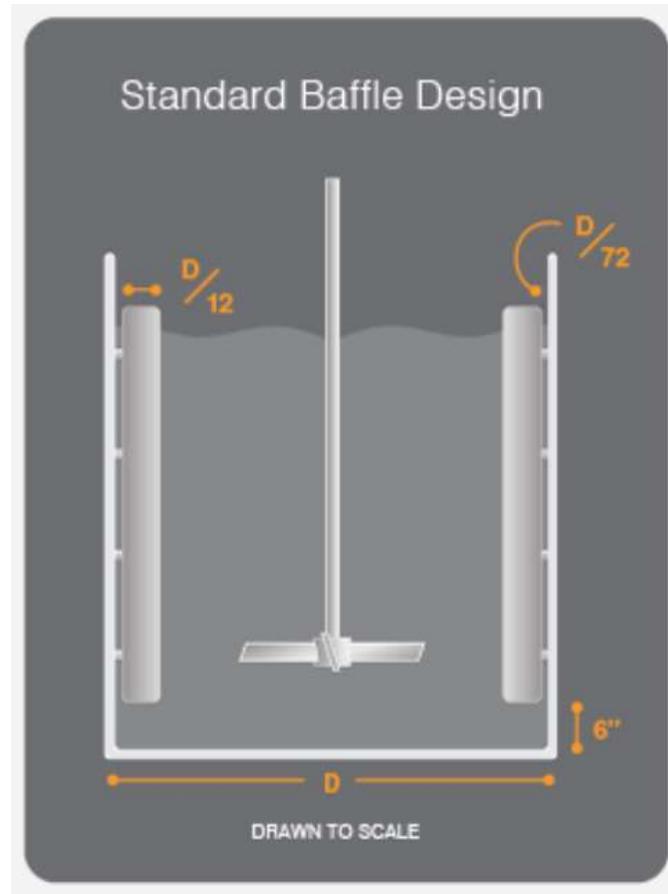
Los deflectores deben diseñarse utilizando las siguientes pautas:

- Número de deflectores = 3 a 4 (4 es ideal, pero 3 dará como resultado una mezcla suficiente). Agregar más de 4 deflectores no dará como resultado ninguna mejora significativa en la mezcla.
- Ancho =  $1/12$  del diámetro del tanque (es decir, para un tanque de 12' de diámetro, el ancho del deflector será 1')
- Longitud = comienza aproximadamente a 6 pulgadas del fondo y termina justo por encima del nivel máximo de líquido
- Posición de montaje =  $1/6$  del ancho del deflector de la pared del tanque. (es decir, se montará un deflector de 1' de ancho a 2" de la pared del tanque)

A continuación en la Figura 8 se presenta las dimensiones geométricas que debe cumplir un deflector.

### Figura 8

*Diseño de un deflector estándar.*



*Nota.* Agitadores Dinámicos

Para mezclas de viscosidad media (es decir, viscosidades superiores a 3.000 cps o números de Reynolds de 10 a 10.000), a menudo se reduce el ancho del deflector a la mitad del ancho estándar.

### Impulsores

Una clasificación básica es entre aquellos que circulan el líquido axialmente y aquellos que logran principalmente circulación radial. En breve se describirán algunas

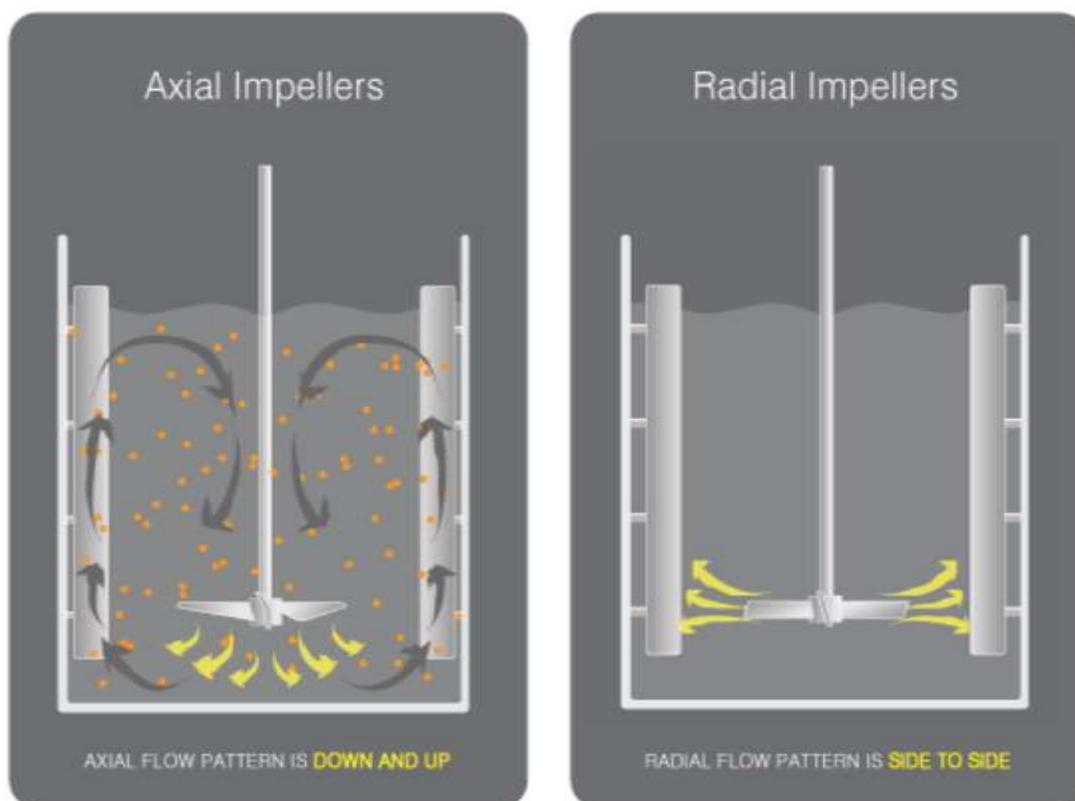
de las muchas formas de impulsores utilizados en mezclas industriales. Ahora se detallará sobre cada tipo de impulsor y sus influencias en el proceso de mezcla.

El enfoque en los impulsores se debe al hecho de que son la parte del mezclador que realiza la mezcla real: a medida que giran, crean flujo de fluido. Estos patrones de flujo son las consideraciones principales al diseñar un mezclador porque crear el patrón de flujo correcto es crítico para lograr el resultado deseado.

Los patrones de flujo más comunes en la mezcla son el flujo axial (abajo y arriba) y el flujo radial (de lado a lado). Estos patrones de flujo también describen las clases genéricas de impulsores: axial y radial, como se muestra en la Figura 9.

### Figura 9

*Patrones de flujo a) Impulsores axiales (izq.), b) Impulsores radiales (der.).*



*Nota.* Agitadores Dinámicos

### a) Impulsores de flujo axial

El bombeo axial (hacia arriba y hacia abajo) es un patrón de flujo importante porque aborda dos de los desafíos más comunes en la mezcla; suspensión sólida y estratificación. Estos son algunos de los impulsores axiales más comunes:

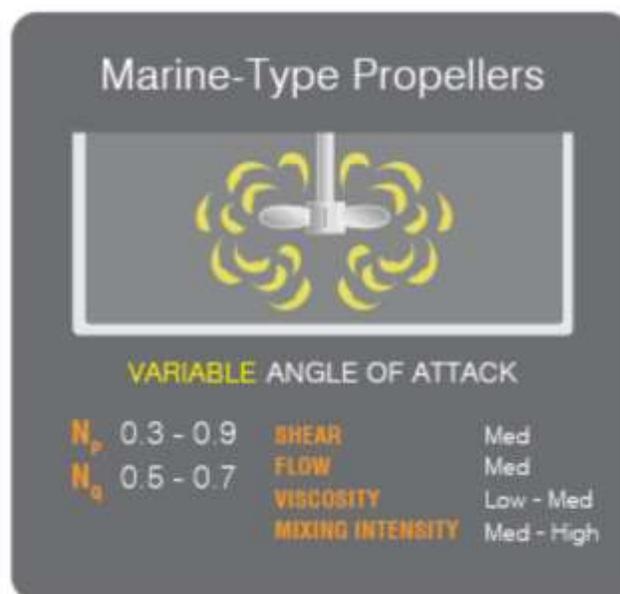
- **Hélices de tipo marino**

Comúnmente utilizado en embarcaciones marinas, las hélices se usan a menudo en pequeñas aplicaciones de mezcladores portátiles de accionamiento directo porque son económicas y eficientes. Sin embargo, en aplicaciones más grandes rara vez se usan debido a su precio y peso.

A continuación en la Figura 10 se presenta el patrón de flujo de un impulsor de hélice de tipo marino.

**Figura 10**

*Impulsor de hélices tipo marino.*



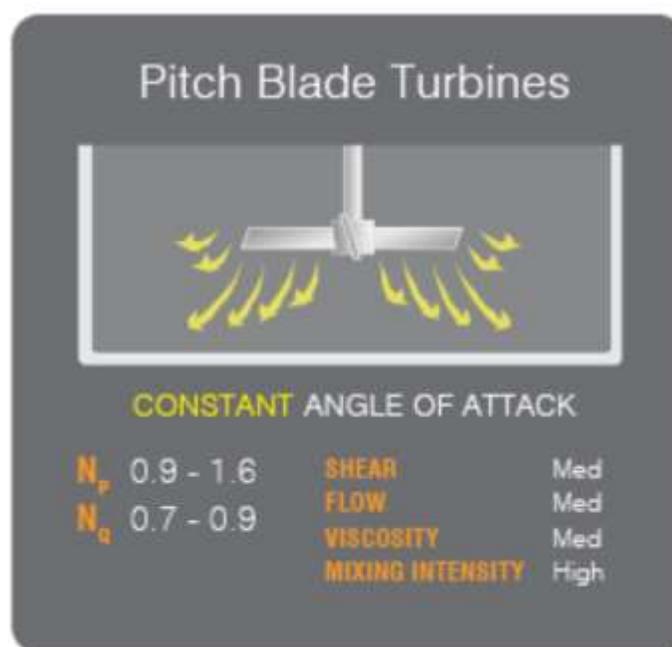
*Nota.* Agitadores Dinámicos

- **Turbina de paletas inclinadas (PBT)**

El impulsor de paletas inclinadas es el impulsor más versátil, ya que son útiles para mezclar dos o más líquidos y son efectivos en un espacio libre bajo con menos inmersión en líquidos. A continuación en la Figura 11 se presenta el patrón de flujo de un impulsor de turbina con paletas inclinadas (PBT).

**Figura 11**

*Impulsor de turbina con paletas inclinadas (PBT).*



*Nota.* Agitadores Dinámicos

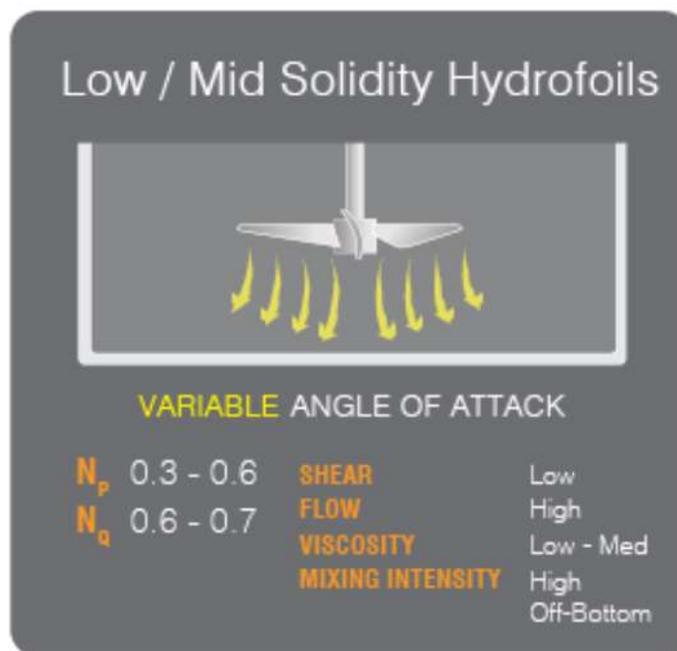
- **Impulsor Hydrofoil**

La curvatura de las paletas aumenta la eficiencia del impulsor, reduciendo su relación potencia/bombeo. Un beneficio más técnico es el flujo laminar creado por la curvatura de este impulsor. Esta curvatura reduce sustancialmente la turbulencia (cizallamiento). Es por eso que también se selecciona para aplicaciones sensibles al

cizallamiento. A continuación en la Figura 12 se presenta el patrón de flujo de un impulsor hydrofoil.

**Figura 12**

*Impulsor de tipo hydrofoil.*



*Nota.* Agitadores Dinámicos

### b) Impulsores de flujo radial

A diferencia de los impulsores axiales, los impulsores radiales se seleccionan comúnmente para una mezcla de bajo nivel o tanques alargados, además los impulsores radiales no tienen un alto flujo de rotación del tanque como los impulsores de flujo axial. Uno de los impulsores de flujo radial más utilizados son las turbinas de flujo radial (RFT).

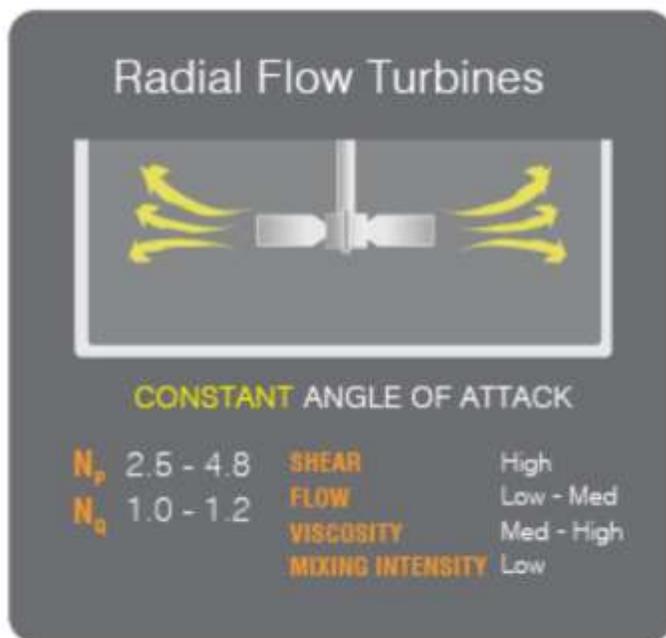
- **Turbina de flujo radial**

Por lo general, dan altas tasas de cizallamiento debido a su ángulo de ataque. También tienen un número de bombeo relativamente bajo, lo que los hace más

sensibles a la viscosidad. A continuación en la Figura 13 se presenta el patrón de flujo de un impulsor de tipo turbina de flujo radial (RFT).

**Figura 13**

*Impulsor de tipo turbina de flujo radial (RFT).*



*Nota.* Agitadores Dinámicos

Las dimensiones y disposición de los impulsores, deflectores y otros elementos internos son factores que influyen en la cantidad de energía requerida para lograr una cantidad necesaria de agitación o calidad de mezcla.

### **Capítulo 3: Diseño Preliminar Y Simulación Del Proceso De Mezcla**

En este capítulo se efectuará el dimensionamiento del reactor con los requerimientos de diseño del CENCINAT y las buenas prácticas del diseño de mezcladores, además se validará el diseño de la investigación de (Revelo, 2016), adaptándolo a un volumen de  $0.5 m^3$  y se optimizará el diseño presentando una nueva propuesta.

Asimismo se realizará la simulación numérica CFD de la mezcla en el software ANSYS FLUENT 17.0, en el Workstation de laboratorio de CAD/CAM, en el cual se verificará el comportamiento de la mezcla y se hará el respectivo análisis y comparación de algunas variables como: Líneas de flujo, Energía Cinética Turbulenta y Contornos de velocidad.

#### **Requerimientos de agitación en los reactores**

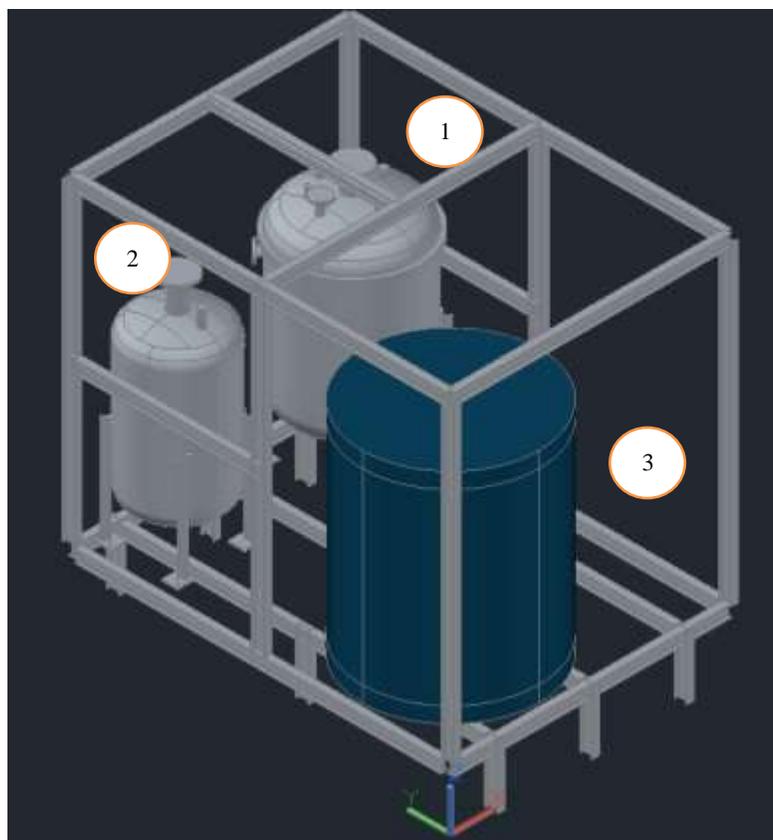
En la Figura 14 se muestra un esquema primitivo de la planta industrial y de los componentes principales que la integran.

La simulación numérica se la realizará exclusivamente del Reactor Principal, debido a que en este se debe garantizar la homogenización de la mezcla y la turbulencia necesaria para generar nanopartículas metálicas y obtener buenos resultados.

No es necesario simulación CFD en el Reactor de mezcla debido a que todos los elementos se mezclan adecuadamente y la turbulencia no es primordial, según las investigaciones en el laboratorio. (Cumbal L. , 2018)

**Figura 14**

*Esquema primitivo de los componentes principales que integran la planta para generación de nanopartículas: (1) Reactor principal, (2) Mezclador y (3) Reservorio de agua.*



En la Tabla 1 se describe cada componente del esquema primitivo y los requerimientos que se requieren para llevar a cabo la simulación.

**Tabla 1**

*Análisis de cada componente que integra la planta industrial.*

N	COMPONENTE	DETALLE	REQUIERE AGITACIÓN	VELOCIDAD DE AGITACIÓN	IMPORT. EN EL PROCESO	REQUIERE CFD
1	Reactor principal	En este se integran todos los elementos para la obtención de	SI	Moderada (400-450 rpm)	Alta	SI

N	COMPONENTE	DETALLE	REQUIERE AGITACIÓN	VELOCIDAD DE AGITACIÓN	IMPORT. EN EL PROCESO	REQUIERE CFD
		nanopartículas metálicas.				
2	Reactor de mezcla	En este reactor se integran algunos elementos como: Tiosulfato de sodio (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Extracto de jamaica + CMC+ NaOH.	SI	Bajo (75-100 rpm)	Moderada	NO
3	Tanque de plástico	En este tanque exclusivamente se almacenará agua	NO	N/A	Baja	NO

Una vez mostrada la Tabla 1 se define que la simulación numérica CFD se la realizará solo para el Reactor Principal con 2 diferentes sistemas de agitación.

### Dimensionamiento del Reactor

El reactor deberá ser diseñado en acero inoxidable por sus capacidades de resistencia a la corrosión, los ambientes húmedos, las bajas y altas temperaturas. La solución para la generación de nanopartículas se forma a temperatura ambiente y tiene un pH ácido en el reactor principal según (Cumbal , Debut, Delgado, Jurado , & Stael, 2015), es decir es una solución altamente corrosiva por tal motivo se necesita proteger el material del reactor de agentes oxidantes que pueden ocasionar corrosión.

La capacidad de circulación se divide en media, moderada y alta según las buenas recomendaciones de (Exxon Mobil, 2001).

- **Capacidad de circulación media:** Para establecer movimiento en el fluido y mezcla media con un valor de  $0.05-0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

- **Capacidad de circulación moderada:** Para mezcla con sólidos en suspensión, mezcla líquido-líquido y dispersiones. La capacidad de circulación oscila entre  $0.1-0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- **Capacidad de circulación alta:** Para reacciones de transferencia de masa, suspensión de sólidos y altas dispersiones en sistemas líquido-líquido y gas-líquido. La capacidad de circulación oscila entre  $0.3-0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A continuación se muestran los datos de diseño del reactor principal para la generación de nanopartículas en la Tabla 2, estos datos son proporcionados por el CENCINAT-ESPE.

**Tabla 2**

*Datos de diseño del reactor para la generación de nanopartículas metálicas.*

Parámetro de diseño	Valor	Unidad
Volumen de trabajo	0.5	$\text{m}^3$
Fluido de trabajo	Agua	
Material	Acero Inoxidable	
Temperatura de Operación	35	$^{\circ}\text{C}$
Presión externa de Diseño	1	atm
Presión externa de Diseño	14.7	psi
Capacidad de circulación	Moderada	
	0.2	$\text{m}^3/\text{s}$
Densidad	1000	$\text{kg}/\text{m}^3$
Viscosidad Dinámica	10.13	cPs
	0.01013	$\text{Pa}\cdot\text{s}$

A partir de estos datos se diseñó dos propuestas de reactores con su respectivo sistema de agitación. Las medidas del recipiente serán las mismas en las dos propuestas, lo que se cambiará en las dos propuestas será algunos parámetros en el sistema de agitación.

Se desarrolló dos propuestas para tener una forma de comparar y analizar el comportamiento de algunas variables esenciales para la generación de nanopartículas como: líneas de flujo, energía cinética turbulenta y contornos de velocidad, y de esa forma elegir la propuesta que presenta mejores resultados en la simulación computacional CFD. Las propuestas fueron las siguientes:

1. La primera propuesta fue desarrollada con la metodología que se utilizó en la investigación de (Revelo, 2016) con el cual se logró buenos resultados.
2. La segunda propuesta se la realizó en base a las buenas recomendaciones para el diseño de reactores con sistema de agitación de (Exxon Mobil, 2001).

La condición que tiene la planta industrial es que debe ser transportable por tal motivo las dimensiones de los reactores y todos los elementos que integran la planta se diseñan considerando el ancho, largo y altura del cajón de una camioneta estándar como espacio para la distribución de los elementos. Más adelante se muestra el diseño de la estructura metálica (SKID).

Se calcula el diámetro del reactor y la altura aplicando las siguientes fórmulas (Exxon Mobil, 2001) respectivamente:

$$T = \left( \frac{4}{\pi} * V \right)^{1/3} \quad (1)$$

$$Z = T \quad (2)$$

**Tabla 3**

*Dimensiones del reactor en las dos propuestas.*

DIMENSIONES DEL REACTOR			
Volumen del reactor	Valor	Unidad	
V=	0.5	m <sup>3</sup>	
Diámetro del reactor	Valor	Unidad	
T=	0.86	m	

DIMENSIONES DEL REACTOR			
Altura del reactor	Z=	0.85	M

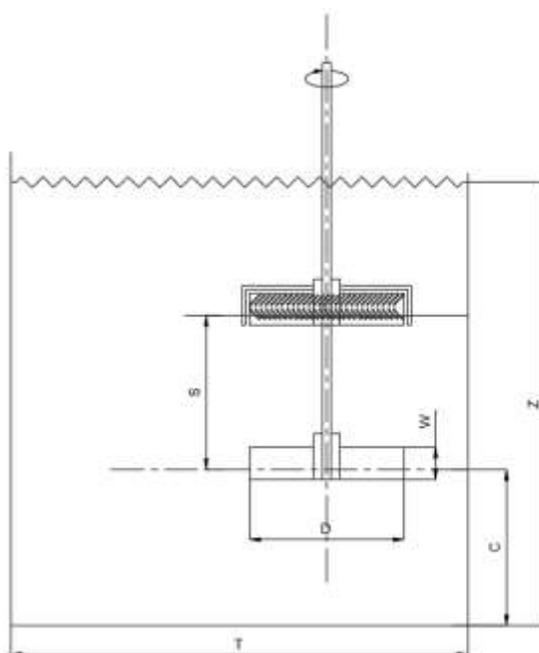
En la Tabla 3 se muestra las dimensiones que tendrá el reactor en cualesquiera de las dos propuestas, estos valores no cambiarán ya que el volumen de trabajo para las dos propuestas será el mismo.

### Sistema de agitación de la propuesta 1

En la primera propuesta se utilizó el diseño de la investigación de (Revelo, 2016), el cual consta de un sistema de agitación rotor-estator y el agitador se encuentra ubicado excéntricamente. A continuación en la Figura 15 se presenta un esquema del reactor con sus respectivas variables geométricas para la disposición del sistema de agitación.

### Figura 15

*Diseño del reactor de la propuesta 1 para la fabricación de nanopartículas.*



Las fórmulas utilizadas para obtener el valor de las variables geométricas son de (Exxon Mobil, 2001):

$$D = \frac{T}{3} \quad (3)$$

$$C = \frac{T}{3} \quad (4)$$

$$S = D \quad (5)$$

$$W = \frac{D}{8} \text{ a } \frac{D}{5} \quad (6)$$

A partir de las ecuaciones (3), (4), (5) y (6), se obtienen los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 4:

**Tabla 4**

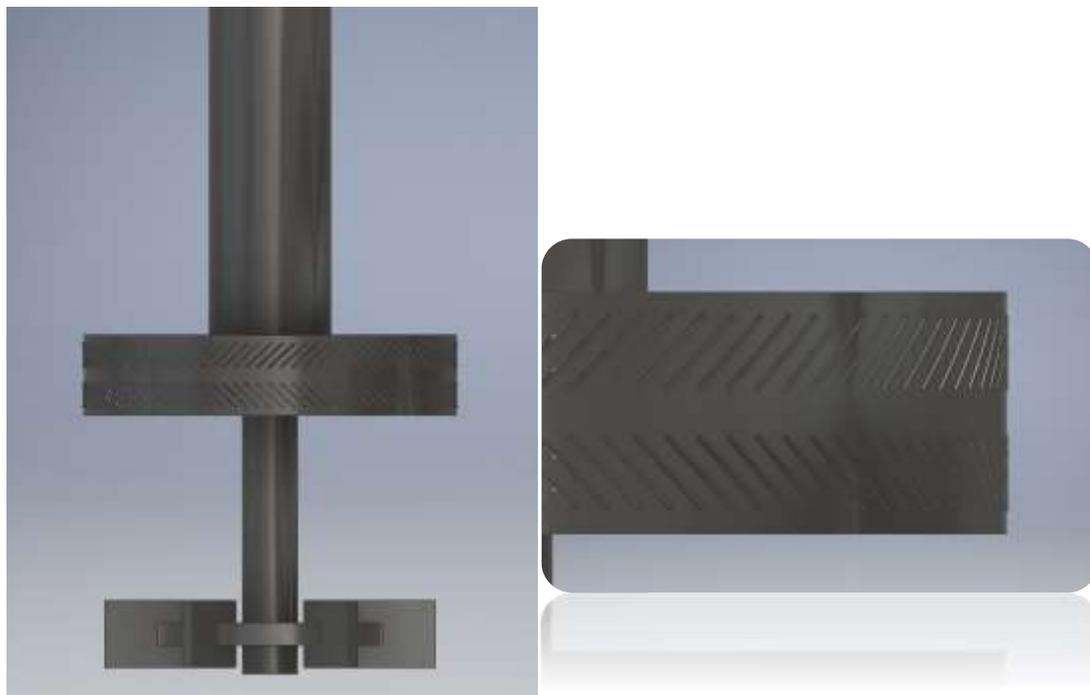
*Dimensiones del sistema de agitación de la propuesta 1.*

<b>AGITADOR</b>			
		<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Largo de la turbina	D=	0.29	m
Ancho de la turbina	W=	0.06	m
Distancia entre turbina y fondo del reactor	C=	0.29	m
Distancia entre turbinas	S=	0.29	m
Tipo de Turbina=		2*RDT	

El estator como se muestra en la Figura 16 se diseñó con ranuras diagonales y a 45°, para que el fluido al salir descargado por acción de la turbina impacte directamente con la pared del estator y de esa manera aumentar la intensidad de la turbulencia y los esfuerzos de corte. (Revelo, 2016)

**Figura 16**

*Diseño del agitador de la propuesta 1 (izq.), detalle del estator (der.).*



En la Tabla 5 se muestra las variables geométricas del estator y se consideró un espaciamiento de 2 mm entre la turbina y el estator según las buenas prácticas de diferentes investigaciones. (Wiley, 2004)

**Tabla 5**

*Dimensiones geométricas del estator.*

<b>ESTATOR</b>		
Diámetro interior=	0.302	m
Diámetro exterior=	0.314	m
Espesor de pared=	0.006	m
Ángulo de ranuras=	45°	

Es importante aclarar que la propuesta 1 se desarrolló en base a la investigación de (Revelo, 2016), y lo que se hizo es adaptarlo a un volumen de  $0.5 \text{ m}^3$ , para posteriormente simular en ANSYS CFD y validar el diseño propuesto.

Algunas consideraciones que se tomaron en cuenta para ingresar en la simulación fueron:

- El fondo del recipiente puede ser plano o elíptico.
- Sistema de agitación excéntrico.
- 2 turbinas de tipo RDT (Rushton Disk Turbine).
- Disposición de estator en la turbina superior.

### **Sistema de agitación de la propuesta 2**

La propuesta 2 del sistema de agitación se diseñó con las buenas prácticas y recomendaciones de varias investigaciones de “Diseño de agitadores” (Exxon Mobil, 2001), con la finalidad de optimizar y generar mejores resultados que la propuesta 1. En esta propuesta se añadió 4 placas deflectoras a las paredes del tanque y el agitador se encuentra ubicado concéntricamente. A continuación en la Figura 17 se presenta un esquema del reactor con sus respectivas variables geométricas para la disposición del sistema de agitación.

Las fórmulas utilizadas para obtener el valor de las variables geométricas en la propuesta 2 son las mismas ecuaciones que se mostraron anteriormente para la propuesta 1, la única diferencia es que se añaden dos ecuaciones más para el dimensionamiento de las placas deflectoras, que se muestran a continuación.

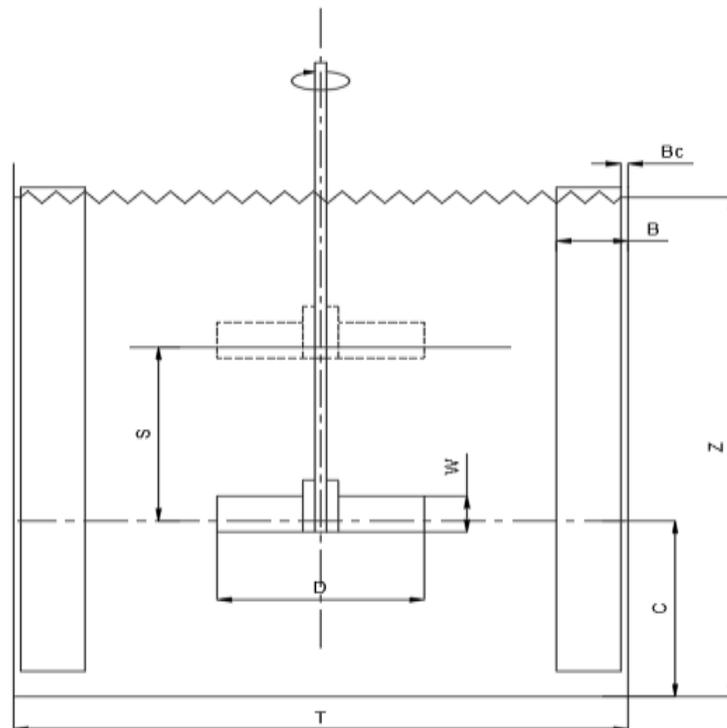
$$B = \frac{T}{12} \text{ a } \frac{T}{10} \quad (7)$$

$$Bc = \frac{T}{72} \quad (8)$$

A partir de las ecuaciones (3), (4), (5), (6), (7) y (8), se obtienen los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 6 y en la Tabla 7:

### Figura 17

*Diseño del reactor de la propuesta 2 para la fabricación de nanopartículas.*



Algunas consideraciones de la propuesta 2 que se tomaron en cuenta para ingresar en la simulación fueron:

- El fondo del recipiente puede ser plano o elíptico.
- Disposición de 4 placas deflectoras (baffles) equidistantes a 90°.
- 2 turbinas de tipo PBT (Axial) y RFT (Radial).
- Sistema de agitación concéntrico.

En la Figura 18 se observa el diseño del agitador de la propuesta 2 con las características mencionadas anteriormente.

**Tabla 6**

*Dimensiones del sistema de agitación de la propuesta 2.*

<b>AGITADOR</b>			
		<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Largo de la turbina	D=	0.29	m
Ancho de la turbina	W=	0.06	m
Distancia entre turbina y fondo del reactor	C=	0.29	m
Distancia entre turbinas	S=	0.29	m
Tipo de Turbina=		PBT	
		RFT	

**Tabla 7**

*Dimensiones de las placas deflectoras.*

<b>PLACAS DEFLECTORAS</b>			
		<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Ancho de placa	B=	0.09	m
Distancia entre placa y pared del reactor	Bc=	0.01	m

**Figura 18**

*Diseño del agitador de la propuesta 2.*



El proceso para la obtención de nanopartículas requiere dos condiciones. La velocidad del impulsor se determina con la ecuación (9).

$$\text{Primera condición} \quad Q = 0.2 \frac{m^3}{s}$$

$$\text{Segunda condición} \quad N_{Re} > 10000$$

$$N = \frac{Q}{N_q * D^3} \quad (9)$$

El valor del número de bombeo ( $N_q$ ) se lo obtiene de la Figura 19. Los valores de  $N_q$  para impulsores usados comúnmente se encuentran entre 0.4 y 0.8. (Exxon Mobil, 2001)

$$\frac{D}{T} = 0.3$$

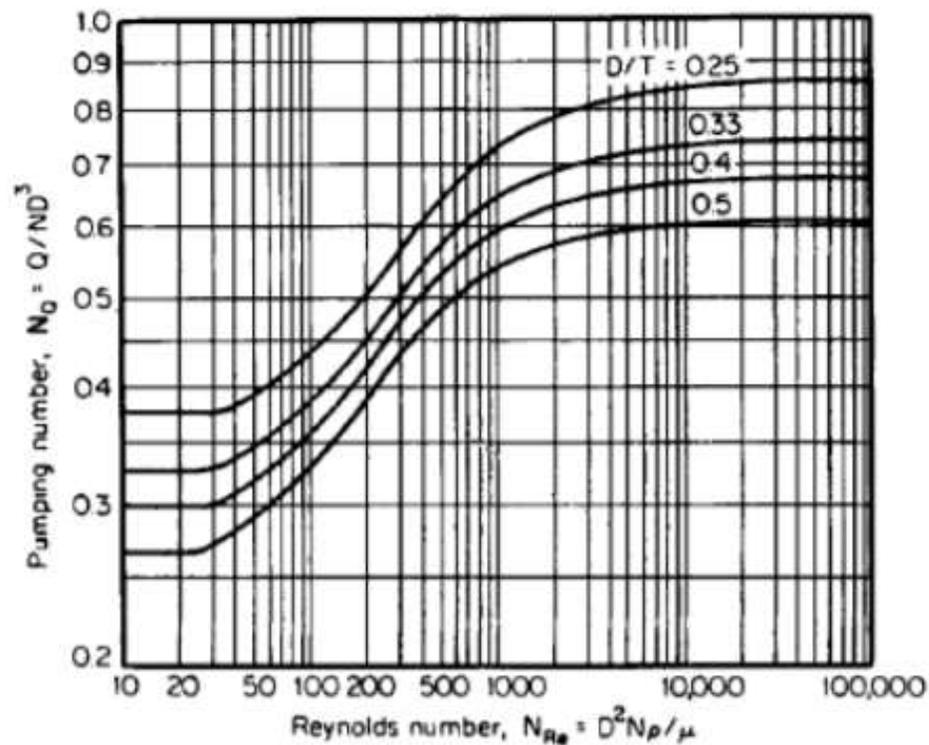
$$N_q = 0.80$$

$$N = \frac{Q}{N_q * D^3} = 7.05 \text{ rps} = 420 \text{ rpm}$$

Se determinó que cuando la turbina gira a 420 rpm el fluido está en régimen turbulento, esta es una condición necesaria para la generación de nanopartículas metálicas.

### Figura 19

Número de Re vs. Número de bombeo en relación D/T.



Nota. Fuente: (Exxon Mobil, 2001)

A continuación en la Tabla 8 se muestra el resumen de las dos propuestas con algunos parámetros de diseño, para posteriormente ingresar en el software ANSYS CFD y determinar la mejor propuesta.

**Tabla 8**

*Resumen de las propuestas con sus respectivos parámetros de diseño.*

PARÁMETROS DE DISEÑO	PROPUESTA	
	1	2
FONDO DEL RECIPIENTE	PLANO/ELÍPTICO	PLANO/ELÍPTICO
PLACAS DEFLECTORAS	NO	SI
Nº PLACAS DEFLECTORAS	N/A	4
AGITADOR	EXCÉNTRICO	CONCÉNTRICO
TIPO DE AGITADOR	TURBINA	TURBINA
TIPO DE TURBINA	RDT	RFT, PBT
Nº DE ASPAS	6	4
Nº TURBINAS	2	2
ESTATOR	SI	NO

### **Simulación Computacional de la Dinámica de los Fluidos (CFD)**

Las simulaciones dinámicas de fluidos permiten realizar diseños para compararlos con los de escala real y de esta forma evaluar proyectos sin inversiones importantes de dinero previo a la construcción de prototipos. (Ansys, 2019)

Los reactores de mezcla y los biorreactores son comunes en muchas industrias: procesamiento químico, farmacéutico, bienes de consumo, etc. Dos desafíos comunes de diseño son:

- Garantizar una alta eficiencia al minimizar el tiempo de mezcla
- Identificar el comportamiento óptimo de los sistemas de agitación.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es de gran valor para superar desafíos porque permite simular para establecer tiempos y análisis del comportamiento de la mezcla. Debido a la complejidad de los reactores de mezcla y las geometrías de los biorreactores (impulsores, ejes, deflectores, sparger, etc.), el análisis de CFD puede considerarse complejo. La dinámica de fluidos computacional de ANSYS ofrece una

solución a este desafío: una solución totalmente automatizada donde ingresan los parámetros geométricos del tanque de mezcla y las condiciones de operación.

El método usado para este tipo de simulación es el denominado turbulencia  $k$ - $\epsilon$ . Este es un modelo de dos ecuaciones en el cual una corresponde a la energía cinética de turbulencia ( $k$ ), y la otra es la disipación de la energía cinética turbulenta ( $\epsilon$ ).

Este modelo es utilizado en la presente investigación por el hecho de que para formular la función de turbulencia, consiste en derivar la ecuación exacta para  $\epsilon$ , y en encontrar aproximaciones de cierre adecuadas para la ecuación exacta que gobierna su comportamiento.

### **Geometría del equipo y mallado computacional**

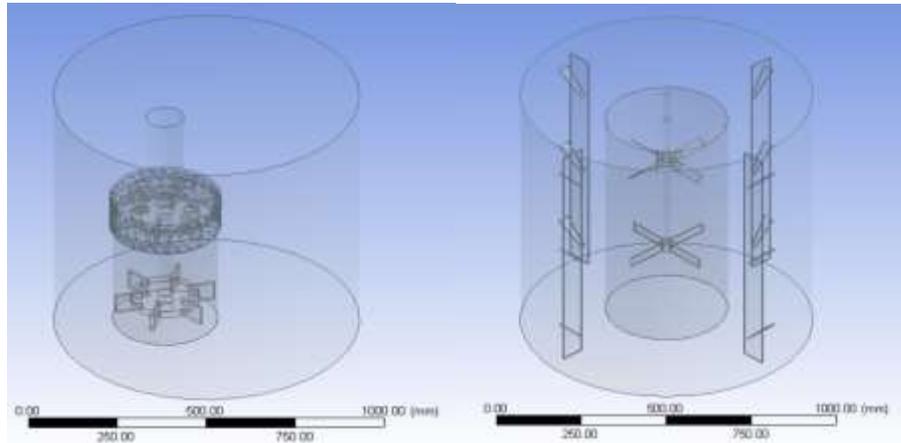
Al momento de realizar un análisis CFD se recomienda generar una malla computacional con la menor cantidad de detalles posibles para ahorrar tiempo y costo computacional.

Se genera el dominio computacional modelando en tres dimensiones el reactor principal y tomando en cuenta el diseño de las 2 propuestas del sistema de agitación sugeridas anteriormente. A continuación se muestra en la Figura 20 y Figura 21, las 2 propuestas de agitadores respectivamente.

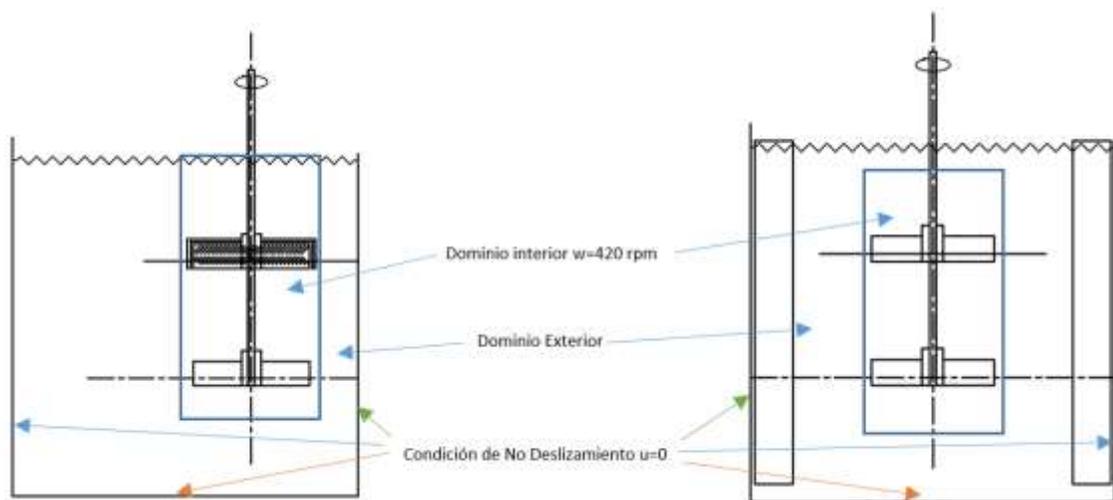
Los modelos se han generado de manera tal que permita correr una simulación en estado transitorio. Finalmente, con la geometría terminada se genera el mallado, tomando en cuenta que, para obtener una convergencia adecuada de la simulación numérica se requiere tener un mallado en la zona cercana a las paletas con un tamaño adimensional  $y \approx 5$ , cuando se utiliza el modelo de turbulencia  $k$ - $\epsilon$ .

**Figura 20**

*Geometría de las propuestas en ANSYS CFD.*

**Figura 21**

*Condiciones de frontera en las dos propuestas.*



El tamaño de elemento en la pared se calcula con la siguiente ecuación:

$$y^+ = \frac{\rho \times U \times \Delta y}{\mu} \quad (10)$$

Donde:

U = Velocidad del fluido

$\rho =$  Densidad del fluido

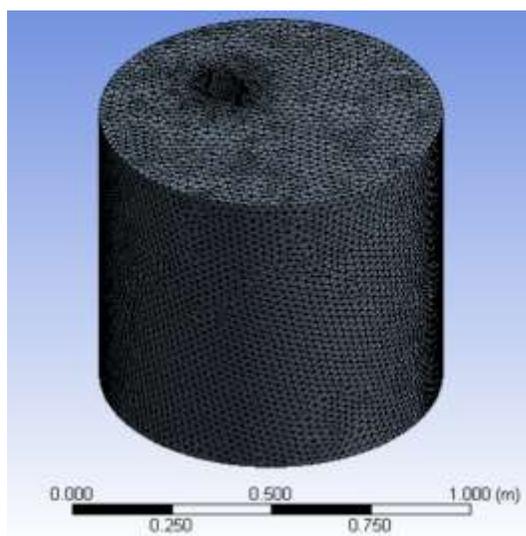
$\Delta y =$  Tamaño del nodo en la pared de la paleta

$\mu =$  Viscosidad dinámica del fluido

Tomando en cuenta estas consideraciones se obtiene la siguiente malla computacional, para cada una de las propuestas. En la Figura 22 se muestra el mallado generado en el modelo 1 y en la Tabla 9 se presenta las estadísticas del mallado.

### **Figura 22**

*Mallado computacional del reactor de la propuesta 1.*



### **Tabla 9**

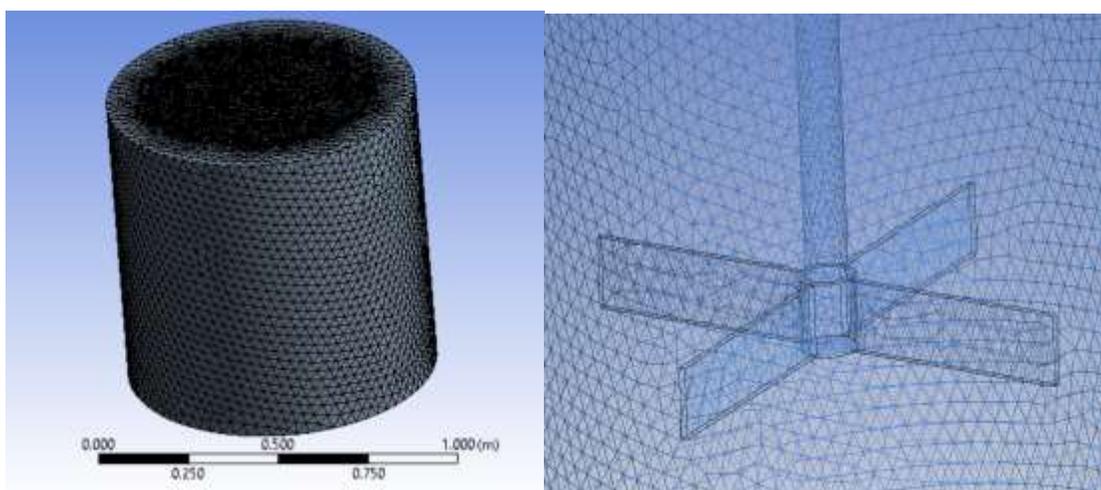
*Datos del mallado computacional de la propuesta 1.*

<b>Datos Estadísticos</b>	
Nodos	257252
Elementos	1444511
Parámetro	Oblicuidad
Min	2.45E-07
Max	0.93259
Promedio	0.20969
Desviación estándar	0.11617

En la Figura 23 se muestra el mallado generado en el modelo 2 y el refinamiento de malla en la zona del agitador. Además en la Tabla 10 se presenta las estadísticas del mallado.

**Figure 23**

*Mallado computacional del reactor de la propuesta 2.*



La calidad del mallado se verifica con dos parámetros los cuales son la ortogonalidad y la oblicuidad. Las recomendaciones de calidad de malla indican valores de oblicuidad altos y de ortogonalidad bajos. En la Figura 24 puede observarse el espectro de calidad de la oblicuidad y la ortogonalidad que fue obtenida por los desarrolladores del software ANSYS.

**Tabla 10**

*Datos del mallado computacional de la propuesta 2.*

<b>Datos Estadísticos</b>	
Nodos	459164
Elementos	2626100
Parámetro	Oblicuidad
Min	2.12E-06
Max	0.9998
Promedio	0.20784
Desviación estándar	0.11393

**Figura 24**

*Espectro de calidad de oblicuidad y ortogonalidad.*



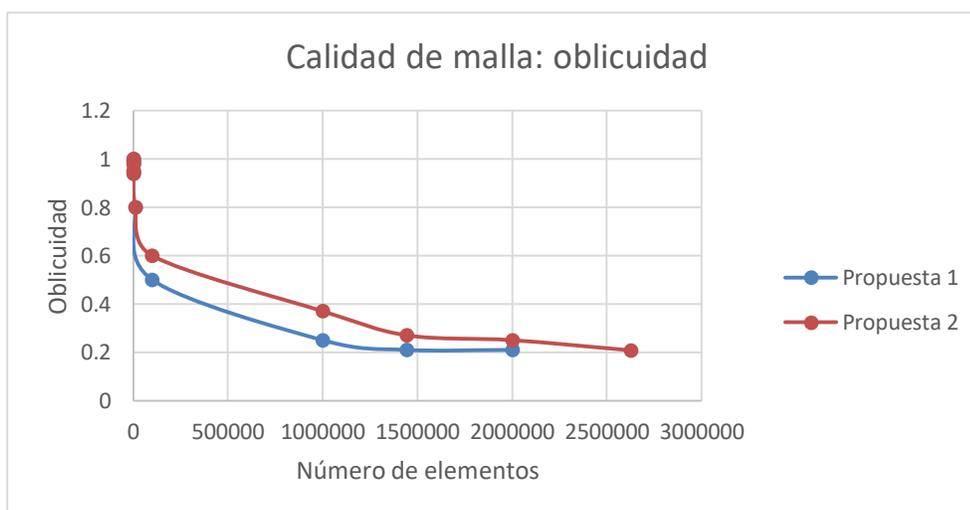
*Nota. Fuente: (Ansys, 2019)*

### **Análisis de oblicuidad**

La oblicuidad o asimetría determina qué tan cerca el elemento está de una cara ideal, los valores recomendados son entre de 0-0.25, como muestra la Figura 24.

**Figure 25**

*Calidad de malla de las 2 propuestas.*



En la presente investigación se empleó la oblicuidad como principal criterio de decisión, como se observa en la Figura 25 sobre la calidad de malla generada en las dos propuestas y se verifica que los valores son aceptables. En la Tabla 9 y 10 se obtiene un valor promedio de oblicuidad de 0.20969 y 0.20784 respectivamente. Las dos propuestas se encuentran en el rango de excelente, lo que significa que en los dos casos las mallas son adecuadas.

### **Configuración (Pre-Procesamiento)**

Con los datos provistos se procedió a correr una simulación numérica de flujo considerando lo siguiente:

- a) Tomando en cuenta la naturaleza del fluido que se analizará, se toma en cuenta un modelo de un fluido en una sola fase.
- b) El modelo viscoso utilizado para esta simulación es  $k-\epsilon$  tomando en cuenta funciones de pared escalables, que permite resolver de manera aproximada las ecuaciones de Navier-Stokes.
- c) Se activan las condiciones gravitacionales considerando que en este caso se desea tener una mezcla de fluidos.
- d) Se utiliza agua como fluido de trabajo debido a que la mezcla en el reactor principal mantiene propiedades similares a las del agua.
- e) Se define 2 dominios el interior y el exterior, en el interior se utiliza una velocidad rotacional de 420 revoluciones por minuto.
- f) En todas las paredes del fluido se aplica una condición de no deslizamiento  $\vec{u} = 0$  cuando  $y = 0$ .
- g) El algoritmo de solución que acopla los campos de velocidad con los campos de presión de la simulación a ser utilizado es el SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent). Este método permite

resolver las ecuaciones en estado transitorio con una constante de relajación que permite que exista una convergencia más rápida en cada iteración de la solución numérica. Los esquemas de discretización de las ecuaciones diferenciales parciales de las variables presión, cantidad de movimiento, energía cinética turbulenta y tasa de disipación de la turbulencia son los siguientes:

- Presión: Segundo orden
  - Cantidad de movimiento: Segundo orden hacia adelante
  - Energía cinética turbulenta: Primer orden hacia adelante
  - Tasa de disipación turbulenta: Primer orden hacia adelante
- h) Se utiliza un método de inicialización híbrida de la solución.
- i) Ya que es una simulación en estado transitorio se usa un método de paso de tiempo adaptivo con un valor inicial de paso de tiempo de  $1 * 10^{-3}$  segundos.

### **Compilación (Procesamiento)**

Una vez realizado el procesamiento se determina que para obtener convergencia y una solución adecuada se requieren de 8000-9000 iteraciones en la solución para cualquiera de las dos propuestas.

Es indispensable tener un número de Courant menor a 1, ya que es un parámetro que caracteriza la relación entre la discretización en espacio y tiempo de un modelo computacional. Una mala selección del valor del número de Courant puede causar resultados divergentes. (Ansys, 2019)

La ecuación para determinar el número de Courant es la siguiente:

$$C = \frac{U \times \Delta t}{\Delta x} \quad (11)$$

Donde:

$U =$  Velocidad del fluido

$\Delta t =$  Intervalo de tiempo

$\Delta y =$  Intervalo de espacio

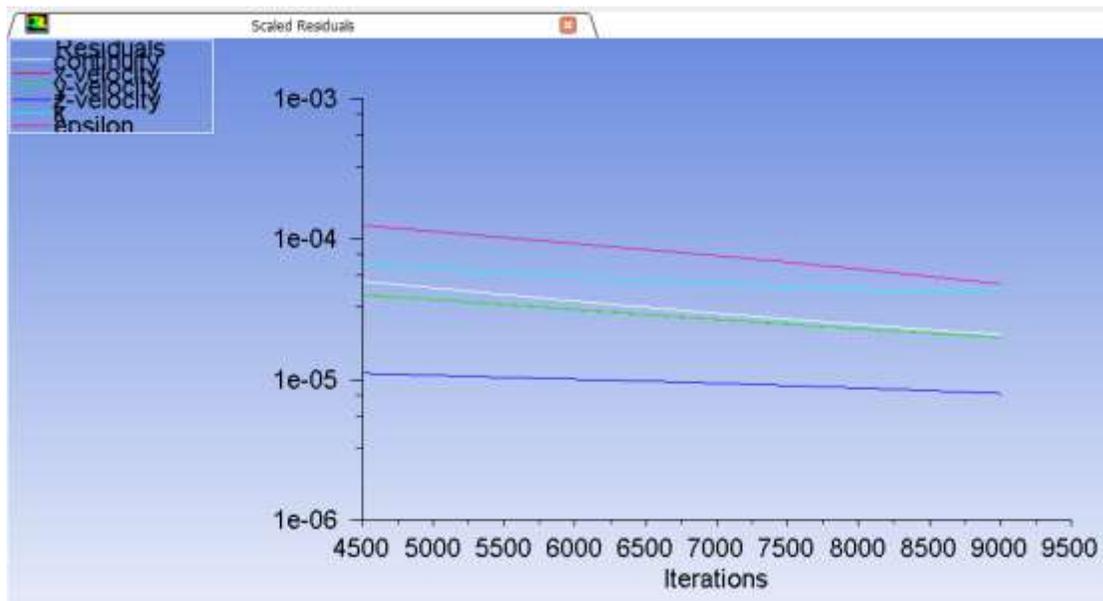
Reemplazando los valores en la ecuación (11) se obtiene un valor de:

$$C = \frac{2.67 \text{ m/s} \times 1 * 10^{-3} \text{ s}}{5 * 10^{-3} \text{ m}} = 0.534$$

Se verificó que el número de Courant se mantiene en  $C \leq 1$  y de esta forma se garantiza la convergencia de la solución. No existe un criterio único para evaluar la convergencia de una simulación CFD, por esta razón se empleó una combinación de los resultados obtenidos para los residuos escalados, de modo que los resultados obtenidos sean suficientemente completos y fiables. En la Figura 26 se muestra la convergencia por residuos escalados en un valor de  $1 * 10^{-4}$ .

### Figura 26

*Gráfica de la escala residual de la simulación y convergencia en  $1e-04$ .*



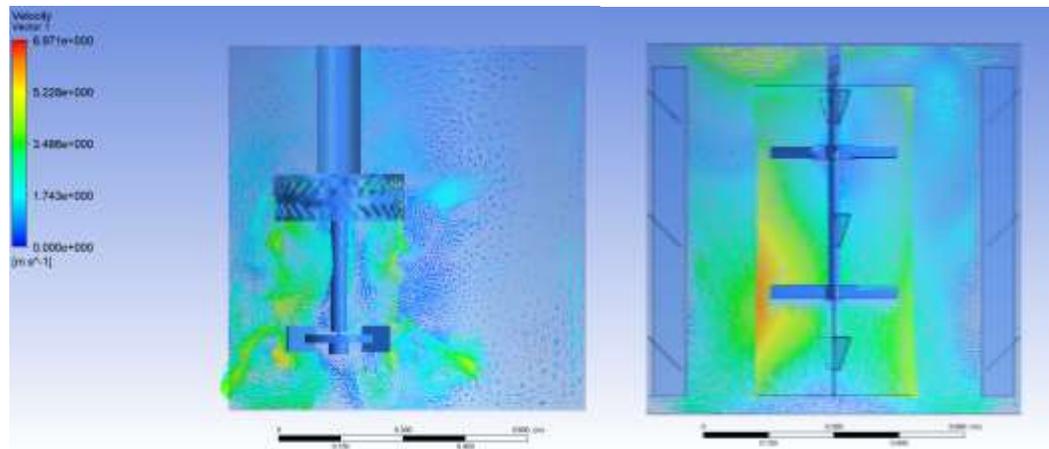
## Resultados (Post-Procesamiento)

### *Análisis de Vectores de Velocidad*

En el campo vectorial de velocidad de la propuesta 2, se observa una cantidad importante de vorticidades en el recorrido del agitador en el fluido. Esto es un indicador de que existirá mezcla en el fluido.

### **Figura 27**

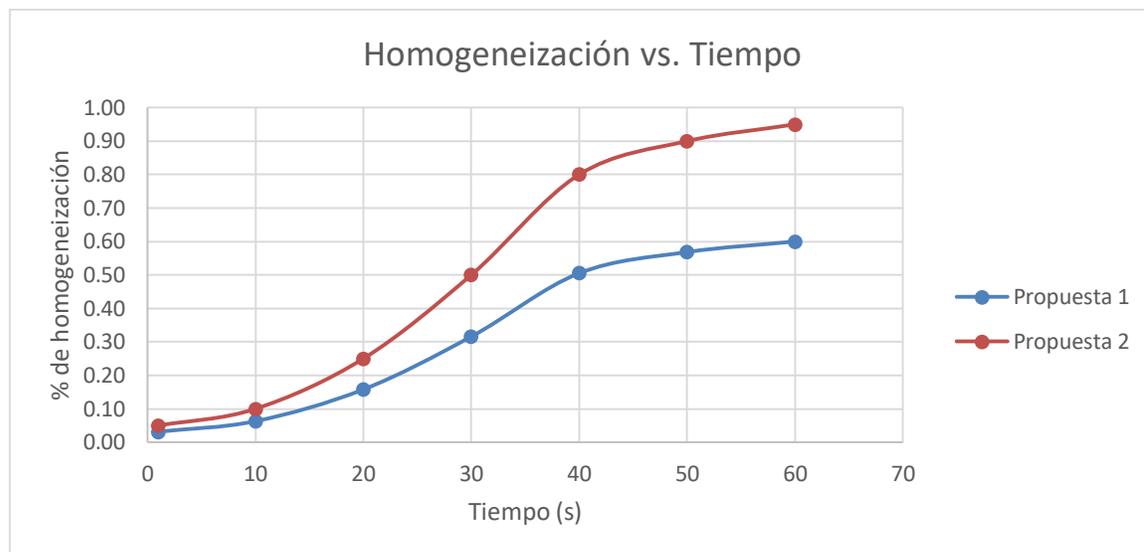
*Vectores de velocidad de la propuesta 1 y 2.*



Al realizar una comparación como se ve en la Figura 27, es evidente que existe una mejor mezcla en la propuesta 2 debido a que los valores de los vectores velocidad están presentes en todo el reactor, a diferencia de la propuesta 1 que existe una zona en la cual los valores de vector velocidad son muy bajos, esto puede provocar que se tarde mucho más tiempo en homogenizar la mezcla o que exista una deficiente homogenización.

**Figura 28**

*Comparación del grado de homogeneización de la mezcla.*



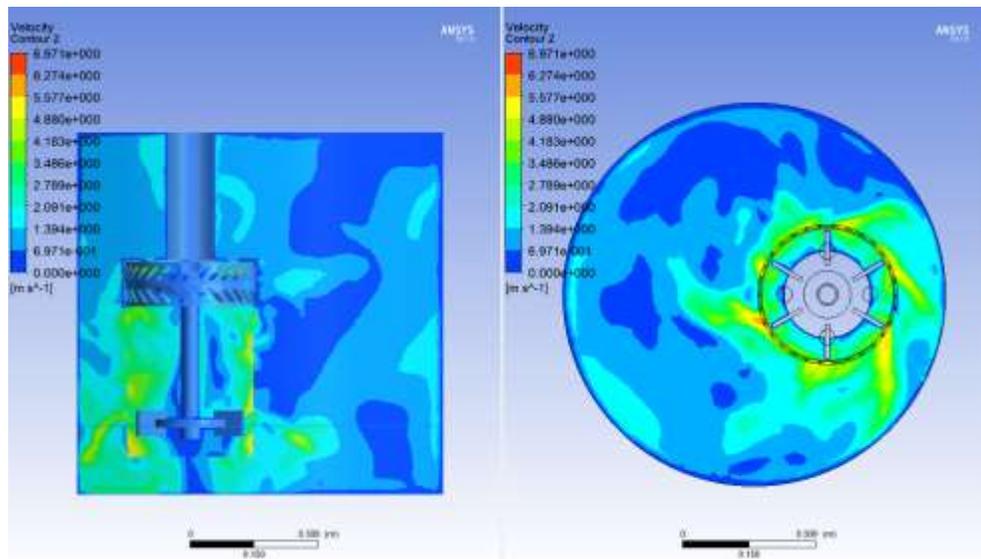
*Nota.* Como se observa en la Figura 28 la propuesta 2 presenta aproximadamente un 95% homogeneización de la mezcla en 60 segundos de simulación.

### ***Análisis de Contornos de Velocidad***

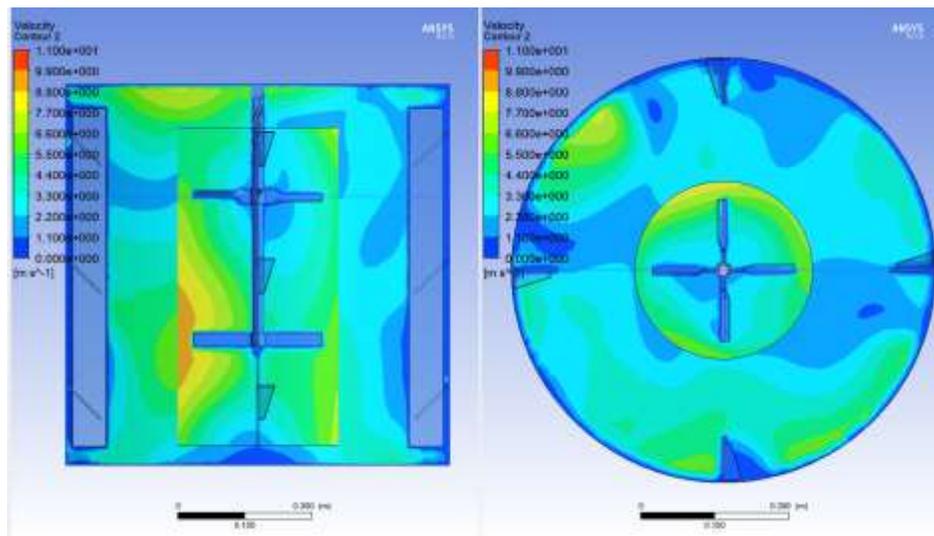
En la Figura 30 se verifica que efectivamente existe una mejor homogeneización de la mezcla en la propuesta 2 ya que existen muy pocos contornos de velocidad igual a cero. La propuesta 1 de la Figura 29, muestra una región considerable sin movimiento del fluido y esto no es muy conveniente para la fabricación de nanopartículas debido a que no se van a mezclar correctamente los compuestos y se va obtener pocas nanopartículas de buena calidad.

**Figura 29**

*Contornos de velocidad de la propuesta 1.*

**Figura 30**

*Contornos de velocidad de la propuesta 2.*

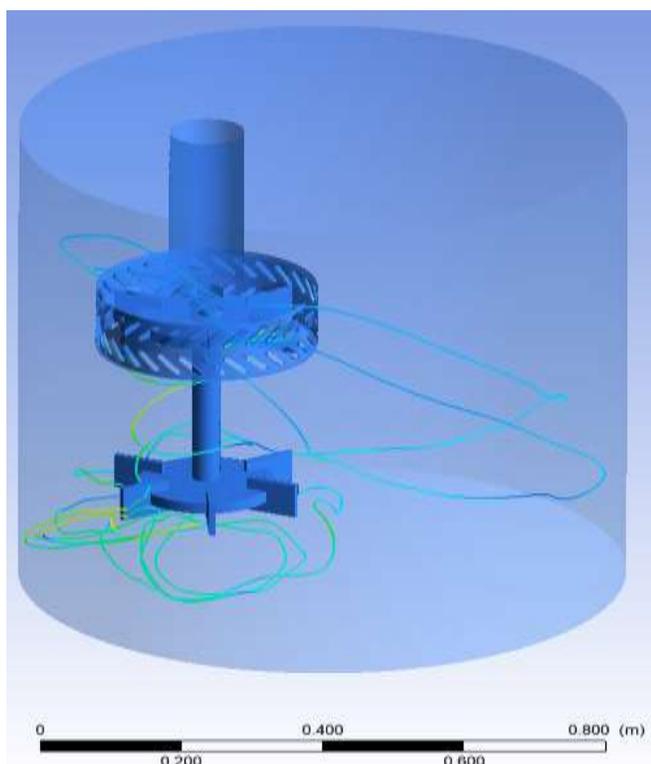


### ***Análisis de líneas de corriente (Streamlines)***

En la Figura 31 y Figura 32 se puede observar las líneas de corriente de las propuestas 1 y 2 respectivamente. Se ha considerado la trayectoria de 1 partícula para verificar cuál es su comportamiento en el reactor y como va a influir en la mezcla.

#### **Figura 31**

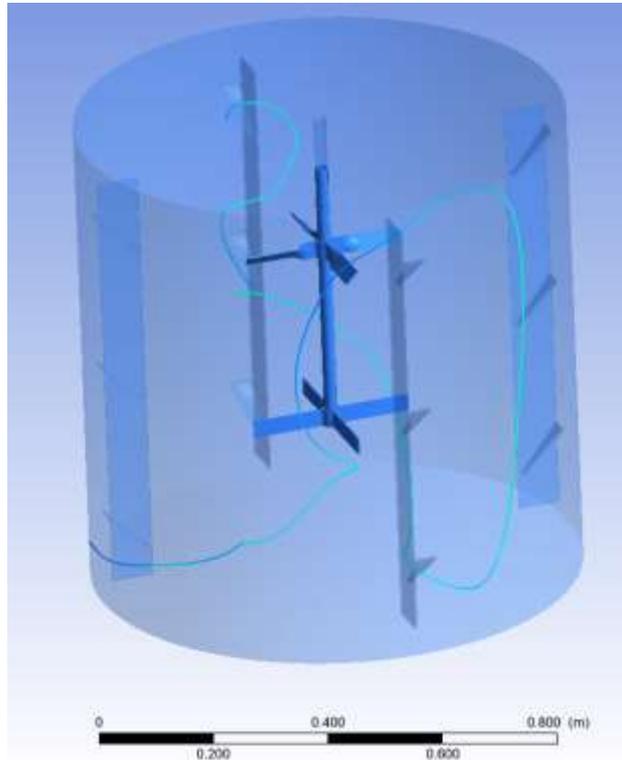
*Líneas de corriente (streamlines) de la propuesta 1.*



La Figura 32 muestra que la partícula recorre por la mayor parte del reactor, a diferencia de la Figura 31 donde se puede apreciar que la partícula recorre la mayor parte en la zona baja del reactor. Adicionalmente, al analizar una línea de corriente de la Figura 31 se visualiza que una partícula recorre una parte importante del dominio computacional siguiendo la ruta de un vórtice. Esto permite afirmar que el mecanismo de agitador de la propuesta 2 cumple con su función primordial.

**Figure 32**

*Líneas de corriente (streamlines) de la propuesta 2.*



### ***Energía Cinética Turbulenta (TKE)***

Otra forma de corroborar que existe mezcla adecuada en un fluido es verificando la existencia de energía cinética turbulenta (Revelo, 2016). En la Figura 33 se observa que existe una cantidad importante de energía cinética turbulenta en la zona que se encuentra ubicada la silueta que van dejando las paletas del sistema de agitación inmediatamente después del corte que ejercen en el fluido.

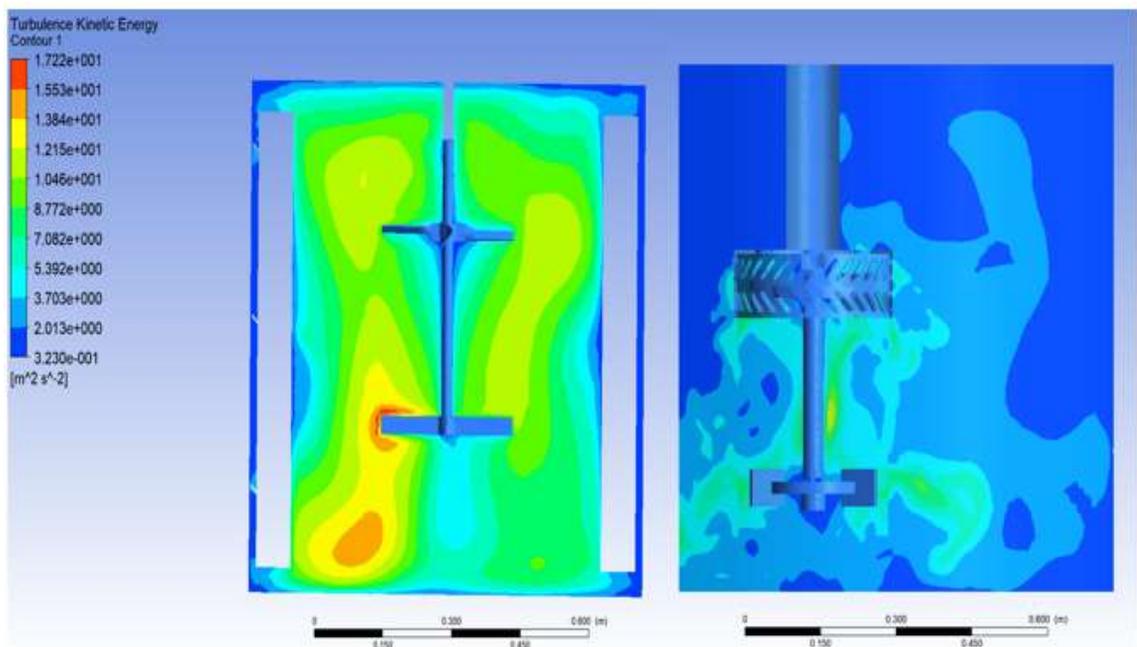
Se visualizan valores de energía turbulenta que oscilan entre 17 y  $0.32 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . La energía cinética turbulenta se define como los valores de las oscilaciones de velocidad existentes en el fluido que son características de la turbulencia y que además generan mezcla.

Se determina que existen oscilaciones de velocidad promedio que varían entre 4.5 y 0.6 m/s lo que nos proporciona otra indicación que permite concluir que existe una mezcla adecuada en el reactor.

En la propuesta 2 se puede presenciar que se generan vorticidades lo cual es muy conveniente para que exista mejor homogenización en el reactor.

### Figura 33

*Energía Cinética Turbulenta de la propuesta 2 (izq.) y propuesta 1 (der.).*



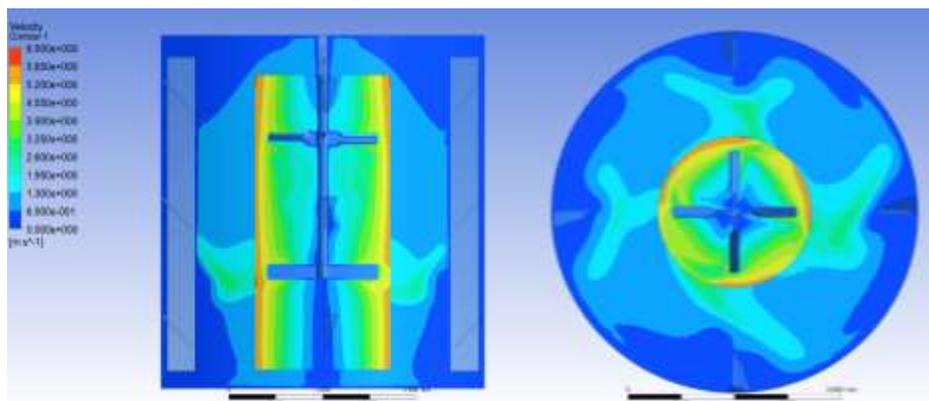
### Selección de la propuesta adecuada.

Después de presentar las dos propuestas, se verifica que la propuesta 1 de la investigación de (Revelo, 2016) genera homogeneización incompleta de la mezcla, a diferencia de la propuesta 2 la cual presentó excelentes resultados en variables como velocidad y TKE, por tal motivo se realiza un análisis más profundo de la propuesta 2 para analizar el comportamiento de la mezcla a través del tiempo.

### Análisis del contorno de velocidad $1 \leq \Delta t \leq 60$ segundos.

**Figure 34**

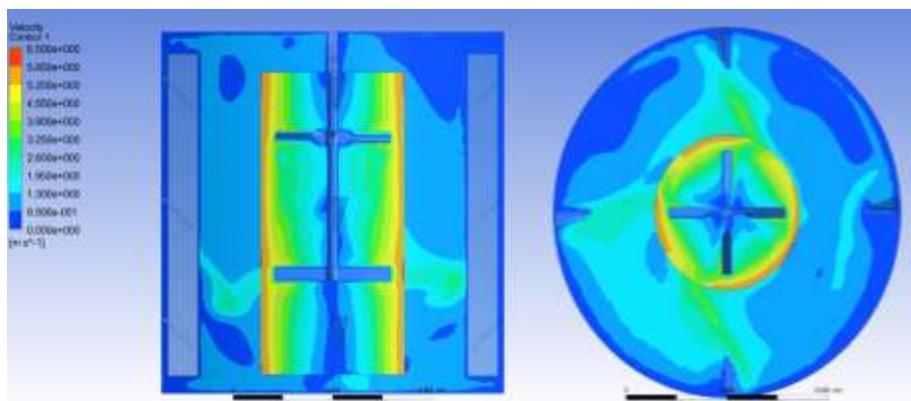
*Contornos de velocidad para  $t=1$  segundo.*



*Nota.* Como se observa en la Figura 34 se distinguen los dos dominios el interior y el exterior, el dominio interior es el que transfiere la cantidad de movimiento para que se genere mezcla en todo el recipiente.

**Figura 35**

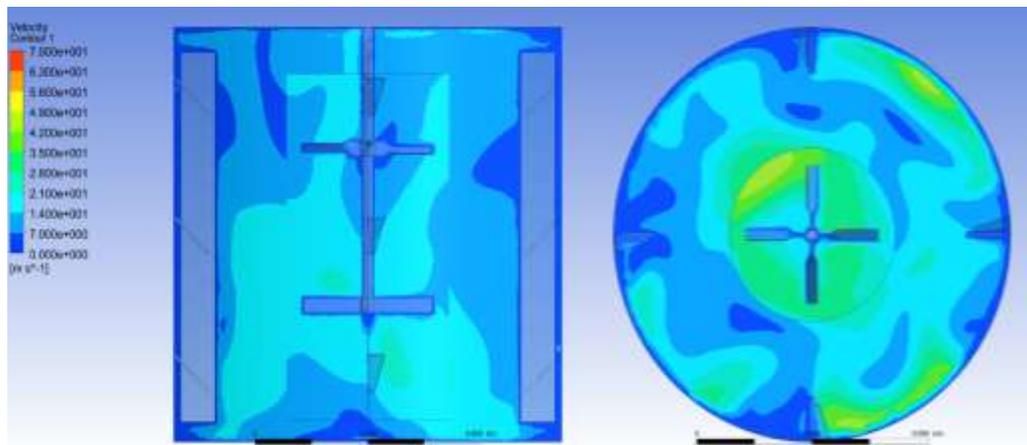
*Contornos de velocidad para  $t=10$  segundos.*



*Nota.* Cuando ya transcurrió 10 segundos se observa que la turbina RDT inferior está generando una mezcla que va de abajo hacia arriba y mejora la circulación.

**Figura 36**

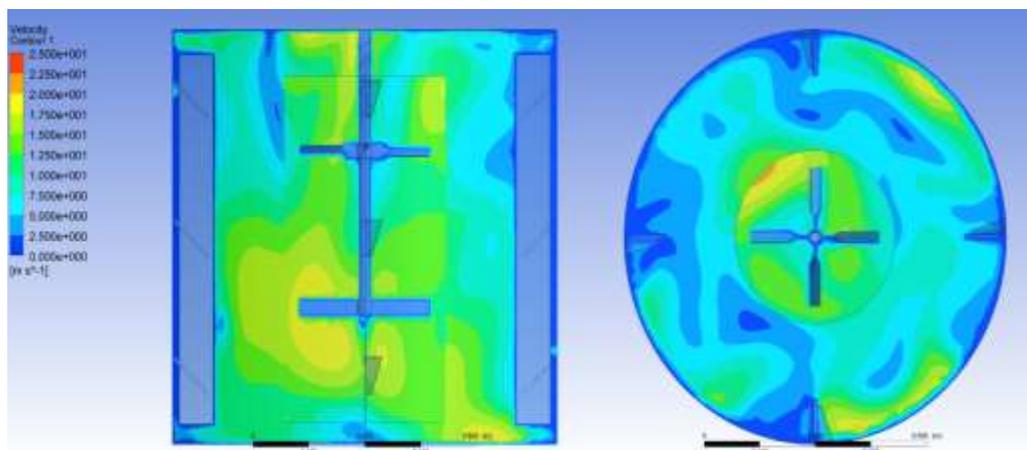
*Contornos de velocidad para  $t=20$  segundos.*



*Nota.* Cuando ya transcurrió 20 segundos se observa que existe una homogeneización del 25%, esto significa que en este punto aún no existe la cantidad adecuada de energía cinética turbulenta que permita generar nanopartículas.

**Figura 37**

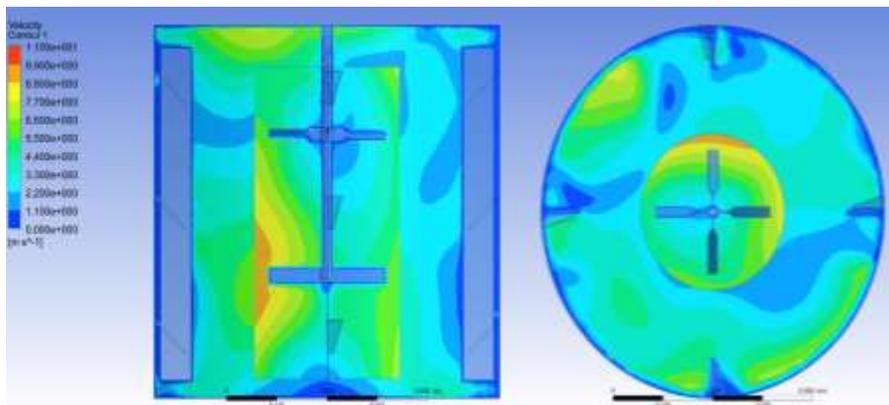
*Contornos de velocidad para  $t=30$  segundos.*



*Nota.* Cuando ya transcurrió 30 segundos se observa que empiezan a generarse algunas vorticidades sobre todo en la zona inferior derecha del recipiente.

**Figura 38**

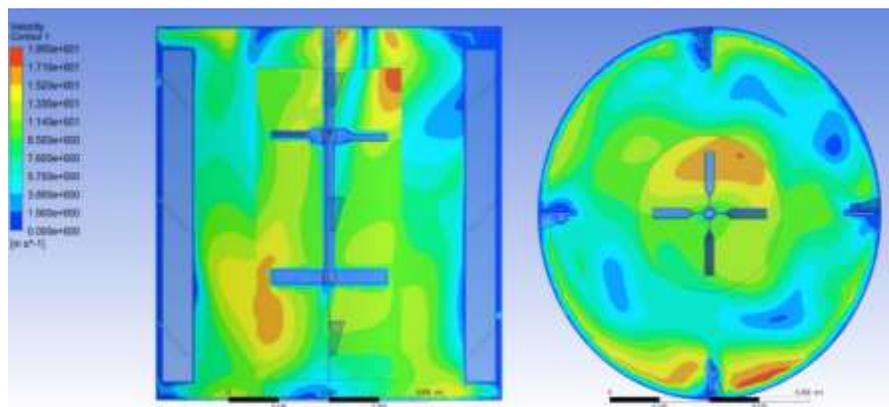
*Contornos de velocidad para  $t=40$  segundos.*



*Nota.* En  $t=40$  segundos se observa que las vorticidades aparecen con mayor intensidad cinética, a partir de este punto los esfuerzos de corte son los adecuados para el cizallamiento de las partículas y el aumento de energía cinética turbulenta (TKE).

**Figura 39**

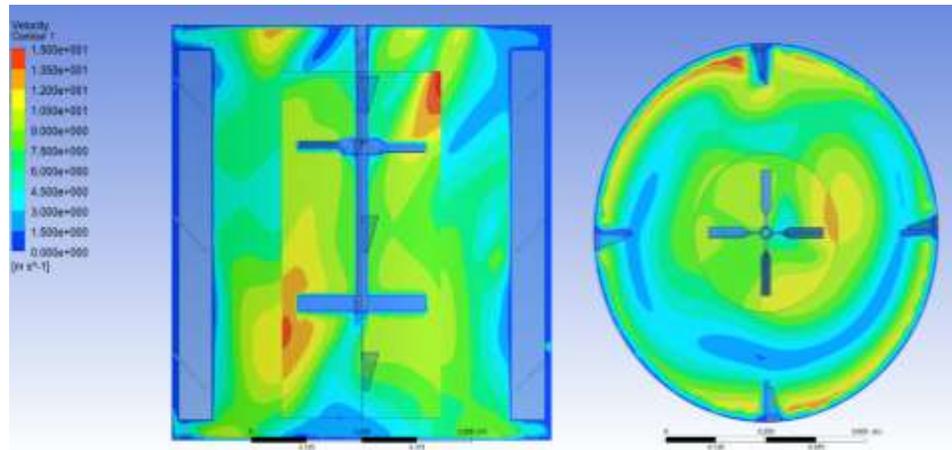
*Contornos de velocidad para  $t=50$  segundos.*



*Nota.* En  $t=50$  segundos se observa que existen algunas vorticidades con gran cantidad de energía cinética turbulenta, esto permite que las nanopartículas se generen de mejor calidad.

**Figura 40**

*Contornos de velocidad para  $t=60$  segundos.*

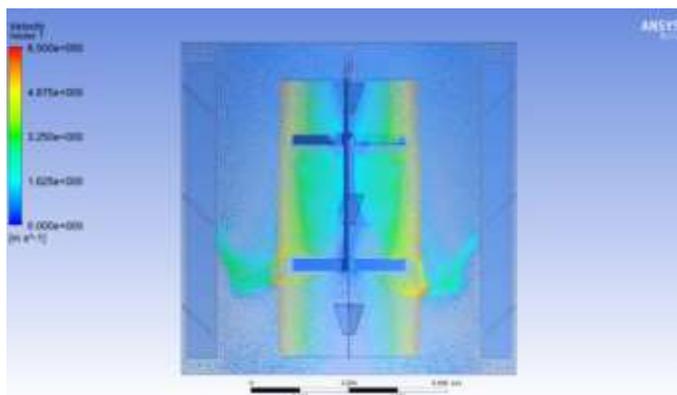


Al analizar el contorno de velocidad de la Figura 34 hasta Figura 40 se puede evidenciar que el comportamiento del fluido es consecuente a medida que transcurre el tiempo, es decir el fluido se va desarrollando desde el volumen de control interno hacia todo el recipiente de manera correcta con valores congruentes a través del tiempo.

En la Figura 36 cuando ha transcurrido 20 segundos se verifica que efectivamente existe una mejor homogeneización de la mezcla en todo el reactor, ya que existen muy pocos contornos de velocidad con velocidad cero.

**Análisis de los vectores de velocidad  $1 \leq \Delta t \leq 60$  segundos.****Figura 41**

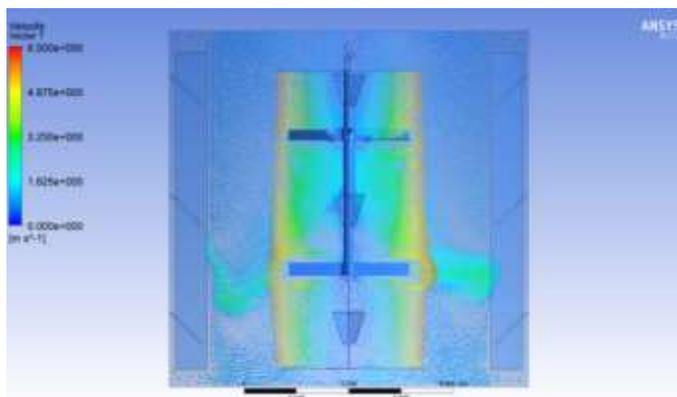
*Vectores de velocidad para  $t=1$  segundo.*



*Nota.* En  $t=1$  segundo se observa que existen algunas zonas las en las cuales la velocidad es muy baja con un valor de 1.62 m/s.

**Figura 42**

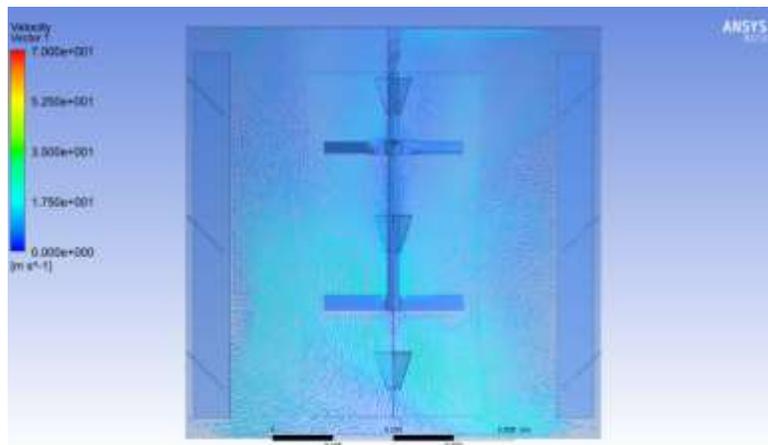
*Vectores de velocidad para  $t=10$  segundos.*



*Nota.* En  $t=10$  segundos se verifica un aumento progresivo de los vectores de velocidad en la zona inferior del recipiente.

**Figura 43**

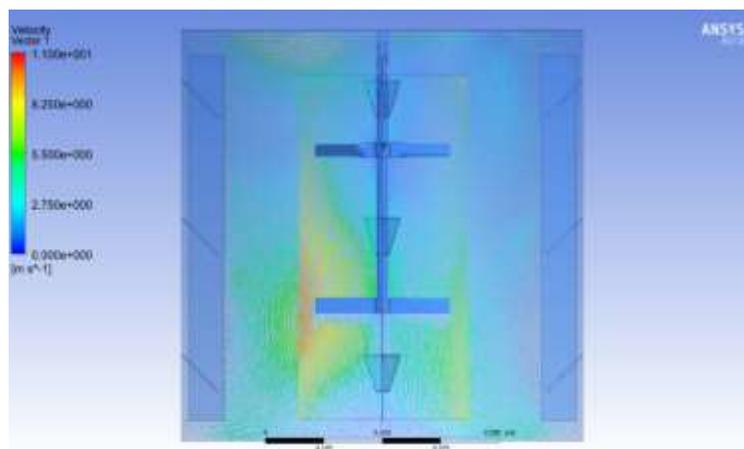
*Vectores de velocidad para  $t=20$  segundos.*



*Nota.* En  $t=20$  segundos se verifica un aumento en el valor de la velocidad de 1.75 m/s y una homogeneidad en un 50% de la capacidad del recipiente.

**Figura 44**

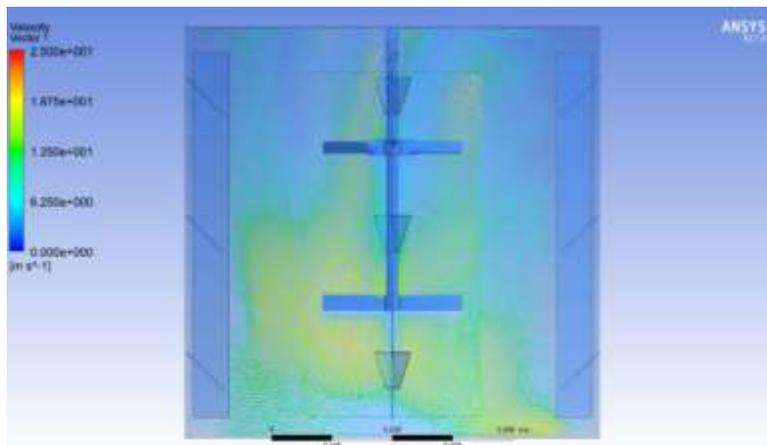
*Vectores de velocidad para  $t=30$  segundos.*



*Nota.* En  $t=30$  segundos se observa una vorticidad importante en la zona inferior izquierda y una homogeneidad en un 80% de la capacidad del recipiente.

**Figura 45**

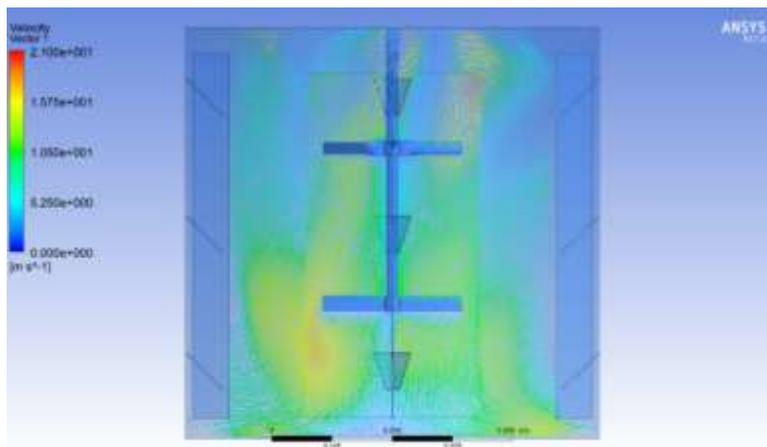
*Vectores de velocidad para  $t=40$  segundos.*



*Nota.* En  $t=40$  segundos se verifica un aumento en el valor de la velocidad de 6.25 m/s y una homogeneidad en un 80% de la capacidad del recipiente.

**Figura 46**

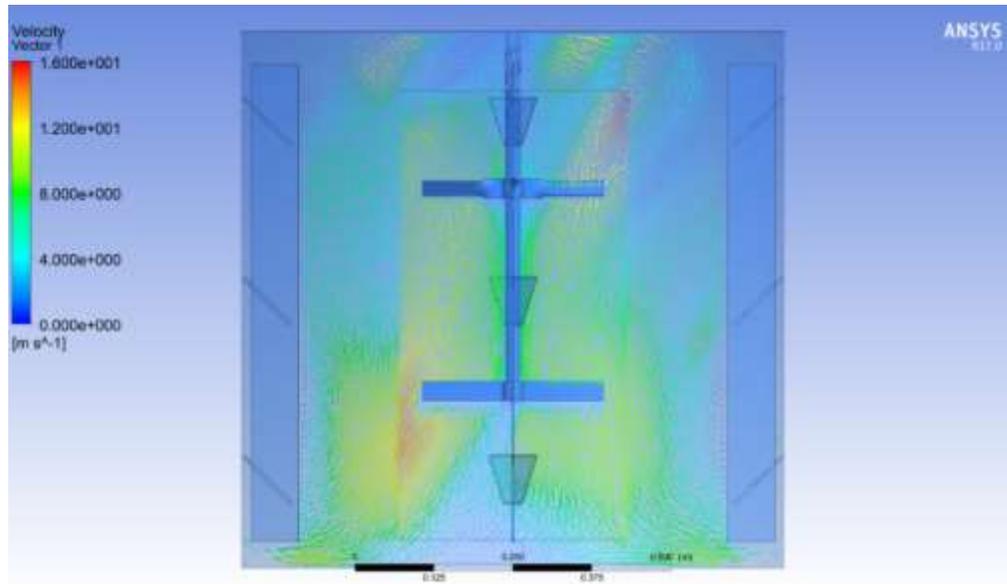
*Vectores de velocidad para  $t=50$  segundos.*



*Nota.* En  $t=50$  segundos existen vorticidades importante cerca de las paletas del agitador, esto significa que las paletas están generando un cantidad considerable de esfuerzos de corte.

**Figura 47**

*Vectores de velocidad para  $t=60$  segundos.*



La Figura 41 y Figura 42 indican que hasta los 10 segundos no ha existido una buena mezcla debido a que hay muchas zonas en las cuales los valores de velocidad son muy bajos.

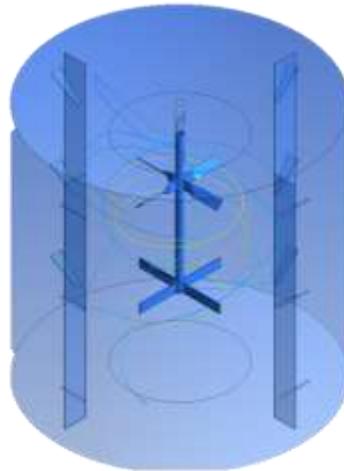
Al visualizar el campo vectorial de velocidad de la Figura 44 hasta Figura 47, se observa una cantidad importante de vorticidades a partir de los 30 segundos. Esto permite afirmar que el mecanismo de agitador propuesto cumple con su función primordial.

#### **Análisis de líneas de corriente (Streamlines) $1 \leq \Delta t \leq 60$ segundos.**

Se muestra 10 líneas de flujo para los diferentes intervalos de tiempo y se verifica el comportamiento de las partículas en el reactor.

**Figura 48**

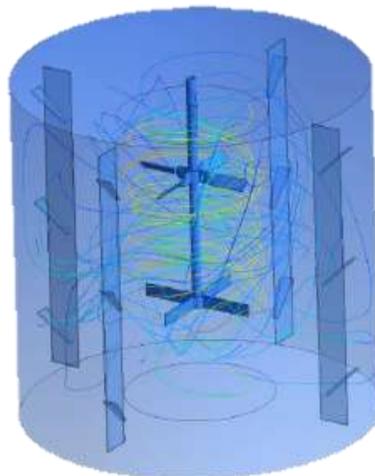
*Líneas de corriente (streamlines) para  $t=1$  segundo.*



*Nota.* En  $t=1$  segundo se generan líneas de flujo con una trayectoria muy corta, esto se debe a que el fluido no tiene la suficiente energía cinética en las partículas.

**Figura 49**

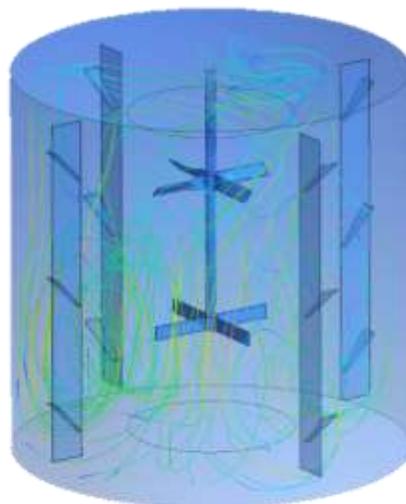
*Líneas de corriente (streamlines) para  $t=10$  segundos.*



*Nota.* En  $t=10$  segundos se generan líneas de flujo con una velocidad de 6.5 m/s, sin embargo solo se desarrollan en el dominio inferior.

**Figura 50**

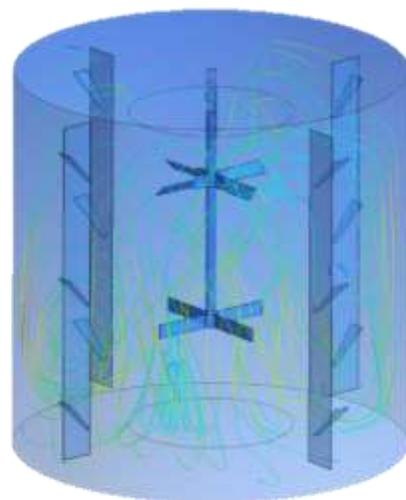
*Líneas de corriente (streamlines) para  $t=20$  segundos.*



*Nota.* En  $t=20$  segundos empiezan a desarrollarse trayectorias por todo el recipiente.

**Figura 51**

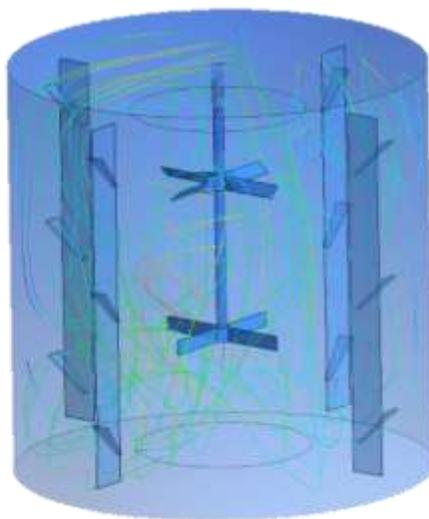
*Líneas de corriente (streamlines) para  $t=30$  segundos.*



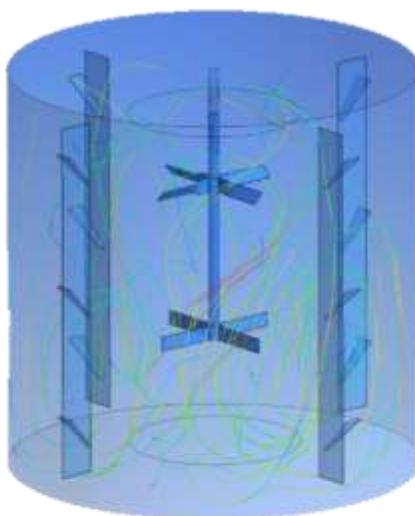
*Nota.* En  $t=30$  segundos las trayectorias de las nanopartículas empiezan a generarse de manera más desordena.

**Figura 52**

*Líneas de corriente (streamlines) para  $t=40$  segundos.*

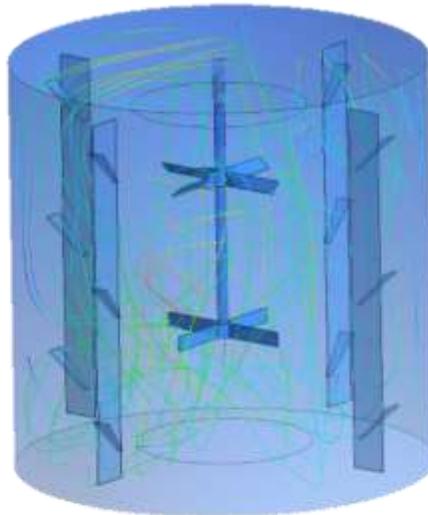
**Figura 53**

*Líneas de corriente (streamlines) para  $t=50$  segundos.*



**Figura 54**

*Líneas de corriente (streamlines) para  $t=60$  segundos.*



De la Figura 52 hasta Figura 54 se muestran las líneas de corriente para diferentes intervalos de tiempo y se comprobó que las trayectorias son completamente caóticas lo que resulta beneficioso para la generación de nanopartículas. Los valores de velocidad en las líneas de corriente oscilan en su mayoría entre 1.63 y 4.88 m/s, pero a medida que transcurre el tiempo se puede ver un incremento de hasta 6.5 m/s, en algunas zonas cercanas al impulsor.

Una vez determinada la validez de la propuesta 2 se presenta el resumen de las razones por las cuales la propuesta 2, es más adecuada y cumple con los requerimientos para la generación de nanopartículas metálicas.

- Presenta mayores valores de energía cinética turbulenta en las paletas del sistema de agitación y esto a su vez representa un mayor valor de esfuerzos de corte en esa zona.

- Tiene unos deflectores (baffles) en la pared del reactor los cuales aumentan la eficiencia del mezclado y de esa forma se evita que el fluido gire como un sólido rígido ya que se logra aumentar la vorticidad en el fluido a lo largo del tiempo, y esto es idóneo para la generación de nanopartículas.
- Se verificó que las líneas de corriente de las partículas son totalmente desordenadas e impredecibles en intervalos de 10 segundos a medida que transcurre los 60 segundos de simulación, esto con el fin de garantizar la existencia de turbulencia en cada lapso de tiempo, ya que la Energía Cinética Turbulenta se define como los valores de las oscilaciones de velocidad existentes en el fluido que son características de la turbulencia y que además generan mezcla.

## Capítulo 4: Diseño Mecánico De La Planta Industrial

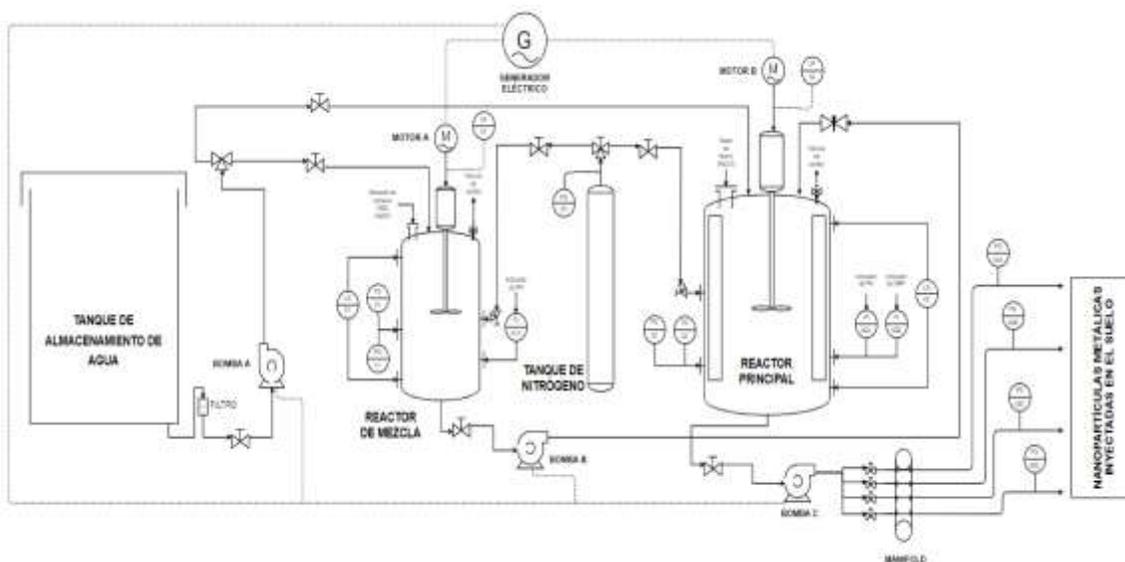
En este capítulo se efectuará el Diseño Mecánico de la planta industrial mediante un método de investigación sintético-analítico, se desarrollará la memoria de cálculo que consta el diseño conceptual y de detalle de los reactores según ASME Sección VIII div. I, también incluye la selección de equipos e instrumentación adecuada para la obtención de datos en los reactores. En este capítulo también se va a diseñar la estructura metálica soporte (SKID).

### Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)

El procedimiento para el desarrollo de nanopartículas metálicas fue desarrollado por el CENCINAT, el proceso se desarrolló para cantidades pequeñas en instrumentos de laboratorio, sin embargo esa misma metodología será utilizada en la planta industrial para la obtención de 300 litros de nanopartículas metálicas. A continuación en la Figura 55 se muestra el respectivo diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID).

### Figura 55

*Diagrama P&ID de la planta para la generación de nanopartículas.*



### **Elementos principales de la planta**

- Tanque de Almacenamiento de Agua: Capacidad de 600 litros.
- Reactor de Mezcla: Capacidad de 200 litros con sistema de agitación.
- Reactor Principal: Capacidad de 500 litros con sistema de agitación.
- Tanque de Nitrógeno
- Manifold

Una vez identificado los elementos principales que integran la planta industrial se procede a detallar el proceso por etapas para la obtención de nanopartículas metálicas.

#### ***Etapa 1: Preparación en el Reactor de Mezcla***

El reactor de mezcla tiene una capacidad de 200 litros de los cuales se utilizarán 150 litros, en este reactor se introduce algunos reactivos como extracto de Jamaica, Carbo Metil Celulosa (CMC), Hidróxido de Sodio (NaOH) y agua filtrada que es transportada gracias a una bomba centrífuga de flujo máximo de 90 [l/min] desde el tanque de almacenamiento de agua.

El reactor de mezcla contará con un sistema de agitación que va a mezclar de 75-100 revoluciones por minuto como se especifica en el Capítulo 3 en la Tabla 1 y se agitará por aproximadamente 10 minutos con el fin de homogeneizar la mezcla; además estará equipado con un indicador de presión, un indicador de temperatura, una mirilla de nivel, un sensor pH y un sensor de potencial de reducción (ORP). El indicador de pH toma un papel importante debido a que indicará si el procedimiento se está realizando de manera adecuada.

### **Etapa 2: Preparación en el Reactor Principal**

El reactor principal tiene una capacidad de 500 litros de los cuales se utilizarán 300 litros, este reactor cumple la tarea más importante, ya que se introducen las sales de hierro ( $\text{FeCl}_3$ ) y se aplica el proceso hierro cero valente ( $\text{nZv}$ ) para la generación de nanopartículas.

Las sales de hierro se combinan con la preparación de la Etapa 1. La preparación de la Etapa 1 es transportada por una bomba centrífuga y a su vez es inyectada a través de una válvula de aguja al reactor principal con 150 litros de agua filtrada que es transportada gracias a una bomba centrífuga de flujo máximo de 90 [ $l/min$ ] desde el tanque de almacenamiento de agua.

El reactor principal contará con un sistema de agitación que va a mezclar de 400-450 revoluciones por minuto como se especifica en el Capítulo 3 en la Tabla 1, y se agitará por aproximadamente 15 minutos con la finalidad de homogeneizar todos los elementos de la mezcla. En este reactor es importante que la cantidad de Energía Cinética Turbulenta sea la adecuada por esa razón se realizó una simulación computacional del comportamiento de la mezcla que se explicó en el Capítulo 3 y se verificó una presión local máxima en el reactor que fue de 5880 [ $Pa$ ].

Además estará equipado con un indicador de presión, un indicador de temperatura, una mirilla de nivel, un sensor de pH y un sensor de potencial de reducción (ORP). El sensor de ORP toma un papel importante debido a que indicará la cantidad de oxígeno disuelto que hay en la mezcla y de esta manera seguir con la etapa de nitrogenación.

### **Etapa 3: Nitrogenación**

La nitrogenación se la realiza en el reactor de mezcla y en el reactor principal para eliminar la cantidad de oxígeno disuelto excedente existente en la mezcla, por tal

motivo se inyecta el nitrógeno al fluido con una presión mínima de 3.44 [kPa] y una máxima de 34.4 [kPa] y se verifica que el sensor de potencial de reducción (ORP) indique los niveles adecuados de oxígeno disuelto para la obtención de nanopartículas metálicas. La presión dentro del reactor principal puede oscilar entre los 15-23 [kPa].

#### **Etapa 4: Obtención de nanopartículas metálicas**

En esta etapa las nanopartículas metálicas serán transportadas desde el reactor principal hacia un manifold por una bomba centrífuga con caudal máximo de 160 [l/min] de acero austenítico para evitar que las nanopartículas se alojen en el rodete. El manifold de mangueras tiene un regulador de flujo para cada una, con la finalidad de realizar la inyección de las nanopartículas variando parámetros de caudal 5-50 [l/min] y de presión de 20-260 [Pa] en los suelos cacaoteros contaminados con cadmio.

#### **Diseño Mecánico del reactor principal**

Para el diseño mecánico se utiliza el código ASME Sección VIII div. 1. Algunas partes y componentes no necesitan ser diseñadas, sin embargo deben ser escogidas correctamente para obtener buenos resultados. A continuación en la Tabla 11 se presentan los parámetros de diseño del reactor principal que requiere el CENCINAT, algunos parámetros como el diámetro externo y la altura ya se definieron en el Capítulo 3 cuando se desarrolló la simulación CFD.

**Tabla 11**

*Parámetros de diseño del reactor principal*

No	Parámetro	Símbolo	Sistema Internacional		Sistema inglés	
			Valor	Unid.	Valor	Unid
1	Diámetro externo	Do	810	mm	32	in
2	Altura cuerpo cilíndrico	H	630	mm	25.19	in
3	Presión externa de diseño	Pd	103	kPa	15	psig
4	Presión atmosférica	Pa	103	kPa	15	psi
5	Temperatura de diseño	Td	25	°C	77	°F

No	Parámetro	Símbolo	Sistema Internacional		Sistema inglés	
			Valor	Unid.	Valor	Unid
6	Material cabezas elipsoidales 2:1		Acero Inoxidable			
7	Material Cuerpo		Acero Inoxidable			
8	Corrosión admisible cuerpo/cabeza	CA	1.56	mm	1/16	in
9	Eficiencia de la junta de cabeza	E	0.85		0.85	
10	Nivel de Líquido	NL	75	%	75	%
11	Stress value in tension	S	137895	kPa	20000	psi

### Diseño del cuerpo cilíndrico del reactor

Se utilizan las fórmulas de diseño de recipientes a presión externa según

(Megyesy & Buthod, 2001), y se tiene:

$$t_{cuerpo} = \frac{P_d * R_o}{S * E + 0.4 * P_d} + CA \quad (12)$$

$$t_{cuerpo} = \frac{3}{16} \text{ in}$$

$$t_{cuerpo} = 4.68 \text{ mm}$$

La altura total de la cabeza elíptica 2:1, se obtiene con las siguientes

ecuaciones:

$$IDD = \frac{D_o - 2 t_1}{4} \quad (13)$$

$$IDD = 7.906 \text{ in}$$

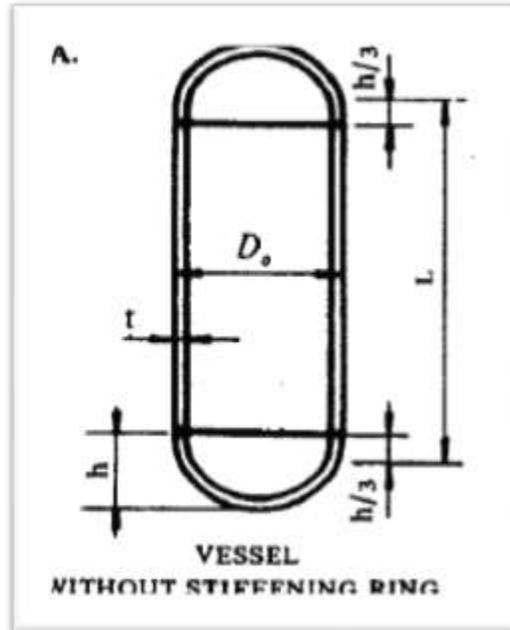
$$IDD = 202 \text{ mm}$$

$$h = SF + IDD + t_1 \quad (14)$$

El valor tomado para SF es 2" (50 mm), según recomendaciones de (Megyesy & Buthod, 2001), las ecuaciones (13), (14), (15) y (16) se obtienen a partir de la Figura 56.

**Figura 56**

*Recipiente sin anillo de refuerzo.*



*Nota. Fuente: (Megyesy & Buthod, 2001)*

$$h = 10.09 \text{ in}$$

$$h_{d1} = \frac{h}{3} \tag{15}$$

$$h_{d1} = \frac{h}{3} = 3.364 \text{ in}$$

$$L = H + 2h_{d1} \tag{16}$$

$$L = 31.92 \text{ in}$$

$$\frac{L}{D_o} = 0.9974$$

$$\frac{D_o}{t} = 170.67$$

Para determinar los valores de los factores A y B, se utiliza las tablas que son obtenidas de (Megyesy & Buthod, 2001).

$$A = 0.000813$$

$$B = 11500$$

Finalmente se determina la presión admisible en el cuerpo cilíndrico, con la siguiente ecuación:

$$P_{ac} = \frac{4B}{3 \left( \frac{D_o}{t_1} \right)} \quad (17)$$

$$P_{ac} = 89.84 \text{ psi}$$

El espesor  $t$  de 3/16" (4.68 mm) cumple con los requerimientos de espesor en el cuerpo cilíndrico. En resumen los parámetros principales se muestran en la Tabla 12:

**Tabla 12**

*Parámetros principales del cuerpo cilíndrico del reactor.*

Parámetro	Símbolo	Sistema Inglés		Sistema Internacional	
		Valor	Unidad	Valor	Unidad
Diámetro externo	$D_o$	32.00	in	810	mm
Diámetro interno	$D_i$	31.63	in	800	mm
Altura del cuerpo	$H$	31.92	in	688	mm
Presión admisible	$P_{ac}$	89.84	Psi	620	kPa
Espesor del cuerpo	$t_c$	3/16	in	4.68	mm

### Diseño de la cabeza elipsoidal inferior

Se parte del espesor calculado anteriormente para el cuerpo cilíndrico que fue de  $t_c = 3/16$  in, y se utiliza las siguientes ecuaciones, en la Figura 57 se presenta las variables geométricas:

$$CR = 0.9D_o \quad (18)$$

$$CR = 28.8 \text{ in} = 731 \text{ mm}$$

$$KR = 0.17D_o \quad (19)$$

$$KR = 5.44 \text{ in} = 136 \text{ mm}$$

$$\frac{D_o}{t_c} = 170.67$$

$$A = \frac{0.125}{\frac{CR}{t_c}} \quad (20)$$

$$A = 0.00081$$

El valor B se toma de las tablas que son obtenidas de (Megyesy & Buthod, 2001).

$$B = 11500$$

Finalmente se determina la presión admisible en la cabeza elipsoidal, con la siguiente ecuación:

$$P_{oc} = \frac{B}{\frac{CR}{t_c}} \quad (21)$$

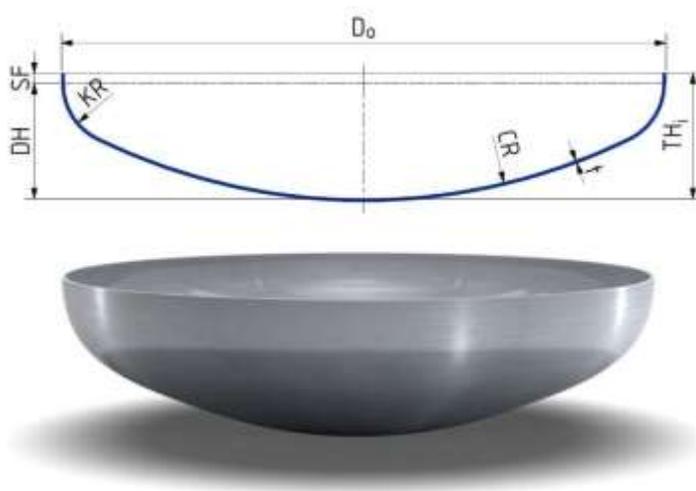
$$P_{oc} = 74.87 \text{ psi}$$

El espesor  $t$  de 3/16" (4.68 mm) cumple con los requerimientos de espesor en la cabeza elipsoidal 2:1.

En resumen los parámetros principales se muestran en la Figura 57 y en la Tabla 13, respectivamente:

**Figura 57**

*Identificación de variables de una cabeza elipsoidal.*



*Nota.* Fuente: (Xinxiang, 2019)

**Tabla 13**

*Variables de la cabeza elipsoidal inferior del reactor.*

Parámetro	Símbolo	Sistema Inglés		Sistema Internacional	
		Valor	Unidad	Valor	Unidad
Diámetro externo	$D_o$	32.00	in	810	mm
Diámetro interno	$D_i$	31.63	in	800	mm
Radio de corona	$CR$	28.80	in	731	mm
Radio de nudillo	$KR$	5.44	in	138	mm
Altura de brida recta	$SF$	2.00	in	50	mm
Profundidad de dishing	$DH$	7.91	in	197	mm
Altura total	$TH$	10.09	in	247	mm
Espesor de cabeza	$t$	3/16	in	4.68	mm

A continuación se comprueba que el espesor de la cabeza elipsoidal cumple con la presión interna.

$$P_{di} = 1.67 P_d \quad (22)$$

$$P_{di} = 25.05 \text{ psi}$$

$$t = \left( \frac{P_{di}(D_i + 2CA)}{2SE - 0.2P_{di}} \right) + CA \quad (23)$$

$$t = 0.0856 \approx \frac{1}{8} \text{ in} = 3.125 \text{ mm}$$

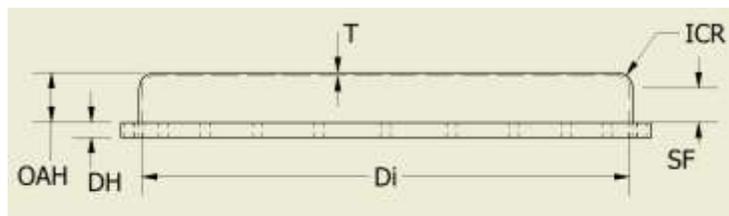
Se comprueba que el espesor mínimo calculado por presión interna es  $t=1/8''$  (3.125 mm), es decir el espesor de  $t=3/16''$  (4.68 mm) que se determinó por presión externa es el espesor crítico y con el que se trabajará.

### Diseño de la tapa superior (Flanged Only Head)

La tapa superior se diseñó como tapa de solo brida (FOH) ya que es muy versátil y comúnmente se utiliza como placa de cubierta para recipientes. La tapa se une al cuerpo por medio de pernos ya que son desmontables para efectos de mantenimiento o traslados y los costos operativos son bajos, además de la versatilidad para unir distintos materiales. Se utilizó las ecuaciones de (Megyesy & Buthod, 2001).

### Figura 58

*Identificación de variables de una tapa solo brida (FOH).*



A continuación se resume las respectivas dimensiones en la Tabla 14.

**Tabla 14**

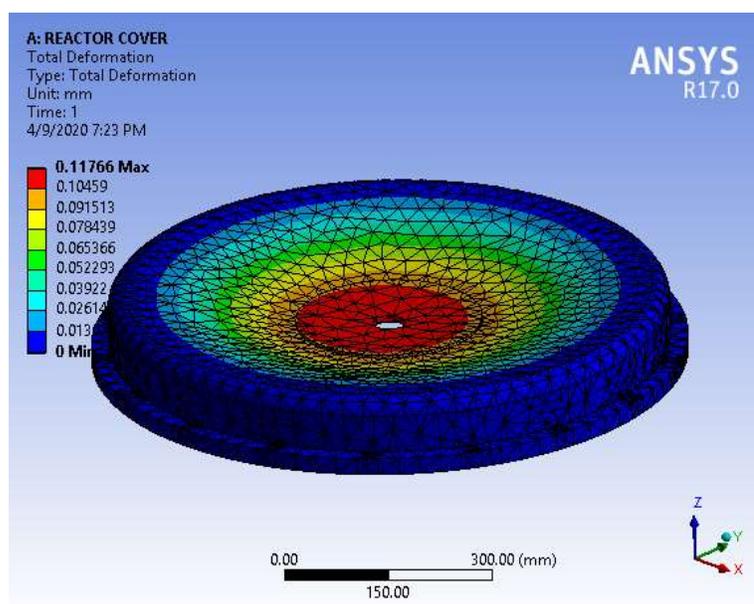
*Variables de la tapa solo brida superior del reactor.*

Parámetro	Símbolo	Sistema Inglés		Sistema Internacional	
		Valor	Unidad	Valor	Unidad
Diámetro interno	Di	31.63	in	800	mm
Radio de esquina interior	ICR	1.00	in	25	mm
Altura de brida recta	SF	2.00	in	50	mm
Profundidad de dishing	DH	1.00	in	25	mm
Altura total	OAH	3.19	in	81	mm
Espesor de cabeza	T	3/16	in	4.68	mm

Se verificó que la tapa del reactor soporte el peso del sistema de agitación incluido el motor eléctrico, para lo cual se realizó una simulación en ANSYS Stactic Structural para comprobar que los esfuerzos y desplazamientos generados en la tapa son admisibles.

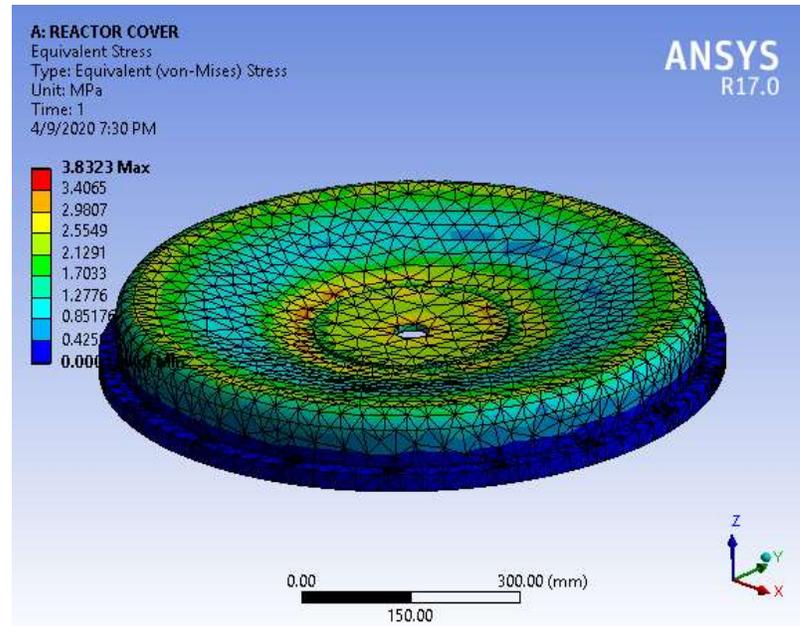
**Figura 59**

*Desplazamiento total máxima de la tapa superior.*



**Figura 60**

*Esfuerzo resultante por Von-Mises de la tapa superior.*



Los resultados que se obtuvieron se muestran en la Figura 58 el desplazamiento total máximo de 0.117 mm y en la Figura 60 el esfuerzo resultante por Von-Mises de 3.83 MPa el cual es menor al esfuerzo de fluencia del material, bajo estas dos premisas la tapa soportará la carga aplicada sin ningún problema.

### **Soporte del reactor principal**

El diseño de los soportes depende de dos parámetros importantes como son el diámetro y la altura del recipiente.

$$D_o = 810 \text{ mm}$$

$$D_o = 2.63 \text{ ft}$$

$$H = 1300 \text{ mm}$$

$$H = 4.22 \text{ ft}$$

**Figura 61**

*Medidas para ángulos como soportes del recipiente.*

VESSEL DIA	VESSEL HEIGHT MAX	ANGLE SIZE	l max	W
2'-6"	8'-0"	3" × 3" × 3/8"	5'-0"	4"
3'-0"				
3'-6"				
4'-0"	10'-0"	3.5" × 3.5" × 3/8"		6"
4'-6"				
5'-0"	14'-0"	4" × 4" × 1/2"		7"
5'-6"				
6'-0"	16'-0"	5" × 5" × 1/2"		10"
6'-6"				
7'-0"	18'-0"	6" × 6" × 5/8"		1'-0"
7'-6"				

*Nota.* Fuente: (Megyesy & Buthod, 2001).

El ángulo de sección L seleccionado fue el de 50x50x5 mm, con una longitud máxima de 500 mm. La placa base será cuadrada de 100 mm de lado y un espesor de 12 mm.

La placa base del soporte del recipiente será empernada en el SKID para facilitar el ensamble de los elementos que integran la planta. En la Figura 62 se muestra los soportes del reactor principal.

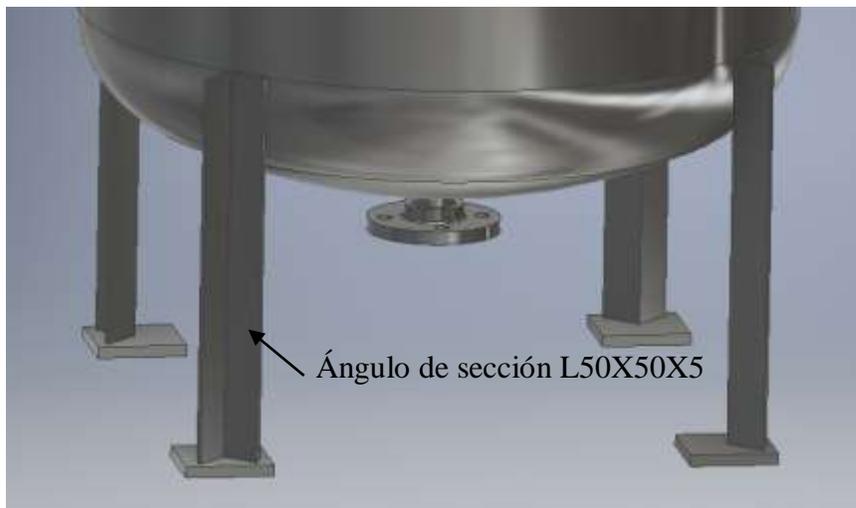
#### **Aberturas del reactor principal**

Las aberturas son necesarias para colocar la instrumentación y el acceso de las válvulas, para este caso serán menores a 2 pulgadas, por lo que no es necesario refuerzos según (Megyesy & Buthod, 2001).

El espesor de las boquillas, no deberá ser menor al espesor del cuerpo y cabezas, considerando la corrosión admisible. Es decir no puede ser menor a 3/16 pulgadas. A continuación en la Tabla 15 se presenta todas las aberturas necesarias.

**Figure 62**

*Soportes del reactor principal.*

**Tabla 15**

*Aberturas que se requieren en el reactor principal.*

No	Denominación	NPT	Diámetro abertura	Unidades	Necesita Refuerzo
1	Sales de hierro(FeCl3/FeSO4)	Para colocar las sales de hierro se necesita el diseño de una tapa la cual se presentará más adelante.			
2	Agua	1 1/2"	47.5	mm	No
3	Nitrógeno	1 1/2"	47.5	mm	No
4	Reactor de mezcla	1 1/2"	47.5	mm	No
5	Válvula de venteo	3/4"	47.5	mm	No
6	Manómetro	1"	32.5	mm	No
7	Termómetro	1"	32.5	mm	No
8	Medidor de PH	1/2"	32.5	mm	No
9	Medidor de ORP	1/2"	13.5	mm	No
10	Indicador de nivel	1"	32.5	mm	No
11	Salida del producto	1 1/2"	47.5	mm	No

#### **Tapa para las sales de hierro (FeCl3/FeSO4)**

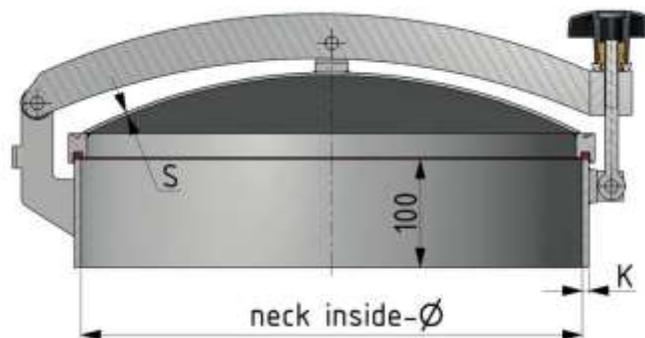
Esta tapa cuenta con un mecanismo mucho más sencillo y rápido para introducir las sales de hierro. Es muy importante que las sales de hierro se las inyecten de

manera rápida para evitar que ingrese la mayor cantidad de oxígeno a la mezcla y evitar posibles defectos para la obtención de nanopartículas.

A continuación en la Figura 63 se presenta el diseño de la tapa que se utilizará para ingresar las sales de hierro en el reactor principal, se tomó como referencia el catálogo de productos de la empresa alemana Zimmerlin. En la Figura 64 se muestra el modelado de la tapa.

### Figura 63

*Cierre de contenedores para diversas aplicaciones.*



*Nota.* Fuente: (Zimmerlin, 2020)

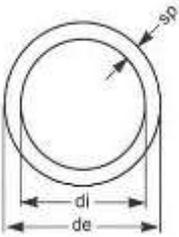
### Figura 64

*Tapa para el ingreso de las sales de hierro.*



## Resumen de diseño del reactor principal

A continuación se presenta la memoria de cálculo del diseño mecánico del reactor principal.

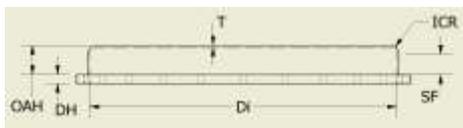
DISEÑO DE UNA PLANTA TRANSPORTABLE PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON CADMIO																																								
INSTITUCIÓN:	ESPE	<b>HOJA DE CÁLCULO - RECIPIENTE A PRESIÓN</b>																																						
INSTALACIÓN:																																								
SITIO:		SERVICIO:	AGITACIÓN																																					
PROYECTO:	1	DESCRIPCIÓN:	REACTOR PRINCIPAL																																					
No. HOJA DE DATOS:	1	ROTULO (# TAG):	RP-001																																					
CÁLCULO DE RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESIÓN INTERNA Y/O EXTERNA																																								
CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO																																								
<b>CUERPO</b>	-----	<b>CILÍNDRICO</b>	TEMPERATURA DE DISEÑO	°C	<b>25.00</b>																																			
ORIENTACIÓN	-----	<b>VERTICAL</b>	PRESIÓN ATMOSFÉRICA	Psig	<b>15.00</b>																																			
DIÁMETRO EXTERNO	Pulg	<b>32.00</b>	PRESIÓN EXTERNA	Psig	<b>15.00</b>																																			
LONGITUD	Pulg	<b>26.10</b>	DENSIDAD DEL FLUIDO	Lb/Pie <sup>3</sup>	<b>62.43</b>																																			
			MATERIAL	-----	<b>INOXIDABLE AISI 304</b>																																			
<b>CABEZAL</b>	INFERIOR	<b>ELIPTICO</b>	ESFUERZO DEL MATERIAL	Psi	20000																																			
	SUPERIOR	<b>PLANO</b>	MODULO DE ELASTICIDAD	Psi	29.00E+06																																			
			DENSIDAD DEL MATERIAL	Lb/Pie <sup>3</sup>	495.00																																			
AROS DE REFUERZO	-----	<b>NO</b>	TIPO DE JUNTA	-----	<b>LONGITUDINAL</b>																																			
CORROSIÓN ADMISIBLE	Pulg	<b>0.0625</b>	EFICIENCIA DE LA JUNTA	%	<b>100.00</b>																																			
ESPESOR DE PARED REQUERIDO																																								
<b>ESPESOR REQUERIDO POR PRESIÓN EXTERNA</b> (INCLUYENDO CORROSIÓN)		CUERPO =	0.1875	Pulg																																				
		CABEZALES =	0.1875	Pulg																																				
<b>ESPESOR REQUERIDO POR PRESIÓN INTERNA</b> (INCLUYENDO CORROSIÓN)		CUERPO =	0.1875	Pulg																																				
		CABEZALES =	0.1875	Pulg																																				
<b>ESPESOR DE DISEÑO SELECCIONADO = 3/16 Pulg</b>																																								
ESFUERZOS MÁXIMOS PERMITIDOS																																								
<b>CUERPO</b>	MÁXIMA PRESIÓN DE TRABAJO PERMITIDA [MAWP]:		235.47	Psi																																				
	MÁXIMA PRESIÓN EXTERNA PERMITIDA [EMAP]:		89.84	Psi																																				
<b>CABEZALES</b>	MÁXIMA PRESIÓN DE TRABAJO PERMITIDA [MAWP]:		236.87	Psi																																				
	MÁXIMA PRESIÓN EXTERNA PERMITIDA [EMAP]:		74.87	Psi																																				
DIMENSIONES DEL CUERPO																																								
REPRESENTACIÓN:																																								
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>PARÁMETRO</th> <th>SÍMBOLO</th> <th>VALOR</th> <th>UNIDAD</th> <th>VALOR</th> <th>UNIDAD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIÁMETRO EXTERNO</td> <td>De</td> <td>31.89</td> <td>Pulg</td> <td>810.00</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>DIÁMETRO INTERNO</td> <td>Di</td> <td>31.51</td> <td>Pulg</td> <td>800.00</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>ALTURA</td> <td>H</td> <td>26.10</td> <td>Pulg</td> <td>663.00</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>ESPESOR</td> <td>Sp</td> <td>0.1875</td> <td>Pulg</td> <td>4.76</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>PESO</td> <td>/</td> <td>141.39</td> <td>Lb</td> <td>64.12</td> <td>Kg</td> </tr> </tbody> </table>	PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	DIÁMETRO EXTERNO	De	31.89	Pulg	810.00	mm	DIÁMETRO INTERNO	Di	31.51	Pulg	800.00	mm	ALTURA	H	26.10	Pulg	663.00	mm	ESPESOR	Sp	0.1875	Pulg	4.76	mm	PESO	/	141.39	Lb	64.12	Kg		
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD																																			
DIÁMETRO EXTERNO	De	31.89	Pulg	810.00	mm																																			
DIÁMETRO INTERNO	Di	31.51	Pulg	800.00	mm																																			
ALTURA	H	26.10	Pulg	663.00	mm																																			
ESPESOR	Sp	0.1875	Pulg	4.76	mm																																			
PESO	/	141.39	Lb	64.12	Kg																																			

CONTINÚA



### DIMENSIONES DE LOS CABEZALES (SUPERIOR)

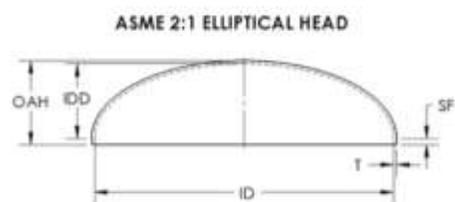
REPRESENTACIÓN:



PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD
DIÁMETRO INTERIOR	Di	31.50	Pulg	800.00	mm
ESPESOR	T	0.1875	Pulg	4.76	mm
RADIO DE ESQ INTERIOR	ICR	1.00	Pulg	25.40	mm
BRIDA RECTA	SF	2.00	Pulg	50.80	mm
PROF. INTERIOR PLATO	DH	1.00	Pulg	25.40	mm
ALTURA GENERAL	OAH	3.19	Pulg	81.03	mm
PESO	/	56.20	Lb	25.49	Kg

### DIMENSIONES DE LOS CABEZALES (INFERIOR)

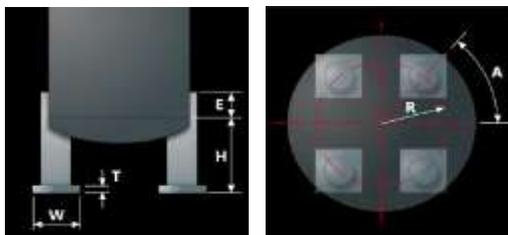
REPRESENTACIÓN:



PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD
DIÁMETRO INTERIOR	ID	31.63	Pulg	800.00	mm
ESPESOR	T	0.1875	Pulg	4.76	mm
BRIDA RECTA	SF	2.00	Pulg	50.80	mm
PROF. INTERIOR PLATO	IDD	7.95	Pulg	202.00	mm
ALTURA GENERAL	OAH	9.95	Pulg	252.80	mm
PESO	/	69.12	Lb	31.35	Kg

### SOPORTE DE RECIPIENTE

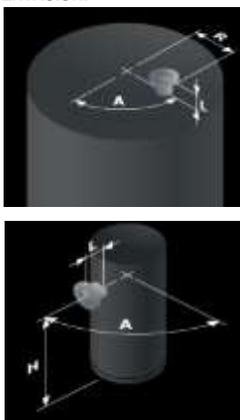
REPRESENTACIÓN:



PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD
DISPOS. DE ÁNGULO	A	45.00	Grados		
ALTURA 1	E	4.84	Pulg	123.00	mm
ALTURA 2	H	17.91	Pulg	455.00	mm
RADIO LEG	R	15.71	Pulg	399.00	mm
ESPESOR DE PLACA	T	0.50	Pulg	12.70	mm
ANCHO DE PLACA	W	3.94	Pulg	100.00	mm
PERFIL TIPO:		L2x2x3/16	N°	4.00	

### ABERTURAS DEL RECIPIENTE

REPRESENTACIÓN:



N°	DENOMINACIÓN	POSICIÓN	NPT	L (mm)	R (mm)	A (°)	H (mm)
1	SALES DE HIERRO (FeCl3/FeSO4)	TAPA		50.00	300.00	0.00	/
2	REACTOR MEZCLA	TAPA	1 1/2"	100.00	250.00	270.00	/
3	AGUA	TAPA	1 1/2"	100.00	250.00	180.00	/
4	N2	RADIAL	1"	50.00	/	90.00	650.00
5	VÁLVULA DE VENDEO	TAPA	3/4"	50.00	250.00	90.00	/
6	MANÓMETRO	RADIAL	1"	50.00	/	0.00	450.00
7	TERMÓMETRO	RADIAL	1"	50.00	/	0.00	325.00
8	MEDIDOR DE PH	RADIAL	1/2"	25.00	/	18.00	450.00
9	MEDIDOR DE ORP	RADIAL	1/2"	25.00	/	18.00	325.00
10	INDICADOR DE NIVEL	RADIAL	1"	50.00	/	342.00	300.00
11	SALIDA DEL PRODUCTO	FONDO	1 1/2"	50.00	0.00	0.00	/

**Aclaraciones:** 1. El espesor de las boquillas, no deberá ser menor al espesor del cuerpo y cabezas, considerando la corrosión admisible. Es decir no puede ser menor a 3/16 Pulg.

2. Según lo calculado, ninguna de las aberturas mencionadas necesita refuerzo.

CONTINÚA



PESO DEL EQUIPO			
CUERPO	VACIO:	141 Lb	64.12 Kg
CABEZALES	VACIO:	125 Lb	56.83 Kg
<b>PESO TOTAL</b>	<b>VACIO:</b>	<b>267 Lb</b>	<b>120.95 Kg</b>

VISTAS E ISOMÉTRICO DEL RECIPIENTE			
ISOMÉTRICO	VISTAS		
	SUPERIOR 	PLANTA 	
	FRONTAL 		
ELAB.: <b>MIGUEL PERUGACHI</b> APROB.: REV.: <b>ING. CARLOS NARANJO</b> FECHA: 10/10/2019			

### Diseño Mecánico del reactor de mezcla

Para el reactor de mezcla se tiene dos opciones las cuales va a depender directamente del material que se va a utilizar.

En este reactor de mezcla se genera una solución básica es decir un pH mayor a 7, este el requerimiento más importante que se debe considerar. En la Tabla 16 se presenta dos opciones del material para el reactor de mezcla.

**Tabla 16**

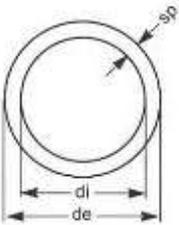
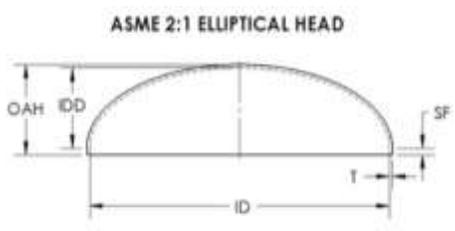
*Opciones de material para diseñar el reactor de mezcla.*

	<b>OPCIÓN 1</b>	<b>OPCIÓN 2</b>
<b>Material</b>	Acero al Carbono	Plástico
<b>Volumen</b>	300 litros	300 litros
<b>Inconvenientes</b>	Tiempo de fabricación	Instalación del sistema de agitación y perforación de las aberturas.
<b>Costo</b>	Elevado a comparación de la opción 2.	Relativamente bajo.

Se desarrollarán las alternativas presentadas en la Tabla 16 y al final se escogerá la más adecuada para la aplicación.

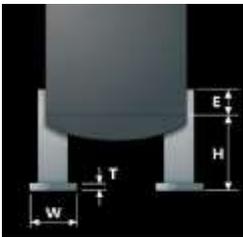
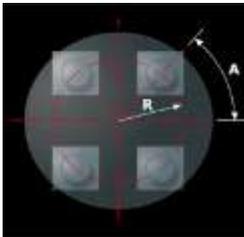
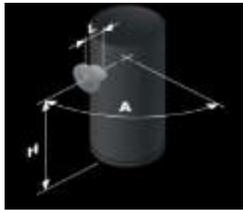
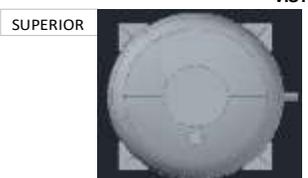
#### **Reactor de mezcla en acero al carbono**

Se diseña el reactor de mezcla con la metodología del código ASME Sección VIII div. 1, la cual fue utilizada anteriormente para el diseño del reactor principal, por tal motivo a continuación se presenta la memoria de cálculo del diseño mecánico del reactor mezcla con dimensiones del cuerpo, tipos de cabeza, aberturas necesarias y el isométrico del recipiente.

DISEÑO DE UNA PLANTA TRANSPORTABLE PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON CADMIO																																												
INSTITUCIÓN: ESPE		<b>HOJA DE CÁLCULO - RECIPIENTE A PRESIÓN</b>																																										
INSTALACIÓN:																																												
SITIO:																																												
PROYECTO: 1																																												
No. HOJA DE DATOS: 2		SERVICIO: AGITACIÓN																																										
		DESCRIPCIÓN: REACTOR DE MEZCLA																																										
		ROTULO (# TAG): RP-002																																										
CÁLCULO DE RECIPIENTES SOMETIDOS A PRESIÓN INTERNA Y/O EXTERNA																																												
CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO																																												
CUERPO	----	<b>CILÍNDRICO</b>	TEMPERATURA DE DISEÑO	°C	<b>25.00</b>																																							
ORIENTACIÓN	----	<b>VERTICAL</b>	PRESIÓN ATMOSFÉRICA	Psig	<b>15.00</b>																																							
DIÁMETRO EXTERNO	Pulg	<b>22.13</b>	PRESIÓN EXTERNA	Psig	<b>15.00</b>																																							
LONGITUD	Pulg	<b>34.45</b>	DENSIDAD DEL FLUIDO	Lb/Pie <sup>3</sup>	<b>62.43</b>																																							
			MATERIAL	----	<b>ACERO AL CARBONO</b>																																							
CABEZAL	SUPERIOR	<b>ELIPTICO</b>	ESFUERZO DEL MATERIAL	Psi	20000																																							
	INFERIOR	<b>ELIPTICO</b>	MODULO DE ELASTICIDAD	Psi	29.00E+06																																							
			DENSIDAD DEL MATERIAL	Lb/Pie <sup>3</sup>	495.00																																							
AROS DE REFUERZO	----	<b>NO</b>	TIPO DE JUNTA	----	<b>LONGITUDINAL</b>																																							
CORROSIÓN ADMISIBLE	Pulg	<b>0.0625</b>	EFICIENCIA DE LA JUNTA	%	<b>100.00</b>																																							
ESPESOR DE PARED REQUERIDO																																												
ESPESOR REQUERIDO POR PRESIÓN EXTERNA (INCLUYENDO CORROSIÓN)		CUERPO =	0.1250	Pulg																																								
		CABEZALES =	0.1250	Pulg																																								
ESPESOR REQUERIDO POR PRESIÓN INTERNA (INCLUYENDO CORROSIÓN)		CUERPO =	0.1250	Pulg																																								
		CABEZALES =	0.1250	Pulg																																								
<b>ESPESOR DE DISEÑO SELECCIONADO = 1/8 Pulg</b>																																												
ESFUERZOS MÁXIMOS PERMITIDOS																																												
<b>CUERPO</b>	MÁXIMA PRESIÓN DE TRABAJO PERMITIDA [MAWP]:		235.47	Psi																																								
	MÁXIMA PRESIÓN EXTERNA PERMITIDA [EMAP]:		86.61	Psi																																								
<b>CABEZALES</b>	MÁXIMA PRESIÓN DE TRABAJO PERMITIDA [MAWP]:		236.87	Psi																																								
	MÁXIMA PRESIÓN EXTERNA PERMITIDA [EMAP]:		72.17	Psi																																								
DIMENSIONES DEL CUERPO																																												
REPRESENTACIÓN:																																												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>PARÁMETRO</th> <th>SÍMBOLO</th> <th>VALOR</th> <th>UNIDAD</th> <th>VALOR</th> <th>UNIDAD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIÁMETRO EXTERNO</td> <td>De</td> <td>22.13</td> <td>Pulg</td> <td>562.00</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>DIÁMETRO INTERNO</td> <td>Di</td> <td>21.88</td> <td>Pulg</td> <td>555.65</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>ALTURA</td> <td>H</td> <td>34.45</td> <td>Pulg</td> <td>875.00</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>ESPESOR</td> <td>Sp</td> <td>0.1250</td> <td>Pulg</td> <td>3.18</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>PESO</td> <td>/</td> <td>85.26</td> <td>Lb</td> <td>38.66</td> <td>Kg</td> </tr> </tbody> </table>	PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	DIÁMETRO EXTERNO	De	22.13	Pulg	562.00	mm	DIÁMETRO INTERNO	Di	21.88	Pulg	555.65	mm	ALTURA	H	34.45	Pulg	875.00	mm	ESPESOR	Sp	0.1250	Pulg	3.18	mm	PESO	/	85.26	Lb	38.66	Kg						
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD																																							
DIÁMETRO EXTERNO	De	22.13	Pulg	562.00	mm																																							
DIÁMETRO INTERNO	Di	21.88	Pulg	555.65	mm																																							
ALTURA	H	34.45	Pulg	875.00	mm																																							
ESPESOR	Sp	0.1250	Pulg	3.18	mm																																							
PESO	/	85.26	Lb	38.66	Kg																																							
DIMENSIONES DE LOS CABEZALES (INFERIOR Y SUPERIOR)																																												
REPRESENTACIÓN:																																												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PARÁMETRO</th> <th>SÍMBOLO</th> <th>VALOR</th> <th>UNIDAD</th> <th>VALOR</th> <th>UNIDAD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIÁMETRO INTERIOR</td> <td>ID</td> <td>21.88</td> <td>Pulg</td> <td>555.65</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>ESPESOR</td> <td>T</td> <td>0.1250</td> <td>Pulg</td> <td>3.18</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>BRIDA RECTA</td> <td>SF</td> <td>2.00</td> <td>Pulg</td> <td>50.80</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>PROF. INTERIOR PLATO</td> <td>IDD</td> <td>5.47</td> <td>Pulg</td> <td>138.94</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>ALTURA GENERAL</td> <td>OAH</td> <td>7.60</td> <td>Pulg</td> <td>192.91</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>PESO</td> <td>/</td> <td>23.55</td> <td>Lb</td> <td>10.68</td> <td>Kg</td> </tr> </tbody> </table>	PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	DIÁMETRO INTERIOR	ID	21.88	Pulg	555.65	mm	ESPESOR	T	0.1250	Pulg	3.18	mm	BRIDA RECTA	SF	2.00	Pulg	50.80	mm	PROF. INTERIOR PLATO	IDD	5.47	Pulg	138.94	mm	ALTURA GENERAL	OAH	7.60	Pulg	192.91	mm	PESO	/	23.55	Lb	10.68	Kg	
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD																																							
DIÁMETRO INTERIOR	ID	21.88	Pulg	555.65	mm																																							
ESPESOR	T	0.1250	Pulg	3.18	mm																																							
BRIDA RECTA	SF	2.00	Pulg	50.80	mm																																							
PROF. INTERIOR PLATO	IDD	5.47	Pulg	138.94	mm																																							
ALTURA GENERAL	OAH	7.60	Pulg	192.91	mm																																							
PESO	/	23.55	Lb	10.68	Kg																																							

CONTINÚA



SOPORTE DE RECIPIENTE																																																																																							
REPRESENTACIÓN:																																																																																							
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>PARÁMETRO</th> <th>SÍMBOLO</th> <th>VALOR</th> <th>UNIDAD</th> <th>VALOR</th> <th>UNIDAD</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DISPOS. DE ÁNGULO</td> <td>A</td> <td>45.00</td> <td>Grados</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ALTURA 1</td> <td>E</td> <td>11.81</td> <td>Pulg</td> <td>300.00</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>ALTURA 2</td> <td>H</td> <td>15.75</td> <td>Pulg</td> <td>400.00</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>RADIO LEG</td> <td>R</td> <td>11.77</td> <td>Pulg</td> <td>299.00</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>ESPESOR DE PLACA</td> <td>T</td> <td>0.50</td> <td>Pulg</td> <td>12.70</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>ANCHO DE PLACA</td> <td>W</td> <td>3.94</td> <td>Pulg</td> <td>100.00</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>PERFIL TIPO:</td> <td></td> <td>L2x3/16</td> <td>N°</td> <td></td> <td>4.00</td> </tr> </tbody> </table>	PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD	DISPOS. DE ÁNGULO	A	45.00	Grados			ALTURA 1	E	11.81	Pulg	300.00	mm	ALTURA 2	H	15.75	Pulg	400.00	mm	RADIO LEG	R	11.77	Pulg	299.00	mm	ESPESOR DE PLACA	T	0.50	Pulg	12.70	mm	ANCHO DE PLACA	W	3.94	Pulg	100.00	mm	PERFIL TIPO:		L2x3/16	N°		4.00																																					
PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD	VALOR	UNIDAD																																																																																		
DISPOS. DE ÁNGULO	A	45.00	Grados																																																																																				
ALTURA 1	E	11.81	Pulg	300.00	mm																																																																																		
ALTURA 2	H	15.75	Pulg	400.00	mm																																																																																		
RADIO LEG	R	11.77	Pulg	299.00	mm																																																																																		
ESPESOR DE PLACA	T	0.50	Pulg	12.70	mm																																																																																		
ANCHO DE PLACA	W	3.94	Pulg	100.00	mm																																																																																		
PERFIL TIPO:		L2x3/16	N°		4.00																																																																																		
ABERTURAS DEL RECIPIENTE																																																																																							
REPRESENTACIÓN:																																																																																							
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>N°</th> <th>DENOMINACIÓN</th> <th>POSICIÓN</th> <th>NPT</th> <th>L (mm)</th> <th>R (mm)</th> <th>A (°)</th> <th>H (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>TIOSULFATO DE SODIO (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), EXTRACTO DE JAMAICA, CMC, NaOH</td> <td>TAPA</td> <td>1 1/2"</td> <td>50.00</td> <td>250.00</td> <td>0.00</td> <td>/</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>AGUA</td> <td>TAPA</td> <td>1 1/2"</td> <td>100.00</td> <td>250.00</td> <td>180.00</td> <td>/</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>N<sub>2</sub></td> <td>RADIAL</td> <td>1 1/2"</td> <td>50.00</td> <td>/</td> <td>225.00</td> <td>650.00</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>VÁLVULA DE VENDEO</td> <td>TAPA</td> <td>1 1/2"</td> <td>50.00</td> <td>250.00</td> <td>90.00</td> <td>/</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>MANÓMETRO</td> <td>RADIAL</td> <td>1"</td> <td>50.00</td> <td>/</td> <td>180.00</td> <td>450.00</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>TERMÓMETRO</td> <td>RADIAL</td> <td>1"</td> <td>50.00</td> <td>/</td> <td>180.00</td> <td>325.00</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>MEDIDOR DE PH</td> <td>RADIAL</td> <td>1"</td> <td>25.00</td> <td>/</td> <td>90.00</td> <td>450.00</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>INDICADOR DE NIVEL</td> <td>RADIAL</td> <td>1/4"</td> <td>25.00</td> <td>/</td> <td>90.00</td> <td>325.00</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>SALIDA DEL PRODUCTO</td> <td>FONDO</td> <td>1 1/2"</td> <td>50.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>/</td> </tr> </tbody> </table>	N°	DENOMINACIÓN	POSICIÓN	NPT	L (mm)	R (mm)	A (°)	H (mm)	1	TIOSULFATO DE SODIO (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), EXTRACTO DE JAMAICA, CMC, NaOH	TAPA	1 1/2"	50.00	250.00	0.00	/	2	AGUA	TAPA	1 1/2"	100.00	250.00	180.00	/	3	N <sub>2</sub>	RADIAL	1 1/2"	50.00	/	225.00	650.00	4	VÁLVULA DE VENDEO	TAPA	1 1/2"	50.00	250.00	90.00	/	5	MANÓMETRO	RADIAL	1"	50.00	/	180.00	450.00	6	TERMÓMETRO	RADIAL	1"	50.00	/	180.00	325.00	7	MEDIDOR DE PH	RADIAL	1"	25.00	/	90.00	450.00	8	INDICADOR DE NIVEL	RADIAL	1/4"	25.00	/	90.00	325.00	9	SALIDA DEL PRODUCTO	FONDO	1 1/2"	50.00	0.00	0.00	/					
N°	DENOMINACIÓN	POSICIÓN	NPT	L (mm)	R (mm)	A (°)	H (mm)																																																																																
1	TIOSULFATO DE SODIO (Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), EXTRACTO DE JAMAICA, CMC, NaOH	TAPA	1 1/2"	50.00	250.00	0.00	/																																																																																
2	AGUA	TAPA	1 1/2"	100.00	250.00	180.00	/																																																																																
3	N <sub>2</sub>	RADIAL	1 1/2"	50.00	/	225.00	650.00																																																																																
4	VÁLVULA DE VENDEO	TAPA	1 1/2"	50.00	250.00	90.00	/																																																																																
5	MANÓMETRO	RADIAL	1"	50.00	/	180.00	450.00																																																																																
6	TERMÓMETRO	RADIAL	1"	50.00	/	180.00	325.00																																																																																
7	MEDIDOR DE PH	RADIAL	1"	25.00	/	90.00	450.00																																																																																
8	INDICADOR DE NIVEL	RADIAL	1/4"	25.00	/	90.00	325.00																																																																																
9	SALIDA DEL PRODUCTO	FONDO	1 1/2"	50.00	0.00	0.00	/																																																																																
<p><b>Aclaraciones:</b> 1. El espesor de las boquillas, no deberá ser menor al espesor del cuerpo y cabezas, considerando la corrosión admisible. Es decir no puede ser menor a 1/8 Pulg.</p> <p>2. Según lo calculado, ninguna de las aberturas mencionadas necesita refuerzo.</p>																																																																																							
PESO DEL EQUIPO																																																																																							
CUERPO	VACIO:	85 Lb	38.66 Kg																																																																																				
CABEZALES	VACIO:	47 Lb	19.68 Kg																																																																																				
<b>PESO TOTAL</b>	<b>VACIO:</b>	<b>132 Lb</b>	<b>58.35 Kg</b>																																																																																				
VISTAS E ISOMÉTRICO DEL RECIPIENTE																																																																																							
	ISOMÉTRICO		VISTAS																																																																																				
			SUPERIOR			PLANTA																																																																																	
			FRONTAL																																																																																				

### Reactor de mezcla en plástico

Como se mencionó anteriormente el pH generado en este recipiente es básico con un valor mayor a 7, por ese motivo la opción más adecuada es que sea un tanque de plástico ya disponible en el mercado con una capacidad de 200 litros. Entre las principales ventajas de los plásticos comparados con los metales cabría mencionar la compatibilidad química y la resistencia a sustancias químicas y a la corrosión.

Se ha seleccionado un tanque de plástico de la marca INDELTRO como se muestra en la Figura 65 que tiene una capacidad de 200 litros y en la Tabla 17 se muestra las dimensiones del tanque.

#### Figura 65

*Tanque de mezcla de 200 litros de plástico.*



*Nota. Fuente: (Indeltro, 2020)*

**Tabla 17**

*Dimensiones del tanque INDELTRO.*

No	Parámetro	Valor	Unidad
1	Diámetro del tanque	562	mm
2	Altura del tanque	875	mm

Las aberturas en el tanque de plástico tendrán la misma ubicación y dimensiones que el recipiente hecho en acero inoxidable. Después de evaluar las consideraciones pertinentes el tanque de plástico es una mejor opción para la determinada función a cumplir, debido a que su costo-beneficio es mucho mayor a comparación de si es fabricado en acero inoxidable.

#### **Diseño del sistema de agitación del reactor principal**

En el capítulo III se presentó la simulación numérica en ANSYS CFD de la mezcla, en el cual se validó el sistema de agitación de la propuesta seleccionada que estaba conformado por dos turbinas (PBT Y RFT) y placas deflectoras.

El fluido de trabajo de la mezcla en el reactor principal tiene una densidad muy similar al agua, por tal motivo para los cálculos se tomará la densidad y viscosidad del agua. En fluidos de baja viscosidad que se encuentran sometidos a un campo irrotacional los esfuerzos de corte no se desarrollan con facilidad entre las capas del flujo (Revelo, 2016).

En el sistema de agitación es fundamental el aumento de los esfuerzos de corte y la cantidad de energía cinética turbulenta para obtener una buena homogeneización en toda la mezcla y favorecer la generación de nanopartículas metálicas.

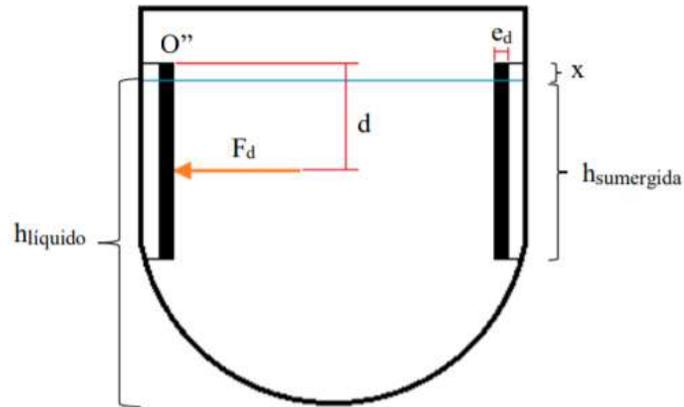
#### **Diseño de las placas deflectoras (baffles)**

Las placas deflectoras son placas largas y planas que se unen al costado del recipiente para evitar remolinos y promover el movimiento de fluido de arriba a abajo.

El proceso para calcular el espesor de las placas deflectoras empieza determinando el parámetro  $d$ , que se lo obtiene con las siguientes ecuaciones.

**Figure 66**

*Punto de aplicación de la fuerza que actúa sobre los deflectores.*



$$d = x + \frac{h_{sumergida}}{2} \quad (24)$$

$$h_{sumergida} = h_{liquido} - h_o \quad (25)$$

$$h_{sumergida} = 600 \text{ mm} - 200 \text{ mm} = 400 \text{ mm}$$

$$x = L_{placa} - h_{sumergida} \quad (26)$$

$$x = 660 \text{ mm} - 400 \text{ mm} = 260 \text{ mm}$$

Para calcular el momento, se tiene en cuenta la fuerza que ejerce el fluido sobre la sección de placa deflectora que está sumergida en el mismo ( $F_d$ ). Esta fuerza a partir de la ecuación (27).

$$F_d = \frac{1}{2} * C_D * \rho * v^2 * A_d \quad (27)$$

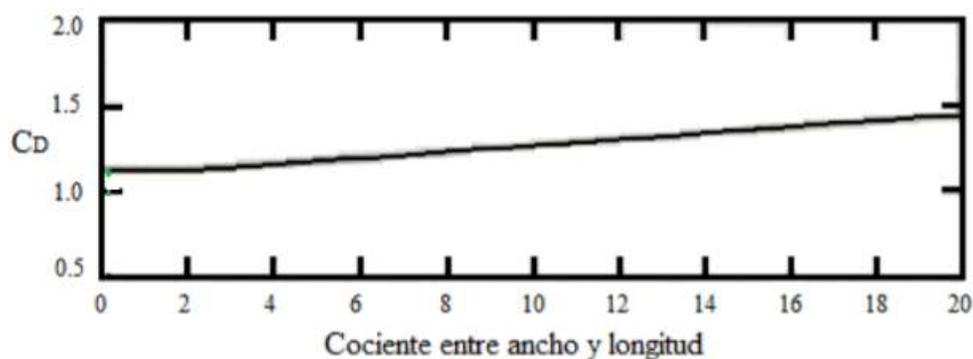
Donde  $C_d$  es el coeficiente de arrastre y se obtiene de la Figura 67,  $v$  es la velocidad del fluido que está en contacto con el deflector y ( $A_d$ ) es el área sumergida de las placas deflectoras.

Para obtener el valor del coeficiente de arrastre se necesita conocer el cociente entre el ancho del deflector y el alto de placa que se encuentra sumergida en el fluido.

$$\frac{B}{h_{sumergida}} = \frac{0.09m}{0.4m} = 0.23$$

**Figure 67**

*CD frente al cociente entre el ancho y la longitud.*



Para un valor de abscisa de 0.23, en la Figura 67, se obtiene un valor para ( $C_d$ ) de 1,16. La velocidad del fluido en los alrededores de los deflectores puede considerarse como la décima parte de la velocidad en la zona de impulsión, que viene expresada en la ecuación (28).

$$v_{impulsión} = n * 2 * \pi * r_a \quad (28)$$

Donde  $n$  es la velocidad angular en rps y  $r_a$  el radio del agitador en metros.

$$v_{impulsión} = n * 2 * \pi * \frac{D_a}{2}$$

$$v_{impulsión} = 5.97 \text{ m/s}$$

$$v = 0.1 * v_{impulsión} \quad (29)$$

$$v = 0.59 \text{ m/s}$$

Por último, se calcula el área sumergida de la placa defletores mediante la ecuación (30).

$$A_d = J * h_{sumergida} \quad (30)$$

$$A_d = (0.09 \text{ m})(0.4 \text{ m}) = 0.036 \text{ m}^2$$

Conocidos los valores de los parámetros anteriores, se obtiene el valor de la fuerza que actúa sobre los deflectores a partir de la ecuación (27).

$$F_d = \frac{1}{2} * 1.16 * 1000 * (0.59)^2 * (0.036) = 7.2 \text{ N}$$

A partir de la fuerza ( $F_d$ ) y considerando que ésta se aplica en el centroide del área sumergida del deflector a una distancia ( $d$ ) respecto al punto O", se obtiene el momento para dicho punto mediante la ecuación (31).

$$M_o = F_d * d \quad (31)$$

$$M_o = 3.34 \text{ N} * \text{m}$$

El cálculo del espesor mínimo de las placas deflectoras se realiza a partir de la fórmula de la flexión, ecuación (32).

$$S_y = \frac{f * M_o * y}{I} \quad (32)$$

Siendo:

- Nf: factor de seguridad con un valor de 2,5 (valor más común).
- y: distancia al punto de máxima tensión.
- I: momento de inercia de una sección rectangular.
- Sy: límite de fluencia del acero AISI 304L, tiene un valor de 170·106 Pa.

$$S_y = \frac{N_f * M_o * \frac{e_d}{2}}{I * \frac{e_d^3}{12}}$$

$$e_d = \sqrt{\frac{6 * N_f * M_o}{S_y * I}} \quad (33)$$

$$e_d = \sqrt{\frac{6 * 2.5 * 3.34}{170.10^6 * 0.1}} = 0.00171 \text{ m} = 1.71 \text{ mm}$$

El mínimo espesor calculado es de 1.71 mm, si bien estos cálculos indican que el comportamiento será adecuado con ese espesor. Se tomará un espesor comercial de 5 mm para facilitar la soldadura de las placas al recipiente.

En la Tabla 18 el resumen de la geometría de las placas deflectoras.

**Tabla 18**

*Dimensiones de las placas deflectoras.*

<b>PLACAS DEFLECTORAS</b>	
B (Ancho de placa)=	81 mm
Bc (Espaciamiento entre placa y pared) =	11 mm
Largo de placa =	660 mm
Espesor de placa comercial =	5 mm
Número de placas =	4

Se colocan 4 placas deflectoras ubicadas a 90° una de la otra, además se utilizó el método de unión por soldadura debido a que el tiempo de preparación es menor que las uniones desmontables, las uniones no se deforman, además son más sencillas y tienen mejor apariencia.

**Figura 68**

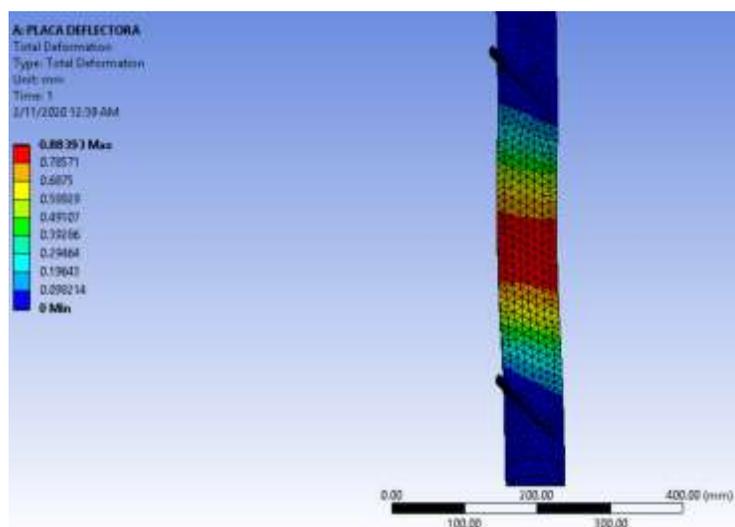
*Ubicación de las placas deflectoras en el reactor.*



Para validar el espesor de las placas deflectoras se realizó una simulación en el software ANSYS 17.0 con el fin de determinar posibles fallos. En la Figura 69 se muestra la máxima deformación de la placa que fue de 0.88 mm, sin embargo se encuentra dentro del rango permisible y se verifica que el espesor de la placa de 5 mm es adecuado para la aplicación.

**Figura 69**

*Deformación máxima de la placa deflectorá.*

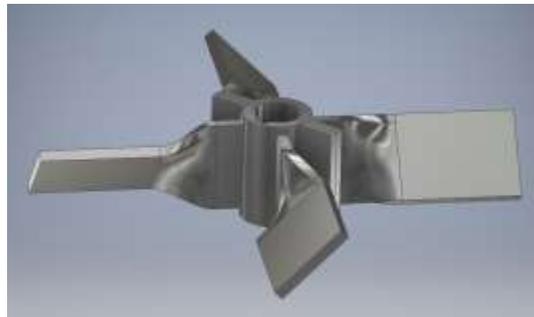


### Diseño de las turbinas (RFT y PBT)

El impulsor PBT como se muestra en la Figura 70 es el impulsor más versátil y son útiles para mezclar dos o más líquidos y generan un flujo axial considerable, son recomendados para aplicaciones de homogeneización.

#### Figura 70

*Turbina de flujo axial.*



El impulsor RFT como se muestra en la Figura 68 proporciona altas tasas de cizallamiento debido a su ángulo de ataque. También tienen un número de bombeo relativamente bajo, lo que los hace más sensibles a la viscosidad. Este impulsor es de carácter radial por lo que no tiene un alto flujo de rotación en el recipiente como los impulsores de flujo axial.

#### Figura 71

*Turbina de flujo radial.*



El dimensionamiento de los impulsores ya se lo realizó en el Capítulo 3. Los parámetros geométricos que se muestran en la Tabla 6 se los obtuvo aplicando las buenas prácticas y recomendaciones de diseño para mezcladores según (Exxon Mobil, 2001).

Definimos el espesor de las paletas aplicando las ecuaciones (31), (32), (33) y las siguientes ecuaciones.

$$v = n * l \quad (34)$$

$$v = 7.05 * 0.135 = 0.95 \text{ m/s}$$

$$F_a = C_D * b * l * \rho * \frac{v^2}{2} \quad (35)$$

$$F_a = 1.16 * 0.135 * 0.09 * 1000 * \frac{(0.95)^2}{2} = 6.36 \text{ N}$$

Siendo:

- Cd: coeficiente de arrastre.
- b: Anchura de la paleta.
- l: Longitud de paleta.
- n: Velocidad en radianes por segundo.
- v: velocidad en m/s.
- $\rho$ : densidad.

$$e_p = \sqrt{\frac{6 * N_f * M_o}{S_y * I}}$$

$$e_p = \sqrt{\frac{6 * 2.5 * 6.36}{170.10^6 * 0.1}} = 0.00236 \text{ m} = 2.36 \text{ mm}$$

El mínimo espesor comercial de las paletas de las turbinas RDT Y PBT es de 3 milímetros por lo que deben tener como mínimo ese espesor. A continuación en la Figura 72 se presenta el agitador con los dos tipos de turbinas que se utilizarán.

### Figura 72

*Agitador con los 2 tipos de turbinas en el reactor principal.*



### Selección del motor

Para seleccionar el motor se fija algunos parámetros necesarios que se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 19**

*Parámetros de entrada para la selección del motor.*

No	Parámetro	Valor	Unidad
1	Densidad ( $\rho$ )	1000	Kg/m <sup>3</sup>
2	Viscosidad dinámica ( $\mu$ )	0.001	Kg/ms
3	Velocidad del agitador (N)	7.05	rps
4	Número de bombeo (Nq)	0.80	

Se recalcula el diámetro de la turbina para verificar si cumple con los requerimientos del proceso.

$$D = \left( \frac{Q}{N_q * N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (36)$$

$$D = 0.329 \text{ m}$$

El número de Reynolds se lo obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho * N * D^2}{\mu} \quad (37)$$

$$Re = 7.59 * 10^5$$

Esto indica que la operación se está llevando a cabo en régimen turbulento. La potencia de disipación al fluido se calcula a partir de la siguiente ecuación (Exxon Mobil, 2001):

$$P = N_p * \rho * N^3 \frac{D^5}{1000} \quad (38)$$

$$P = 1.727 \text{ kW}$$

Donde el valor de  $N_p=1.3$  se lo obtiene de la Figura 73 del rodete tipo 6 que es el Pitched Blade Turbine que se utiliza en el diseño. La potencia necesaria se estima multiplicando la potencia de disipación por 1.25 y se obtiene (Exxon Mobil, 2001):

$$P_N = 1.25 * P = 2.16 \text{ kW}$$

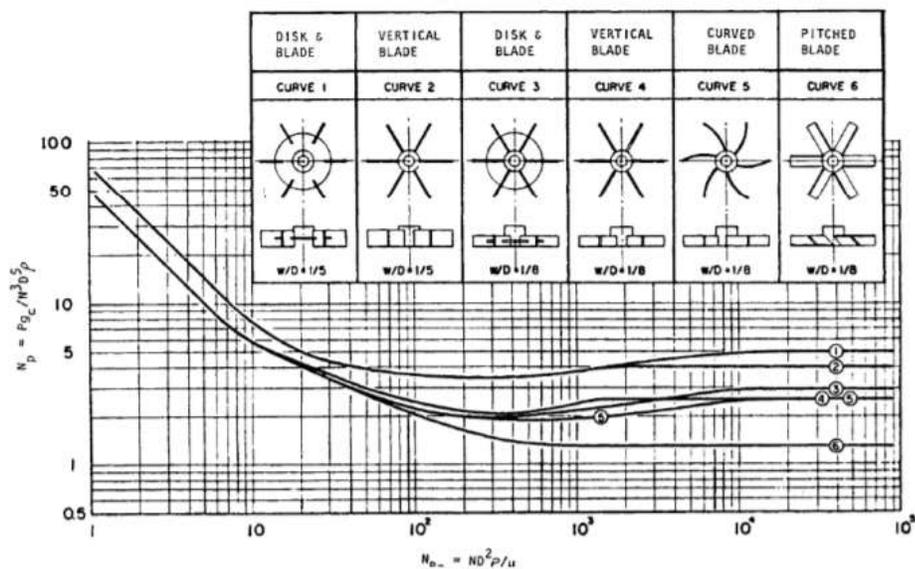
$$Pot = \frac{P_N}{0.746} \quad (39)$$

$$Pot = \frac{P_N}{0.746} = 2.89 \text{ HP}$$

La potencia que se necesita en el motor eléctrico es de 3 HP. Es recomendado que el motor sea trifásico para esta aplicación.

Figura 73

Número de potencia para distintos impulsores.



Nota. Fuente: (Pyle, Fryer , & Reilly , 2012)

Para la elección del motor se debe fijar algunos parámetros como velocidad sincrónica y velocidad real de salida del motor.

### 1. Velocidad sincrónica

$$N_s = \frac{120 * f}{P} \quad (40)$$

$$N_s = 1800 \text{ rpm}$$

Donde  $f=60$  Hz que es la frecuencia de voltaje en Ecuador y  $P=4$  que es el número de polos del rotor.

### 2. Velocidad real de salida del motor

$$N_m = (1 - s) * N_s \quad (41)$$

$$N_m = 1710 \text{ rpm}$$

Donde  $s=0.05$  que es el deslizamiento que se admite debido a que el motor no gira a velocidad sincrónica.

Para esta aplicación se necesita un motor de inducción de forma constructiva tipo V1, las formas constructivas V son aquellas en la cual el montaje del motor es en vertical. Suele ser necesario equipar el motor con rodamientos de contacto angular que permitan soportar las cargas axiales producidas por la carga en esa posición. (Roydisa, 2020).

La Figura 74 muestra las formas constructivas en montaje vertical.

### Figura 74

*Formas constructivas de motores eléctricos en montaje vertical.*

Figura	Símbolo para					Fijación o montaje
	Designación WEG	DIN 42990	IEC 60034-7		Carcasa	
			Código I	Código II		
 (*)	V5	V5	IM V5	IM 1011	con patas	montada en pared o sobre subestructura
	V6	V6	IM V6	IM 1001	con patas	montada en pared o sobre subestructura
 (*)	V1	V1	IM V1	IM 3011	sin patas	fijada por la brida "FF", para abajo
	V3	V3	IM V3	IM 3001	sin patas	fijada por la brida "FF", para arriba
 (*)	V15	V15	IM V15	IM 2011	con patas	montada en pared con fijación suplementaria por la brida "FF", para abajo
	V36	V36	IM V36	IM 2001	con patas	fijada en pared con fijación suplementaria por la brida "FF", para arriba
 (*)	V18	V18	IM V18	IM 3011	patasless	fijada por la brida "C", para abajo
	V19	V19	IM V19	IM 3001	sin patas	fijada por la brida "C", para arriba

Nota. Fuente: (Weg, 2019)

A continuación se escoge el motor eléctrico que cumpla con 3HP de potencia.

**Figura 75**

*Motores eléctricos de la marca FELM.*

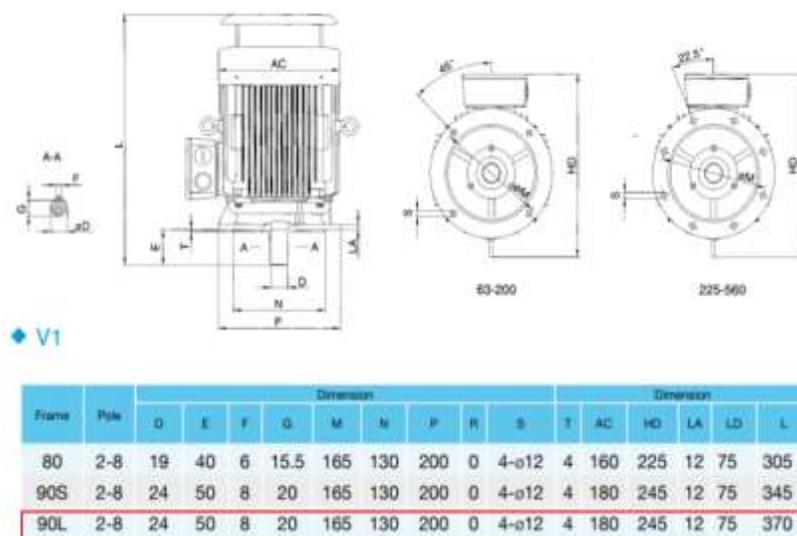
Type	Output		Voltage (V)	Current (A)	Speed r/min	Eff. (%)			Power Factor	Tsn/Tn	Tmax/Tn	Weight Kg
	KW	HP				50%	75%	100%				
FA2 801-2	0,75	1	230/400	3.0/1.73	2800	76,5	77,3	77,4	0,813	2,2	2,3	9,5
FA2 802-2	1,1	1,5	230/400	4.2/2.43	2800	79,0	80,0	79,6	0,825	2,2	2,3	10,5
FA2 90S-2	1,5	2	230/400	5.53/3.19	2820	80,2	81,5	81,3	0,837	2,2	2,3	12,5
FA2 90L-2	2,2	3	230/400	7.93/4.58	2820	82,2	83,5	83,2	0,837	2,2	2,3	16

*Nota.* Fuente: (Felm Motors, 2019)

El motor es de la marca FELM tipo FA2 90L-2 el cual es trifásico y cumple con la potencia requerida para la aplicación. En la Figura 76 se presenta las dimensiones del motor V1.

**Figura 76**

*Dimensiones del motor tipo V1.*



*Nota.* Fuente: (Felm Motors, 2019)

### Selección del variador de frecuencia (VDF)

Para la presente aplicación es muy importante controlar las velocidades del agitador, ya que así se puede variar el estado del fluido de trabajo, esta condición sirve para dar una aleatoriedad al fluido y aumentar la intensidad de la turbulencia.

Algunas ventajas de usar VDF son las siguientes:

- Velocidad y el par de motor ajustables.
- Aceleración reducida del motor al arrancar.
- Detención y marcha atrás controlada.

Es importante controlar el arranque del motor para extender la vida útil del motor y evitar posibles fallos en el agitador.

El VDF seleccionado es un CFW700 que abarca un rango de potencia desde 1,1 a 7.45 kW (1,5 a 10 HP). WEG desarrolló un convertidor robusto y de alto desempeño que posee como estándar algunos accesorios indispensables en las aplicaciones.

#### Figura 77

*Variador de frecuencia CW700*



*Nota.* Fuente: (Weg, 2019)

El VDF CW700 presenta las siguientes características como se muestra en la Tabla 20.

**Tabla 20**

*Características técnicas del VDF CW700.*

<b>Número de fases de entrada</b>	<b>Trifásico</b>
Rango de frecuencia	0-300 Hz
Velocidad de referencia	0-4500 rpm
Configuración	Opcional
Corriente nominal (ND)	3.6 A
Corriente nominal (HD)	3.5 A
Filtro RFI	Opcional filtro C3
Grado de protección	IP20
Alimentación de la electrónica	Interna

*Nota.* Fuente: (Weg, 2019)

### **Selección del sello mecánico**

El sello mecánico es indispensable para mantener la hermeticidad del reactor, ya que impide que fluidos o gases ingresen al recipiente lo que significaría una situación desfavorable para la generación de nanopartículas metálicas.

Algunos parámetros que se consideran importantes para la selección correcta del sello mecánico son los que se muestran en la Tabla 21.

**Tabla 21**

*Parámetros para la selección del sello mecánico.*

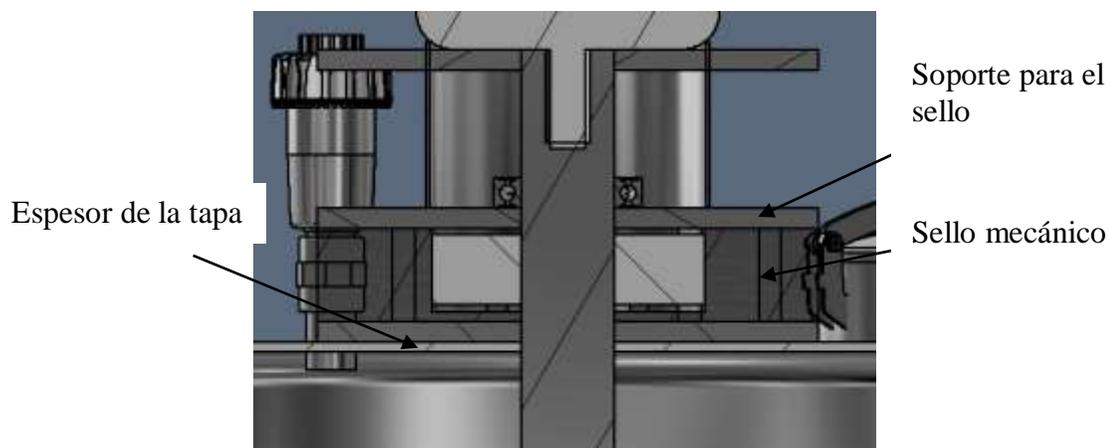
<b>No</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
1	Diámetro interior	25 a 50	mm
2	Presión de trabajo	1	atm
3	Temperatura de operación	-20 a 60	°C
4	Velocidad	0.5	m/s
5	Material	Acero Inoxidable	

El sello mecánico seleccionado es el sello partido para mezcladores 442M marca Chesterton, incluye la capacidad de vacío a presión positiva, que es especialmente

ventajosa en el mezclado de materiales en recipientes de proceso. En la Figura 78 se muestra la ubicación del sello mecánico.

### Figura 78

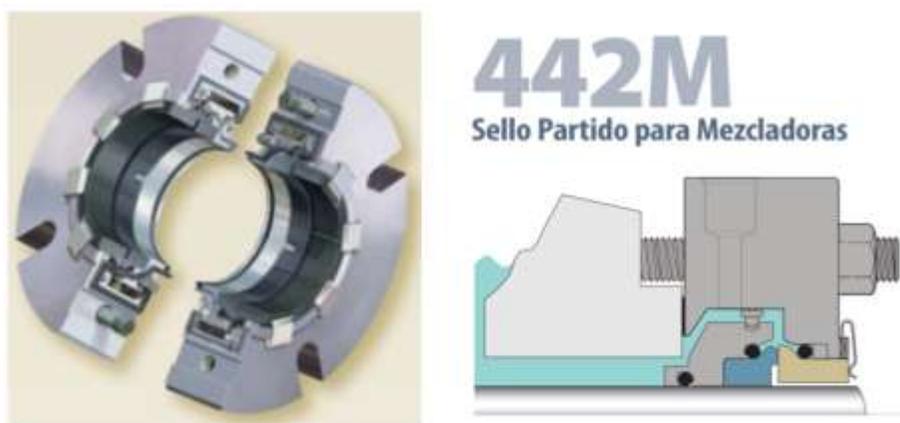
*Ubicación del sello mecánico en el reactor.*



Se ajusta a los grandes movimientos radial y axial del eje asociados con mezcladoras, agitadores, reactores y batidoras. La instalación se facilita con el centrado automático patentado. El modelo 442M usa muchas características patentadas que permiten la reparación fácil y económica en el campo. (Chesterton, 2019)

### Figura 79

*Sello mecánico 442M partido para mezcladoras.*



*Nota.* Fuente: (Chesterton, 2019)

**Tabla 22**

*Especificaciones del sello mecánico Chesterton 442M.*

No	Parámetros de operación	Valor	Unidad
1	Tamaño	25 a 120	mm
2	Presión	1	atm
3	Temperatura	-55 a 300	°C
4	Velocidad	20	m/s
5	Material	Acero Inoxidable	

Fuente: (Chesterton, 2019)

### **Cálculo del diámetro del eje**

Se determina el diámetro según la Norma ASME que asegure la resistencia y rigidez del eje para cuando el agitador este en pleno funcionamiento. Para un eje macizo con carga axial pequeña o casi nula se tiene la siguiente ecuación para determinar su diámetro.

$$d^3 = \frac{16}{\pi * \tau d} \sqrt{(K_b * M)^2 + (K_T * T)^2} \quad (42)$$

El material del eje será acero inoxidable 304L, el cual tiene un esfuerzo de fluencia  $S_y=170$  MPa y un esfuerzo de ruptura  $S_u=485$  MPa. (Cia. General de Aceros S.A., 2008)

$$\tau d = \begin{cases} 0.3 * S_y \\ 0.18 * S_u \end{cases} \quad (43)$$

$$\tau d = \begin{cases} 0.3 * 170 \text{ MPa} \\ 0.18 * 485 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\tau d = \begin{cases} 51 \text{ MPa} \\ 87.3 \text{ MPa} \end{cases}$$

La variable  $\tau d$  es el esfuerzo permisible que será el menor valor multiplicado por 0.75, debido a que se hará un canal chavetero.

Para carga en agitadores las constantes  $K_b$  y  $K_t$  son respectivamente:

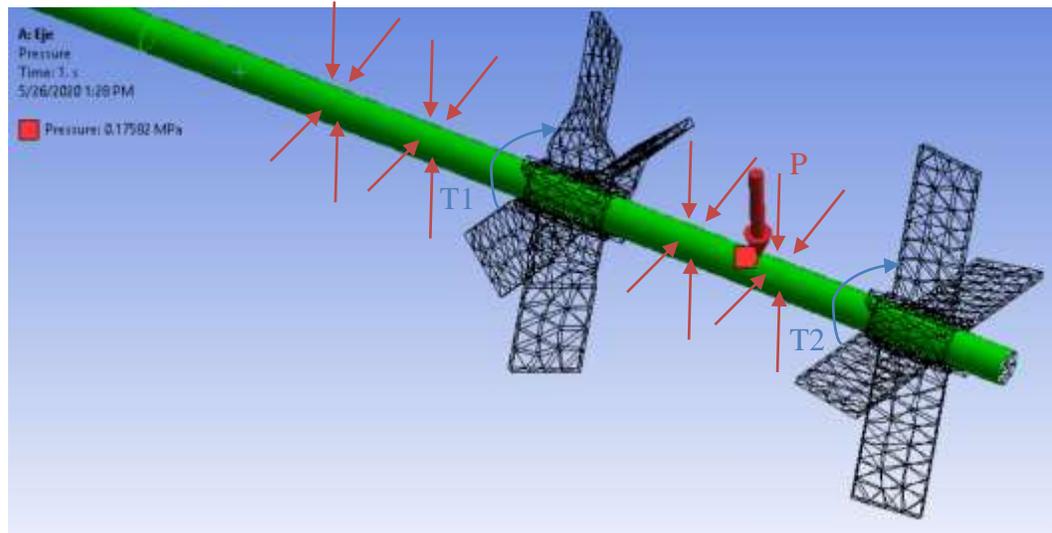
$$\begin{cases} K_b = 1.5 - 2 \\ K_t = 1 - 1.5 \end{cases}$$

Para determinar el momento flector  $M$ , se utilizará el software ANSYS Mechanical 17.0 como se muestra en la Figura 80. La ecuación para obtener el momento es:

$$M = \oint (P * A) dL = \sum_{i=1}^n \oint (P_i * A) dL \approx 0 \quad (44)$$

### Figura 80

*Representación de las cargas que está sometido el eje.*



Según los resultados que se obtuvieron en la simulación computacional la presión a la que estaba sometida el eje del agitador era de 0.1785 MPa en todas las direcciones. El momento flector que se genera según la ecuación (44) tiene un valor de  $M \approx 0 [N * mm]$ , esto se debe a que la suma total de todas las integrales es igual a cero ya que, al integrar y sumar, cada una de estas reacciones perpendiculares con sus orientaciones opuestas se neutralizan entre sí, como consecuencia el momento flector es nulo.

El torque T se lo obtiene con la siguiente ecuación:

$$T = T_1 + T_2 = \frac{7162000 * Pot}{rpm} \quad (45)$$

$$T = 47746.67 \quad N * mm$$

Donde finalmente al reemplazar las ecuaciones (44) y (45) en (42) el diámetro que se obtiene es:

$$d^3 = \frac{16}{\pi * \tau d} \sqrt{(K_T * T)^2}$$

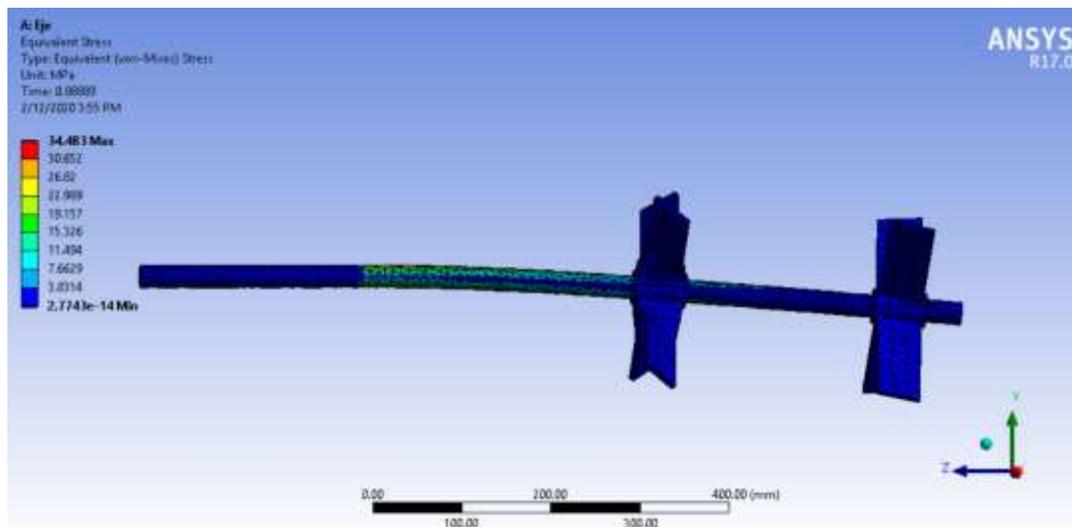
$$d = 22.86 \text{ mm}$$

Se aproxima a un diámetro comercial estandarizado el cual es 25 mm.

Para verificar la validez del tamaño del diámetro se realiza una simulación en el software ANSYS 17.0. En la Figura 81 se muestra el esfuerzo resultante por Von-Mises de 34.83 MPa con un factor de seguridad de FS=4.88. El valor del esfuerzo por Von-Mises es menor al esfuerzo de fluencia del material lo cual demuestra que no fallará.

### Figura 81

*Esfuerzo resultante por Von-Mises en el eje del agitador.*



### Modelo del agitador final del reactor principal

**Figura 82**

*Agitador del reactor principal.*



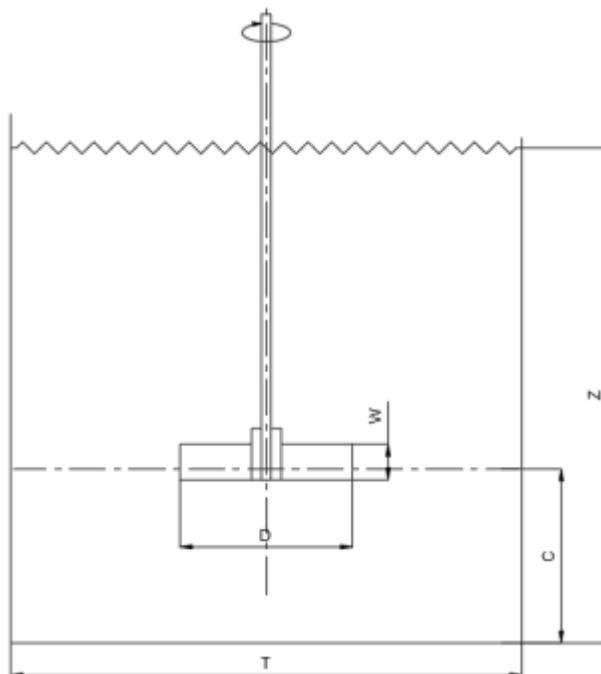
### Diseño del sistema de agitación del reactor de mezcla

El diseño del sistema de agitación en el reactor de mezcla es menos riguroso, debido a que lo único que se necesita es que la mezcla se agite a una velocidad moderada-baja entre 75 a 100 rpm, como se explicó en el Capítulo 3. Este reactor no requiere el uso de placas deflectoras, y solo se instalará una turbina para la agitación.

La metodología que se va a utilizar para el dimensionamiento del agitador de mezcla es la misma que en el sistema de agitación del reactor principal, por lo que no será necesario realizarlo nuevamente. En la Figura 83 se muestra un esquema del agitador y en la Tabla 23 se presenta el dimensionamiento con los valores.

**Figura 83**

*Esquema del sistema de agitación en el reactor de mezcla.*

**Tabla 23**

*Resumen del dimensionamiento del agitador de mezcla.*

<b>AGITADOR</b>			
	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>	
Largo de la turbina			
$D=$	0.187	m	
Ancho de la turbina			
$W=$	0.039	m	
Distancia entre turbina y fondo del reactor			
$C=$	0.187	m	
Tipo de Turbina= PBT			

El impulsor PBT como se mencionó anteriormente es versátil y genera un flujo axial considerable para homogeneización.

A continuación presentamos un resumen de algunas variables en el sistema de agitación en el reactor de mezcla. Todos estos valores de la Tabla 24 se los obtiene utilizando la misma metodología del reactor principal.

**Tabla 24**

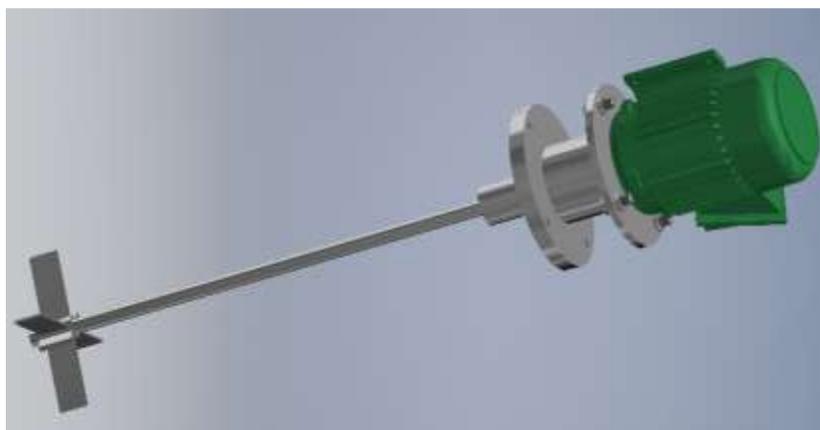
*Resumen de algunos elementos que integran el agitador del reactor de mezcla.*

Parámetro	Detalle	Valor	Unidad
Selección del motor	Diámetro de la turbine	D	0.187 m
	Velocidad de operación	N	75 rpm
	Potencia de disipación	P	0.635 kW
	Potencia necesaria	Pot	1 HP
	Velocidad sincrónica	Ns	1800 rpm
	Velocidad de salida	Nm	1710 rpm
	Forma constructiva		TIPO V1
Variador de Frecuencia	Motor elegido		FELM tipo FA2 801-2
	Modelo		CFW700
	Marca		WEG
	Rango de frecuencia		0-300 Hz
	Diámetro del eje según ASME	d	25 mm

### Modelo del agitador final del reactor de mezcla

**Figura 84**

*Agitador del reactor de mezcla.*



## Selección de Equipos

### Tanque de almacenamiento y filtro de agua

Para el almacenamiento de agua se ha seleccionado un tanque de plástico de la marca Rotoplas, que tiene una capacidad de 600 litros, como se indica en la Figura 85.

**Figura 85**

*Tanque de almacenamiento de agua de 600 litros.*

**Tanque Elevado  
600 Litros**

**Para almacenamiento de Agua**

- Incluye todos los accesorios para funcionamiento
- Sistema TRICAPA
- Fácil instalación
- 45 años de vida útil
- Tapa Click de cierre perfecto

Precio\* **USD 133,08**

**Dimensiones**  
0.97 m (diámetro) x 1.12 m (altura)

**Accesorios Incluidos**

Válvula Estática   Multiconector   Válvula de Desaire   Flotador #5   Tubo de Aire   Filtro Entender

\* PRECIO SUGERIDO / REFERENCIAL

**Rotoplas.**  
ALTA Y PROFESIONAL

*Nota.* Fuente: (Rotoplas, 2020)

**Tabla 25**

*Medidas del tanque de almacenamiento de agua.*

No	Parámetro	Valor	Unidad
1	Diámetro del tanque	0.97	m
2	Altura del tanque	1.12	m

*Nota.* Fuente: (Rotoplas, 2020)

El uso de filtros es fundamental para filtrar contaminantes como: metales pesados, microorganismos, impurezas, etc., esto permite mejorar la calidad del agua que está almacenada en el tanque de agua para extraer residuos que pueden causar problemas para la generación de nanopartículas. El filtro de agua seleccionado tiene las siguientes características:

**Tabla 26**

*Características del filtro de agua.*

No	Parámetro	Valor	Unidad
1	Caudal	0.001262	m <sup>3</sup> /s
2	Entrada y salida	1 1/2	NPT
3	Calidad de retención	5	μm

**Figura 86**

*Filtro de agua para el tanque de almacenamiento.*



### **Bombas centrífugas**

Se necesita 3 bombas centrífugas las cuales se puede verificar en el diagrama P&ID que se encuentra en la Figura 54.

- **BOMBA A**

Para llenar el reactor de mezcla de 200 litros y el reactor principal de 500 litros, se considera que la abertura de ingreso es de 1-1/2 pulgada, y que la velocidad de ingreso del fluido es de 1 m/s. A continuación se presenta los datos de entrada en el Tabla 27 para el cálculo de la potencia hidráulica que se requiere en la bomba A.

**Tabla 27**

*Datos de entrada para el cálculo de la bomba A.*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal	Q	0.003	m <sup>3</sup> /s
Densidad del fluido	$\rho$	1000	kg/m <sup>3</sup>
Gravedad	g	9.8	m/s <sup>2</sup>
Altura de bombeo	H	2	m
Eficiencia de la bomba	$\eta$	75	%

$$P_H(HP) = \frac{\rho * Q * g * H}{746 * \eta} \quad (36)$$

$$P_H = 0.105 Hp$$

Por tal motivo la bomba adecuada para la aplicación no requiere una potencia elevada por eso será una bomba centrífuga de marca TRUPPER modelo BOAC-1/2. Las características técnicas están detalladas a continuación en la Tabla 28.

**Figura 87**

*Bomba centrífuga de 1/2 HP marca TRUPPER.*



*Nota. Fuente: (Trupper, 2020)*

**Tabla 28**

*Características de la Bomba TRUPPER.*

Parámetro	Valor	Unidad
Flujo máximo:	90	L/min
Potencia:	½	HP
Tensión / Frecuencia:	120-60	V/Hz
Corriente:	5	A
Velocidad:	3450	rpm
Altura máxima:	23	m
Máxima profundidad:	8	m
Ø Entrada / salida:	1	NPT
Tipo:	Centrífuga	
Máximo diario:	6	h

*Nota.* Fuente: (Trupper, 2020)

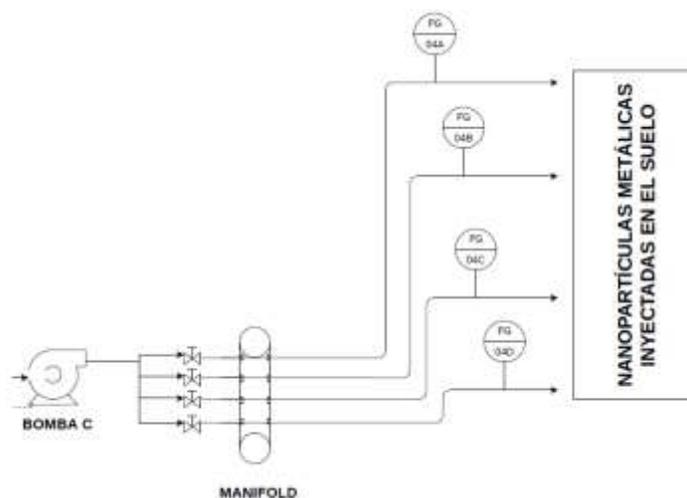
- **BOMBA B y C**

B: Para transportar el contenido del reactor de mezcla hacia el reactor principal, se necesita una bomba centrífuga de 1/2 HP.

C: Para transportar el contenido de las nanopartículas hacia los suelos cacaoteros contaminados, se necesita una bomba centrífuga de 3 HP.

**Figura 88**

*Esquema del manifold con el número de salidas.*



El manifold tiene 4 salidas las cuales son: A, B, C Y D. Cada salida tendrá un caudal de 5-10-20-50 [l/min] respectivamente y una presión que oscilará entre 20-260 [Pa] dependiendo el valor que necesiten para realizar las pruebas de inyección de las nanopartículas en los suelos cacaoteros contaminados con cadmio.

Las electrobombas centrífugas deben ser en acero inoxidable AISI 304 (acero austenítico) porque es importante que no haya partes magnéticas lo que haría que las nanopartículas metálicas se alojen en estas zonas y de esa forma no se inyectarían en los suelos el cuál es el propósito principal.

Por tal motivo la electrobomba adecuada para la aplicación será una electrobomba centrífuga en acero inoxidable de marca AL-RED 670-4. Las características técnicas están detalladas en la Tabla 29.

**Tabla 29**

*Bombas centrífugas de la marca AL-RED.*

<b>Parámetro</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>Unidad</b>
Modelo	AL-RED-620-4	AL-RED-670-4	
Flujo máximo:	100	160	L/min
Potencia:	1	3	HP
Tensión / Frecuencia:	120-60	120-60	V/Hz
Corriente:	4.2	8.8	A
Velocidad:	3450	3450	rpm
Altura máxima:	37	60	m
Ø Entrada / salida:	1	1	NPT
Tipo:	Centrífuga	Centrífuga	
Máximo diario:	6	6	h

**Figura 89**

*Electrobombas de la marca AL-RED.*



*Nota.* Fuente: (Pedrollo, 2019)

### **Generador Eléctrico**

Una de las características de la planta industrial para la generación de nanopartículas es que sea transportable y que se pueda acceder con ella a los suelos cacaoteros contaminados. Estos suelos pueden quedar lejos de la zona rural y podría significar un problema para el uso de los diferentes equipos e instrumentos que funcionan con electricidad como: motores y bombas.

Por esa razón es importante considerar un generador eléctrico que pueda abastecer a estos equipos en el caso de que las zonas donde se inyecten las nanopartículas estén muy alejadas de la civilización y se carezca de energía eléctrica.

**Tabla 30**

*Listado de cargas eléctricas de la planta.*

<b>Carga</b>	<b>Potencia</b>	<b>Unidad</b>
Motor reactor principal	746	W
Motor reactor de mezcla	2238	

<b>Carga</b>	<b>Potencia</b>	<b>Unidad</b>
Bomba A	373	
Bomba B	746	
Bomba C	2238	
Tablero de Control	200	
<b>Total</b>	<b>6541</b>	<b>W</b>

El generador eléctrico escogido es de marca LONCIN modelo LC13000, que funciona a gasolina con una potencia de 13300 W, suficiente para alimentar a todos los equipos que requieren electricidad.

### **Figura 90**

*Generador marca LONCIN modelo LC13000.*



*Nota.* Fuente: (Procim, 2019)

### **Instrumentación necesaria**

La instrumentación en el proceso nos permite detectar simultáneamente una gran cantidad de variables en los recipientes tanto principal como de mezcla. Las variables que se van analizar son temperatura, nivel, presión, pH y ORP.

#### **Indicador de presión**

Se necesita dos manómetros uno para el reactor principal y otro para el reactor de mezcla. La mejor práctica para seleccionar es un rango equivalente al doble de la

presión de trabajo, en este caso la presión de trabajo del reactor principal en operación es de 29.94 [psi], por lo tanto el manómetro que se requiere es un WINTERS PLP con las siguientes especificaciones:

**Tabla 31**

*Especificaciones del manómetro WINTERS PLP.*

Especificación	Valor	Unidad
Carátula	4	in
Carcasa	AISI Acero Inoxidable 304	
Exactitud	±1 %	
Rango	0-100	psi
Resolución	1	psi
Conexión	1/2	in

**Figura 91**

*Manómetro WINTERS PLP.*



1. Opcional Brida en U (U-Clamp)
2. Opcional Brida Frontal (Front Flange)

*Nota.* Fuente: (Winters, 2020)

### **Indicador de temperatura**

Se necesita dos termómetros para: reactor de mezcla y reactor principal. Es importante tener en cuenta que en el método de elaboración de nanopartículas no

existe una liberación significativa de calor, es decir la temperatura oscilará  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  respecto a la del ambiente. Sin embargo en cualquier proceso de carácter industrial siempre es adecuado tener lectura de la medida de temperatura. En esta aplicación se ha seleccionado termómetros económicos de la marca WINTERS con las siguientes especificaciones técnicas.

**Tabla 32**

*Especificaciones del termómetro WINTERS.*

<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Carátula	6	in
Carcasa	AISI Acero Inoxidable 304	
Exactitud	$\pm 2\%$	
Rango	-20 a 60	$^{\circ}\text{C}$
Resolución	2	$^{\circ}\text{C}$
Conexión	1/2	in

**Figura 92**

*Termómetro de la marca WINTERS.*



*Nota.* Fuente: (Winters, 2020)

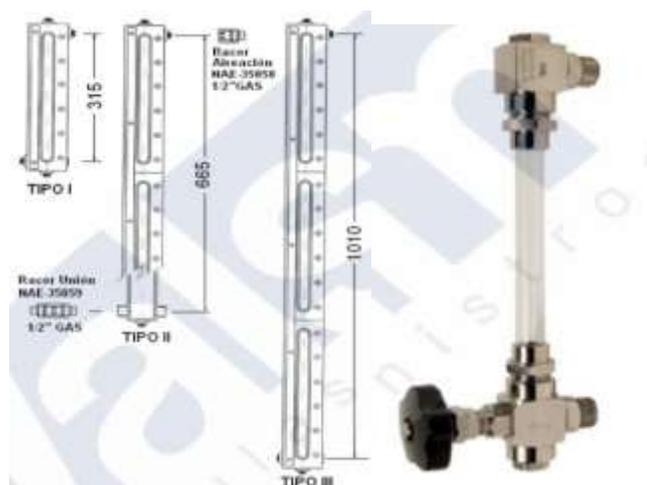
### Indicador de nivel

La importancia de medir el nivel, no puede ser subestimada. Los niveles bajos pueden ocasionar problemas de bombeo, mientras que niveles altos pueden causar que el reactor se desborde y creen problemas en la aplicación. La mirilla de nivel se instalará en el reactor de mezcla y reactor principal.

Para este caso se usará un nivel de la marca VALSUM

### Figura 93

Medidor de nivel de la marca VALSUM.



Nota. Fuente: (Valsum, 2020)

### Figura 94

Especificaciones de los diferentes tipos de nivel.

Tipo	PARA TANQUES DE M/M DE ALTURA:							
	375 a 475	725 a 825	1075 a 1175	1390 a 1490	1740 a 1840	2090 a 2505	2405 a 2855	2755 a 2855
I	1						1	
II		1		2	1			1
III			1		1	2	2	2

Nota. Fuente: (Valsum, 2020)

Se escoge un nivel de tanque tipo III ya que la altura del recipiente se encuentra entre 1075 a 1175 mm. Fabricados de acero inoxidable AISI-316, apto para líquidos alimentarios y ambientes corrosivos. Tiene una rosca de 1/2 pulgada.

### Indicador de pH

La medición de pH es de suma importancia ya que se debe tener control de la acidez de la solución del reactor de mezcla y del reactor principal, con la finalidad de que los niveles de pH sean los adecuados. Se va a utilizar un sensor de pH con su respectivo mini controlador con las características que se muestra en la Tabla 33:

#### Figura 95

*Indicador de pH tipo BL931700.*



*Nota.* Fuente: (Hanna Instruments, 2020)

#### Tabla 33

*Especificaciones del indicador de pH.*

Especificación	Valor	Unidad
Rango	0-14	pH
Resolución	0.01	pH
Rendimiento	±0.02	pH
Calibración	Manuales, offset y pendiente mediante potenciómetros de ajuste	
Fuente de alimentación	12	VDC
Dimensiones	79x49x95	mm
Peso	200	g

*Nota.* Fuente: (Hanna Instruments, 2020)

### Indicador de Potencial de Oxidación de Reducción (ORP)

La medida ORP también conocida como redox es un parámetro que mide la capacidad que tiene una solución de absorber o expeler sales diluidas y de manera efectiva nos permite tener un registro. Al igual que el pH es importante saber si existe la presencia de oxígeno disuelto en la solución por eso se debe comprobar que el nivel de ORP es el adecuado, este medidor se lo instalará en el reactor principal y en el de mezcla. Las especificaciones se muestran en la Tabla 34.

#### Figura 96

Indicador de ORP tipo BL92700.



Nota. Fuente: (Hanna Instruments, 2020)

#### Tabla 34

Especificaciones del indicador de ORP.

Especificación	Valor	Unidad
Rango	$\pm 1000$	mV
Resolución	1	mV
Exactitud	$\pm 2$	mV
Calibración	Calibrado de fábrica	
Dimensiones	79x49x95	mm
Peso	200	g

Nota. Fuente: (Hanna Instruments, 2020)

### Diseño de la estructura metálica (SKID)

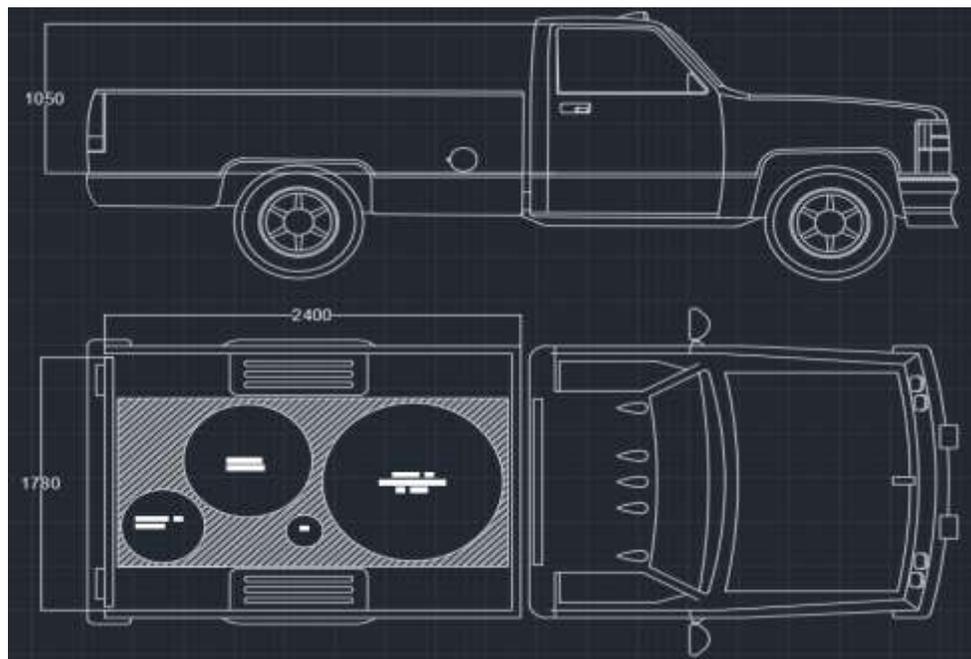
La estructura metálica (SKID) tiene la función de poder facilitar el manejo y la movilización de toda la planta. La estructura metálica debe cumplir con estos tres aspectos: Estabilidad, Resistencia y Deformación limitada.

La condición que tiene la estructura metálica es que debe alcanzar en una camioneta estándar por ese motivo el largo, ancho y altura están limitados a las dimensiones del cajón de la camioneta.

A continuación en la Figura 97 se presenta la distribución de los equipos en la camioneta y las dimensiones del cajón de la camioneta.

#### Figura 97

*Distribución preliminar de los equipos en la camioneta.*

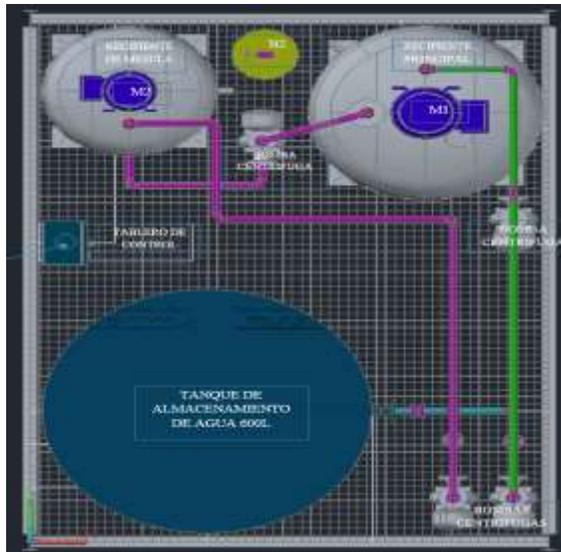


Se realizó el diseño básico de la planta en el software AutoCad Plant 3D para tener una noción de la ubicación y de la distribución de las cargas en la estructura metálica, de esa manera el skid se diseñó a partir del modelo que se muestra en la

Figura 99 y se lo optimizó con un análisis en la selección del material y una simulación por elementos finitos.

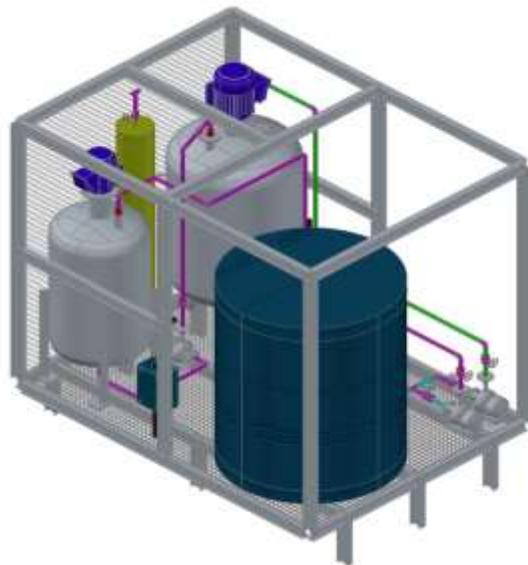
### Figura 98

*Planta Industrial en AutoCad Plant 3D.*



### Figura 99

*Modelo preliminar de la estructura metálica (Skid).*



### **Selección del material y perfiles para la estructura metálica**

Para la selección del material y el perfil se utilizó el código AISC para la selección de perfiles adecuados. El acero que se utilizará es un ASTM A36 que es un acero estructural al carbono, utilizado en construcción de estructuras metálicas, puentes, torres de energía, torres para comunicación y edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas, herrajes eléctricos y señalización.

Las piezas hechas a partir de acero A36 son fácilmente unidas mediante casi todos los procesos de soldadura. Los más comúnmente usados para el A36 son los menos costosos y rápidos. En Ecuador existen algunas empresas que ofrecen perfiles entre ellos está NOVACERO, KUBIEC, IPAC, entre otros.

El perfil que se utilizará es uno de sección abierta en forma de “C” y perfil tipo “L”, por algunas de sus ventajas como:

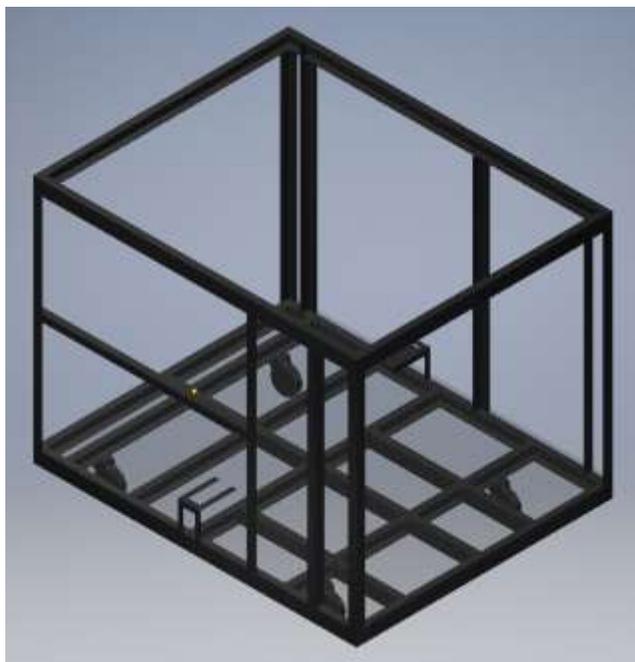
- Livianos, durables, resistentes y de fácil mantenimiento.
- Se adaptan a cualquier geometría.
- Reciclables y recuperables.
- Apariencia sólida y atractiva.

### **Simulación computacional de la estructura metálica**

Se realiza el modelado de la estructura metálica en el software Inventor 2018, para luego realizar la simulación correspondiente y determinar la validez del diseño. En la Figura 100 se puede observar el modelo CAD.

**Figura 100**

*Estructura metálica en Inventor 2018.*



A continuación se muestra las propiedades del material ASTM A36.

**Tabla 35**

*Propiedades mecánicas del Acero A36.*

Nombre	Acero, A36	
General	Densidad de masa	7.850 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	250.000 MPa
	Resistencia máxima a tracción	400.000 MPa
Tensión	Módulo de Young	200.000 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.275 su
Nombre(s) de pieza	ANSI C 3 x 3.5 00000001.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000002.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000003.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000004.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000005.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000006.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000007.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000008.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000009.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000010.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000011.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000013.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000014.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000015.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000016.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000019.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000020.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000021.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000022.ipt ANSI L 3 x 3 x 1_4 00000024.ipt ANSI L 3 x 3 x 1_4 00000025.ipt ANSI L 3 x 3 x 1_4 00000026.ipt ANSI L 3 x 3 x 1_4 00000027.ipt	

En la Tabla 36 y 37 se muestra las propiedades geométricas y mecánicas de las secciones tipo C y ángulo (L) respectivamente que se utilizarán.

**Tabla 36**

*Propiedades mecánicas y geométricas del perfil tipo C.*

Propiedades de geometría	Área de sección (a)	704.057 mm <sup>2</sup>
	Anchura de sección	34.798 mm
	Altura de sección	76.200 mm
	Centroide de sección (x)	12.059 mm
	Centroide de sección (y)	38.100 mm
Propiedades mecánicas	Momento de inercia (I <sub>x</sub> )	658317.584 mm <sup>4</sup>
	Momento de inercia (I <sub>y</sub> )	81403.317 mm <sup>4</sup>
	Módulo de rigidez de torsión (J)	8633.991 mm <sup>4</sup>
	Módulo de sección (W <sub>x</sub> )	17278.677 mm <sup>3</sup>
	Módulo de sección (W <sub>y</sub> )	3579.822 mm <sup>3</sup>
	Módulo de sección de torsión (W <sub>t</sub> )	975.990 mm <sup>3</sup>
	Área de esfuerzo cortante reducida (A <sub>v</sub> )	354.880 mm <sup>2</sup>
Área de esfuerzo cortante reducida (A <sub>v</sub> )	217.223 mm <sup>2</sup>	
Nombre(s) de pieza	ANSI C 3 x 3.5 00000001.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000002.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000003.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000004.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000005.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000006.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000007.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000008.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000009.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000010.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000011.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000013.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000014.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000015.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000016.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000019.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000020.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000021.ipt ANSI C 3 x 3.5 00000022.ipt	

**Tabla 37**

*Propiedades mecánicas y geométricas del perfil tipo L.*

Propiedades de geometría	Área de sección (a)	937.414 mm <sup>2</sup>
	Anchura de sección	76.200 mm
	Altura de sección	76.200 mm
	Centroide de sección (x)	20.921 mm
	Centroide de sección (y)	20.921 mm
Propiedades mecánicas	Momento de inercia (I <sub>x</sub> )	505333.107 mm <sup>4</sup>
	Momento de inercia (I <sub>y</sub> )	505333.107 mm <sup>4</sup>
	Módulo de rigidez de torsión (J)	13818.274 mm <sup>4</sup>
	Módulo de sección (W <sub>x</sub> )	9141.557 mm <sup>3</sup>
	Módulo de sección (W <sub>y</sub> )	9141.557 mm <sup>3</sup>
	Módulo de sección de torsión (W <sub>t</sub> )	1372.152 mm <sup>3</sup>
	Área de esfuerzo cortante reducida (A <sub>v</sub> )	340.245 mm <sup>2</sup>
Área de esfuerzo cortante reducida (A <sub>v</sub> )	340.245 mm <sup>2</sup>	
Nombre(s) de pieza	ANSI L 3 x 3 x 1_4 00000024.ipt ANSI L 3 x 3 x 1_4 00000025.ipt ANSI L 3 x 3 x 1_4 00000026.ipt ANSI L 3 x 3 x 1_4 00000027.ipt	

A continuación se agrega las restricciones y las fuerzas que van a soportar. En este punto se tomó el peso del reactor principal, reactor de mezcla y tanque de almacenamiento de agua completamente cargados a su máxima capacidad. Las cargas muertas equivalen al peso de los recipientes en su máxima capacidad y las carga vivas son las cargas de viento.

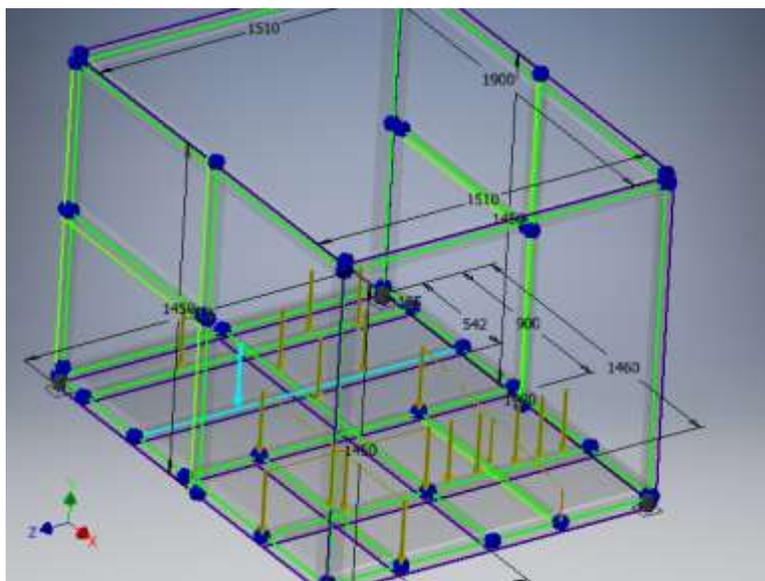
**Tabla 38**

*Fuerzas que va a soportar la estructura metálica.*

Componente de la Planta Industrial	Peso vacío (N)	Peso a su máxima capacidad (N)	Carga muerta (N/mm)	Carga viva (N/mm)
Reactor principal	1185	6085	3.46	2.02
Reactor de mezcla	572	2532	1.44	
Tanque de almacenamiento	128	6008	3.16	

**Figura 101**

*Estructura metálica cargada con los elementos de la planta.*



En la Tabla 39 se muestran los resultados de desplazamiento, fuerzas, momentos y tensiones normales, de corte y de torsión.

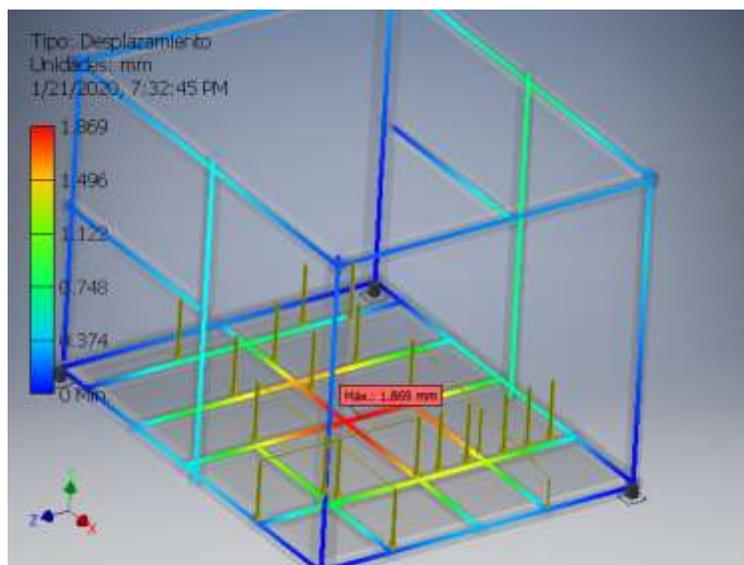
Tabla 39

Resultados de la simulación de la estructura metálica.

Nombre		Mínimo	Máximo
Desplazamiento		0.000 mm	1.869 mm
Fuerzas	Fx	-558.754 N	379.660 N
	Fy	-3132.715 N	2914.872 N
	Fz	-1976.993 N	1356.022 N
Momentos	Mx	-997655.713 N mm	999963.130 N mm
	My	-303563.868 N mm	202902.087 N mm
	Mz	-39611.993 N mm	22392.122 N mm
Tensiones normales	Smax	-0.876 MPa	58.018 MPa
	Smin	-57.735 MPa	0.112 MPa
	Smax(Mx)	0.000 MPa	57.873 MPa
	Smin(Mx)	-57.873 MPa	0.000 MPa
	Smax(My)	0.000 MPa	22.196 MPa
	Smin(My)	-33.207 MPa	0.000 MPa
Tensión de corte	Tx	-1.116 MPa	1.642 MPa
	Ty	-13.419 MPa	14.422 MPa
Tensiones de torsión	T	-22.943 MPa	40.586 MPa

Figura 102

Desplazamientos obtenidos en la estructura metálica.



**Determinación de las tensiones y deformaciones permisibles en la estructura metálica según la AISC 360.**

Se realiza un análisis de flexión de la viga que está sometida a la mayor carga, como se muestra en la Figura 102 para verificar la deformación permisible.

El perfil utilizado es un tipo C3x3.5 in de 6.23 ft, además las cargas nominales son una carga muerta uniforme promedio de 0,23 kip/ft y una carga viva uniforme de 0,13 kip/ft.

Del manual del AISC, las propiedades del material son  $F_y=36$  ksi y  $F_u=58$  ksi. Se determina primero las cargas aplicadas por criterio LRFD y ASD, según el código ASCE/SEI 7.

LRFD	ASD
$w_u = 1.2 \left( 0.23 \frac{\text{kip}}{\text{ft}} \right) + 1.6 \left( 0.13 \frac{\text{kip}}{\text{ft}} \right)$ $w_u = 0.484 \frac{\text{kip}}{\text{ft}}$ $M_u = \frac{0.484 \frac{\text{kip}}{\text{ft}} * (6.23 \text{ ft})^2}{8}$ $M_u = 2.34 \text{ kip} - \text{ft}$	$w_a = 0.2 \frac{\text{kip}}{\text{ft}} + 0.13 \frac{\text{kip}}{\text{ft}}$ $w_a = 0.33 \frac{\text{kip}}{\text{ft}}$ $M_a = \frac{0.33 \frac{\text{kip}}{\text{ft}} * (6.23 \text{ ft})^2}{8}$ $M_a = 1.60 \text{ kip} - \text{ft}$

En la sección F2 de la especificación AISC, todos los canales ASTM A36 son compactos. Debido a que la viga es compacta, el estado límite de fluencia gobierna que  $M_n = M_p = F_y Z_x$ .

Del Manual de la AISC de la Tabla 3-8, se determina los valores de resistencia según LRFD y ASD, de un perfil tipo C3x3.5 in.

LRFD	ASD
$\phi_b M_n = \phi_b M_p$ $= 3.35 \text{ kip-ft} > 2.34 \text{ kip-ft}$ <p style="text-align: right;">OK</p>	$\frac{M_n}{\Omega_b} = \frac{M_p}{\Omega_b}$ $= 2.23 \text{ kip-ft} > 1.60 \text{ kip-ft}$ <p style="text-align: right;">OK</p>

Si cumple con los criterios de diseño LRFD y ASD, por lo cual se garantiza que la estructura metálica SKID, no presentará fallos de resistencia.

Se determina primero la deflexión permisible con la siguiente ecuación (46).

$$\Delta_{max} = \frac{L}{360} \quad (46)$$

$$\Delta_{max} = \frac{6.23 \text{ ft} \left(12 \frac{\text{in}}{\text{ft}}\right)}{360} = 0.207 \text{ in} = 5.25 \text{ mm}$$

La máxima deflexión calculada se la obtiene con la ecuación (47):

$$\Delta_{max} = \frac{5 w_L l^4}{384 EI} \quad (47)$$

$$\Delta_{max} = \frac{5 \left(0.13 \frac{\text{kip}}{\text{ft}}\right) (6.83 \text{ ft})^4 \left(12 \frac{\text{in}}{\text{ft}}\right)^3}{384 (29000 \text{ ksi}) (1.21 \text{ in}^4)} = 0.18 \text{ in} = 4.60 \text{ mm}$$

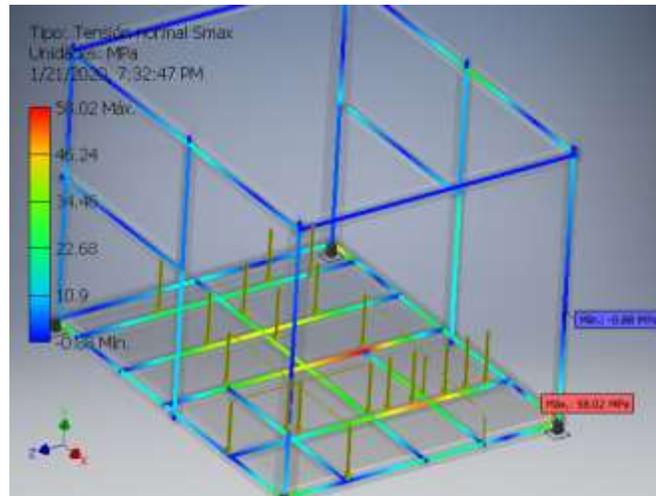
La máxima deflexión calculada es de 4.60 mm y es menor a la permisible de 5.25 mm, lo que demuestra que la estructura se encuentra dentro de los límites permitidos de deflexión.

Además se realizó una simulación como segundo método de verificación de la estructura en la cual los resultados que se obtuvieron indican que el desplazamiento máximo fue de 1.87 mm como indica la Figura 102, con un factor de seguridad de 1.45 esto demuestra que está dentro de la deformación permisible que es de 5.25 mm.

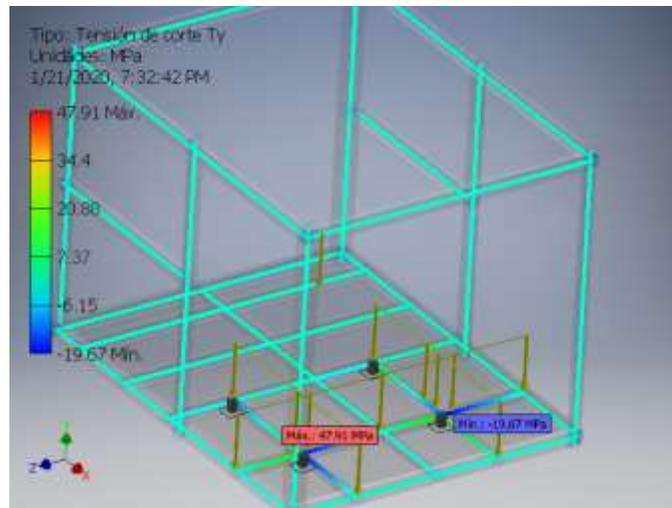
La resistencia máxima del material ASTM A36 es de 400 MPa y el esfuerzo normal máximo ( $\sigma_{max}$ ) fue de 58.02 MPa según la Figura 103, además se aplicó la teoría de fallo por Tresca para verificar la validez del diseño y se obtuvo que el esfuerzo cortante máximo fue de 47.91 MPa, como se muestra en la Figura 104 esto demuestra que la estructura metálica soportará perfectamente las cargas aplicadas.

**Figura 103**

*Tensión normal de la estructura metálica.*

**Figura 104**

*Esfuerzo cortante máximo de la estructura metálica.*



### **Conexión de los miembros estructurales**

Las conexiones del skid serán soldadas por las siguientes razones:

1. El empleo de conexiones soldadas en vez de atornilladas o remachadas permite un ahorro de material (hasta de un 15%).

2. La soldadura permite una gran variedad de conexiones, cosa que no se puede con remaches o tornillos.
3. Las conexiones soldadas son más rígidas que las demás, lo cual permite una verdadera continuidad en la transmisión de elementos mecánicos entre miembros.
4. Debido a la mayor resistencia del metal de aportación las conexiones soldadas permiten una gran resistencia a la fatiga.

Las conexiones estructurales del skid serán de tipo filete y se utiliza la Tabla J2.4 de AISC-360 la cual recomienda unos espesores mínimos de soldadura en función del menor espesor de las piezas a unir en este caso el espesor es de 10 mm.

**Tabla 40**

*Tamaño mínimo de filete de soldadura.*

<b>TABLE J2.4 Minimum Size of Fillet Welds</b>	
Material Thickness of Thinner Part Joined, in. (mm)	Minimum Size of Fillet Weld, <sup>(a)</sup> in. (mm)
To 1/4 (6) inclusive	1/8 (3)
Over 1/4 (6) to 1/2 (13)	3/16 (5)
Over 1/2 (13) to 3/4 (19)	1/4 (6)
Over 3/4 (19)	5/16 (8)
<small><sup>(a)</sup> Leg dimension of fillet welds. Single pass welds must be used. Note: See Section J2.2b for maximum size of fillet welds.</small>	

El tamaño mínimo del filete que se utilizará es de 3/16 in (5 mm) en los miembros estructurales del soporte metálico de la planta industrial para generar nanopartículas metálicas.

Finalmente se enumera y se ensambla todos los elementos que integran la planta en la estructura metálica, como se muestra en Figura 105-106 y en la Tabla 41.

**Tabla 41**

*Elementos que integran la planta para la obtención de nanopartículas metálicas.*

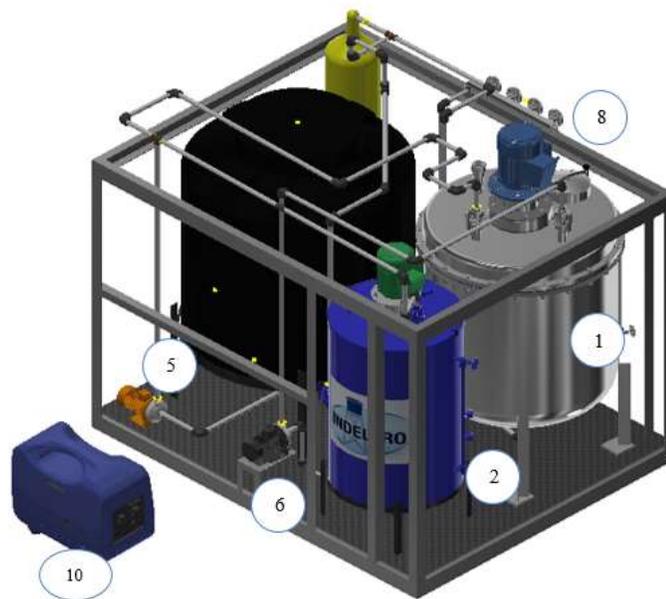
<b>No.</b>	<b>Componentes de la planta industrial para la generación de nanopartículas</b>
1	Reactor Principal
2	Reactor de mezcla
3	Tanque de almacenamiento de agua
4	Tanque de Nitrógeno
5	Bomba centrífuga A (Desde tanque de agua hacia reactor principal y de mezcla)
6	Bomba centrífuga B (Desde el reactor de mezcla hacia el reactor principal)
7	Bomba centrífuga C (Desde el reactor principal al manifold)
8	Sistema de agitación del reactor principal
9	Sistema de agitación del reactor de mezcla
10	Generador eléctrico
11	Estructura metálica (SKID)
12	Manifold de 4 salidas para mangueras

Las conexiones de los equipos y componentes pueden ser por tubería o manguera de 25 mm, sin embargo esto depende directamente de la construcción y de las facilidades de conexión.

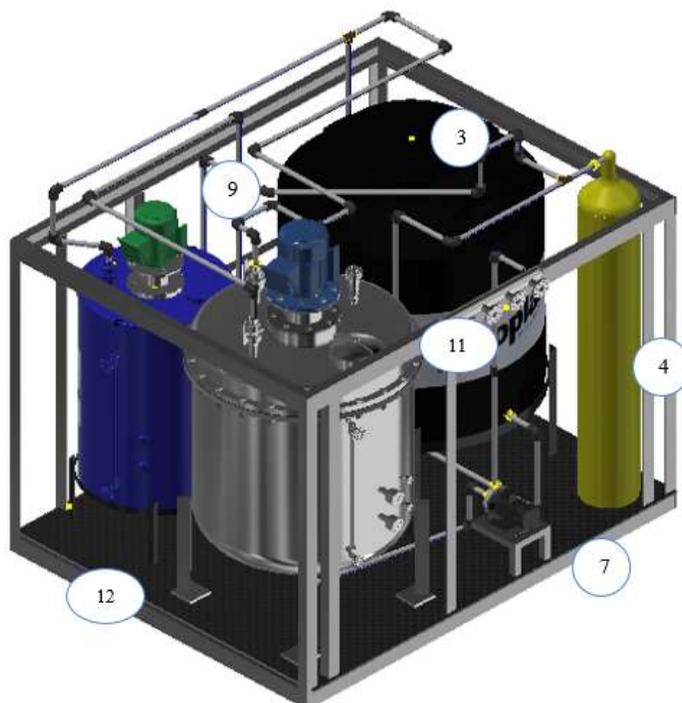
De esta manera quedan establecidos todos los parámetros de diseño para el levantamiento de una planta industrial para la generación de nanopartículas. La construcción y las pruebas quedan fuera del alcance de esta investigación.

**Figure 105**

*Vista frontal de la planta industrial para generar nanopartículas.*

**Figura 106**

*Vista posterior de la planta industrial para generar nanopartículas.*



## **Capítulo 5: Análisis Económico Y Financiero**

En este capítulo se hará un estudio de los proveedores existentes en el mercado local y se detallará el costo estimado para la construcción de la planta industrial para la generación de nanopartículas metálicas.

### **Análisis Presupuestario**

Para el análisis presupuestario se detallará todos los factores necesarios para el desarrollo del proyecto.

#### **MANO DE OBRA**

Consideraciones:

- Personal calificado.
- Suficiente conocimiento del personal para toma de decisiones.
- Capacitación al personal del proceso.
- Para establecer el costo de la mano de obra se tomó como referencia el taller INDRUSMET localizado en la ciudad de Sangolquí.
- El tiempo de fabricación será de 3 meses a partir de la fecha de contratación de servicios.

#### **MATERIA PRIMA**

Consideraciones:

- Acero Inoxidable Austenítico Tipo 304 para el diseño del reactor principal.
- Recipiente de mezcla en Polietileno de Alta densidad (Marca Rotoplas).

#### **COSTOS INDIRECTOS**

Consideraciones:

- No están relacionados directamente con la construcción y funcionamiento pero intervienen en el proceso de fabricación de los reactores.

## INSTRUMENTACIÓN, EQUIPOS Y CONTROL

Consideraciones:

- Las bombas centrífugas y motores trifásicos serán adquiridos en el mercado local para optimizar recursos.
- La instrumentación necesaria será escogida con mucho cuidado debido a que tiene un papel indispensable para la generación de nanopartículas.
- Las pruebas de operación del sistema se las realizará con agua filtrada por la similitud en las propiedades físicas y químicas de las soluciones experimentales, con la finalidad de verificar el correcto funcionamiento de los equipos y de la instrumentación.

**Tabla 42**

*Costo total estimado de la planta para la obtención de nanopartículas.*

Parámetro	Descripción	Unid.	Cant.	Costo (\$)	Costo final (\$)
<b>MATERIA PRIMA</b>	Plancha de acero inoxidable Tipo 304L de e=6mm	Unidad	3	1200	3600
	Perfiles de acero inoxidable Tipo 304L tipo ángulo de L50X50X5 mm	Unidad	2	25	50
	Perfiles de acero A36 tipo Canal C75X88 mm	Unidad	5	40	200
	Perfiles de acero A36 tipo ángulo L75X75X6 mm	Unidad	2	38	76
	Plancha ASTM A36 corrugada de e=3mm	Unidad	1	980	980
	Brida Long Welding Neck Tipo 304 Clase 150lb D=1 1/2"	Unidad	2	150	300
	Tubo de 1" Tipo inoxidable 304 Cédula 5S	Unidad	1	350	350
	Tubo de 2" Tipo inoxidable 304 Cédula 5S	Unidad	1	380	380

Parámetro	Descripción	Unid.	Cant.	Costo (\$)	Costo final (\$)
	Acoples TDH 1'' Tipo inoxidable 304 Clase 1500	Unidad	8	10	80
	Acoples TDH 1 1/2'' Tipo inoxidable 304 Clase 1500	Unidad	8	12	96
	Tubería PVC de 1'' Cédula 40	Unidad	3	15	45
<b>MANO DE OBRA</b>	Construcción del reactor principal de 0.5 m3	N/A	1	5000	5000
	Instalación del sistema de agitación del reactor principal	N/A	1	2500	2500
	Instalación del sistema de agitación del reactor de mezcla	N/A	1	2500	2500
	Construcción de la estructura metálica	N/A	1	2500	2500
	Conexión de los equipos e instrumentación	N/A	1	1000	1000
<b>EQUIPOS</b>	Tanque de plástico Rotoplas de 600 litros.	Unidad	1	50	50
	Bomba Centrífuga TRUPPER de 1/2 HP	Unidad	1	250	250
	Bomba Centrífuga AL-RED de 1 HP	Unidad	1	222	222
	Bomba Centrífuga AL-RED de 3 HP	Unidad	1	312	312
	Generador Eléctrico marca LONCIN de 13300 W	Unidad	1	2000	2000
	Motor Trifásico FELM de 1 HP	Unidad	1	150	150
	Motor Trifásico FELM de 3 HP	Unidad	1	330	330
<b>INSTRUMENTACIÓN</b>	Manómetro marca WINTER PLP	Unidad	2	300	600
	Termómetro marca WINTER	Unidad	2	220	440
	Mirilla de nivel marca VALSUM	Unidad	2	500	1000
	Indicador de PH con microcontrolador BL 931700	Unidad	2	550	1100
	Indicador de ORP con microcontrolador BL 92700	Unidad	2	550	1100
	Variadores de frecuencia de CW700	Unidad	2	278	556
	Tablero de control	Unidad	1	200	200
	Válvulas globo de 1''	Unidad	4	80	320

Parámetro	Descripción	Unid.	Cant.	Costo (\$)	Costo final (\$)
	Válvulas Check de 1''	Unidad	3	20	60
	Válvula de aguja de 1''	Unidad	1	130	130
	Accesorios para acoplar instrumentos a los reactores	N/A	1	400	400
<b>ACCESORIOS COMPLEMENTARIOS</b>	Sello mecánico marca CHESTERTON 442M	Unidad	2	70	140
	Rodamiento SKF de bola d=50, D=75	Unidad	3	100	300
	Accesorios generales para la instalación de reactores	N/A	1	400	400
<b>COSTO ESTIMADO</b>				<b>\$</b>	<b>29717</b>

El presupuesto aproximado tiene un valor de \$29717, es aceptado y se encuentra dentro del presupuesto disponible. El presupuesto puede variar hasta un 7% del valor calculado.

### Estudio de proveedores

Afortunadamente todos los elementos como: equipos e instrumentación que integran la planta industrial para la generación de nanopartículas metálicas se encontró en el mercado local, es una ventaja para mantenerse en contacto con los proveedores y asegurar productos de calidad, buen precio, condiciones de entrega y métodos de pago. Algunos de los proveedores fueron los siguientes que se muestran en la Tabla 43:

**Tabla 43**

*Proveedores que se encontraron en el mercado local.*

Proveedor	Producto	Dirección	Contacto	Correo electrónico o Sitio Web
	Perfilería, tubos y planchas de acero	De las Higueras Lote 30 y de las Avellanas Quito-Ecuador	Telf: (593) 2-248- 0420	kubiec@kubiec.com

Proveedor	Producto	Dirección	Contacto	Correo electrónico o Sitio Web
	Bombas centrífugas de 1 y 3 HP	Av. Eloy Alfaro y Avigiras Quito-Ecuador	Telf: 1700 150 150	<a href="http://pedrollo.com.ec/">http://pedrollo.com.ec/</a>
	Motores trifásicos de 1 y 3 HP	SUCURSAL QUITO Av. Mariscal Sucre (Occidental) N52-120 y Florida.	Telf: (02) 605-5602	<a href="mailto:quito@dinattek.ec">quito@dinattek.ec</a>
	Variadores de frecuencia	Catalina de Aldaz, Quito-Ecuador	Telf: (02) 392-2129	<a href="mailto:wegecuador@weg.net">wegecuador@weg.net</a>
	Tanque de plástico Rotoplas de 600 L	Av. Eloy Alfaro y Avigiras Quito-Ecuador	Telf: 1700 150 150	<a href="http://rotoplas.com.ec/">http://rotoplas.com.ec/</a>
	Accesorios para la conexión, tubería tipo PVC	Oficina Comercial: Av. Siena 2-14 y Miguel Ángel, Edf. Matter, Sector La Primavera (Cumbayá), Quito, Pichincha	Telf: (593) 2 3934420	<a href="https://plastigamawavin.com/contacto/">https://plastigamawavin.com/contacto/</a>
	Tanque de plástico con capacidad de 200L	Km. 12,5 Vía Daule Guayaquil, Ecuador.	Telf: (593) 99 105 7386	<a href="mailto:infoventas@indeltro.com">infoventas@indeltro.com</a>
	Manómetros y Termómetros	Concepción E5-37 y Valparaíso, Quito	Telf: (593) 2 2952888	<a href="mailto:info@ecuadorianaindustrial.com">info@ecuadorianaindustrial.com</a>
	Indicadores de pH y de ORP	Inglaterra N31-126 y Mariana de Jesús, Sector la Mariscal, Quito, Ecuador.	Telf: (593) 2 601 6989	<a href="mailto:hannaguayaquil@hannainst.ec">hannaguayaquil@hannainst.ec</a>
	Rodamientos, bridas	Av. La Prensa y Av. Mariano Echeverría (Sector la Y)	Telf: (593) 99910903 7	<a href="mailto:info@casadelruliman.com">info@casadelruliman.com</a>
	Sellos mecánicos	Vía a la Costa Km 17.5 Puerto Hondo Av. Primera – Solar 13	Telf: (593) 99765641 5	<a href="mailto:evillacis@evasa.com.ec">evillacis@evasa.com.ec</a>
	Generador eléctrico, válvulas, accesorios complementarios	Es una tienda de e-commerce, motivo por el cual la dirección depende del vendedor	Varios	<a href="https://www.mercadolibre.com.ec/">https://www.mercadolibre.com.ec/</a>

Proveedor	Producto	Dirección	Contacto	Correo electrónico o Sitio Web
	Taller de referencia para la fabricación de la planta	Darío Figueroa y Gonzalo Rivera lote 4-1 A 100 mts del Cementerio de Sangolquí, San Nicolás	Telf: (593) 99490469 6	<a href="https://www.aiyflow.com/indrismet/">https://www.aiyflow.com/indrismet/</a>

## Capítulo 6: Conclusiones Y Recomendaciones

En este sexto capítulo se redactará las conclusiones necesarias respecto al diseño de la planta industrial para la generación de nanopartículas metálicas y optimización de la simulación de la mezcla.

### Conclusiones

- Se ha desarrollado la ingeniería conceptual y de detalle en las cuales consta: memorias técnicas de cálculo, planos de conjunto y de partes, lista de equipos e instrumentos, layout de distribución, diagrama de flujo del proceso, así como el plano de instrumentación y control de la planta industrial con capacidad de  $0.3\text{ m}^3$  para la generación de nanopartículas metálicas, la misma que está conformada principalmente por: el reactor principal, el reactor de mezcla, tanque de almacenamiento de agua, tanque de nitrógeno y estructura metálica de soporte, además se detalla la instrumentación requerida para la medición de las propiedades físicas y químicas en el proceso de obtención de las nanopartículas, por consiguiente todo esto permitirá la fabricación de los componentes y el montaje de la planta.
- Dado que la mezcla que se desarrolla en el reactor principal debe garantizar la generación de nanopartículas se validó el diseño de la investigación de (Revelo, 2016) en el cual el sistema de agitación era un tipo rotor-estator, además se investigó sobre otros conceptos que intervienen en el proceso de mezcla como placas deflectoras y tipos de rotores, los cuales se los consideró en una nueva propuesta de sistema de agitación que presentó mejores resultados de la simulación CFD transitoria del comportamiento de la mezcla, obteniendo líneas de corriente de las partículas totalmente desordenadas e impredecibles con

valores de 0.6 a 4.5  $m/s$  y energía cinética turbulenta existente de 17  $m^2/s^2$  suficiente para garantizar la homogeneización y turbulencia en la mezcla.

- El diseño preliminar para el dimensionamiento de los reactores, placas deflectoras y tipos de agitadores se basó en la teoría de (Exxon Mobil, 2001), para recipientes sometidos a presión externa, en la cual se considera las fuerzas de compresión generadas por el vacío interno y el aumento del espesor para el reforzamiento adecuado.
- Los componentes que integran la planta se montarán en una estructura metálica de 1900x1510x1450 mm, su diseño garantiza la estabilidad y la seguridad de los componentes, así como también la facilidad en el manejo y la movilización de la planta durante el traslado y puesta en operación en lugares poco accesibles en donde se va a realizar la intervención de las nanopartículas en los suelos cacaoteros contaminados con cadmio.
- El costo estimado para la fabricación de la planta industrial para la generación de nanopartículas es de \$29717 incluyendo mano de obra. Todos los elementos que integran la planta se pueden encontrar en el mercado local, esto representa una ventaja para mantenerse en contacto con los proveedores y asegurar productos de calidad, buen precio, condiciones de entrega y tiempos en la fabricación.
- La planificación y ejecución del diseño ingenieril de este proyecto fue logrado gracias a la combinación de formación previa con la que se contaba y de conocimientos nuevos que se adquirieron durante el proceso investigativo en temas como: diseño mecánico, elementos finitos aplicados, mecánica de fluidos, entre otros. Por consiguiente el trabajo de investigación tuvo como resultado una

dinamización e integración de conocimientos para complementar la formación cómo futuro profesional.

### **Recomendaciones**

- Realizar un estudio con mayor profundidad y detalle de la relación existente entre la geometría de los álabes y la energía cinética turbulenta (TKE) para la reducción de costos en la fabricación de los agitadores.
- Para optimizar el tiempo de fabricación hay que trabajar en paralelo con los proveedores del material y el taller dónde se llevará a cabo el proyecto y de esa forma asegurar que se cumplan los tiempos de entrega ya que algunos medidores como pH y ORP son importados y pueden tardar hasta 2 meses en llegar.
- El taller dónde se va a fabricar debe contar con todas las facilidades respecto a maquinaria y personal calificado para obtener los resultados esperados.
- Cuando se realiza simulaciones por elementos finitos se recomienda minimizar los componentes que no están directamente involucrados en nuestro volumen de control, ya que estos generan mayor costo computacional y a su vez falsas aproximaciones en la solución.
- Promover la simulación computacional CFD en la carrera de Ingeniería Mecánica como una alternativa para la resolución de problemas reales relacionados con la mecánica de fluidos, todo esto con la finalidad de mejorar el aprendizaje y de esta manera involucrarse en proyectos de mayor exigencia intelectual y tecnológica.

### Referencias Bibliográficas

- Ansys. (Noviembre de 2019). *Modelo de turbulencia*. Obtenido de <https://www.ansys.com/products/fluids/turbulence-modeling>
- Chavez, E. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of the total environment*, 533, págs. 205-214.
- Chesterton. (Octubre de 2019). *Sellos mecánicos*. Obtenido de <http://www.chesterton.cl/ficha/Catalogo%20Sellos%20Mecanicos%20Chesterton.pdf>
- Cia. General de Aceros S.A. (Noviembre de 2008). *Aceros Inoxidables*. Obtenido de <https://www.cga.com.co/images/document/ficha-304-304L.pdf>
- Comission European Amending, R. (21 de Mayo de 2018). *No 1881/2006 as regards maximum levels of cadmium in foodstuffs*. Obtenido de [https://members.wto.org/crnattachments/2013/sps/EEC/13\\_3645\\_00\\_e.pdf](https://members.wto.org/crnattachments/2013/sps/EEC/13_3645_00_e.pdf)
- Cumbal , L., Debut, A., Delgado, D., Jurado , C., & Stael, C. (2015). Synthesis of multicomponent nanoparticles for immobilization of heavy metals in aqueous phase. *NanoWorld J*, 103-109.
- Cumbal, L. (2018). Biosynthesis of Multicomponent Nanoparticles with Extract of Mortiño (*Vaccinium floribundum* Kunth) Berry: Application on Heavy Metals Removal from Water and Immobilization in Soils. . *Journal of Nanotechnology*.
- Cumbal, L., Ruiz, H., & Abril, M. (2018). Biosynthesis of Multicomponent Nanoparticles with Extract of Mortiño (*Vaccinium floribundum* Kunth) Berry: Application on Heavy Metals Removal from Water and Immobilization in Soils. *Journal of Nanotechnology*, 2018.
- Exxon Mobil. (2001). *Mixing Operations-General Concepts and Equipment Sizes*. Ohio.

- Felix, I. (2002). Determinación de metales contaminantes en los cultivos de exportación cacao, café, banano, palma africana y su repercusión sobre la calidad de los mismos. *VII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*. Portoviejo.
- Felm Motors. (2019). *Bombas y motores eléctricos*. Obtenido de <http://www.hmapumps.com/Downloads/HMAFelmIE2.pdf>
- García, C. (2014). Diseño de un reactor para la obtención de nanopartículas y facilidades asociadas. En ESPE, *Carrera de Ingeniería Mecánica* (págs. 20-24). Sangolquí.
- Hanna Instruments. (Febrero de 2020). *Indicadores de pH*. Obtenido de <https://hannainst.ec/productos/>
- Indeltro. (2020). *Tanques de plástico*. Obtenido de [http://www.indeltro.com/producto.asp?id=12&id\\_tipo=1&navin=1](http://www.indeltro.com/producto.asp?id=12&id_tipo=1&navin=1)
- Mallampati, S. (2013). Total Immobilization of soil heavy metals with nano-Fe/Ca/CaO dispersion mixtures. *Environmental chemistry letters.*, 11(2), 119-125.
- Megyesy, E., & Buthod, P. (2001). *Pressure Vessel Handbook*. Pensilvania: Pressure Vessel Publishing.
- Michalkova, Z., Komárková, M., Sillerová, H., Della Puppa, L., Joussein, E., & Bordas, F. (2014). Evaluating the potential of three Fe- and Mn (nano) oxides for the stabilization of Cd, Cu and Pb in contaminated soils. *Journal of Environmental Management*, 146, 226-234.
- Mite, F. (2010). Avances del monitoreo de presencia de cadmio en almendras de cacao, suelos y aguas. *XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*. Santo Domingo de los Sáchilas, Ecuador.

- O'Carroll, D., Sleep, B., & Krol, M. (2013). Nanoscale zero valent iron and bimetallic particles for contaminated site remediation. . *Advances in Water Resources*, 104-122.
- Pedrollo. (Marzo de 2019). *Motores eléctricos*. Obtenido de <https://www.pedrollo.com/es/al-red-electrobombas-centrifugas-en-acero-inox/131>
- Procim. (Abril de 2019). *Generadores Eléctricos*. Obtenido de <https://www.procim.cl/catalogo/generador-electrico/generador-loncin>
- Pyle, D., Fryer , P., & Reilly , C. (2012). *Chemical Engineering for the food industry*. Springer Science & Business Media.
- Rathor, G., Chopra, N., & Adhikari, T. (2017). Remediation of Nickel Ion from Soil and Water Using Nano Particles of Zero-Valente Iron (nZVI). *Oriental Journal of Chemistry*, 1025-1029.
- Revelo, J. (2016). Diseño de un Reactor y Simulación de la mezcla para la fabricación de nanopartículas metálicas como proceso de remediación en suelos contaminados por acción minera. En ESPE, *Carrera de Ingeniería Mecánica* (págs. 35-39).
- Rothbart, H. (2004). *Cam Desing Handbook*. New Jersey: McGraw-Hill.
- Rotoplas. (Junio de 2020). *Tanques de plástico*. Obtenido de <http://rotoplas.com.ec/producto/tanque-600/>
- Roydisa. (Marzo de 2020). *Agitadores mecánicos*. Obtenido de <https://www.roydisa.es/archivos/3183>
- Stefaniuk, M., Oleszczuk, P., & Ok, Y. (2016). Review on nano zerovalent iron (nZVI): From synthesis to environmental applications. *Chemical Engineering Journal*, 618-632.

- Trupper. (Febrero de 2020). *Bombas centrífugas*. Obtenido de <https://www.truper.com/CatVigente/Bombas-electricas-para-agua-perifericas-TRUPER-EXPERT-33.html>
- Valsum. (Febrero de 2020). *Indicadores de nivel*. Obtenido de <http://www.valsum.es/index.php?route=information/products>
- Weg. (2019). *Variadores de frecuencia*. Obtenido de <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h6e/h82/WEG-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>
- Wiley, P. (2004). *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*.
- Winters. (Febrero de 2020). *Indicadores de temperatura*. Obtenido de <https://winters.com/product-services/>
- Xinxiang, S. H. (Diciembre de 2019). *Tapas de recipientes a presión*. Obtenido de <http://m.es.cnxxhead.com/metal-spherical-head/din-28011-torispherical-head.html>
- Zimmerlin. (Enero de 2020). *Tapas de agitadores*. Obtenido de [www.zimmerlin.de](http://www.zimmerlin.de)

**Anexo A. Diagrama de Instrumentación y Tubería (P&Id)**

**Anexo B. Planos**

**Anexo C. Hojas Técnicas de los Componentes**