



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

“Diseño de un reactor anaerobio de lecho fluidizado a nivel planta piloto para el tratamiento de vinazas de origen mezcalero”

TESIS

Para obtener el título de
INGENIERO EN DISEÑO

Presenta:

Laura Susana Gracida León

Director de tesis:

Dr. Vania Shuhua Robles González

Codirector de tesis:

M.C. Víctor Manuel Cruz Martínez

Huajuapán de León, Oaxaca, Octubre de 2021

DEDICATORIA

A Dios, por guiarme en la vida.

A mis padres, por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente.

A mi compañero de vida, por su motivación y apoyo incondicional, gracias por confiar en mí.

A mis hermanos, por regalarme grandes momentos de alegría que me motivaron en los días difíciles.

A mi amiga, por sus consejos y el apoyo incondicional.

A mis amigos, por los momentos divertidos que pasamos juntos.

Y a mi familia en general, por su motivación.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a mi director de tesis Dr. Vania Shuhua Robles González, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo, admiro su capacidad y entusiasmo, gracias por confiar en mí.

A mi codirector M.C. Víctor Manuel Cruz Martínez por su apoyo y el tiempo brindado para la revisión de la tesis.

Al Dr. José Gabriel Mendoza por su apoyo y el tiempo brindado para asesorías.

A mis revisores de tesis, M.T.A.M. Armando Rosas, Dr. Mario Márquez y M.P.I.I.O. Fernando Iturbide, por su atención prestada para la revisión de la tesis.

A los técnicos del taller de metalmecánica y manufactura, por sus consejos y apoyo.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca, por haberme brindado tantas oportunidades y enriquecerme en conocimiento.

RESUMEN

La generación de nuevos proyectos surge a través del análisis del entorno y la formación de propuestas de soluciones desde diferentes perspectivas para aquellos problemas o debilidades encontradas. Partiendo de ello se detectó la necesidad de dimensionar y mejorar el sistema a nivel laboratorio de un Reactor Anaerobio de Lecho Fluidizado (RAnLEF) para dar tratamiento a las vinazas de origen mezcalero. En México la industria mezcalera genera residuos líquidos altamente contaminantes denominados vinazas, los cuales son efluentes agresivos cuyas descargas a cuerpos de agua o suelo puede provocar serios problemas ambientales. El estado de Oaxaca es el principal productor de mezcal a nivel nacional, con una producción de 5 millones de litros por año, y la generación de residuales, de aproximadamente 75 millones de litros de vinazas. Es desafortunado que las fábricas de mezcal, no cuentan con un sistema para dar tratamiento a las VM. Por lo anterior es de suma importancia el desarrollo de una tecnología que contribuya a que la industria mezcalera sea más limpia.

El uso de reactores anaerobios para disminuir la alta carga de materia orgánica presente en las VM ha demostrado ser una alternativa tecnológica viable, sin embargo son pocos los trabajos reportados de este tipo de reactores a nivel planta piloto, por lo que el objetivo del presente trabajo fue desarrollar el escalamiento de un RAnLEF a nivel planta piloto a partir de diseños de escala laboratorio, el cual pueda ser implementado en fábricas de producción de mezcal, para dar un tratamiento a las VM y disminuir la contaminación provocada por este tipo de residuos en el ambiente. Siguiendo los pasos de la metodología de Karl T. Ulrich se realizó de forma ordenada el desarrollo del prototipo virtual a escala piloto, a partir de relaciones geométricas de cada uno de los componentes principales del RAnLEF para determinar sus dimensiones y geometría. Presentando al final un modelo 3D escalado a nivel planta piloto, que permite la visualización de los componentes, ensamble y proceso de manufactura, cubriendo la necesidad detectada.

ÍNDICE GENERAL

ABREVIATURAS.....	15
INTRODUCCIÓN	17
CAPÍTULO I ASPECTOS PRELIMINARES	19
1.1 Antecedentes	19
1.2 Planteamiento del problema.....	22
1.3 Justificación	23
1.4 Objetivos	25
1.4.1 Objetivo general	25
1.4.2 Objetivos específicos y metas	25
1.5 Metodología	27
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	29
2.1 Principales estados de México productores de mezcal	29
2.2 Regiones de Oaxaca productores de mezcal.....	31
2.3 Definición de vinazas mezcaleras.....	32
2.4 Contaminación causada por vinazas mezcaleras	33
2.5 Sistemas empleados para el tratamiento de vinazas.....	34
2.6 Reactores anaerobios y sus características	37
2.6.1 Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA, UASB)	37
2.6.2 Reactor anaerobio de lecho empacado de flujo ascendente (RAnLEFA)	38
2.6.3 Reactor anaerobio de lecho empacado de flujo descendente (RAnLEFD).....	39
2.6.4 Reactor anaerobio de lecho fluidizado (RAnLEF)	40
2.7 Escalamiento	43
CAPÍTULO III CONCEPTUALIZACIÓN	45
3.1 Descripción de las configuraciones reportadas del diseño del RAnLEF a nivel laboratorio... 45	
3.2 Uso de las relaciones geométricas altura de lecho fluidizado (H_{LF}); Diámetro del lecho fluidizado (D_{LF}); altura de la cámara de expansión (H_{CE}) y diámetro de la cámara de expansión (D_{CE}), para el diseño del RAnLEF (123 L) a nivel piloto, reportadas en la literatura científica	47
3.3 Cálculo de las relaciones geométricas para el escalamiento del RAnLEF a nivel planta piloto (NPP).....	49
3.3.1 Diseño en el nivel sistema	49

3.3.2 Cálculo de la altura del lecho fluidizado (H_{LF}) y diámetro del lecho fluidizado (D_{LF}) del RAnLEF a nivel planta piloto para un volumen de 70 L	49
3.3.3 Cálculo del volumen, diámetro y altura de la cámara de expansión (V_{CE} , D_{CE} y H_{CE}) a NPP51	
3.3.4 Cálculo de la altura y volumen del espacio superior (H_{ES} y V_{ES} , respectivamente) en el RAnLEF a NPP	53
3.4 Selección de material adecuado para la fabricación de los componentes del RAnLEF	56
3.4.1 Tipos de aceros empleados en la industria	56
3.4.2 Clasificación de los aceros inoxidables.....	58
3.4.3 Nomenclatura de los aceros inoxidables normas AISI, ISO y ASTM.....	59
3.4.4 Especificaciones de láminas (Hoja) de la serie 300 aceros inoxidables austeníticos.....	62
3.4.5 Tubos de acero inoxidable	63
3.4.6 Unión del LF con la tapa inferior por medio de bridas de acero inoxidable	65
3.5 Material de soporte ECO STAR.....	68
3.6 Modelado del RAnLEF a nivel piloto con los requerimientos de diseño y parámetros establecidos a nivel laboratorio	69
3.6.1 Propuestas del RAnLEF con relación $H_{LF}/D_{LF}=10$	71
CAPÍTULO VI DESARROLLO	73
4.1 Desarrollo del modelo y diseño estructural con sistemas CAD/CAE.....	73
4.2 Procesos de manufactura.....	75
4.2.1 Procesos de unión y ensamble	78
4.2.2 Tipos de procesos de soldadura para unión permanente.....	78
4.2.3 Tipos de soldadura empleadas para unir piezas de acero inoxidable.....	79
4.2.4 Ensamble mecánico por medio de sujetadores roscados.....	81
4.2.5 Descripción del proceso de manufactura del RAnLEF y la estructura de soporte	82
CAPÍTULO V EVALUACIÓN	91
5.1 Verificar la resistencia mecánica de los elementos del RAnLEF mediante el análisis estático por medio del software CAD/CAE	91
5.1.1 Análisis del elemento finito (AEF)	91
5.1.2 SolidWorks Simulation	92
5.1.3 Teorías de falla	92
5.1.4 Análisis estático.....	94
5.2 Estudio del análisis estático estructural.....	95
5.2.1 Cálculo de las cargas aplicadas a la estructura.....	95

5.3 Estudio del análisis de esfuerzos en recipientes a presión de pared delgada	102
5.3.1 Cálculo de la presión hidrostática	105
5.4 Cálculo de la longitud total de la tubería de alimentación de vinazas en el RAnLEF	113
5.4.1 Descripción de alimentación de vinazas al RAnLEF	113
5.4.2 Cálculo de la potencia de la bomba centrífuga	114
5.5 Disponibilidad de equipos y herramientas en los talleres de la UTM para la manufactura del RAnLEF	120
CAPÍTULO VI PROTOTIPO VIRTUAL.....	121
6.1 Dibujos técnicos de los componentes del RAnLEF	123
6.2 Lista de componentes estándares necesarios para la manufactura del RAnLEF	147
6.3 Costo final de componentes estándares	151
6.4 Lista de componentes a manufacturar	152
CAPÍTULO VII CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	153
7.1 Conclusiones.....	153
7.2 Trabajos futuros	158
REFERENCIAS:	159
ANEXOS	169
A. Proveedores de tubos de acero inoxidable.....	170
B. Modelo y análisis de recipiente a presión de pared delgada.....	172
C. Propuestas del diseño de logotipo STAR-V (Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales-Vinazas)	175

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.-</i> Reactor anaerobio de lecho fluidizado a nivel laboratorio. (i) Fabricado en material de vidrio; (ii) ensamblaje deficiente en las tapas superior e inferior; (iii) obstrucción de la tubería de recirculación; (vi) sistema de soporte poco resistente; (v) carece de un sistema de captación de biogás.....	22
<i>Figura 2.-</i> Estados de México productores de mezcal, con denominación de origen. Fuente: Elaboración propia, con información de CRM (2018).	30
<i>Figura 3.-</i> Distritos que integran la región del mezcal. Fuente: Elaboración propia, con datos de Centro Latinoamericano para el desarrollo Rural (RIMISP, 2009).	31
<i>Figura 4.-</i> Proceso de producción de mezcal y obtención de vinazas. Fuente: Elaboración propia.	32
<i>Figura 5.-</i> Esquema de reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB). Fuente: Elaboración propia.	37
<i>Figura 6.-</i> Esquema de reactor anaerobio de lecho empacado de flujo ascendente (RAnLEFA). Fuente: Elaboración propia.....	38
<i>Figura 7.-</i> Esquema de reactor anaerobio de lecho empacado de flujo descendente (RAnLEFD). Fuente: Elaboración propia.....	39
<i>Figura 8.-</i> Esquema de reactor anaerobio de lecho fluidizado (RAnLEF). Fuente: Elaboración propia.....	40
<i>Figura 9.-</i> Proceso de escalamiento de reactores. Fuente: https://www.youtube.com/watch?	43
<i>Figura 10.-</i> Esquema del RAnLEF a nivel laboratorio. Fuente: Elaboración propia.....	46
<i>Figura 11.-</i> Brida deslizable (Slip On).	66
<i>Figura 12.-</i> Brida ciega (Blind).	67
<i>Figura 13.-</i> a) Propuesta 1, y b) Propuesta 2.	72
<i>Figura 14.-</i> RAnLEF sujetado en una estructura desmontable.	73
<i>Figura 15.-</i> a) Proceso técnico, y b) Proceso económico (Groover, 2007).	75
<i>Figura 16.-</i> Clasificación de procesos de manufactura (Groover, 2007).	77
<i>Figura 17.-</i> Etapas en la realización de un análisis (Gómez, 2010).	95
<i>Figura 18.-</i> Diagrama de aplicación de cargas a la estructura. Fuente: Elaboración propia.	97
<i>Figura 19.-</i> Tensión.	99
<i>Figura 20.-</i> Desplazamiento.....	100
<i>Figura 21.-</i> a) Tensión de Von Mises máx. y b) Tensión de cortadura máx. (Tresca).	101
<i>Figura 22.-</i> Distribución de esfuerzos supuesta en recipientes a presión de pared delgada (Beer, 2017).	102
<i>Figura 23.-</i> Recipiente cilíndrico presurizado (Beer, 2017).	102
<i>Figura 24.-</i> Diagrama de cuerpo libre (Beer, 2017).	103
<i>Figura 25.-</i> Círculo de Mohr (Beer, 2017).	104
<i>Figura 26.-</i> Esfuerzo normal máximo.....	108
<i>Figura 27.-</i> Esfuerzo Von mises.	109
<i>Figura 28.-</i> Desplazamiento.....	110
<i>Figura 29.-</i> Deformación unitaria.	111
<i>Figura 30.-</i> a) Tensión de Von Mises máx. y b) Tensión de cortadura máx. (Tresca).	112
<i>Figura 31.-</i> Esquema para el cálculo de la longitud total de la tubería de alimentación de vinazas en el RAnLEF.....	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Especificaciones de límites máximos permisibles.....	34
Tabla 2.- Proceso de tratamiento de vinazas.....	36
Tabla 3.- Relaciones geométricas de reactores empleados para el tratamiento de vinazas.	47
Tabla 4.- Dimensiones de alturas del lecho fluidizado (H_{LF}) y diámetro del lecho fluidizado (D_{LF}) del RAnLEF a nivel planta piloto para obtener un volumen de 70 L, obtenidas con relaciones H_{LF}/D_{LF} de 6, 8, 10, 12 y 15.	50
Tabla 5.- Cálculo del volumen de la cámara de expansión del RAnLEF a NPP.....	51
Tabla 6.- Dimensiones obtenidas de las secciones que conforman el RAnLEF a nivel planta piloto (NPP).	55
Tabla 7.- Consideraciones de diseño.	56
Tabla 8.- Tipos de aceros empleados para la fabricación de reactores.	57
Tabla 9.- Principales elementos de aleación y su influencia.	58
Tabla 10.- Tipos de aceros inoxidables más comunes y sus principales características.....	59
Tabla 11.- Composiciones y propiedades mecánicas de aceros inoxidables.....	61
Tabla 12.- Dimensiones de láminas comerciales (LC).	62
Tabla 13.- Tubería de acero inoxidable industrial.	63
Tabla 14.- Dimensiones de tubos comerciales (TC) con y sin costura de acero inoxidable ASTM 312.....	64
Tabla 15.- Tipos de Bridas utilizadas en la industria.	65
Tabla 16.- Características y beneficios de ECO STAR.	68
Tabla 17.- Necesidades y requerimientos.	69
Tabla 18.- Tipos de soldadura más utilizados para acero inoxidable.....	80
Tabla 19.- Tipo de broca para perforar metal y su aplicación.	82
Tabla 20.- Proceso de manufactura de los componentes del RAnLEF.....	83
Tabla 21.- Proceso de manufactura del depósito de 30 L y base para bomba de recirculación..	87
Tabla 22.- Proceso de manufactura de la fabricación de la estructura desmontable.....	88
Tabla 23.- Tipo de predicción de fallas.	93
Tabla 24.- Cargas aplicadas a la estructura.	96
Tabla 25.- Herramientas y equipos de los talleres de la UTM.	120
Tabla 26.- Listado de componentes estándares.....	147
Tabla 27.- Listado de componentes eléctricos.....	150
Tabla 28.- Listado de sistema de almacenamiento.	150
Tabla 29.- Importe total de los componentes estándares.....	151
Tabla 30.- Listado de componentes a manufacturar.....	152

ABREVIATURAS

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
B _v	Carga Orgánica
CE	Cámara de expansión del RAnLEF
CRM	Consejo Regulador de Mezcal
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
D _{CE}	Diámetro de la cámara de expansión
DI	Diámetro interior
D _{LF}	Diámetro de lecho fluidizado
D _{ES}	Diámetro espacio superior
DO	Diámetro exterior
DQO	Demanda Química de Oxígeno
ES	Espacio superior del RAnLEF
H _{CE}	Altura de la cámara de expansión
H _{ES}	Altura del espacio superior
H _{LF}	Altura del lecho fluidizado
ISO	International Standardization Organization
LF	Lecho fluidizado del RAnLEF
NL	Nivel laboratorio
NPP	Nivel planta piloto
RAnLEF	Reactor Anaerobio de Lecho Fluidizado
r _{CE}	Radio del cilindro que forma la sección de la CE
RG	Relaciones geométricas

XVI

RML	Recirculación del medio líquido
TRH	Tiempo de retención hidráulico
V_{CE}	Volumen de la cámara de expansión del RAnLEF
VLF	Volumen del lecho fluidizado del RAnLEF
VM	Vinazas mezcaleras

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad el hombre ha desarrollado máquinas con la finalidad de que le ayuden a realizar tareas cotidianas para brindarle comodidad. Teniendo como base los conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera de Ingeniería en Diseño, así como motivación personal hacia el área de materiales y procesos de transformación, se detectó la oportunidad de generar un proyecto para el escalamiento y mejoramiento de un reactor de lecho fluidizado para dar tratamiento a los residuos líquidos (vinazas) generadas durante el proceso de elaboración de mezcal.

Las actividades antropogénicas han impactado negativamente en el medio ambiente, el problema de la contaminación ambiental ha sido múltiple, presentándose en formas muy diversas a través de efectos directos o indirectos que dañan seriamente la atmósfera, suelo, agua y seres vivos, un ejemplo de estas actividades es la generación de residuos líquidos durante la fabricación de mezcal denominados vinazas, las cuales son vertidas en el ambiente generando serios problemas de contaminación.

Los tratamientos biológicos anaerobios y aerobios constituyen dos grandes alternativas para la depuración de aguas residuales y residuos orgánicos biodegradables. Sin embargo, el tratamiento anaerobio resulta mucho más favorable económicamente por el hecho de no requerir aireación, y por la generación de biogás, que se puede utilizar como energía alternativa (Juárez et al., 2015).

Una de las estrategias tecnológicas en el diseño de reactores anaerobios, es la adherencia de microorganismos en soportes (formación de biopelículas), los cuales se expanden o fluidifican, permitiendo operar dichos reactores con altas cargas orgánicas (B_v) y menores tiempos de retención hidráulicos (TRH). El flujo ascendente del lecho de partículas de soporte se logra a través de una corriente de recirculación, lográndose de esta manera la fluidización. Los materiales de soporte son variados e incluyen: arena, material plástico, cerámica, carbón y otros tipos de materiales.

En estudios realizados por Robles-González y Poggi-Varaldo (2017), quienes utilizaron un reactor de lecho fluidizado para el tratamiento de VM, observaron problemas asociados con el diseño del reactor, así como la posibilidad de su escalamiento, por lo que en el presente trabajo se propone realizar su escalamiento a nivel planta piloto, así como propuestas de mejoras en su funcionalidad. Para el logro de este objetivo, se utilizó como guía la metodología de Karl T. Ulrich que consta de 5 fases, las cuales son una serie de etapas que permiten la obtención y análisis de información de una forma clara y ordenada.

La tesis consta de 7 capítulos de los cuales los 2 primeros muestran la información acerca del problema a resolver y un bosquejo de conceptos utilizados en los siguientes apartados a través del marco teórico.

Los siguientes 3 capítulos muestran el proceso del proyecto a través del desarrollo del concepto, diseño a nivel sistema, diseño a detalle, pruebas y refinamiento del prototipo analizando la resistencia de materiales propuestos para su fabricación por medio del software SolidWorks, para finalmente mostrar los resultados en el capítulo 6, en el que se encuentra la presentación del producto, planos y despiece del sistema diseñado.

Las conclusiones a las que se llegaron después de todo el proceso y la propuesta de temas de investigación en trabajos futuros se muestran en el capítulo 7, además de contener esta tesis una serie de anexos que permiten ampliar la información de aspectos en específico.

CAPÍTULO I ASPECTOS PRELIMINARES

1.1 Antecedentes

En México el mezcal es uno de los productos agroindustriales más representativos, el cual se obtiene como producto de la destilación de los mostos fermentados de las cabezas cocidas del maguey o agave. Oaxaca es el estado con mayor producción de mezcal alcanzando el 92.3% de producción, convirtiéndose en una de sus principales industrias (Consejo Regulador del Mezcal, 2018). Las fábricas de mezcal producen altos volúmenes de vinazas, por ejemplo, en una fábrica tradicional de mezcal se generan de 12 a 15 litros de vinazas por litro de alcohol producido (Robles-González et al., 2012). En el año 2019 el Consejo Regulador del Mezcal (CRM), reporto la producción de más de 7.4 millones de litros de mezcal certificado (Sánchez, 2020), lo anterior generó aproximadamente 88.8 millones de litros de vinazas, las cuales, si son vertidos al suelo y cuerpos de agua, pueden provocar serios problemas de contaminación ambiental (Robles-González et al., 2012).

La CONAGUA (2018) reportó que a nivel nacional existen de 3 123 plantas de tratamiento de agua residual instaladas en el sector industrial, el estado de Oaxaca cuenta con tan solo el 0.67 % de estas plantas, en su mayoría instaladas en grandes y medianas industrias, existiendo tan solo una planta de tratamiento para la industria del mezcal ubicada en Santa Lucia del Camino, la cual cuenta con un tratamiento primario, no se especifica el tipo de tratamiento y tiene una capacidad instalada de 0.11 L/s.

En los últimos 20 años, varios grupos de investigación han realizado estudios para tratar o reutilizar a las vinazas, siendo el tratamiento biológico anaerobio el más utilizado debido a sus bajos costos operativos y la biodegradación (mineralización) de una gran cantidad de compuestos orgánicos presentes en los efluentes relacionados con las vinazas mezcaleras (Robles-González et al., 2018; De Bazúa-Durand et al., 1991; Kanimozhi y Vasudevan, 2014; Strong y Burgess, 2008).

Las tecnologías anaerobias más adecuadas, que se informan en la literatura con el objetivo de degradar la alta concentración de materia orgánica que presentan las diferentes variedades de vinazas han sido: (i) reactor anaerobio de lecho fluidizado

[RAnLEF] (De Bazúa-Durand et al., 1991; Pérez-García et al., 2005; Pérez et al., 1999); (ii) reactor anaerobio de lecho empacado de flujo ascendente [RAnLEFA] (Acharya et al., 2008); (iii) reactor anaerobio de lecho de flujo ascendente [RAnLFA] (Marino-Marmolejo et al., 2015; Gomes de Barros et al., 2017; España-Gamboa et al., 2012; Latif et al., 2011) y (iv) reactor anaerobio de lecho empacado de flujo descendente [RAnLEFD] (Gouvêa de Godoi et al., 2017).

De las tecnologías mencionadas anteriormente, el RAnLEF ofrece ventajas distintivas sobre las otras tecnologías anaeróbicas, como son: la simplicidad de construcción, la eliminación de mezclas mecánicas, mejor estabilidad a mayores velocidades de carga orgánica, capacidad para soportar altas cargas orgánicas, así como operación a bajos tiempos de retención hidráulica (Robles-González y Poggi-Varaldo, 2017; Acharya et al., 2008; Estrada-Vázquez et al., 1998).

Los reactores de lecho fluidizado son sistemas que emplean materiales particulados de pequeño tamaño como medio de soporte para el crecimiento por adsorción de microorganismos (García y Hidalgo, 2005). El conjunto soporte-biofilm (bio-partícula) se mantiene en suspensión en medio del flujo vertical ascendente cuya velocidad es lo suficientemente elevada para superar la fuerza de la gravedad.

Las bio-partículas están en continuo movimiento relativo, pero no son transportadas por el flujo, es decir, no son lavadas del reactor (Turan, 2000). El flujo de agua en sentido ascendente a través de un lecho de arena, carbón activo granular, antracita, partículas de polipropileno, etc., a elevada velocidad es quien provoca la fluidización del mismo (Diez et al., 1992). El material soporte de un lecho fluidizado cuenta con una superficie específica extremadamente grande, y alcanza en minutos el nivel de tratamiento que cualquier proceso biológico convencional consigue en varias horas. La suspensión de las biopartículas maximiza la superficie de contacto entre los microorganismos y el agua residual (Jafari et al., 2014).

Los tratamientos biológicos anaerobios constituyen grandes alternativas para la depuración de aguas residuales y residuos orgánicos biodegradables, este tratamiento resulta favorable económicamente debido a que no requiere aireación y por la generación de biogás que se puede utilizar como energía alternativa (Robles-González y Poggi-Varaldo, 2017; Jafari et al., 2013).

En la generación más reciente de reactores anaerobios, los microorganismos se adhieren a un material de soporte formando biopelículas, que se expanden o fluidifican con altas velocidades de flujo, lo cual proporciona la ventaja de tratar efluentes con altas cargas orgánicas en menor tiempo a comparación de otros sistemas (Juárez et al., 2015).

Con respecto al reactor a escala laboratorio que se encuentra en el laboratorio de Biotecnología Ambiental del Instituto de Hidrología, empleado para el tratamiento de vinazas de origen mezcalero, presentó las siguientes desventajas en los materiales empleados para su construcción y operación: *(i)* Material frágil, debido a que el reactor fue fabricado en material de vidrio, lo cual no permite una manipulación robusta; *(ii)* problemas de ensamblaje en las tapas superior e inferior; *(iii)* obstrucción de la tubería utilizada para la recirculación de las vinazas tratadas anaeróbicamente por el material de soporte de la biomasa celular; *(iv)* no cuenta con un sistema de soporte adecuado para el reactor y *(v)* carece de un sistema de captación de biogás.

El reactor funcionó como modelo experimental a nivel laboratorio, sin embargo, debido a los problemas presentados en su diseño se propone considerar las áreas de oportunidad antes mencionadas en su escalamiento a nivel planta piloto, haciendo un modelado virtual, mejorando los procesos de manufactura y materiales utilizados para su fabricación. En la Figura 1 se muestran las secciones principales del reactor fabricado a nivel laboratorio, donde se observan las áreas de oportunidad mencionadas anteriormente.

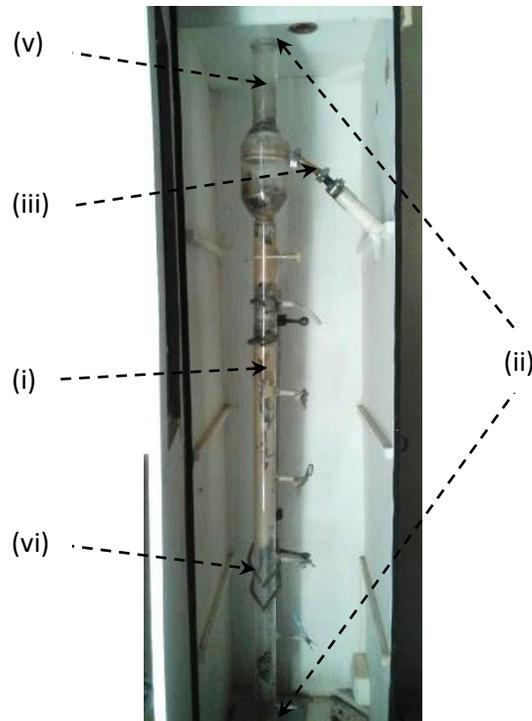


Figura 1.- Reactor anaerobio de lecho fluidizado a nivel laboratorio. (i) Fabricado en material de vidrio; (ii) ensamblaje deficiente en las tapas superior e inferior; (iii) obstrucción de la tubería de recirculación; (vi) sistema de soporte poco resistente; (v) carece de un sistema de captación de biogás.

1.2 Planteamiento del problema

En el estado de Oaxaca existen 422 productores de mezcal registrados ante el Consejo Regulador del Mezcal (Espinosa et al., 2017) y 329 unidades económicas dedicadas a la actividad de elaboración de bebidas destiladas de agave (INEGI, 2016), sin embargo, es lamentable mencionar que el estado de Oaxaca solo cuenta con una sola planta de tratamiento de aguas residuales generadas por la industria de la elaboración de mezcal (CONAGUA, 2018).

Se ha reportado en la literatura que el uso de reactores anaerobios es una alternativa tecnológica viable para disminuir la alta carga de materia orgánica presente en las vinazas mezcaleras (VM), sin embargo su investigación ha sido a nivel laboratorio (Robles-González y Poggi-Varaldo, 2017; Albanez et al., 2016; Balaguer, 1992), por lo que es de suma importancia el diseño a nivel planta piloto de un reactor anaerobio de lecho fluidizado que pueda ser implementado como una alternativa tecnológica viable, para el tratamiento de las VM, que contribuya a que la industria del mezcal en el estado de Oaxaca, no cause deterioro del ambiente y de la salud humana.

1.3 Justificación

El Plan de Desarrollo Estatal de Oaxaca (2016-2022), menciona que todas las riquezas naturales se deben de aprovechar de manera adecuada para la mejora de vida de los habitantes. El medio ambiente es considerado como elemento base del desarrollo sustentable. La mayor parte de las personas identifican el gran problema de contaminación del medio ambiente, los estudios acerca de este caso señalan que muy pocas personas están interesadas en hacer algo para rescatarlo y conservarlo, existen diferentes factores que provocan la contaminación, entre ellos se encuentran los residuos sólidos y líquidos, siendo este último uno de los que tiene mayor impacto sobre el medio ambiente. “El impacto que generan los residuos sobre los recursos naturales, la flora y la fauna, es evidente poniendo en riesgo la biodiversidad de la entidad” (Plan Estatal de Desarrollo, 2016).

El estado de Oaxaca es el principal productor de mezcal a nivel nacional, alcanzando el 92.3% de la producción total, convirtiéndose en una de sus principales industrias (Consejo Regulador del Mezcal, 2018). En el año 2019 se generaron 88.8 millones de litros de vinazas las cuales presentan altas cargas orgánicas de materia orgánica, son fuertemente ácidos y contienen una importante fracción recalcitrante, y de no ser tratadas antes de ser vertidas, pueden generar un grave deterioro al medio ambiente, así como provocar problemas de salud en las comunidades. Por lo anterior, es necesario dar un tratamiento a las VM, existen diferentes métodos, los cuales pueden ser clasificados en tratamientos físico-químicos y tratamientos biológicos, los cuales se pueden subdividir en aerobios y anaerobios. La digestión anaerobia ha sido el proceso más utilizado en el tratamiento de vinazas. Aun cuando se han reportado diversas configuraciones de los RAnLEF, estos han sido utilizados únicamente a nivel laboratorio, haciéndose necesario su escalamiento a nivel planta piloto. La importancia de una planta piloto es definir los datos necesarios, los cuales a través de una técnica adecuada de escalamiento servirán para definir la planta industrial en un futuro, en diferentes capacidades, sin afectar los criterios de diseño, logrando el mejoramiento de la calidad del producto.

Propósito de utilizar plantas piloto:

- Parámetros de diseño
- Operaciones unitarias
- Corrosión
- Procedimientos operativos
- Problemas de trabajo
- Problemas ambientales

El escalamiento es una herramienta vital, se puede reducir errores en diseños directos debido a correlaciones inexactas o a la falta de información. La realización de un adecuado uso de las reglas de similaridad sumado al análisis dimensional permite la simplificación de cálculos y una mayor efectividad en el diseño de equipos a partir de datos de plantas piloto.

Las plantas piloto son un elemento muy importante, pues son fuente de información y generación de conocimiento, además permite la realización de análisis económico, (Anaya-Durand y Pedroza-Flores, 2008).

El alcance de este proyecto fue realizar: (i) propuesta de escalamiento a nivel planta piloto de un RAnLEF de 123 L de volumen total a partir de relaciones geométricas obtenidas de un RAnLEF a nivel laboratorio (el cual se encuentra en el laboratorio de Biotecnología Ambiental, del Instituto de Hidrología de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, y que a su vez fue empleado en el trabajo de investigación realizado por Robles-González y Poggi-Varaldo (2017); (ii) modelado virtual el cual se realizó mediante el uso de la herramienta CAD; (iii) explosivo del modelo; (iv) planos constructivos a detalle; (v) proceso de manufactura; (vi) análisis estático de la estructura desmontable para el soporte del RAnLEF, empleando la herramienta CAE; (vii) análisis de presión hidrostática del RAnLEF, empleando la herramienta CAE; (viii) generador de precios unitarios de piezas para la fabricación del RAnLEF. Es importante señalar que el RAnLEF que se propone no se encuentra disponible comercialmente, de aquí la necesidad de escalar un RAnLEF de nivel laboratorio a nivel planta piloto, que cumpla con los requerimientos de fabricación para ser implementado en la industria mexicana del mezcal.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Dimensionar un reactor anaerobio de lecho fluidizado (RAnLEF) a nivel planta piloto (123 L) para el tratamiento de vinazas mezcaleras, a partir del uso de relaciones geométricas establecidas para este tipo de reactores.

1.4.2 Objetivos específicos y metas

Objetivo 1. Revisar en la literatura las relaciones geométricas (RG), correspondientes a la altura de lecho fluidizado (H_{LF}); diámetro del lecho fluidizado (D_{LF}); altura de la cámara de expansión (H_{CE}) y diámetro de la cámara de expansión (D_{CE}), en los RAnLEF a nivel laboratorio.

Meta 1. Obtención de las RG que se emplearan en el escalamiento del RAnLEF a nivel planta piloto.

Objetivo 2. Realizar el modelado virtual del RAnLEF a nivel planta piloto mediante el uso del software SolidWorks.

Meta 2. Obtener un modelo 3D del RAnLEF a nivel planta piloto en donde se especifique su geometría de cada sección que compone al reactor, así como el render del RAnLEF instalado.

Objetivo 3. Realizar vistas explosivas a partir del modelado del RAnLEF a nivel planta piloto, mediante el uso del software SolidWorks.

Meta 3. Obtener planos de las vistas explosionadas de cada sección que conforman al RAnLEF a nivel planta piloto.

Objetivo 4. Realizar los planos constructivos a detalle del RAnLEF a nivel planta piloto, y de su estructura de soporte desmontable.

Meta 4. Obtener planos con las especificaciones de las medidas de cada una de las partes que conforman al RAnLEF a nivel planta piloto y de su estructura de soporte desmontable.

Objetivo 5. Descripción del proceso de manufactura de las secciones del RAnLEF, de la cámara de expansión, depósito 30 L, estructura de soporte desmontable, soporte para bomba de recirculación, mampara de captación de biogás, dispositivo inferior de entrada de efluente.

Meta 5. Obtener planos a detalle donde se indica el proceso de fabricación, materiales empleados, tipos de uniones, métodos de soldadura, ensambles mecánicos, equipos y herramientas empleados para su manufactura, de la cámara de expansión, depósito 30 L, estructura de soporte desmontable, soporte para bomba de recirculación, mampara de captación de biogás, dispositivo inferior de entrada de efluente.

Objetivo 6. Realizar el análisis estático de la estructura desmontable para el soporte del RAnLEF para verificar la resistencia mecánica de los materiales empleados, por medio del software CAD/CAE.

Meta 6. Determinar si los materiales empleados en la estructura desmontable no sufren deformación por las fuerzas aplicadas por el RAnLEF y accesorios.

Objetivo 7. Realizar el análisis de presión hidrostática interna del RAnLEF, por medio del software CAD/CAE.

Meta 7. Determinar si la presión interna generada por las vinazas provoca deformación en las paredes del RAnLEF.

Objetivo 8. Elaborar un generador de precios unitarios de las piezas requeridas para la fabricación del RAnLEF.

Meta 8. Obtención del costo de fabricación del RAnLEF a nivel planta piloto.

1.5 Metodología

Para el desarrollo del proyecto se empleó la metodología de Karl T. Ulrich, debido a su aplicación como una metodología integradora que permite la participación de diferentes enfoques sobre el producto, se estructura de la siguiente forma:



FASE	ACTIVIDAD
FASE 0	<p>Planeación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identificar los parámetros más relevantes para el diseño del RAnLEF a las condiciones que se desea aplicar, empleando la teoría existente. • A partir de las desventajas del RAnLEF a nivel laboratorio propuesto por Robles-González y Poggi-Varaldo (2017), desarrollar soluciones integrales a la medida basada en el diagnóstico obtenido.
FASE 1	<p>Desarrollo del concepto</p> <ul style="list-style-type: none"> • A partir de las relaciones geométricas establecidas en el RAnLEF nivel laboratorio propuesto por Robles-González y Poggi-Varaldo (2017) y las RG reportadas en la literatura de reactores anaerobios de lecho fluidizado para el tratamiento de efluentes con altas cargas orgánicas, se realizará el diseño del RAnLEF (123 L) a nivel planta piloto para el tratamiento de vinazas de origen mezcalero.
FASE 2	<p>Diseño en el nivel sistema</p> <ul style="list-style-type: none"> • Selección de materiales adecuados para su fabricación. • Realizar el modelado del RAnLEF (123 L) a nivel planta piloto, con los requerimientos de diseño y parámetros establecidos a nivel laboratorio.
FASE 3	<p>Diseño de detalle</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo final de la propuesta. • Determinación de los procesos de manufactura.
FASE 4	<p>Pruebas y refinamiento</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verificar el ensamble y la resistencia mecánica de los elementos del RAnLEF mediante el análisis estático por medio del software CAD/CAE. • Evaluar la disponibilidad de equipos y herramientas en los talleres de la UTM para la manufactura del RAnLEF (123 L). • Realizar los dibujos técnicos de los componentes del RAnLEF (123 L).

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

Este capítulo inicia exponiendo los principales estados de México productores de mezcal y las regiones de Oaxaca. Se describen las vinazas y los fundamentos teóricos empleados para el diseño y análisis de reactores anaerobios, con el objetivo de entender su funcionamiento para implementar un prototipo virtual funcional a nivel piloto, que pueda realizar el proceso de tratamiento a las vinazas mezcaleras.

2.1 Principales estados de México productores de mezcal

El mezcal es una bebida alcohólica regional, obtenida por destilación de jugos de maguey fermentado, previamente cocido, esta bebida representa la historia, la cultura y la diversidad de México, denominado como bebida espirituosa mexicana, actualmente el mezcal se considera como una industria que genera economía para los pueblos de México (Consejo Regulador del Mezcal, 2018). Este modelo de intercambio se ha potencializado gracias a tres factores fundamentales que lo han llevado a ser de una bebida popular a una bebida gourmet, los cuáles son: Denominación del Origen de Mezcal (reconocimiento internacional), Norma Oficial Mexicana 070 (reglamento de la producción de mezcal) y Consejo Regulador del Mezcal (organismo que se encarga de vigilar el cumplimiento de la NOM 070 para garantizar la autenticidad y la calidad del mezcal), la norma oficial mexicana del mezcal NOM-070-SCFI-2016 Bebidas Alcohólicas-Mezcal Especificaciones, se aprobó el 23 de Febrero de 2017. Esta bebida es producida en el territorio de México (ver Figura 2) que comprende nueve estados: Oaxaca, Zacatecas, Durango, Guanajuato, Guerrero, San Luis Potosí, Tamaulipas, Michoacán, Puebla, cuenta con más de 500 mil hectáreas, es la Denominación de Origen con mayor territorio en el mundo (Consejo Regulador del Mezcal, 2018), por lo que el mezcal se ha convertido en uno de los productos más representativos de México a nivel internacional.

El 28 de noviembre de 1994, se publica en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la declaración de protección a la Denominación de Origen Mezcal (DOM), que incluye a los Estados de Durango, San Luis Potosí, Guerrero, Zacatecas y Oaxaca, ampliándose esta protección al municipio de San Felipe, Guanajuato, el 21 de noviembre de 2001;

posteriormente a 11 Municipios del Estado de Tamaulipas el 3 de marzo de 2003; para después extenderse a 29 Municipios del Estado de Michoacán el 22 de noviembre de 2012, además del municipio de San Luis de la Paz, Guanajuato el 2 de octubre de 2015 y recientemente a 115 municipios del Estado de Puebla el 24 de diciembre de 2015 (Consejo Regulador del Mezcal, 2018).



Figura 2.- Estados de México productores de mezcal, con denominación de origen. Fuente: Elaboración propia, con información de CRM (2018).

En el Sistema Producto Maguey-Mezcal (cifras 2018), señala la existencia de 632 fábricas productoras de mezcal en los estados de México, de las cuales se identifican 163 empresas certificadas que agrupan a 560 marcas certificadas y registradas por el Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual, siendo el estado de Oaxaca el de mayor número de empresas asociadas al CRM (Plan Rector, 2019).

Los magueyes pertenecientes al género *Agave* que forma parte de la familia *Agavaceae*, se encuentran más de 300 especies de agaves adaptados a las zonas áridas en el mundo, en el territorio de México se registran 75% de especies (Consejo Regulador del Mezcal, 2018). El mezcal, el tequila, el agua miel y la bacanora se producen a partir de

diferentes especies de Agave, como son: *Agave salmiana* (Cimarrón, Verde), *A. angustifolia* (Espadilla, Espadín), *A. potatorum* (Tobalá, Biliá), *A. americana* (Sierrudo, Arroqueño), *A. convallis* (Jabalí), *A. cupreata* (Papalometl, Ancho), *A. durangensis* (Cenizo), *A. inaequidens* (Largo, Lechuguilla), *A. karwinskii* (Cuish, Tobasiche), *A. marmorata* (Pitzometl, Tepeztate), *A. rhodacantha* (Quixe, Mexicano), *A. tequilana* Weber (Azul, Tequilero), (Consejo Regulador del Mezcal, 2018).

2.2 Regiones de Oaxaca productores de mezcal

El estado de Oaxaca se considera como el principal productor nacional de mezcal, debido a que alcanzó en el 2018 el 92.3% de la producción total, convirtiéndose en una de sus principales industrias. Cuenta con variedad de agaves y la sede de Consejo Regulador del Mezcal (Consejo Regulador del Mezcal, 2018). Las regiones productoras de mezcal de Oaxaca son: Valles Centrales y la Sierra Sur. Los distritos de Valles Centrales productores de mezcal son: Tlacolula, Zimatlán, Ejutla y Ocotlán, los distritos de la Sierra Sur son: Yautepec, Miahuatlán y Sola de Vega.

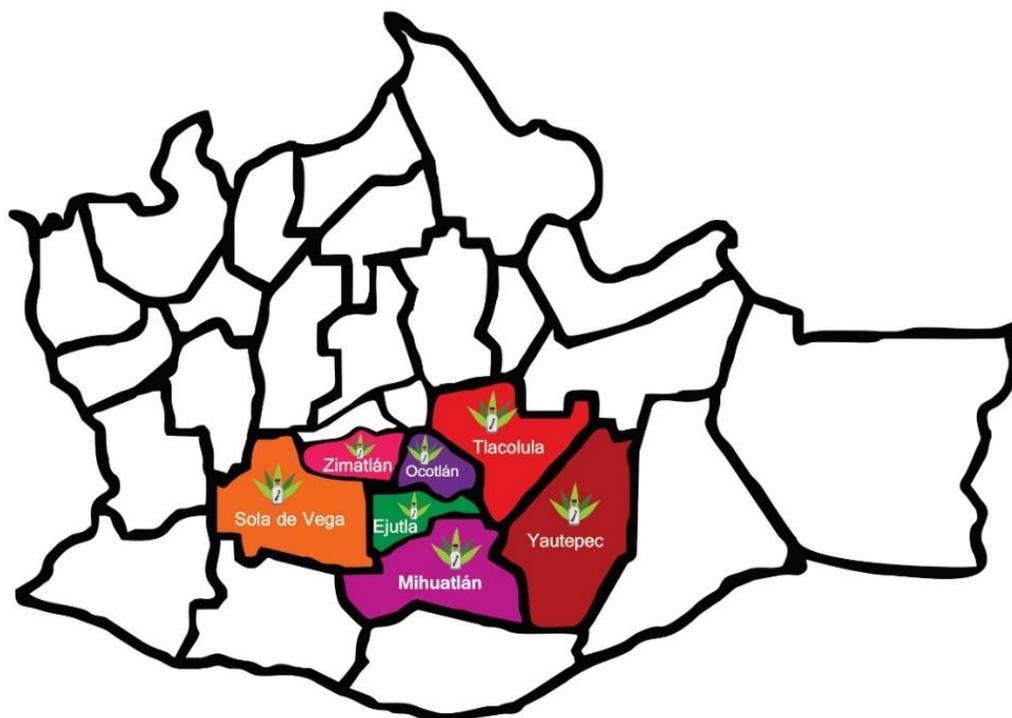


Figura 3.- Distritos que integran la región del mezcal. Fuente: Elaboración propia, con datos de Centro Latinoamericano para el desarrollo Rural (RIMISP, 2009).

2.3 Definición de vinazas mezcaleras

Las vinazas se definen como los residuos líquidos remanentes, obtenidos en la etapa de la destilación de los azúcares fermentables provenientes de la caña de azúcar, melazas, jugos de uva, remolacha y agaves, etc. (Robles-González et al., 2012; Moran-Salazar *et al.*, 2016). El caso de estudio se enfoca en los agaves, en el proceso de obtención de la bebida alcohólica denominada mezcal. El proceso de elaboración de mezcal, consta de 5 principales etapas (ver Figura 4): i) selección y corte del maguey maduro, ii) cocción de las piñas, iii) molienda o macerado, iv) fermentación y v) destilación, es en esta última etapa donde se obtienen como subproducto a las vinazas.



Figura 4.- Proceso de producción de mezcal y obtención de vinazas. Fuente: Elaboración propia.

Las vinazas presentan una composición variada que depende de la materia prima empleada para la fermentación, así como de otros aspectos del proceso de producción como: las aguas de lavado para la limpieza de los fermentadores y destiladores y las aguas de enfriamiento o aguas de condensación (Robles-González et al., 2012), sin embargo todas ellas comparten algunas propiedades similares, como tener un pH ácido, altas concentraciones de materia orgánica expresada como demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demandas químicas de oxígeno (DQO), que pueden tomar valores entre 35,000–50,000 mg O₂/L y 70,000–150,000 mg O₂/L, respectivamente (Robles-González et al., 2012; Robles-González y Poggi-Varaldo, 2017; Madejón *et al.*, 2001; Nandy *et al.*, 2002; Sangave *et al.*, 2007a), presencia de compuestos fenólicos 478-541 mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/L (Robles-González et al., 2012; Sales *et al.*,

1987; Capasso *et al.*, 1992); cenizas 1,550–2,000 mg/L, sólidos disueltos (el 50% de estos sólidos corresponde a azúcares reductores) (Sangave *et al.*, 2007b), compuestos no volátiles del caldo de fermentación, concentraciones altas de sales minerales (Robles-González *et al.*, 2012), alta conductividad electrolítica (250-300 dS m⁻¹) y fuerte coloración café oscuro por la presencia de melanoidinas (García *et al.*, 1997; Jiménez *et al.*, 2003; Peña *et al.*, 2003; Coca *et al.*, 2005; López *et al.*, 2010). Las cuales de no ser tratadas antes de ser vertidas a suelos o cuerpos de agua pueden provocar serios problemas de contaminación ambiental.

2.4 Contaminación causada por vinazas mezcaleras

Las vinazas vertidas en el suelo pueden provocar la acumulación de sales y cationes, lo que trae como consecuencia el aumento de salinidad y sodicidad (Tejada *et al.*, 2009), los sólidos suspendidos que contienen provocan que exista una menor permeabilidad, lo anterior debido a la obstrucción de los poros del suelo, evitando el paso normal de líquidos a través de él, favoreciendo fermentaciones anaerobias que generan olores desagradables, (Robles-González *et al.*, 2012). Los compuestos fenólicos y polifenólicos presentes en las vinazas puede inhibir la germinación de las semillas y dañar los cultivos, así como tener un impacto negativo en la actividad microbiana del suelo (Díaz *et al.*, 2002; Kannabiran *et al.*, 1993).

Por otro lado, su disposición en mantos acuíferos provoca el bloqueo de la luz solar debido a que son altamente coloridas, reduciendo la oxigenación generada por la fotosíntesis de plantas, ocasionando la muerte de la vida acuática (Fitzgibbon *et al.*, 1995), las altas temperaturas con las que salen de la fábrica (50-90 °C) disminuye el oxígeno disuelto de los cuerpos de agua, por debajo de su nivel crítico para la supervivencia de los peces (Mane *et al.*, 2006). Las altas concentraciones de nutrientes como fósforo y nitrógeno, presentes en las vinazas, pueden causar eutrofización en cuerpos de agua, embalses y ríos (Vlyssides *et al.*, 1997). Las fábricas de mezcal producen altos volúmenes de vinazas, por ejemplo, en una fábrica tradicional de mezcal se generan de 12 a 15 litros de vinazas por litro de alcohol producido (Robles-González *et al.*, 2012). En el año 2019 en el estado de Oaxaca se produjeron 7.4 millones de litros de mezcal certificado, lo que generó 88.8 millones de litros de vinazas. Las cuales de no

ser tratadas antes de verterlas a cuerpos de agua o suelo pueden provocar serios problemas de contaminación ambiental y riesgos de salud a la población de las comunidades donde se elabora mezcal.

2.5 Sistemas empleados para el tratamiento de vinazas

Las descargas de agua residuales en las redes recolectoras, ríos, cuencas, cauces y demás depósitos o corrientes de agua, así como de los derrames en suelos, provenientes de la industria de la destilería, provocan efectos desfavorables en los ecosistemas, por lo que es necesario fijar los límites máximos permisibles de contaminantes que deberán satisfacer dichas descargas. La normativa ambiental aplicable para este tipo de efluentes es la Norma Oficial Mexicana NOM-064-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, provenientes de la industria de la destilería (publicada en el Diario Oficial de la Federación el 10 de junio de 1994). Las descargas de aguas residuales provenientes de la industria de la destilería deben cumplir con las especificaciones que se indican en la siguiente tabla.

Tabla 1.- *Especificaciones de límites máximos permisibles.*

Parámetros	Límites máximos permisibles	
	Promedio diario	Instantáneo
pH (-)	6-9	6-9
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	200	240
Demanda química de oxígeno (mg/L)	260	360
Grasas y aceites (mg/L)	10	20
Sólidos sedimentables ml/L	1.0	2.0
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	200	240
Fósforo total (mg/L)	5	6
Nitrógeno total (mg/L)	10	12

Fuente: (NOM-064-ECOL-1994, ECOLEX)

Debido a la gran variedad de contaminantes presentes en las vinazas mezcaleras y a la carencia de sistemas de tratamiento implementados en las fábricas de mezcal o bien por que el tratamiento que reciben no es el adecuado para cumplir con los límites máximos permisibles señalados en la tabla anterior, en los últimos 20 años diversos grupos de

investigadores han realizado estudios con el objetivo de desarrollar tecnologías que ayuden a eliminar los contaminantes y utilizar o disponer de estos efluentes residuales. Existen diferentes métodos para el tratamiento de las vinazas, los cuales pueden ser clasificados en tratamientos físico-químicos, que incluyen el uso de electrolitos, floculación, electrocoagulación, electrofenton, ozono, luz ultravioleta, etc. (De Bazúa et al., 1991; Thanapimmetha et al., 2017) y tratamientos biológicos, los cuales se pueden subdividir en aerobios y anaerobios; en éstos últimos, los microorganismos utilizan la materia orgánica para transformarla en algún metabolito de interés (De Bazúa et al., 1991; Robles-González et al., 2012). El tratamiento aerobio es poco utilizado para aguas residuales de elevado contenido de materia orgánica ya que se pueden presentar problemas con la transferencia de oxígeno, limitando la disponibilidad para los microorganismos (Lalov et al., 2001). Por lo anterior puede traer como consecuencia dificultades durante su operación. Por su parte, la digestión anaerobia ha sido el proceso más utilizado en el tratamiento de vinazas, debido a que tiene las siguientes ventajas: soportan altas cargas orgánicas, requerimientos de energía y nutrimentos bajos, poca producción de lodos y la capacidad de las bacterias anaerobias para transformar la materia orgánica en metano que puede ser utilizado como fuente de energía; la biodegradación anaerobia se lleva a cabo dentro de tanques totalmente cerrados, denominados reactores debido a la reacción bioquímica de descomposición que se realiza en ellos. Por otra parte, debido a la alta concentración de materia orgánica en los procesos de tratamiento de las vinazas tequileras comúnmente se realiza la dilución de las vinazas con agua para lograr la concentración de DQO del efluente deseado antes de someterlas al tratamiento anaerobio.

Se ha reportado que los procesos anaerobios presentan eficiencias de remoción de compuestos orgánicos biodegradables en un intervalo del 70 al 91% en vinazas de diferentes orígenes (De Bazúa et al., 1991; Lalov et al., 2001).

En la Tabla 2 se muestran algunos de los principales procesos de tratamiento a los cuales han sido sometidas vinazas obtenidas de diferentes materias primas utilizadas en la etapa de fermentación.

Tabla 2.- Proceso de tratamiento de vinazas.

Origen	Características	Proceso	Referencia
Vinazas Tequileras	DQO= 27 000 - 33 000 mgO ₂ /L pHi= 6.5 - 7.0 (NaOH 2N) pHf= 7.4 (NaOH) T= 35±2°C		1
Vinazas Mezcaleras	DQO= 26 900 mgO ₂ /L pHi= 6.5 - 7.0 (NaOH 2N) pHf= 7 (NaOH) T= 23°C		2
Vinazas caña de azúcar	DQO=42 818 mgO ₂ /L pHi= 5.0 ± 0.18 (NaOH 2N) pHf= 4-5 (NaOH)		3
Vinazas caña de azúcar	DQO= 44 500 mgO ₂ /L pHi= 4.5 (NaOH 2N) pHf= 6.59 - 7.70 (NaOH) T= 54-56°C		4
Vinazas Tequileras	DQO= 10 000 - 33 000 mgO ₂ /L pHi= 6.5 - 7.0 (NaOH 2N) pHf= 7.4 (NaOH) T= 35±1°C		5

Referencia: 1. Jáuregui et al., 2014; 2. Robles-González et al., 2018; 3. Marques et al., 2015; 4. Gomes et al., 2017; 5. Méndez et al., 2010.

2.6 Reactores anaerobios y sus características

Las tecnologías anaerobias más adecuadas, que se informan en la literatura con el objetivo de remover la alta concentración de materia orgánica presente en las vinazas han sido: (i) reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA, UASB) (Marino-Marmolejo et al., 2015; Gomes de Barros et al., 2017; España-Gamboa et al., 2012; Latif et al., 2011); (ii) reactor anaerobio de lecho empacado de flujo ascendente (RAnLEFA) (Acharya et al., 2008); (iii) reactor anaerobio de lecho empacado de flujo descendente (RAnLEFD) (Gouvêa de Godoi et al., 2017); (iv) reactor anaerobio de lecho fluidizado (RAnLEF) (De Bazúa et al., 1991; Pérez-García et al., 2005; Pérez et al., 1999).

2.6.1 Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA, UASB)

El reactor conocido como UASB, es uno de los reactores más utilizados en la industria para degradar la materia orgánica, se compone de las siguientes partes: I) manto de lodo, II) separador gas/líquido/sólido, III) deflector de biogás y IV) campana de biogás.

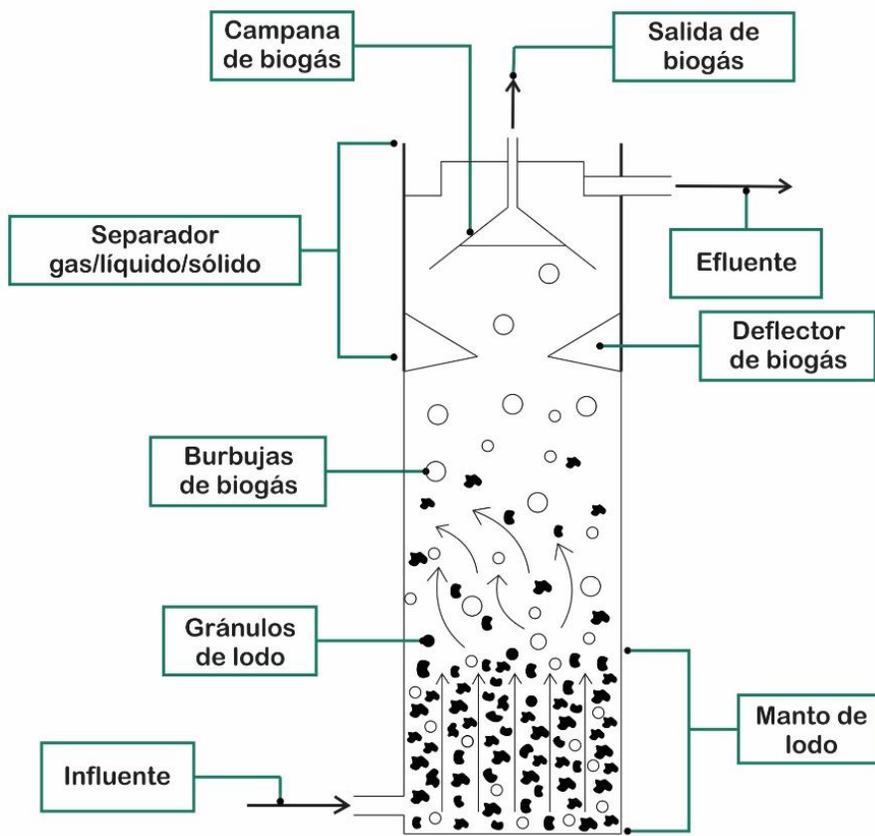


Figura 5.- Esquema de reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB). Fuente: Elaboración propia.

El reactor UASB no posee material inerte como soporte para la biomasa, el flujo es de forma ascendente que circula a través del lecho de lodo denso, la estabilización de la materia orgánica ocurre en todas las zonas del reactor. Para evitar la salida de partículas de lodo con el efluente, se ubica un sedimentador en la parte superior del reactor y abajo se encuentra un dispositivo de separación de los gases. El sistema es auto mezclado por el movimiento ascendente de las burbujas de gas y del flujo de líquido a través del reactor. Se garantiza bajas velocidades en los compartimientos de digestión y sedimentación para retener la biomasa en el sistema. Los UASB pueden ser de forma circular o rectangular con área superficial uniforme o variable (Ortiz, 2014).

2.6.2 Reactor anaerobio de lecho empacado de flujo ascendente (RAnLEFA)

Se muestra el esquema del RAnLEFA y sus componentes, en el cual consiste en: I) una sección de lecho fluidizado, II) zona de separación, III) un sistema de recirculación y IV) bomba hidráulica.

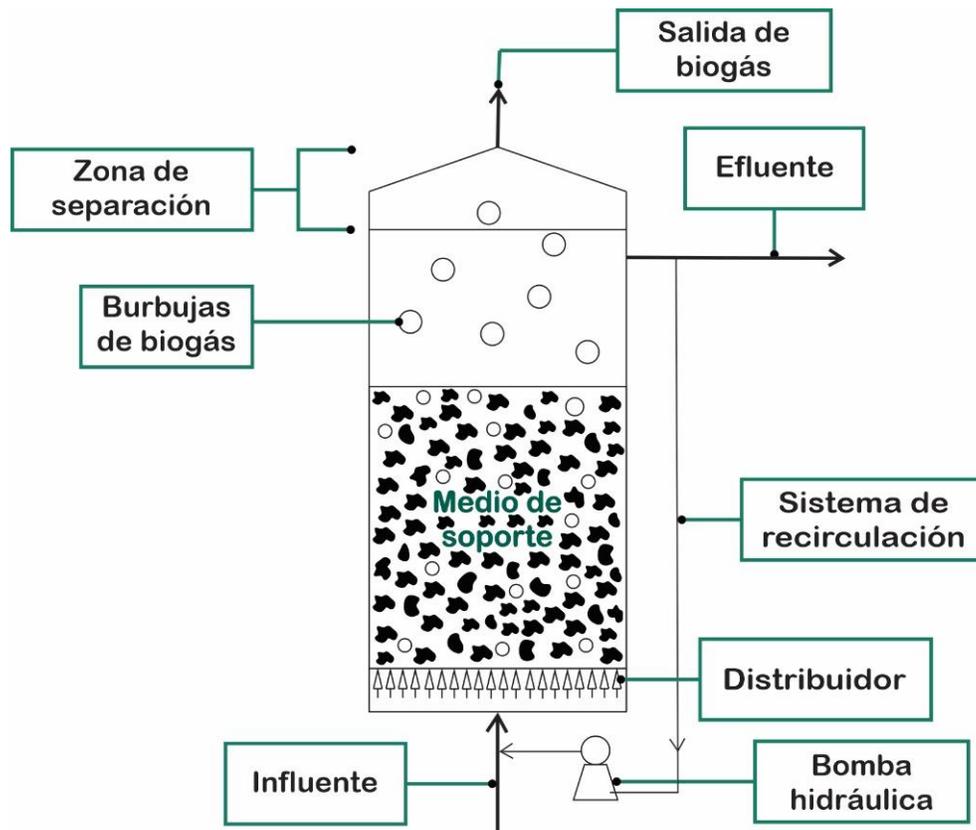


Figura 6.- Esquema de reactor anaerobio de lecho empacado de flujo ascendente (RAnLEFA). Fuente: Elaboración propia.

Los RAnLEFA han sido utilizados en el tratamiento de vinazas, se caracterizan porque en ellos la biomasa bacteriana se encuentra en parte inmobilizada en un material de soporte fijo en el reactor biológico y en parte en suspensión entre los espacios vacíos, en el cual propicia que exista alta actividad bacteriana por unidad de volumen del reactor, proporciona una mayor reducción de DQO para bajos tiempos de retención hidráulicos (TRH). El flujo del afluente es vertical y de forma ascendente, el propio material de relleno actúa como separador de gas que se recoge en la parte superior, proporcionando zonas de reposo para la sedimentación de los sólidos que se encuentran en suspensión. El afluente pasa a través de los soportes y de los microorganismos anaerobios, creando una fina capa de biopelícula (Cabrera Díaz y Díaz Marrero, 2013).

2.6.3 Reactor anaerobio de lecho empacado de flujo descendente (RAnLEFD)

El reactor de flujo descendente (RAnLEFD), consiste en: I) zona de acumulación de lodo, II) zona de separación de gas, III) medio de soporte y IV) sistema de recirculación.

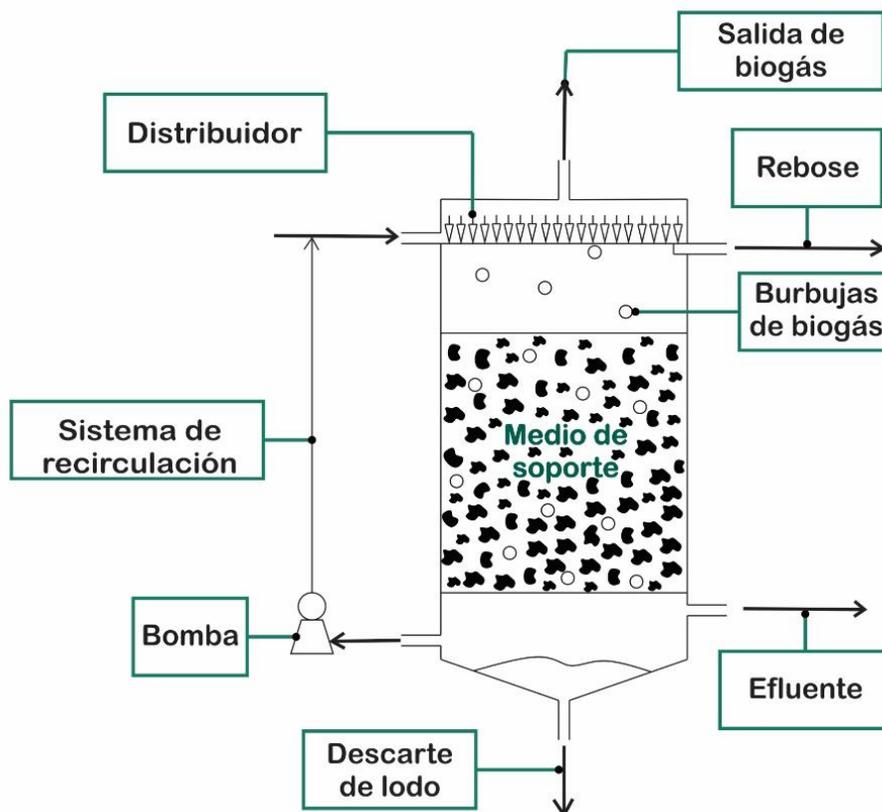


Figura 7.- Esquema de reactor anaerobio de lecho empacado de flujo descendente (RAnLEFD). Fuente: Elaboración propia.

Los RAnLEF son los más indicados para el tratamiento de elevadas cargas de residuo sólidos, por lo que tiene ventaja de acumular biomasa en el fondo y el medio de soporte que puede provocar la formación de caminos preferenciales (Ortíz Bardales, 2014). El flujo del afluente es vertical y de forma descendente, el propio material de relleno actúa como separador de gas que se recoge en la parte superior, proporcionando zonas de reposo para la sedimentación de los sólidos que se encuentran en suspensión (Cabrera Díaz y Díaz Marrero, 2013).

2.6.4 Reactor anaerobio de lecho fluidizado (RAnLEF)

En la Figura 8, se muestra el esquema de un reactor anaerobio de lecho fluidizado, el cual consiste en: (I) un tubo esbelto donde se encuentra el lecho, (II) cámara de expansión, (III) Mampara de recolección de biogás, (IV) sistema de recirculación de influente y (V) bomba hidráulica.

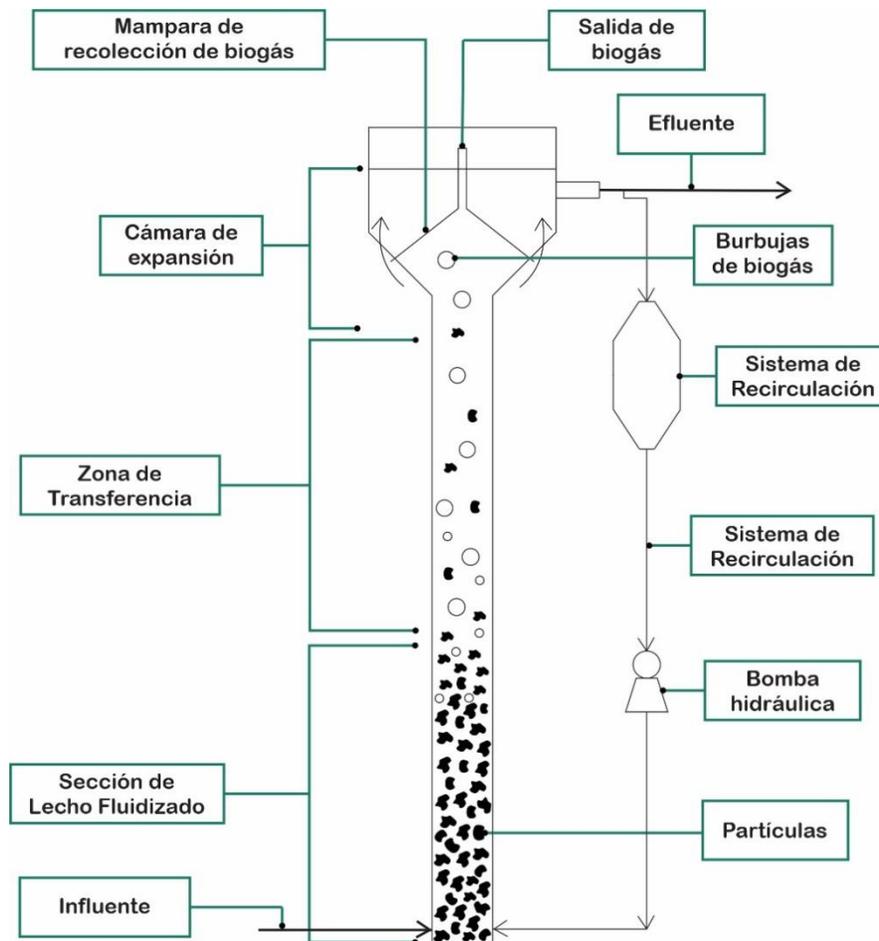


Figura 8.- Esquema de reactor anaerobio de lecho fluidizado (RAnLEF). Fuente: Elaboración propia.

La biodegradación biológica de la materia orgánica presente en el influente (residuo líquido que entra al reactor) se lleva a cabo por microorganismos anaerobios (no requieren de la presencia de oxígeno como aceptor final de electrones), los cuales se adhieren al material particulado (lecho fluidizado) formando una biopelícula, lo anterior les permite a los microorganismos tener un mayor tiempo de retención celular y poder operar el reactor a mayores velocidades de carga orgánica, definida como la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo. El proceso de biodegradación se lleva a cabo en todo el reactor, sin embargo, debido a que la mayoría de los microorganismos se encuentran formando una biopelícula, la mayor biodegradación se lleva a cabo en el volumen formado por el lecho fluidizado, el cual se forma cuando el fluido asciende o desciende por un lecho de partículas, la fluidización se logra a través de una corriente de recirculación la cual es realizada por una bomba hidráulica. El biogás que se forma como producto de la biodegradación de la materia orgánica, (formado principalmente por moléculas de metano y bióxido de carbono), ascienden del seno del líquido del reactor hacia la parte superior de este, siendo recolectado en la cámara de expansión mediante una mampara o bien conducidos a la zona de espacio vacío y retirado del reactor mediante un tubo de salida.

De las tecnologías mencionadas anteriormente, el RAnLEF ofrece ventajas distintivas sobre las otras tecnologías anaeróbicas, como son: la simplicidad de construcción, la eliminación de mezclas mecánicas, mejor estabilidad a mayores velocidades de carga orgánica, capacidad para soportar elevadas cargas tóxicas, así como operación a bajos tiempos de retención hidráulica (Acharya et al., 2008; Estrada-Vázquez et al., 1998; Robles-González y Poggi-Varaldo, 2017).

Los reactores de lecho fluidizado son sistemas que emplean materiales particulados de pequeño tamaño como medio soporte para el crecimiento por adsorción de microorganismos. El conjunto soporte-biofilm (bio-partícula) se mantiene en suspensión en medio del flujo vertical ascendente cuya velocidad es lo suficientemente elevada para superar la fuerza de la gravedad.

Las bio-partículas están en continuo movimiento relativo, pero no son transportadas por el flujo, es decir, no son lavadas del reactor. El flujo de agua en sentido ascendente a través de un lecho de arena, carbón activo granular, antracita, partículas de polipropileno,

etc., a elevada velocidad es quien provoca la fluidización del mismo. El material soporte de un lecho fluidizado cuenta con una superficie específica extremadamente grande, y alcanza en minutos el nivel de tratamiento que cualquier proceso biológico convencional consigue en varias horas. La suspensión de las biopartículas maximiza la superficie de contacto entre los microorganismos y el agua residual.

Los tratamientos biológicos anaerobios constituyen grandes alternativas para la depuración de aguas residuales y residuos orgánicos biodegradables, este tratamiento resulta favorable económicamente debido a que no requiere aireación y por la generación de biogás que se puede utilizar como energía alternativa.

En la generación más reciente de reactores anaerobios, los microorganismos se adhieren a un material de soporte formando biopelículas, que se expanden o fluidifican con altas velocidades de flujo, lo cual proporciona la ventaja de tratar efluentes con altas cargas volumétricas en menor tiempo a comparación de otros sistemas (Juárez et al., 2015).

2.7 Escalamiento

El escalado es un método de diseño, que consiste en el desarrollo de una secuencia de trabajos experimentales en los que el sistema se somete a estudios en aparatos de dimensiones cada vez mayores, (Anaya-Durand y Pedroza-Flores, 2008; De Cuba, 2016). Cuando en dos etapas sucesivas se reproducen resultados satisfactorios, se considera que se puede proceder al diseño de equipo a escala industrial sin mayores riesgos, siempre que el cambio de escala se encuentre dentro de los límites tolerables. A continuación, se muestra en el siguiente diagrama el proceso de escalamiento para reactores:

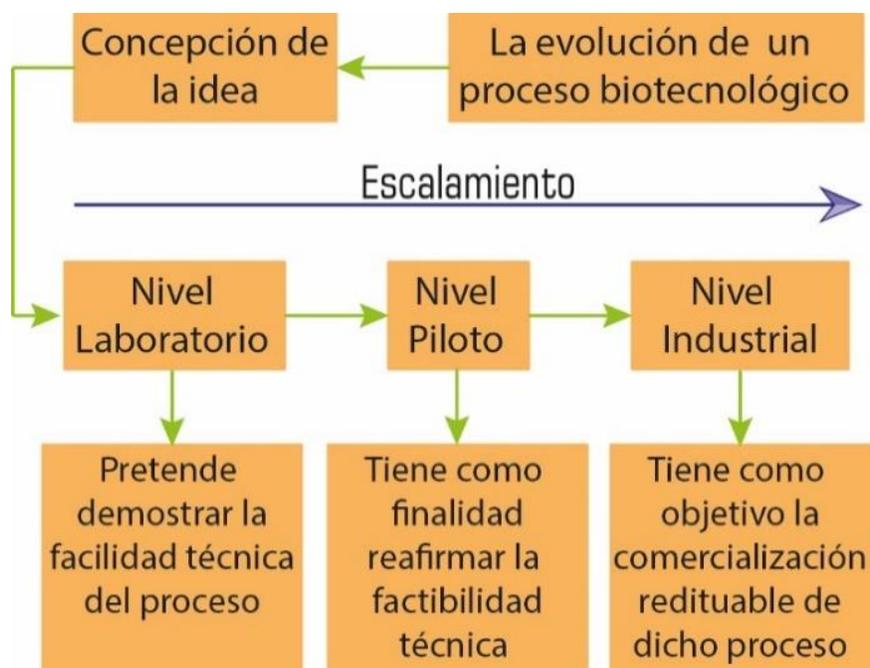


Figura 9.- Proceso de escalamiento de reactores. Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=OoXQzM8J0Iw>.

v=OoXQzM8J0Iw.

El factor de escala a utilizar depende en gran medida de la naturaleza del sistema y del conocimiento que se tenga del mismo. Para desarrollar el escalamiento de planta piloto a proceso productivo (nivel industrial), es necesario tener en cuenta principios de similitud, por lo cual es importante generar un prototipo planta piloto para poder establecer los principios de similitud en trabajos a futuro:

- Similitud geométrica: Dos cuerpos son geoméricamente similares cuando para todo punto en el primer cuerpo existe un punto en el segundo.
- Similitud mecánica: Similaridad geométrica en sistemas fijos o en movimiento sujetos a fuerzas externas o internas.
- Similitud estática: Son estáticamente similares cuando al estar sujetos a esfuerzos constantes sus deformaciones relativas son tales que permanecen geoméricamente similares.
- Similitud química: Relacionada con sistemas que presentan reacciones químicas donde la composición varía de un punto a otro, ya sea en procesos intermitentes o continuos, en diferentes instantes.

El escalamiento a nivel planta piloto es necesario para:

- Estudiar los efectos de proceso a largo plazo.
- Para determinar los factores relacionados con la calidad del producto.
- Para obtener el producto necesario para desarrollar un estudio de mercado.
- Para proporcionar una demostración convincente para los usuarios de la tecnología.

Basando en la importancia que tiene generar un prototipo nivel planta piloto, significa crear un producto factible a partir del modelo a nivel laboratorio o de banco, aplicando los criterios de escalamiento y de diseño, mejorando la calidad y los procesos de fabricación.

CAPÍTULO III CONCEPTUALIZACIÓN

En este capítulo se realiza el desarrollo del concepto y el diseño en el nivel sistema, se muestra la información que se utilizó para la generación de las especificaciones del producto, así como los cálculos para el escalamiento de los componentes del RAnLEF con base a las relaciones geométricas.

3.1 Descripción de las configuraciones reportadas del diseño del RAnLEF a nivel laboratorio

Descripción del RAnLEF a nivel laboratorio, propuesto por Robles-González y Poggi-Varaldo (2017), como base se emplearon las siguientes relaciones geométricas:

$$H_{LF}: \text{Altura lecho fluidizado} \quad \frac{H_{LF}}{D_{LF}}$$

D_{LF} : Diámetro lecho fluidizado

$$H_{CE}: \text{Altura cámara de expansión} \quad \frac{H_{CE}}{D_{CE}}$$

D_{CE} : Diámetro cámara de expansión

Robles-González y Poggi-Varaldo (2017) utilizaron un RAnLEF a nivel laboratorio, para el tratamiento de vinazas de origen mezcalero, en donde se evaluaron cinco estados estacionarios con cargas orgánicas crecientes. Los valores de remoción de materia orgánica estuvieron en el intervalo de 49 al 83%. Las productividades de biogás y metano estuvieron en los intervalos 0.118-0.198 NL/(d*LLF) y 0.054-0.151 NL CH₄/(d*LLF). Los resultados anteriores demostraron que las vinazas procedentes de la industria del mezcal pueden ser tratadas mediante un RAnLEF y eliminar la materia orgánica, así como la generación de gas metano como un suministro energético para la propia industria. El RAnLEF (Figura 10) propuesto por los investigadores se compone de cuatro partes principales, en el cual consiste en: (i) Lecho fluidizado, (ii) Zona de transferencia, (iii) Cámara de expansión y (iv) Espacio superior.

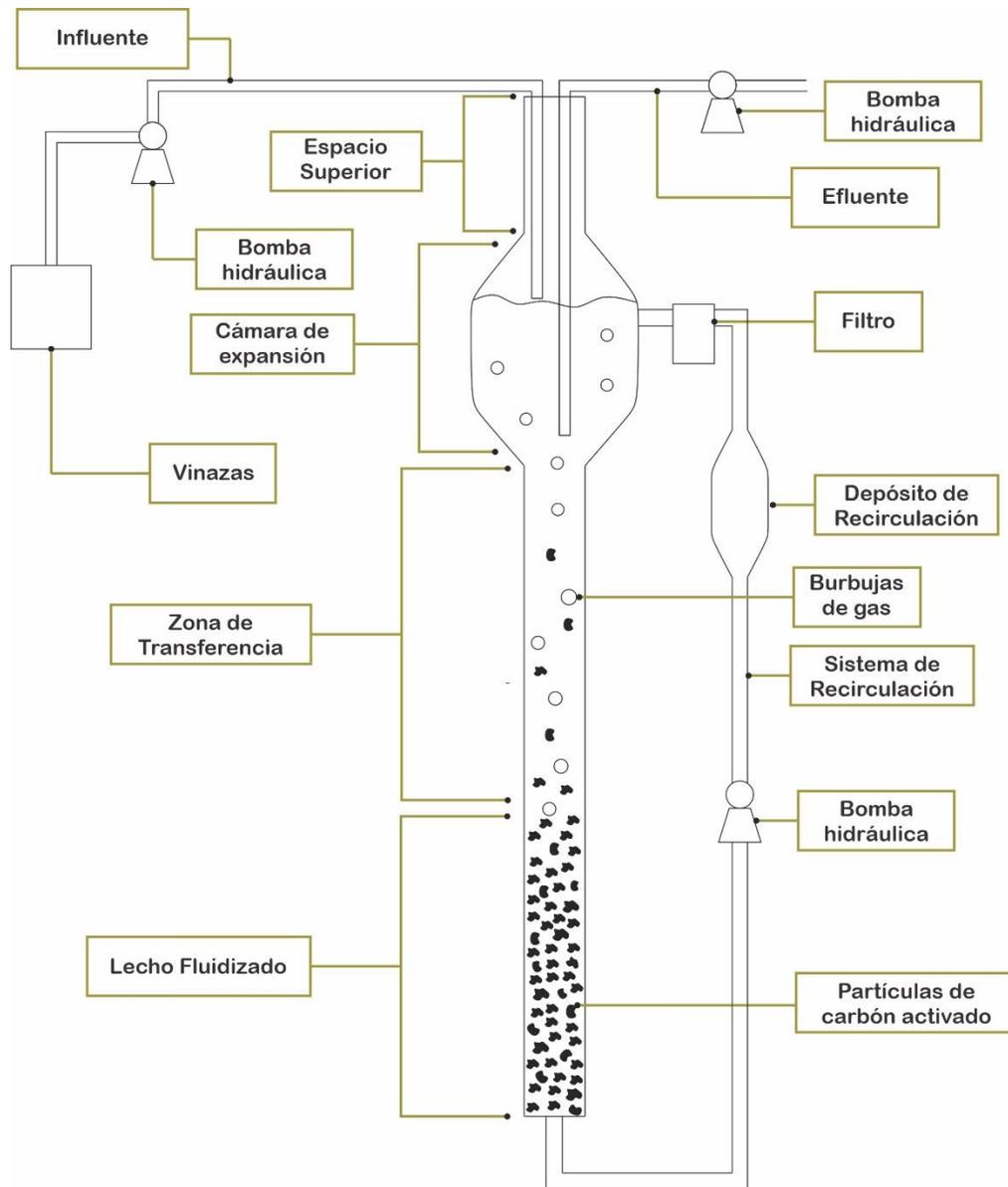


Figura 10.- Esquema del RAnLEF a nivel laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

El RAnLEF a nivel laboratorio fue construido de vidrio, la sección del lecho fluidizado tiene una altura de 1.2 m y un diámetro de 0.05 m, la sección correspondiente a la cámara de expansión tiene una altura de 0.18 m y un diámetro de 0.10 m, el espacio superior tiene una altura de 0.145 m, diámetro de 0.05 m. El diseño del RAnLEF presentó las siguientes desventajas: *i*) material frágil, debido a que el reactor fue fabricado en material de vidrio, lo cual no permite una manipulación robusta; *ii*) ensamblaje deficiente en las tapas superior e inferior del reactor y *iii*) la tubería inferior utilizada para la recirculación del agua, se obstruía debido a la sedimentación del material de soporte.

3.2 Uso de las relaciones geométricas altura de lecho fluidizado (H_{LF}); Diámetro del lecho fluidizado (D_{LF}); altura de la cámara de expansión (H_{CE}) y diámetro de la cámara de expansión (D_{CE}), para el diseño del RANLEF (123 L) a nivel piloto, reportadas en la literatura científica

En la Tabla 3 se muestran las relaciones geométricas establecidas en reactores anaerobios de lecho fluidizado para el tratamiento de efluentes con altas cargas orgánicas, reportadas en la literatura. Se puede observar que en su mayoría no se reportan las relaciones H_{CE}/D_{CE} y los valores de H_{LF}/D_{LF} se encuentran en el rango de 6-24.

Tabla 3.- *Relaciones geométricas de reactores empleados para el tratamiento de vinazas.*

Origen del influente	Características de proceso	Relación H_{LF}/D_{LF}	Relación H_{CE}/D_{CE}	Observaciones	Ref.
Vinazas de la fermentación de la uva	Proceso: nivel laboratorio (NL) ^a ; sistema de lote alimentado (fed-batch); diámetro (Ø)= 11.5 cm, altura (H) ^b = 150 cm; sistema de distribución de flujo (SDF) ^c ; material de vidrio con Ø promedio de 10 mm; uso de sedimentador externo para la colecta de bio-partícula y biomasa; velocidad del líquido (VL) ^d = 6 a 15 m/h; material de soporte de biomasa (MSB) ^e = material volcánico granular con Ø= 300 a 450 µm.	Relación altura del lecho fluidizado/diámetro del lecho fluidizado (H_{LF}/D_{LF}^k)= 13	Relación altura de la cámara de expansión/diámetro de la cámara de expansión (H_{CE}/D_{CE}^m)=No reportado (NR) ⁿ	La fricción en el material de soporte en la fluidización provocó pérdida de la biomasa adherida al soporte; el reactor mostró eficiencias de remoción de carbono orgánico total (η_{cor}) ^o = 70%.	1
Industria azucarera producción de etanol	Proceso: NL; tipo de reactor (TR) ^f ; filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) ^g ; Ø: 9.5 cm, H: 58 cm; volumen (V) ^h : 3400 mL; MSB: PVC corrugada con área específica de 205 m ² /m ³ ; Uso de lodo anaerobio aclimatado para adherirse al soporte a temperaturas entre 28 y 31°C.	$H_{LF}/D_{LF}= 6$	$H_{CE}/D_{CE}= NR$	Se observó que para un día puede trabajarse con velocidades de carga orgánica (B _v) ^p de hasta 5 g DQO/(L.d) logrando un porcentaje de eficiencia de remoción de materia orgánica expresada como DQO (η_{DQO}) ^q =70% para dos días la B _v se incrementó hasta 16 g DQO/(L.d).	2

(Continúa en la siguiente página.)

(Tabla 3.- Continuación)

Origen del influente	Características de proceso	Relación H_{LF}/D_{LF}	Relación H_{CE}/D_{CE}	Observaciones	Ref.
Aguas de lavado de aceitunas de almazara	Proceso: NL; material de construcción (MC) ^r : vidrio; $\Theta=6$ cm, H= 40 cm; V=1L; MSB=sepiolita, silicato magnésico; tamaño de partícula (TP) ^s : comprendido entre 0.4 y 0.8 mm de diámetro.	$H_{LF}/D_{LF}= 6.6$	$H_{CE}/D_{CE} = NR$	La η_{DQO} se encontró entre el 50 a 90% para B_v variables entre 0.46 y 2.25 $g_{DQO}/L \cdot día$.	3
Vinazas de la fermentación de la uva	Proceso: NL; $\Theta= 3.2$ cm, H= 78 cm; vol. efectivo= 0.63 L; MSB: sepiolita 200 mL, $\Theta= 0.53$ mm; densidad= 1977.4 $Kg.m^3$; temperatura de operación (t_{op}): 35°C.	$H_{LF}/D_{LF}= 24$	$H_{CE}/D_{CE} = NR$	$\eta_{DQO}=70.5$ a 88.6%; se utilizó un régimen de carga escalonada con la adición de metanol; 6 estados estacionarios diferentes Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) ^v =0.5 y 2.48 días; trabajó con alta velocidad vertical.	4
Vinazas de la fermentación de agave	Proceso: NL; MC: vidrio; dimensiones lecho fluidizado: $\Theta= 5$ cm, H= 120 cm; dimensiones cámara de expansión: $\Theta= 10$ cm; H= 18 cm; Lote alimentado (LA) ^y ; MSB: carbón activado; $top= 35^\circ C$	$H_{LF}/D_{LF}= 24$	$H_{CE}/D_{CE} = 1.8$	$\eta_{DQO} = 61.5-84.8\%$, mientras que el contenido de metano en biogás cayó en el intervalo 48.9-82.9%. Las productividades de biogás y metano estuvieron en intervalos 0.110-0.198 $NL/(L_{LF} \cdot d)$ y 0.054-0.151 $NL_{CH_4}/(L_{LF} \cdot d)$. A partir de ($B_v =$ de 10.7 g $DQO/(L_{LF} \cdot d)$) se constató deterioro de la metanogénesis.	5

Notas: ^a Nivel laboratorio; ^b Altura; ^c Sistema de distribución de flujo; ^d Velocidad del líquido; ^e Material de soporte de biomasa; ^f Tipo de reactor;

^h Volumen; ⁱ Altura de lecho fluidizado; ^k Diámetro de lecho fluidizado; ^l Altura de la cámara de expansión; ^m Diámetro de la cámara de expansión;

ⁿ No reportado; ^o Eficiencia de remoción de carbono orgánico total; ^p Velocidad de carga orgánica; ^q Eficiencia de remoción de materia orgánica;

^r Material de construcción; ^s Tamaño de partícula; ^t Temperatura de operación; ^u Tiempo de retención hidráulico; ^v Lote alimentado. Referencias:

1. Buffiere et al., 1995; 2. Viguera et al., 2016; 3. Borja et al., 1998; 4. Balaguer et al., 1992; 5. Robles-González y Poggi-Varaldo, 2017.

3.3 Cálculo de las relaciones geométricas para el escalamiento del RAnLEF a nivel planta piloto (NPP)

Para realizar el diseño y modelado virtual del RAnLEF a nivel planta piloto, con un volumen total de 123 L (incluye volúmenes del lecho fluidizado, cámara de expansión y espacio superior), se consideraron las relaciones $H_{LF}/D_{LF}=6, 8, 10, 12, 15$ y 20 , que se encuentran dentro del rango reportadas en la tabla 3, así como las relaciones $H_{CE}/D_{CE}=1.8$ y $H_{ES}/H_{LF}=0.12$ reportadas por Robles-González y Poggi-Varaldo, 2017.

3.3.1 Diseño en el nivel sistema

Se calcularon las tres principales secciones del reactor: lecho fluidizado, cámara de expansión y espacio superior, empleando las relaciones geométricas antes mencionadas para el RAnLEF. Selección de materiales y propuestas del prototipo virtual. Definición de la arquitectura del producto y desglose de este en subsistemas y componentes.

3.3.2 Cálculo de la altura del lecho fluidizado (H_{LF}) y diámetro del lecho fluidizado (D_{LF}) del RAnLEF a nivel planta piloto para un volumen de 70 L

A continuación, se presenta el cálculo de los diferentes valores de H_{LF} y D_{LF} , a partir de las relaciones geométricas $H_{LF}/D_{LF}=6, 8, 10, 12, 15$ y 20 , con la finalidad de encontrar un tubo con un diámetro accesible comercialmente. Una vez obtenido el diámetro del lecho fluidizado y comparado con los diámetros de tubo existentes comercialmente, se obtuvo la altura del tubo de la sección del lecho fluidizado del RAnLEF a NPP.

Ejemplo del cálculo del diámetro del lecho fluidizado empleando una relación de $H_{LF}/D_{LF}=20$, las relaciones mencionadas anteriormente se calcularon de manera similar.

$$H_{LF} = 20D_{LF} \quad [1]$$

$$V_{LF} = \pi * r^2 * H_{LF} \quad [2]$$

Donde:

V_{LF} = volumen del lecho fluidizado del RAnLEF

r = radio del cilindro de la sección del lecho fluidizado del RAnLEF

H_{LF} = altura del lecho fluidizado del RAnLEF

Sustituyendo la ecuación [1] en [2] y resolviendo para D_{LF} , considerando un V_{LF} de escalamiento de 0.07 m^3

$$V_{LF} = \pi * (0.5D_{LF})^2 * 20D_{LF}$$

Despejando D_{LF} para obtener el diámetro del lecho fluidizado

$$D_{LF} = \left(\frac{V_{LF}}{5\pi}\right)^{1/3} \quad [3]$$

Sustituyendo el valor de V_{LF}

$$D_{LF} = \left(\frac{0.07}{5\pi}\right)^{1/3} = 0.1645 \text{ m} \approx 16.45 \text{ cm}$$

Para hallar la altura del lecho fluidizado sustituimos el valor obtenido en la ecuación [3] en la ecuación [4].

$$H_{LF} = D_{LF} * 20 \quad [4]$$

$$H_{LF} = 0.1645 \text{ m} * 20 = 3.3 \text{ m}$$

En la tabla 4 se muestran las alturas y diámetros del lecho fluidizado (H_{LF} y D_{LF}) obtenidas con relaciones $H_{LF}/D_{LF} = 15, 12, 10, 8$ y 6 , con la finalidad de encontrar un diámetro de tubería disponible comercialmente.

Tabla 4.- Dimensiones de alturas del lecho fluidizado (H_{LF}) y diámetro del lecho fluidizado (D_{LF}) del RANLEF a nivel planta piloto para obtener un volumen de 70 L, obtenidas con relaciones H_{LF}/D_{LF} de 6, 8, 10, 12 y 15.

^a $H_{LF}/D_{LF} = 15$ ^c NPP	$H_{LF}/D_{LF} = 12$ NPP	$H_{LF}/D_{LF} = 10$ NPP	$H_{LF}/D_{LF} = 8$ NPP	$H_{LF}/D_{LF} = 6$ NPP
^d $V_{LF} = 70 \text{ L}$	$V_{LF} = 70 \text{ L}$	$V_{LF} = 70 \text{ L}$	$V_{LF} = 70 \text{ L}$	$V_{LF} = 70 \text{ L}$
$V_{LF} = 0.07 \text{ m}^3$	$V_{LF} = 0.07 \text{ m}^3$	$V_{LF} = 0.07 \text{ m}^3$	$V_{LF} = 0.07 \text{ m}^3$	$V_{LF} = 0.07 \text{ m}^3$
$V_{LF} = \pi(0.5D_{LF})^2 D_{LF} * 15$	$V_{LF} = \pi(0.5D_{LF})^2 D_{LF} * 12$	$V_{LF} = \pi(0.5D_{LF})^2 D_{LF} * 10$	$V_{LF} = \pi(0.5D_{LF})^2 D_{LF} * 8$	$V_{LF} = \pi(0.5D_{LF})^2 D_{LF} * 6$
$D_{LF} = (V/0.25 * 15 * \pi)^{1/3}$	$D_{LF} = (V/0.25 * 12 * \pi)^{1/3}$	$D_{LF} = (V/0.25 * 10 * \pi)^{1/3}$	$D_{LF} = (V/0.25 * 8 * \pi)^{1/3}$	$D_{LF} = (V/0.25 * 6 * \pi)^{1/3}$
$D_{LF} = (0.07/3.75 * \pi)^{1/3}$	$D_{LF} = (0.07/3 * \pi)^{1/3}$	$D_{LF} = (0.07/2.5 * \pi)^{1/3}$	$D_{LF} = (0.07/2 * \pi)^{1/3}$	$D_{LF} = (0.07/1.5 * \pi)^{1/3}$
$D_{LF} = 0.1811 \text{ m}$	$D_{LF} = 0.1951 \text{ m}$	$D_{LF} = 0.2073 \text{ m}$	$D_{LF} = 0.2233 \text{ m}$	$D_{LF} = 0.2458 \text{ m}$
$D_{LF} = 18.1 \text{ cm}$	$D_{LF} = 19.5 \text{ cm}$	$D_{LF} = 20.7 \text{ cm}$	$D_{LF} = 22.3 \text{ cm}$	$D_{LF} = 24.6 \text{ cm}$
$H_{LF} = D_{LF} * 15$	$H_{LF} = D_{LF} * 12$	$H_{LF} = D_{LF} * 10$	$H_{LF} = D_{LF} * 8$	$H_{LF} = D_{LF} * 6$
$H_{LF} = 2.7 \text{ m}$	$H_{LF} = 2.3 \text{ m}$	$H_{LF} = 2.1 \text{ m}$	$H_{LF} = 1.8 \text{ m}$	$H_{LF} = 1.5 \text{ m}$

Notas: ^a Altura del lecho fluidizado; ^b Diámetro del lecho fluidizado; ^c Nivel Planta Piloto; ^d Volumen del lecho fluidizado.

De la tabla 4 podemos observar que con un valor de relación $H_{LF}/D_{LF}= 10$, se obtiene un diámetro de tubería de 20.7 cm (aproximadamente 8”), el cual se encuentra asequible comercialmente, por lo que esta relación se seleccionó para calcular las dimensiones de las secciones de lecho fluidizado y espacio superior del RAnLEF a nivel planta piloto.

3.3.3 Cálculo del volumen, diámetro y altura de la cámara de expansión (V_{CE} , D_{CE} y H_{CE}) a NPP

Debido a que no se reportan medidas de la cámara de expansión en RAnLEF, esta se obtuvo a partir de las dimensiones del RAnLEF que se encuentra en el laboratorio de Biotecnología ambiental del Instituto de Hidrología de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Obtención del volumen de la cámara de expansión (V_{CE}) del RAnLEF a nivel planta piloto empleando la relación $V_{LF}/V_{CE}= 1.7$, obtenida del RAnLEF a nivel laboratorio.

Tabla 5.- Cálculo del volumen de la cámara de expansión del RAnLEF a NPP.

$H_{LF}/D_{LF} = 24$ y $H_{CE}/D_{CE} = 1.8$ Nivel Laboratorio (NL)	Volumen de cámara de expansión Nivel Planta Piloto (NPP)
^a $H_{LF} = 1.2$ m	^g $V_{LF} = 70$ L
^b $D_{LF} = 0.05$ m	$V_{LF} = 0.07$ m ³
$H_{LF}/D_{LF} = 24$	Relación de volúmenes del LF y CE a nivel laboratorio es $V_{LF} / V_{CE} = 1.7$, despejando el V_{CE} , se tiene:
^c $V_{LF} = \pi * r^2 * H_{LF}$ $V_{LF} = 0.00245$ m ³	^h $V_{CE} = V_{LF} / 1.7$ $V_{CE} = 0.042$ m ³
$V_{LF} = 2.4$ L	$V_{CE} = 42$ L
^d $H_{CE} = 0.18$ m	
^e $D_{CE} = 0.10$ m	
$H_{CE}/D_{CE} = 1.8$	
^f $V_{CE} = \pi * r^2 * H_{CE}$ $V_{CE} = 0.0014$ m ³	
$V_{CE} = 1.4$ L	
$V_{LF} / V_{CE} = 1.7$	

Notas: ^a Altura del lecho fluidizado del RAnLEF nivel laboratorio; ^b Diámetro del lecho fluidizado del RAnLEF nivel laboratorio; ^c Volumen del lecho fluidizado del RAnLEF nivel laboratorio; ^d Altura de la cámara de expansión del RAnLEF nivel laboratorio; ^e Diámetro de la cámara de expansión del RAnLEF nivel laboratorio; ^f Volumen de la cámara de expansión del RAnLEF nivel laboratorio; ^g Volumen del lecho fluidizado del RAnLEF nivel planta piloto; ^h Volumen de la cámara de expansión del RAnLEF nivel planta piloto.

Cálculo del diámetro de la cámara de expansión (D_{CE}) y la altura de la cámara de expansión (H_{CE}) del RAnLEF a NPP, para un volumen de 42 L, obtenidos a partir de la relación geométrica $H_{CE}/D_{CE} = 1.8$ del RAnLEF a nivel laboratorio.

Cálculo del diámetro de la cámara de expansión del RAnLEF a NPP:

$$\frac{H_{CE}}{D_{CE}} = 1.8$$

$$H_{CE} = 1.8 * D_{CE} \quad [5]$$

$$V_{CE} = \pi * r_{CE}^2 * H_{CE} \quad [6]$$

Donde:

V_{CE} = volumen de la cámara de expansión del RAnLEF a nivel planta piloto (ver tabla 5)

r_{CE} = radio del cilindro que forma la sección de la cámara de expansión en RAnLEF a nivel planta piloto

H_{CE} = altura de la cámara de expansión del RAnLEF a nivel planta piloto

Valores:

$$V_{CE} = 0.042 \text{ m}^3$$

$$r_{CE} = 0.05 \text{ m}$$

Sustituyendo la ecuación [5] en [6] y resolviendo para D_{CE} , se obtiene:

$$V_{CE} = \pi * (0.5D_{CE})^2 * 1.8D_{CE} \quad [6]$$

Despejando D_{CE} de la ecuación

$$D_{CE} = \left(\frac{V_{CE}}{0.45\pi} \right)^{1/3} \quad [7]$$

Sustituyendo el valor de V_{CE} , en la ecuación [7], obtenemos el diámetro de la cámara de expansión en el RAnLEF a nivel planta piloto:

$$D_{CE} = \left(\frac{0.042}{0.45\pi} \right)^{1/3} = 0.309 \text{ m} \approx 31 \text{ cm}$$

Para hallar la altura de la cámara de expansión se sustituyó el valor obtenido de la ecuación [7] en la ecuación [5].

$$H_{CE} = 1.8 * D_{CE} \quad [5]$$

$$H_{CE} = 1.8 * 0.31 \text{ m} = 0.56 \text{ m} \approx 56 \text{ cm}$$

3.3.4 Cálculo de la altura y volumen del espacio superior (H_{ES} y V_{ES} , respectivamente) en el RAnLEF a NPP

Cálculo de la altura del espacio superior H_{ES} , obtenidos a partir de la relación geométrica $H_{ES}/H_{LF} = 0.12$ del RAnLEF a nivel laboratorio.

Cálculo de la altura del espacio superior (H_{ES}), tomando la relación del RAnLEF a nivel laboratorio:

$$\frac{H_{ES}}{H_{LF}} = 0.12$$

$$H_{ES} = H_{LF} * 0.12 \quad [8]$$

Donde:

H_{ES} = altura del espacio superior del RAnLEF a nivel planta piloto

H_{LF} = altura del lecho fluidizado del RAnLEF a nivel planta piloto

H_{ES}/H_{LF} = relación del espacio superior en el RAnLEF a nivel laboratorio

Sustituyendo los valores para determinar la altura del espacio superior en el RAnLEF a nivel planta piloto se obtiene:

Datos:

$H_{LF} = 2.1 \text{ m}$ (ver tabla 4, relación $H_{LF}/D_{LF} = 10$)

Sustituyendo valores en la ecuación [8] se obtiene la altura del espacio superior del RAnLEF a nivel planta piloto:

$$H_{ES} = 2.1(0.12) = 0.252 \text{ m}$$

Cálculo del volumen del espacio superior (V_{ES}) del RAnLEF a nivel planta piloto:

$$V_{ES} = \pi * r^2 * H_{ES} \quad [9]$$

Donde:

V_{ES} = volumen del espacio superior del RAnLEF a nivel planta piloto

r = radio del cilindro que forma la sección del espacio superior del RAnLEF a nivel planta piloto

H_{ES} = altura del espacio superior del RAnLEF a nivel planta piloto

Datos:

$H_{ES} = 0.252 \text{ m}$

$r = 0.104$ (ver tabla 4, relación $H_{LF}/D_{LF} = 10$)

Sustituyendo el valor de r y H_{ES} , en la ecuación [9], obtenemos el valor del volumen del espacio superior en el RAnLEF a nivel planta piloto:

$$V_{ES} = \pi(0.104 \text{ m})^2(0.252 \text{ m}) = 8.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \approx 8.6 \text{ L}$$

En la Tabla 6 se muestra el resumen con las dimensiones obtenidas del RAnLEF a nivel planta piloto, las cuales se emplearon para realizar el prototipo virtual.

Tabla 6.- Dimensiones obtenidas de las secciones que conforman el RAnLEF a nivel planta piloto (NPP).

Sección que conforma al RAnLEF	Relaciones geométricas	Dimensiones a NPP	Volumen
Lecho Fluidizado	$a \frac{H_{LF}}{D_{LF}} = 10$	$H_{LF}= 2.1 \text{ m}$ $D_{LF}=0.207 \text{ m}$	70 L
Cámara de expansión	$b \frac{H_{CE}}{D_{CE}} = 1.8$	$H_{CE}=0.50 \text{ m}$ $D_{CE}=0.329 \text{ m}$	42 L
Espacio superior	$c \frac{H_{ES}}{H_{LF}} = 0.12$	$H_{ES}=0.252 \text{ m}$ $D_{ES}=0.207 \text{ m}$	8.6 L
Tapas	---	---	2.4 L
			Total= 123 L

Nota: ^a Relación geométrica obtenida de la tabla 4; ^b Relación geométrica obtenida del RAnLEF a nivel laboratorio, tabla 5; ^c Relación geométrica obtenida del RAnLEF a nivel laboratorio.

A partir de estos cálculos se dimensionó el RAnLEF nivel planta piloto y se modeló de acuerdo a los requerimientos de diseño y parámetros establecidos a nivel planta piloto, seleccionando los materiales adecuados para su resistencia a la corrosión y su proceso de manufactura.

3.4 Selección de material adecuado para la fabricación de los componentes del RAnLEF

En la determinación de la geometría y dimensiones de elementos es importante analizar las características o propiedades que se muestran en la Tabla 7. Estas propiedades tienen que ver de manera directa con las dimensiones, el material, el procesamiento y la unión de los elementos del sistema.

Tabla 7.- Consideraciones de diseño.

Requerimiento	Criterio
Corrosión	Resistente a pH alcalinos (8.0)
Resistencia	Resistencia mecánica Resistencia a las presiones estáticas y de flujo
Durabilidad	Ciclo de vida larga (20 años)
Ecológico	Hecho con material 100% reciclable
Comercialización	Facilidad de operación Buena maquinabilidad Facilidad de limpieza Facilidad de mantenimiento

Fuente: Elaboración propia con información obtenida de los requerimientos señalados por el usuario.

No existe una Norma con los criterios para la fabricación de reactores anaerobios de lecho fluidizado.

3.4.1 Tipos de aceros empleados en la industria

La Tabla 8 muestra los tipos de aceros más usados en la industria para la fabricación de reactores anaerobios, así como otras aplicaciones tales como: tuberías, equipos para la industria química, conductores descendientes del agua pluvial, entre otros. Los aceros al carbón son aleaciones base Fe (composición química), su principal componente es el carbono también posee hierro y manganeso. El incremento de carbono reduce la capacidad de ser soldados con facilidad. El acero inoxidable es una aleación de hierro y carbono, es conocido por sus propiedades resistentes a la corrosión, debido a que

contiene alta cantidad de cromo (elemento de aleación). Algunos tipos de aceros contienen níquel y molibdeno, que ofrecen distintas propiedades a dichos aceros.

Tabla 8.- Tipos de aceros empleados para la fabricación de reactores.

Aceros	Características	Clasificación	Ref.
Al carbón	-Alta cantidad de carbono en su composición	-Acero con un nivel medio de carbono.	1,2
	-No contiene cromo		
	-Menor resistencia a la corrosión		
Al carbón	-Maquinabilidad	-Acero con un nivel alto de carbono	
	-Dureza: resistencia de un mineral o metal a ser rayado por otro		
	-Resiste altas presiones estáticas y de flujo	-Acero con un nivel ultraalto de carbono	
Inoxidable	-Bajo contenido de carbono	-Austenítico	3,4,5
	-Alto contenido de cromo		
	-Resistencia a la corrosión	- Ferrítico	
	-Resistencia mecánica		
	-Durabilidad	- Martensítico	
	-No requiere procesos adicionales para su protección	-Duplex	
	-Facilidad de formado		
	-Ecológico (Material 100% reciclable)	-Super Duplex	
	-Higiénico		
	-Facilidad de mantenimiento		
	-Maquinabilidad		
-Dureza: resistencia de un mineral o metal a ser rayado por otro			
-Resiste altas presiones estáticas y de flujo			
Superficie totalmente compactada			

Referencias: ¹ Metalium (2014); ² Insumex (2015); ³ Metalografía (2012); ⁴Jn aceros (2019); ⁵ MIPSA (2019).

El carbono se utiliza para dar resistencia y endurecer el metal, sin embargo, el contenido creciente de carbono tiene el efecto de reducir la protección contra la corrosión debido a que el carburo de cromo se forma para reducir la cantidad de cromo disponible en la aleación, por lo cual los aceros que contienen alta cantidad de carbono experimentan una velocidad de corrosión mayor que los pobres de carbono en medio ácido. Los aceros inoxidables se destacan por ser resistentes a la corrosión, por su combinación de resistencia y ductilidad (Groover, 2007).

De acuerdo con las características de los aceros antes mencionadas, el indicado para la fabricación del RAnLEF es el acero inoxidable puesto que cumple con las propiedades o características necesarias tales como: resistencia a la corrosión, resistencia a la alta presión de fluidos, maquinabilidad, buena soldabilidad, entre otros.

Existen diversos elementos aleantes que unidos al acero inoxidable hacen que varíe su contextura, resistencia, maleabilidad, etc. Entre estos componentes se encuentran los tres más importantes, por lo que dependerá el tipo de acero inoxidable más adecuado a emplear para la fabricación del RAnLEF. En la Tabla 9 se muestran los tres principales elementos de aleación.

Tabla 9.- *Principales elementos de aleación y su influencia.*

Cromo (Cr)	Níquel (Ni)	Molibdeno (Mo)
Incrementa la resistencia a la oxidación y a la corrosión.	Incrementa la resistencia a temperaturas elevadas, así como a la corrosión. Mejora la tenacidad y la ductilidad. Aumenta la resistencia eléctrica, la fatiga y aumenta la capacidad de ser soldado.	Mejora la resistencia a temperaturas elevadas. Mejora la resistencia a la corrosión. Mejora la resistencia química en presencia de ácidos y cloruros.

Fuente: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables/>

De los elementos de aleación, el cromo es el más trascendente, dado que produce un aspecto brillante y le da la propiedad de ser resistente a la corrosión, lo que distingue al acero inoxidable de otros tipos de aceros.

3.4.2 Clasificación de los aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son aleaciones ferrosas que contienen alto porcentaje de cromo para crear resistencia a la corrosión, una de sus principales propiedades. Todos los grados de acero que contienen por lo menos el 10.5% de cromo se consideran como acero inoxidable, el cual, al unirse con el oxígeno del aire forma una delgada película transparente de oxígeno de cromo llamada capa pasiva. Los aceros inoxidables son clasificados según su estructura cristalina, se dividen en tres grupos que reciben su nombre por la fase predominante presente en la aleación a temperatura ambiente

(Groover, 2007). En la Tabla 10 se muestran los tres grupos, con sus principales características.

Tabla 10.- *Tipos de aceros inoxidables más comunes y sus principales características.*

Tipo de acero inoxidable	Características	Uso
Austeníticos	Composición normal de alrededor de 18% de Cr y 8% de Ni, poseen mayor resistencia a la corrosión de los tres grupos. No son magnéticos y son muy dúctiles, pero muestran un endurecimiento por trabajo significativo.	Son empleados para fabricar equipo de procesamiento químico y de alimentos, así como piezas de maquinaria que requieren alta resistencia a la corrosión.
Ferríticos	Contienen de 15% a 20% de cromo, poco carbono y nada de níquel. Lo que produce una fase una fase de ferrita a temperatura ambiente. Los Ferríticos son magnéticos, menos dúctiles y resistentes a la corrosión.	Las piezas fabricadas con ellos van desde utensilios de cocina hasta componentes de motores a reacción.
Martensíticos	Tienen un contenido de carbono más elevado que los Ferríticos, lo que permite que se les dé resistencia por medio de tratamiento térmico. Tienen hasta 18% de Cr, pero nada de Ni. Son fuertes, duros y resistentes a la fatiga, pero por lo general no tan resistentes a la corrosión como los de los otros dos grupos. Son de pobre soldabilidad a causa de su alto contenido de carbono.	Los productos más comunes incluyen instrumentos de corte y quirúrgicos.

Fuente: Fundamentos de manufactura moderna; (Groover, 2007).

3.4.3 Nomenclatura de los aceros inoxidables normas AISI, ISO y ASTM

El material seleccionado para la fabricación del RANLEF debe ser legal y adecuarse a los códigos y normas aplicables. Por la variedad de aceros inoxidables los sistemas de nomenclatura se dividen en:

1. Clasificación

Lista de todos los aceros inoxidables dividida en series y subdividida en tipos.

Una de las clasificaciones más conocidas es la norma AISI (American Iron and Steel Institute), es la más usada en el mundo para organizar los aceros y sus diferentes aleaciones. Los aceros inoxidable reciben su nombre con un esquema de numeración de la AISI, de los tres dígitos. El primero indica el tipo general y los últimos dos dan el grado específico dentro del tipo:

- Aceros Austeníticos al Cromo, Manganeso y Níquel (Cr-Mn-Ni) comienza con la cifra 2XX.
- Aceros Austeníticos al Cromo, Molibdeno y Níquel (Cr-Mo-Ni) comienza con la cifra 3XX.
- Aceros Ferríticos y Martensíticos al Cromo (Cr) comienza con la cifra 4XX.

2. Estandarización o Unificación

Limitación de la multiplicidad de los tipos de aceros inoxidable, nomenclaturas aceptadas internacionalmente.

ISO (International Standardization Organization), es la Organización Internacional de Normalización más representativo que formula normas a nivel mundial.

3. Convenios de aceptación

Especificaciones de técnicas que contemplan las características del producto para aplicaciones determinadas. Las más usadas son las normas ASTM (American Society for Testing and Materials), estas especificaciones respetan la clasificación AISI, a excepción de los tipos introducidos particularmente por ASTM. Esta especificación es la más utilizada para tubos de acero inoxidable, (Blog/Jn aceros, 2019).

La Tabla 11 se enlista los aceros inoxidable más comunes con sus composiciones normales y propiedades mecánicas. Por la modificación de uno o varios elementos de aleación se obtienen diferentes grados dentro del mismo grupo.

Tabla 11.- Composiciones y propiedades mecánicas de aceros inoxidables.

Tipo	Fe	Cr	Ni	Análisis químico, %			Resistencia a la tensión		
				C	Mn	Otro	MPa	Lb/in ²	Elongación, %
Austeníticos									
301	73	17	7	0.15	2		620	90 000	40
302	71	18	8	0.15	2		515	75 000	40
304	69	19	9	0.08	2		515	75 000	40
309	61	23	13	0.20	2		515	75 000	40
316	65	17	12	0.08	2	2.5 Mo	515	75 000	40
Ferrítico									
405	85	13	---	0.08	1		415	60 000	20
430	81	17	---	0.12	1		415	60 000	20
Martensítico									
403	86	12	---	0.15	1		485	70 000	20
403	86	12	---	0.15	1		825	120 000	12
416	85	13	---	0.15	1		485	70 000	20
416	85	13	---	0.15	1		965	140 000	10
440	81	17	---	0.65	1		725	105 000	20
440	81	17	---	0.65	1		1790	260 000	5

Fuente: Fundamentos de manufactura moderna; Groover (2007).

La serie 300 austeníticos es el material más adecuado de los tipos de acero inoxidable para la fabricación de las piezas del RAnLEF, por sus composiciones y propiedades mecánicas, en el cual se obtiene un material con mayor resistencia a la corrosión, excelente factor de higiene, facilidad de transformación y excelente soldabilidad, son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades, que se obtiene agregando Níquel a la aleación por lo que la estructura cristalina del material se transforma en austenita. La resistencia a la corrosión se debe a la película delgada, adherente, estable de óxido de cromo o de óxido de níquel, que se forma con el oxígeno del aire y que protege al acero de los medios corrosivos. Esta

propiedad no aparece en los aceros de bajo cromo, existe solo cuando el contenido de cromo excede el 10% (Blog/Jn aceros, 2019). En la serie Austenítica los tipos más utilizados son: 304 AISI y 316 AISI por su resistencia a la corrosión (Metalografía, 2012). El acero inoxidable Austenítico serie 300, con contenido de Cr que varía desde 15 a 32% y contenido de Ni de 8 a 37% aproximadamente, se utilizan en la mayor parte de las aplicaciones de soldadura (INDURA, 2010).

3.4.4 Especificaciones de láminas (Hoja) de la serie 300 aceros inoxidables austeníticos

La segunda sección del RAnLEF llamada cámara de expansión será fabricada con lámina de la serie 300 acero inoxidable austeníticos por sus características importantes que son necesarios considerar para cumplir con los requerimientos. Se observa en la Tabla 12 las dimensiones de algunas láminas disponibles en la empresa DM Distribuidora Metálica 100% mexicana.

Tabla 12.- Dimensiones de láminas comerciales (LC).

Descripción	Tipo de inoxidable	Calibre	Espesor		Ancho mm	Largo mm	Acabado Descripción
	AISI		mm	In			
Lámina lisa de acero inoxidable	304	29	0.33	0.013	910	2440	2B
	316	28	0.38	0.015	910	3058	Laminado en
	316L	26	0.45	0.018	1220	2440	frío, recocido y
	430	24	0.61	0.024	1220	3050	decapado. Con
		22	0.74	0.029			un acabado
		20	0.89	0.035			superficial.
		18	1.22	0.048			Superficie lisa
		16	1.52	0.060			para
		14	1.9	0.075			aplicaciones
		12	2.67	0.105			generales.
	11	3.05	0.120				
	10	3.43	0.135				

Nota. Láminas de acero inoxidable disponibles en el catálogo de la empresa mexicana DM Distribuidora Metálica S.A de C.V. Fuente: https://www.metalica.com.mx/pdf/DM_PLANOS.pdf

Para la fabricación de la cámara de expansión, se empleará la lámina AISI 304 calibre 12, debido a su excelencia resistencia a la corrosión, fácil soldabilidad, entre otras propiedades mencionadas anteriormente, sus excelentes características de trabajo, además de su extenso historial y disponibilidad, requisitos que son necesarios considerar para determinar el material adecuado, (Jn aceros, 2021).

3.4.5 Tubos de acero inoxidable

El uso de tubos de acero inoxidable ha aumentado por las diversas ventajas que presentan tales como: alta resistencia a la corrosión, elevada resistencia mecánica a bajas y altas temperaturas, facilidad de limpieza, mínimo costo de mantenimiento, alta durabilidad y excelente apariencia.

Dentro de los tubos comunes PIPE y los tubos especiales TUBING se encuentran distintos tipos de tubos de acero inoxidable, como se muestra en la Tabla 13. Las tuberías industriales de acero inoxidable se basan en las normas de fabricación dependiendo de su aplicación final para garantizar el cumplimiento de los requisitos a nivel internacional.

Tabla 13.- *Tubería de acero inoxidable industrial.*

Clasificación	Tipos de acero inoxidable	Aplicación	Norma
Tubería de cédula (Schedule PIPE)	Austenítico	Empleado en la conducción de fluidos para servicio en altas temperaturas y ambientes corrosivos generales.	ASTM A312 ANSI B36-19/B36-10 ISO 65
TUBING	Austenítico	Para servicio como tubos de calderas, intercambiadores de calor y condensadores.	ASTM A249 ISO 1127
TUBING	Austenítico	Servicio en bajas y altas temperaturas para la industria alimentaria.	ASTM A269 ISO 1127
TUBING	Austenítico y Ferrítico	Para la industria azucarera, papelera y química	ASTM 268 y 269

Fuente: <https://www.jnaceros.com.pe/blog/tubos-acero-inoxidable/tipos-tubos-acero-inoxidable/>

Tubos (Pipe) de acero inoxidable austenítico sin costura o soldados para servicio general con resistencia a la corrosión se basa en ASTM A.312 con dimensiones Schedule según ANSI B36.19 y B36.10 y calidades: AISI 304, 304L, 321, 316, 316L y 316 Ti, (ALINOX, 2016).

En la Tabla 14 se muestran las dimensiones de los tubos comerciales ASTM A.312 existentes en la empresa Alinox INOXIDABLES.

Tabla 14.- Dimensiones de tubos comerciales (TC) con y sin costura de acero inoxidable ASTM 312.

RAnLEF Nivel Planta Piloto		Dimensiones de los tubos de acero inoxidable comercial					
Relación altura/diámetro H_{LF}/D_{LF}	Diámetro del lecho fluidizado D_{LF}	Tamaño Diámetro Nominal NPS	Diámetro exterior O.D		Cédula		Cédula 40S SCH
			Mm	In	mm	Mm	
15	181	---	---	---	---	---	---
12	195	---	---	---	---	---	---
10	207	8	219.08	8.625	2.77	3.76	8.18
8	223	8	219.08	8.625	2.77	3.76	8.18
6	246	10	273.05	10.75	3.40	4.19	9.27

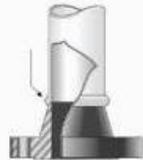
Fuente: <http://alinox.es/wp-content/uploads/2016/06/CATALOGO-ALINOX.pdf>

De acuerdo a las dimensiones y especificaciones del RAnLEF a escala nivel piloto, para la fabricación del lecho fluidizado y espacio superior con relación $H_{LF}/D_{LF} = 10$ se requiere un tubo de tamaño diámetro nominal 8" con cédula 5S, debido a que el diámetro externo es cercano al diámetro del lecho fluidizado. A continuación, se muestran los datos técnicos del tubo optado para la fabricación de los componentes. Dimensiones SCH del tubo de acero inoxidable ASTM 312, según ANSI B36.19 Y B36.10, calidad AISI 304: Diámetro nominal (In): 8; Diámetro exterior (mm): 219.08; Cédula 5s, espesor (mm): 2.77; Peso (Kg/m): 15.00; Presión (Kg/cm²): 133. Los tubos se suministran en longitudes estándar de 6 m.

3.4.6 Unión del LF con la tapa inferior por medio de bridas de acero inoxidable

La brida es un elemento que une dos componentes de un sistema de tuberías, permitiendo ser desmontado sin operaciones destructivas. En la siguiente tabla se muestran las bridas más comunes empleadas en la industria.

Tabla 15.- *Tipos de Bidas utilizadas en la industria.*

Bridas	Descripción	Esquema
Con cuello para soldar Welding Neck Flanges (WN)	Se unen al tubo mediante soldadura a tope. El largo cuello cónico optima la distribución de tensiones.	
Deslizante Slip On Flanges (SO)	Se colocan mediante dos filetes de soldadura, deslizando el tubo en su interior. Por ello su costo de instalación es menor, requiriendo menos precisión en el corte del tubo.	
Roscadas Threaded Flanges (TF)	Se colocan en el tubo previamente roscado, normalmente en lugares donde no pueden aplicarse soldaduras.	
Para junta con solapa Lap Joint Flanges (LJ)	Deslizan sobre una junta solapada. Normalmente se utiliza en lugares donde es necesario desarmar frecuentemente para limpieza o reparaciones.	
Con asiento para soldar Socket Welding Flanges(SW)	Desarrolladas especialmente para pequeños diámetros y altas presiones. Se inserta el tubo en ellas hasta el asiento y luego se suelda en filete contra el cubo.	
Ciegas Blind Flanges (BF)	Se utilizan a fin de cerrar extremos de tuberías, abulonadas a alguno de los tipos de bridas anteriores.	

De la Tabla 15 se seleccionó dos tipos de bridas que cumplen con los requisitos y que se adaptan mejor a la propuesta de las tapas. A continuación, se describe cada una de las bridas con sus dimensiones basados en la norma AISI B16.5. Es la norma de bridas más utilizada en el mundo. Cubre presiones de servicio, materiales, dimensiones, tolerancias, marcado y pruebas para bridas. Se describen todos los tipos en medidas de media 1/2" hasta 24" en clases de presión 150, 300, 400, 600, 900 y 1500 y de 1/2" a 12" en 2500 lbs, (Aceros y tubería ANSI/ASME).

- Brida deslizante, ANSI Clase 150 Bridas Acero Forjado y Acero Fundido, RF (Raised Face) cara con resalto.

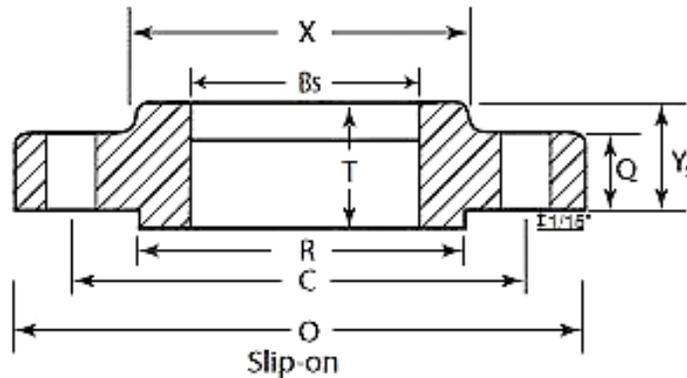


Figura 11.- Brida deslizable (Slip On).

Descripción

Material: Acero Inoxidable, ASTM A 182 (T-304)

Datos técnicos de la brida deslizante (SO)

Tamaño nominal: 8 pulg.

Dimensiones comunes: Diámetro exterior (O): 342.9 mm; espesor de la brida (Q): 28.6 mm; Diámetro del cubo (X): 246.1 mm; Diámetro levantado (R): 269.9 mm; Altura total de la brida (Y_s): 44.5 mm; Diámetro de Bore conducto del fluido (B_s): 221.5 mm; Peso: 12.7 kg.

- Brida ciega, ANSI Clase 150 Bridas Acero Forjado y Acero Fundido, RF (Raised Fase) cara con resalto.

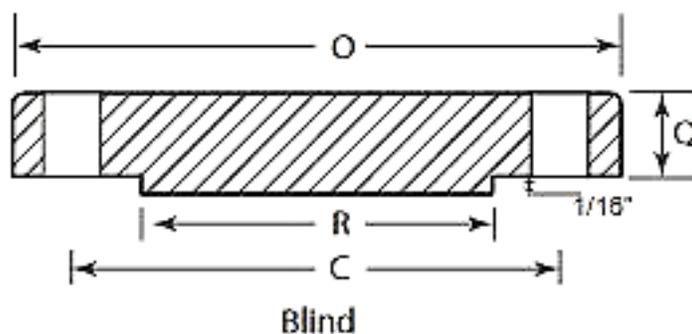


Figura 12.- Brida ciega (Blind).

Descripción

Material: Acero Inoxidable, ASTM A 182 (T-304)

Datos técnicos de la brida ciega (BF)

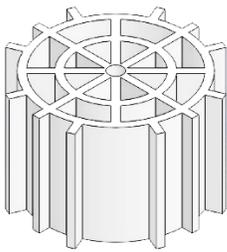
Tamaño nominal: 8 pulg.

Dimensiones comunes: Diámetro exterior (O): 342.9 mm; espesor de la brida (Q): 28.6 mm; Diámetro levantado (R): 269.9 mm; Peso: 21.3 kg.

3.5 Material de soporte ECO STAR

ECO STAR es una tecnología, cuerpo de relleno para lechos móviles fluidizados, es un material plástico cilíndrico de elevada superficie específica y alto rendimiento, su diseño fue estudiado para maximizar, favorecer y proteger la superficie de adhesión y crecimiento de las biopelículas. Los principales beneficios de la utilización de esta tecnología en comparación con los sistemas convencionales de lodos activados se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16.- *Características y beneficios de ECO STAR.*

ECO STAR	Características del material de fabricación	Beneficios
	<p>Fabricado en polipropileno, material ligero, resistente a los ácidos abrasivos, de color blanco translúcido, con densidad ligeramente inferior a la del agua, que permite un equilibrio de la suspensión continua.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado porcentaje de retención de biomasa. • El porcentaje biológico es rápido, con menos tiempo de reacción y volumen necesario. • No hay sólidos en suspensión. • Las fluctuaciones en el agua de entrada no afectan al proceso. • La planta alcanza su plena eficiencia en menores tiempos respecto a un sistema de lodos activados convencional. • Alta flexibilidad, no existen restricciones especiales relacionadas a la forma del recipiente.

Fuente: <https://www.ecodena.com.mx/materiales-plasticos.html>

En general se han utilizado como material de soporte arena silíceo (diámetro de 0.3 a 0.7 mm) o carbón activado granular (0.6 a 1.4 mm) en los reactores de lecho fluidizado. En los sistemas planta piloto se ha utilizado coque vítreo (0.7 a 1.0 mm) (Jácome et al., 2018). En el prototipo de RAnLEF se propone el uso del material de soporte para la biomasa ECO STAR, el cual debido a sus características y beneficios antes mencionados resulta adecuado para la fluidización del lecho del reactor.

3.6 Modelado del RAnLEF a nivel piloto con los requerimientos de diseño y parámetros establecidos a nivel laboratorio

En esta sección se realizaron dos propuestas del RAnLEF desarrolladas en SolidWorks® con base a las especificaciones de escalamiento con las relaciones geométricas calculadas en las secciones anteriores.

En la siguiente tabla se muestran las necesidades señalados por el usuario para la realización del escalamiento del RAnLEF, su proceso de manufactura, diseño de la estructura de soporte, diseño de la mampara para la recolección de biogás, propuestas de las tapas desmontables, diseño del dispositivo de entrada de recirculación de las vinazas.

Tabla 17.- *Necesidades y requerimientos.*

Necesidades	Requerimientos
Escalamiento	Obtención de las relaciones geométricas del RAnLEF a nivel laboratorio. Así mismo se buscaron relaciones geométricas de reactores anaerobios de lecho fluidizado reportados en la literatura con la finalidad de establecer un intervalo de dichas relaciones geométricas.
Material robusto	Materiales resistentes a pH alcalinos, resistencia mecánica.
Procesos de manufactura	<ul style="list-style-type: none"> -Tomar en cuenta las herramientas y maquinarias disponibles en los talleres de la UTM para la fabricación de los componentes principales del RAnLEF. -Mejora de ensambles -Elaboración de dibujos técnicos donde se especifican las medidas de cada componente del RAnLEF y estructura de soporte a manufacturar, así como los accesorios roscados y bridas estándares disponibles comercialmente.

(Continúa en la siguiente pág.)

(Tabla 17.- Continuación)

Necesidades	Requerimientos
Procesos de manufactura	-Elaboración de vistas explosionadas del armado del RAnLEF y la estructura de soporte. -Elaboración de una tabla de los procesos de fabricación y armado de los componentes del RAnLEF.
Dispositivo de entrada de recirculación de las vinazas mezcleras	Elaboración de un dispositivo para la tapa inferior que se conecta con la tubería de recirculación, con la cual se espera mejorar la fluidización de las VM.
Tapas superior e inferior	Tapas desmontables para dar mantenimiento al RAnLEF. Empleando bridas deslizantes y ciegas con empaques de sellamiento para evitar fugas de biogás.
Mampara de biogás	Diseño de una mampara de recolección de biogás para el RAnLEF a nivel planta piloto.
Estructura de soporte del RAnLEF	Propuesta de una estructura desmontable de soporte para el RAnLEF durante su funcionamiento, se puede desmontar para dar mantenimiento al RAnLEF.
Capacidad en hp de la bomba centrífuga para el suministro y salida de vinazas mezcleras en el RAnLEF	Cálculo y obtención de la potencia de la bomba centrífuga para el suministro y salida de vinazas mezcleras en el RAnLEF.
Costo de fabricación	Generador de precios unitarios para la fabricación del RAnLEF.

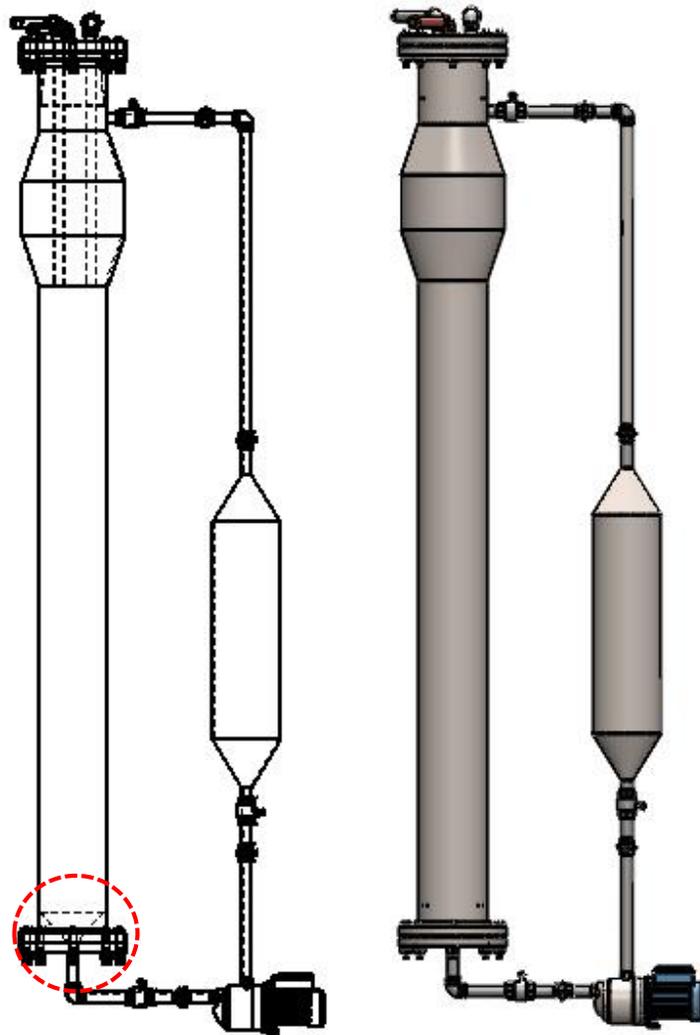
Fuente: Elaboración propia con información obtenida de los requerimientos señalados por el usuario.

Se tomó en cuenta la información de la tabla anterior para el desarrollo de las propuestas del RAnLEF a nivel planta piloto, así como la estructura de soporte, entre otros elementos que conforma el RAnLEF.

A continuación, se observan las propuestas del RAnLEF con relación $H_{LF}/D_{LF}= 10$, desarrollados en el software SolidWorks, la propuesta seleccionada se desarrollará en base a los requerimientos antes mencionadas en la Tabla 17.

3.6.1 Propuestas del RAnLEF con relación $H_{LF}/D_{LF}=10$

Para la propuesta 1 la recirculación del fluido entra verticalmente en el dispositivo inferior-interno enmarcado con círculo rojo que se muestra en la Figura 13a). En la propuesta 2 el fluido entra de forma horizontal en el dispositivo inferior-externo ver Figura 13b).



a)

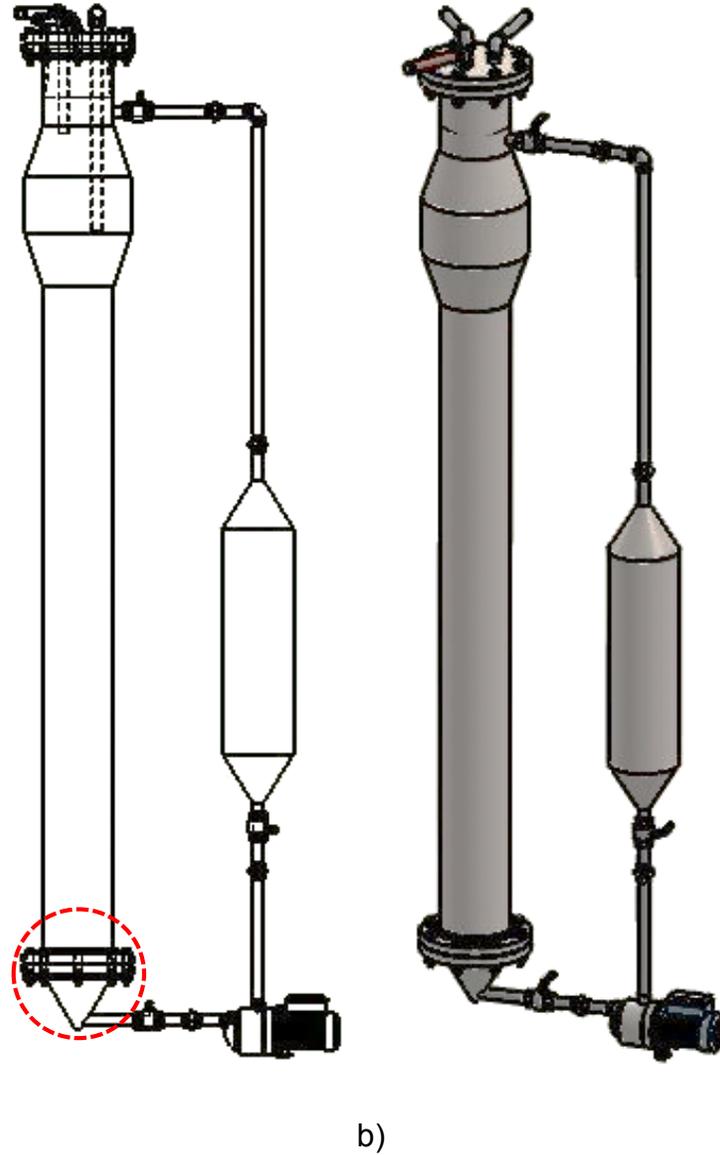


Figura 13.- a) Propuesta 1, y b) Propuesta 2.

La propuesta 1 es la seleccionada para el desarrollo de procesos de manufactura, la representación del prototipo virtual y elaboración de los dibujos técnicos que a continuación se muestra en los siguientes capítulos.

CAPÍTULO VI DESARROLLO

En este capítulo se presenta el prototipo final desarrollado en SolidWorks® con los requerimientos de diseño, parámetros establecidos a nivel laboratorio, los procesos de manufactura para su fabricación y ensamble de los componentes.

4.1 Desarrollo del modelo y diseño estructural con sistemas CAD/CAE

El proceso de diseño del RAnLEF se basó en varias etapas de conceptualización y refinamiento, realizadas durante la definición de componentes. En esta sección se presenta el prototipo CAD del RAnLEF desarrollado en SolidWorks®, sujeto a una estructura desmontable, un elemento importante para la instalación del RAnLEF.

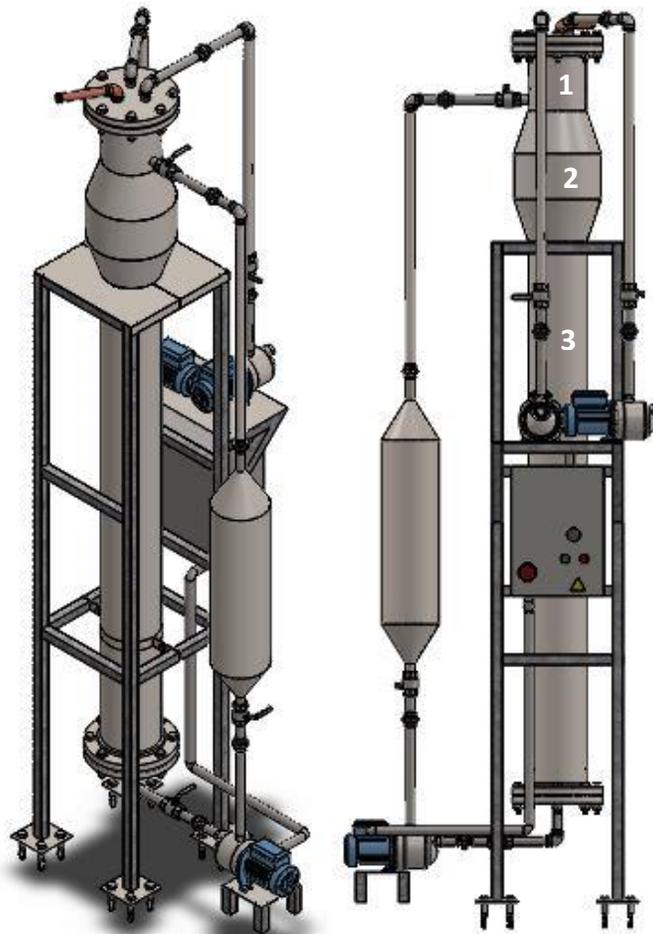


Figura 14.- RAnLEF sujeto en una estructura desmontable.

Como se observa en la Figura 14 el RAnLEF a nivel piloto con Relación geométrica $H_{LF}/D_{LF}=10$, cuenta con tres principales componentes, 1) espacio superior, 2) cámara de expansión y 3) lecho fluidizado. En los dibujos técnicos se muestran los detalles de los componentes, conexiones de tubería, estructura y la parte interna del reactor.

Condiciones o limitantes del diseño que fueron considerados durante el proceso de modelado del RAnLEF nivel planta piloto.

- Procesos de manufactura disponibles en la UTM
- Uso de componentes comerciales para disminuir costos y tiempo de manufactura
- Capacidad de producción
- Fácil manejo y control de maquinaria
- Fácil limpieza de componentes

4.2 Procesos de manufactura

La manufactura ha sido una actividad importante desde el enfoque tecnológico, económico e histórico. Gran parte de la moderna manufactura se realiza con maquinaria computarizada y automatizada que se supervisa manualmente. Existen dos maneras de definir la manufactura: tecnológica y económica. En el ámbito tecnológico se refiere a la aplicación de procesos químicos y físicos que alteran la geometría, las propiedades, o el aspecto de un determinado material para elaborar partes o productos terminados (Groover, 2007). Los procesos para llevar a cabo la manufactura involucran una combinación de máquinas, herramientas, energía y trabajo manual, como se ilustra en la Fig.15a). En el sentido económico, la manufactura es la transformación de los materiales en artículos de valor mayor por medio de uno o más operaciones de procesamiento o ensamblado. La manufactura agrega valor al material cambiado, ver Fig.15b).

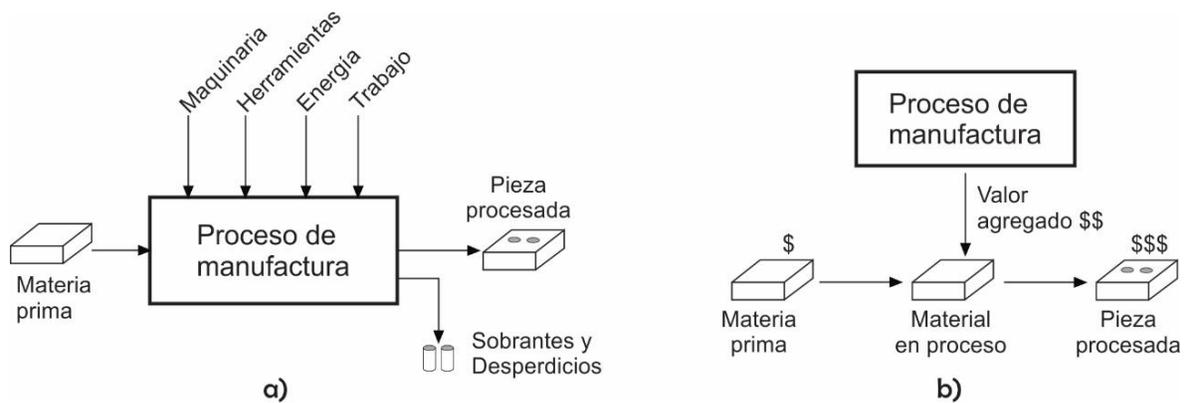


Figura 15.- a) Proceso técnico, y b) Proceso económico (Groover, 2007).

De acuerdo con Groover, dentro de los procesos de manufactura existen dos tipos básicos de operaciones:

- Operaciones de proceso

Esta operación transforma un material de trabajo de una etapa a otra más avanzada. Esto le agrega valor al cambiar la geometría, las propiedades o la apariencia del material inicial.

- Operaciones de ensamble

Una operación de ensamble une dos o más componentes para crear una nueva entidad llamada ensamble o subensamble. Los componentes quedan unidos en forma permanente o semipermanente. Los procesos de **unión permanente** incluyen: la soldadura térmica, la soldadura fuerte, la soldadura blanda y el pegado con adhesivos. Los métodos de **ensamble mecánico** aseguran dos o más partes en una unión que puede desarmarse; el uso de tornillos, pernos, tuercas y demás sujetadores roscados son métodos tradicionales importantes dentro de esta categoría.

Con base en la Figura 16 y las necesidades del prototipo, el proceso de manufactura que se utilizará son: ensamblaje de unión permanente por medio de soldadura y ensamblaje mecánico empleando sujetadores roscados.

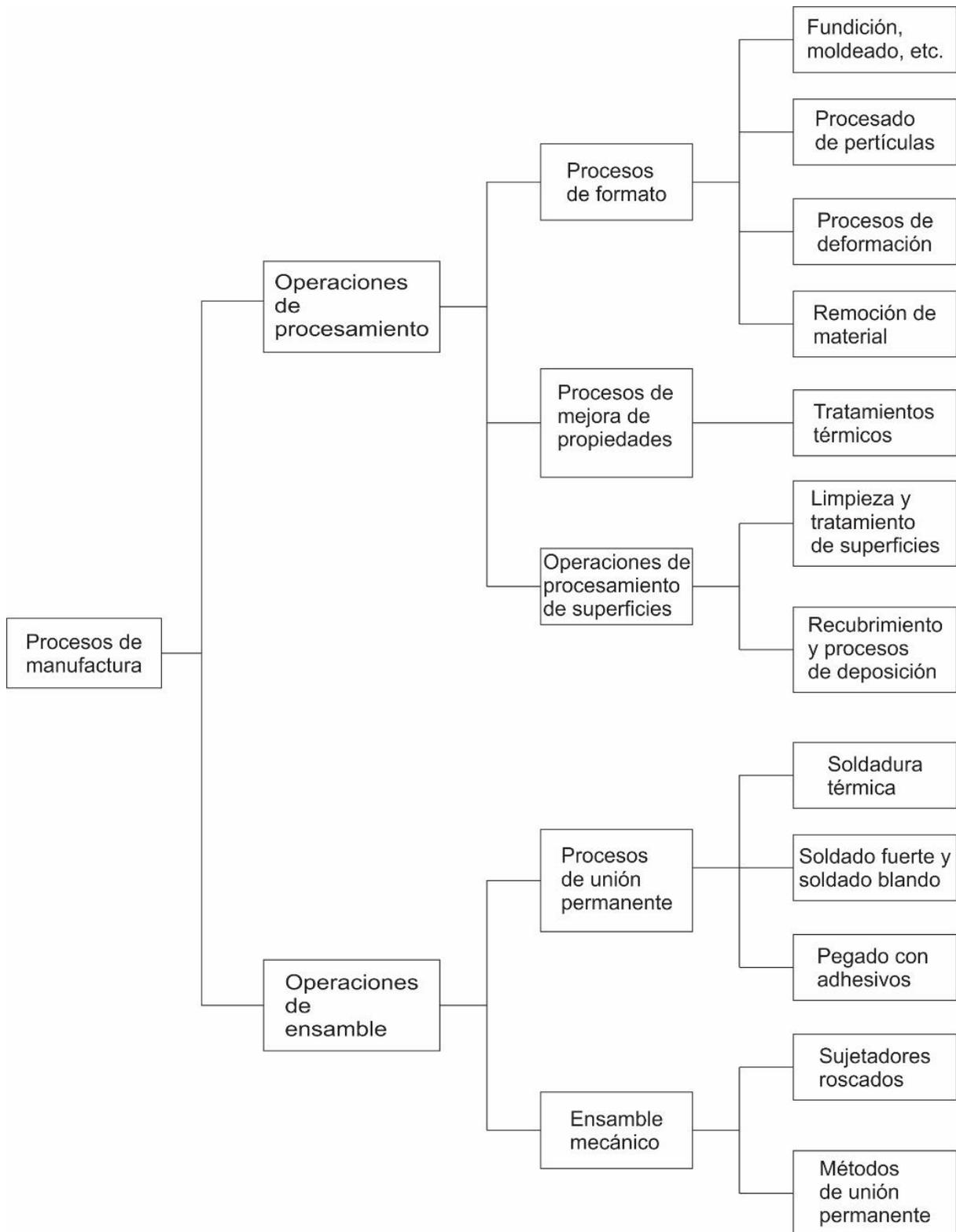


Figura 16.- Clasificación de procesos de manufactura (Groover, 2007).

A continuación, se describen los tipos de ensambles y uniones empleados en la industria para armar piezas de acero.

4.2.1 Procesos de unión y ensamble

El RAnLEF está compuesto por varios componentes que necesitan ser unidos o ensamblados para cumplir su función, existen diversos métodos de ensamblaje permanente o semipermanente. De la clasificación de procesos de manufactura se realizará operaciones de ensamble, para realizar uniones permanentes por medio de soldadura y uniones desmontables a partir de los métodos de ensamble mecánico para asegurar dos o más partes en la unión y que se pueda desarmar cuando sea necesario.

4.2.2 Tipos de procesos de soldadura para unión permanente

La soldadura es un proceso de unión de materiales en el cual se funden las superficies de contacto de dos o más partes mediante la aplicación conveniente de calor o presión.

Por lo general, la soldadura se realiza sobre piezas hechas del mismo metal, pero es posible usar algunas operaciones para unir metales diferentes. Los procesos de soldadura pueden dividirse en dos grupos principales:

1) Soldadura por fusión

Los procesos de soldadura por fusión usan calor para fundir los metales base, en ocasiones se agrega un metal de relleno a la combinación fundida para facilitar el proceso y proporcionar volumen y resistencia a la unión soldada. La categoría por fusión incluye los procesos de soldadura de uso más amplio. Los cuales pueden organizarse en los siguientes grupos generales (American Welding Society):

-Soldadura con arco (AW). Grupo de procesos de soldadura en los cuales el calentamiento de los metales se obtiene mediante un arco eléctrico. Algunas de las operaciones de soldadura con arco también aplican presión durante el proceso, y la mayoría utiliza un metal de relleno.

-Soldadura por resistencia (RW). Se obtiene la fusión usando el calor de una resistencia eléctrica para el flujo de una corriente que pasa entre las superficies de empalme de dos piezas sostenidas juntas bajo presión.

-Soldadura con oxígeno y gas combustible (OFW). Estos procesos de unión usan un gas de oxígeno combustible, tal como una mezcla de oxígeno y acetileno, para producir una flama caliente para fundir la base metálica y el metal de relleno.

2) Soldadura de estado sólido

Se refiere a los procesos de unión en los cuales la fusión proviene sólo de la aplicación de presión o de una combinación de calor y presión. No se utiliza un metal de relleno:

-Soldadura por difusión (DFW). Se colocan juntas dos superficies bajo presión a una temperatura elevada y las piezas se sueldan por medio de fusión de estado sólido.

-Soldadura por fricción (FRW). En este proceso, la coalescencia se obtiene mediante el calor de la fricción entre dos superficies.

-Soldadura ultrasónica (USW). Se realiza aplicando una presión moderada entre las dos piezas y un movimiento oscilatorio a frecuencias ultrasónicas en una dirección paralela a las superficies de contacto.

4.2.3 Tipos de soldadura empleadas para unir piezas de acero inoxidable

En la fabricación de un equipo o estructura de acero es necesario realizar uniones soldados, una de las principales opciones es un acero inoxidable austenítico de la serie 300, funde de manera controlada y estable, fluye, cohesiona con las zonas frías, solidifica de una manera regular y sin imprevistos (Blog/Jn aceros, 2019).

En la industria, los aceros inoxidables austeníticos son los más empleados, para hacer uniones de piezas mediante la soldadura (Aracil, 2018).

Tabla 18.- *Tipos de soldadura más utilizados para acero inoxidable.*

Tipo de soldadura	Ventajas
Soldadura por arco manual con electrodo revestido o MMA/SMAW (Shielded Metal Arc Welding)	La combustión del revestimiento permite crear una atmósfera protectora para evitar la contaminación del material fundido.
Tungsteno como gas inerte o TIG (Tungsten Inert Gas)	<ul style="list-style-type: none"> -No genera escorias en el cordón, reduce las tareas de limpieza posteriores a la soldadura. -El proceso puede ser empleado en cualquier posición de la soldadura, recomendable para la soldadura de tubos. -No genera ninguna salpicadura alrededor del cordón. -No afecta a la composición química y propiedades del metal base que se esté utilizando durante el proceso de soldadura.
Metal como gas inerte o MIG (Metal Inert Gas)	<ul style="list-style-type: none"> -Permite velocidades de soldadura mayores. -En el caso de grandes producciones, permite facilidad de automatización del proceso.

Nota. Tipo de soldadura para acero inoxidable según su uso y la calidad del material.

Fuente: <http://www.gnccaldereria.es/que-tipo-de-soldadura-se-utiliza-para-acero-inoxidable/>.

Al fundir un material con 18% de cromo y 8% de níquel, se pueden reducir a 16% y 6% lo que provoca una soldadura menos resistente a la corrosión que el resto del material. Por eso es necesario la fabricación de materiales de aportación para soldadura con un contenido en cromo y níquel superior a lo exigido en el material base (Blog/Jn aceros, 2019).

Los materiales de aportación más indicados para soldar el AISI 304, son los tipos E308 y ER308, estas referencias poseen 19.5-22% de cromo y 9-11% de níquel. La referencia E es para electrodos revestidos con soldadura eléctrica y la referencia ER es para varillas desnudas para utilizar con técnicas de soldadura que protegen

el arco mediante gases: TIG, MIG, MAG y FLUX. El material de aportación es superior al material base para evitar la reducción de la resistencia a la corrosión que el resto del material (Blog/Jn aceros, 2019).

La soldadura TIG es uno de los métodos más eficaces y que aporta mayor calidad en la unión de elementos metálicos. Es ideal para soldar el acero inoxidable.

La unión de los elementos del RAnLEF se realizará por medio del procedimiento de soldadura Tungsteno gas inerte (TIG) con electrodo infusible de tungsteno, para la unión de las secciones principales del RAnLEF se empleará la soldadura TIG con material de aporte ER308. Los elementos de la estructura se unirán por medio del proceso de soldadura manual por arco eléctrico (MMA/SMAW) con electrodo revestido E6013, para las piezas de la estructura que son armadas con acero inoxidable y acero al carbón, se empleará la soldadura MMA con electrodo revestido E308.

4.2.4 Ensamble mecánico por medio de sujetadores roscados

En el ensamble mecánico se usan diferentes métodos de sujeción para sostener juntas en forma mecánica dos o más piezas, en la mayoría de los casos se utilizan sujetadores que se agregan a las piezas durante la operación de ensamblado, los métodos de sujeción mecánica pueden dividirse en dos clases principales: 1) los que permiten el desensamble y 2) los que crean una unión permanente. Dentro de la primera clase se encuentran los sujetadores roscados que son los tornillos, pernos, tuerca, etc. y los remaches en la segunda. Los productos ensamblados presentan ventajas no sólo en la fábrica, sino también durante la instalación en campo. Los productos que son demasiado grandes y pesados presentan gran dificultad para transportarse por lo que se pueden enviar en subensambles más pequeños y después armarse en las instalaciones de los clientes. La facilidad de desensamble sólo se aplica a los métodos de sujeción mecánica que lo permite. Se requiere un desensamble periódico para la mayoría de los productos en los que debe realizarse mantenimiento y reparaciones. Por ejemplo, sustituir componentes gastados, para hacer ajustes, etc. Los métodos de ensamble mecánico se han clasificado en las siguientes categorías: 1) sujetadores roscados, 2) remaches, 3)

ajustes de interferencia, 4) otros métodos de sujeción mecánica y 5) inserto en moldeado y sujetadores integrales. Las ventajas que se mencionaron anteriormente se tomaron en cuenta para proponer tuberías con conexiones roscadas, bridas desmontables, uso de sujetadores roscados como son pernos, tornillos, tuercas, entre otros elementos desmontables, que forman parte del RAnLEF.

En la Tabla 19 se observa el tipo de broca recomendable para perforar o barrenar metal.

Tabla 19.- *Tipo de broca para perforar metal y su aplicación.*

Tipo de broca	Tipo de vástago	Material de la broca	Material recomendado para perforar
Broca para metal	Liso y hexagonal	Cobalto	Metales ferrosos y no ferrosos, Acero inoxidable, etc.
		Carburo monobloque	Todo tipo de acero

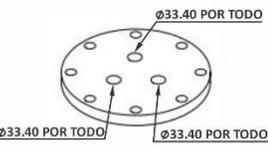
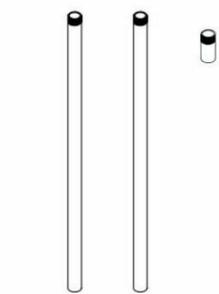
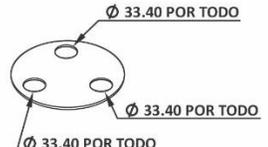
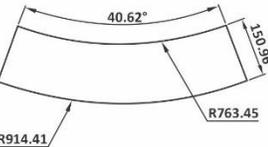
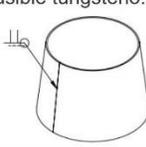
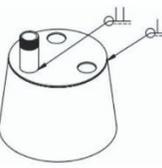
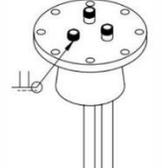
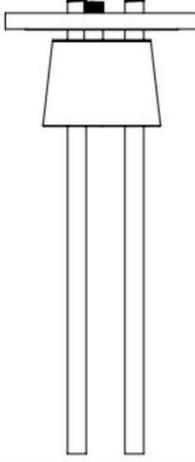
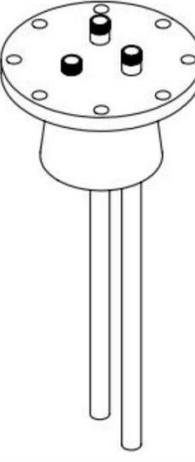
Fuente: <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/como-elegir-mechas-o-brocas-de-acuerdo-al-trabajo-a-realizar-parte-1>

Las piezas a barrenar son de acero inoxidable por lo tanto es recomendable utilizar una broca con vástago liso y hexagonal de material cobalto, usando la máquina CNC o el torno.

4.2.5 Descripción del proceso de manufactura del RAnLEF y la estructura de soporte

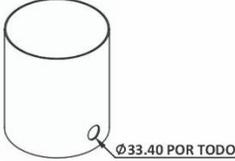
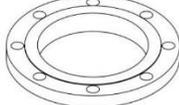
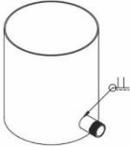
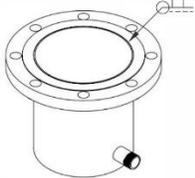
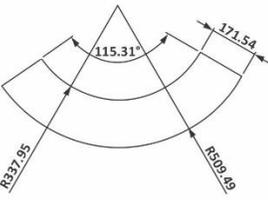
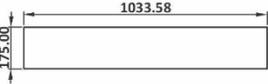
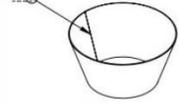
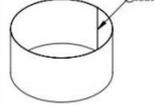
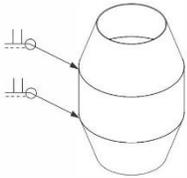
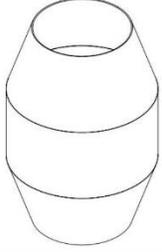
Para realizar la transformación de cada elemento que conforma el RAnLEF, es necesario determinar los procesos de manufactura y maquinaria o herramienta a utilizar dependiendo del tipo de trabajo y material, durante el proceso de manufactura es obligatorio cumplir con las reglas de los talleres de la UTM, portando el equipo de protección necesario. En la siguiente tabla se describe el proceso de manufactura que con lleva fabricar las partes del RAnLEF, tomando en cuenta la maquinaria que disponen los talleres de la UTM.

Tabla 20.- *Proceso de manufactura de los componentes del RAnLEF.*

ENTRADA	PROCESO DE MANUFACTURA		PIEZA PROCESADA
MATERIA PRIMA	MAQUINARIA Y HERRAMIENTA	DESARROLLO	COMPONENTES RAnLEF
<p>Brida ciega superior: tamaño nominal de 8", de acero inoxidable T-304, 150 Lbs.</p> <p>Tubería de alimentación: medio niple 1" x 32.40", de acero inox. T-304, cédula 40, roscado NPT.</p> <p>Tubería de recolección: medio niple 1" x 32.40", de acero inox. T-304, cédula 40, roscado NPT.</p> <p>Tubería de biogás: medio niple 1" x 2.7", de cobre, cédula 40, roscado NPT.</p> <p>Tapa-mampara: lámina de acero inox. T-304, calibre 12, acabado 2B.</p> <p>Cono truncado: lámina de acero inox. T-304, calibre 12, acabado 2B.</p> <p>Material de aporte: electrodo acero inoxidable, tipo ER308.</p>	<p>-Torno de banco -Broca de 1 3/8" -Máquina de cizalla -Máquina roladora -Sierra cinta -Planta soldadora TIG -Esmeriladora -Disco de corte fino -Flexómetro -Lima bastarda -Equipo de protección</p>	<p>Barrenado de la brida ciega para la colocación de niples: tubería de alimentación, biogás y recolección.</p>  <p>Corte de los niples para la tubería de alimentación, tubería de recolección y tubería de biogás.</p>  <p>Trazado y corte de la plantilla de la tapa para la mampara; se realizan tres barrenos a la tapa para la entrada de la tubería de alimentación, tubería de biogás y la tubería recolección.</p>  <p>Trazado y corte de la plantilla del cono truncado para el armado de la mampara de recolección de biogás.</p>  <p>Limado y limpieza de las piezas para el armado de la mampara y tapa superior.</p> <p>Rolado de la lámina para el armado del cono truncado, unión por medio de soldadura TIG con electrodo infusible tungsteno.</p>  <p>Armado de la mampara, colocación del medio niple y la tapa por el proceso de soldadura TIG con electrodo infusible tungsteno.</p>  <p>Colocación de los niples a la brida ciega para la tubería de alimentación y recolección de fluido, unión por medio de la soldadura TIG con electrodo infusible tungsteno.</p>  <p>Unión de la mampara con la brida ciega por medio de la soldadura TIG con electrodo ER308.</p> 	<p>TAPA SUPERIOR MAMPARA</p>  

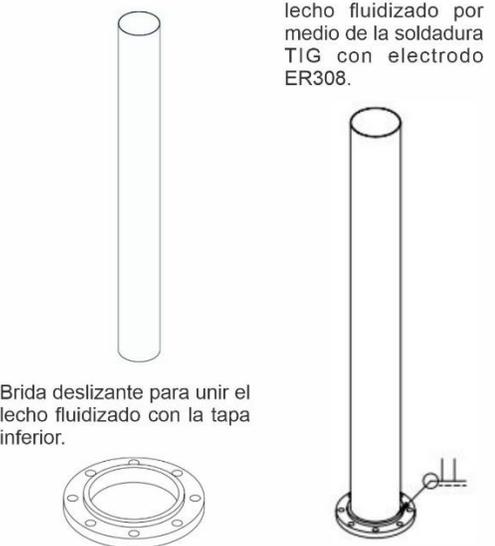
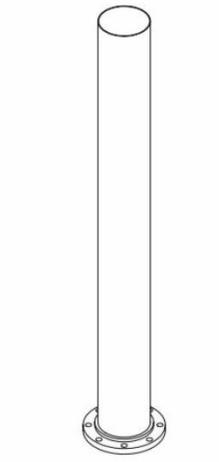
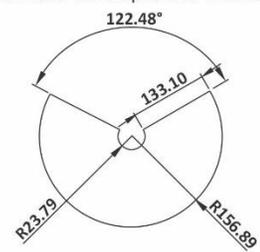
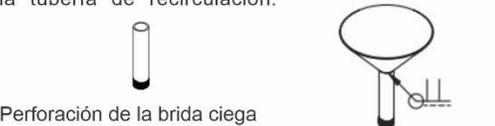
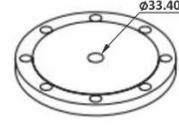
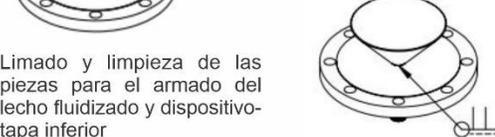
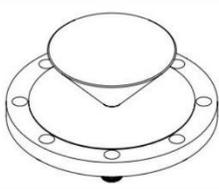
(Continúa en la siguiente pág.)

(Tabla 20. Continuación)

ENTRADA	PROCESO DE MANUFACTURA		PIEZA PROCESADA
MATERIA PRIMA	MAQUINARIA Y HERRAMIENTA	DESARROLLO	SECCIONES DEL RAnLEF
<p>Tubo SCH 5s: tamaño nominal de 8", de acero inoxidable T-304, 150 Lbs.</p> <p>Tubería de recirculación: medio niple de 1" x 2", de acero inox. T-304, cédula 40, roscado NPT.</p> <p>Brida deslizante: tamaño nominal de 8", de acero inoxidable T-304, 150 Lbs.</p> <p>Material de aporte: electrodo acero inoxidable, tipo ER308.</p>	<p>-Torno de banco -Broca de 1 3/8" -Sierra cinta -Planta soldadora TIG -Lima bastarda -Flexómetro -Equipo de protección</p>	<p>Corte y perforación del tubo SCH 5s, para la sección del espacio superior.</p>  <p>Corte y limado del medio niple para la tubería de recirculación.</p>  <p>Brida deslizante para unir el espacio superior con la tapa superior.</p> 	<p>Colocación del medio niple en la perforación del espacio superior, por medio de la soldadura TIG con electrodo ER308.</p>  <p>Unión del espacio superior con la brida deslizante, por medio de la soldadura TIG con electrodo ER308.</p>  <p>ESPACIO SUPERIOR CON BRIDA DESLIZANTE</p> 
<p>Cono truncado: lámina de acero inox. T-304, calibre 12, acabado 2B.</p> <p>Cilindro CE: lámina de acero inox. T-304, calibre 12, acabado 2B.</p> <p>Material de aporte: electrodo acero inoxidable, tipo ER308.</p>	<p>-Máquina de cizalla -Máquina roladora -Planta soldadora TIG -Esmeriladora -Disco de corte fino -Lima bastarda -Flexómetro -Equipo de protección</p>	<p>Trazado y corte de la lámina para el armado de dos conos truncados para la cámara de expansión (CE).</p>  <p>Trazado y corte de la lámina para el armado del cilindro de la cámara de expansión (CE).</p>  <p>Limado y limpieza de las piezas para el armado del espacio superior y de la cámara de expansión.</p>	<p>Armado de dos conos truncados, rolado y unión por medio de la soldadura TIG con electrodo ER308.</p>  <p>Rolado y unión del cilindro CE por medio de la soldadura TIG con electrodo ER308.</p>  <p>Armado de la cámara de expansión, unión de las piezas por medio de la soldadura TIG con electrodo ER308.</p>  <p>CÁMARA DE EXPANSIÓN</p> 

(Continúa en la siguiente pág.)

(Tabla 20. Continuación)

ENTRADA	PROCESO DE MANUFACTURA		PIEZA PROCESADA
MATERIA PRIMA	MAQUINARIA Y HERRAMIENTA	DESARROLLO	SECCIONES DEL RANLEF
<p>Tubo SCH 5s: tamaño nominal de 8", de acero inoxidable T-304, 150 Lbs.</p> <p>Brida deslizante: tamaño nominal de 8", de acero inoxidable T-304, 150 Lbs.</p> <p>Material de aporte: electrodo acero inoxidable, tipo ER308.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Sierra cinta -Planta soldadora TIG -Lima bastarda -Flexómetro -Equipo de protección 	<p>Corte del tubo SCH 5s para la sección del lecho fluidizado.</p>  <p>Unión de la brida deslizante y tubo del lecho fluidizado por medio de la soldadura TIG con electrodo ER308.</p> <p>Brida deslizante para unir el lecho fluidizado con la tapa inferior.</p>	<p>LECHO FLUIDIZADO</p> 
<p>Cono truncado: lámina de acero inox. T-304, calibre 12, acabado 2B.</p> <p>Tubo dispositivo: medio niple 1" x 4", de acero inoxidable T-304, cédula 40, roscado NTP.</p> <p>Tapa inferior: brida ciega tamaño nominal de 8", de acero inoxidable T-304, 150 L.</p> <p>Material de aporte: electrodo acero inoxidable, tipo ER308.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Torno de banco -Broca de 1 3/8" -Máquina de cizalla -Máquina roladora -Sierra cinta -Planta soldadora TIG -Esmeriladora -Disco de corte fino -Lima bastarda -Flexómetro -Equipo de protección 	<p>Trazado y corte de la plantilla del cono truncado para el armado del dispositivo inferior.</p>  <p>Armado del cono truncado, rolado de la lámina y unión por medio de la soldadura TIG con electrodo infusible tungsteno.</p> <p>Unión del cono truncado con el medio niple por proceso de soldadura TIG con electrodo infusible tungsteno.</p> <p>Corte del medio niple para el dispositivo inferior que conecta la tubería de recirculación.</p>  <p>Perforación de la brida ciega para la colocación del tubo del dispositivo inferior.</p>  <p>Limado y limpieza de las piezas para el armado del lecho fluidizado y dispositivo-tapa inferior</p> 	<p>DISPOSITIVO - TAPA INFERIOR</p> 

(Continúa en la siguiente pág.)

(Tabla 20. Continuación)

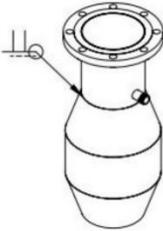
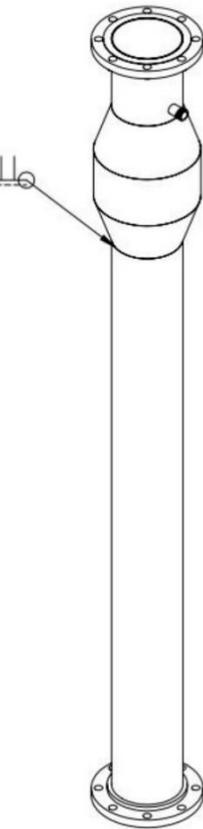
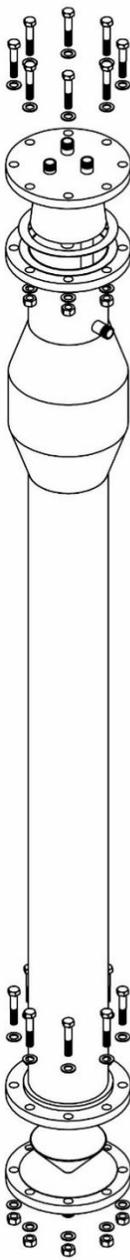
ENTRADA	PROCESO DE MANUFACTURA		RAnLEF
MATERIA PRIMA	MAQUINARIA Y HERRAMIENTA	ENSAMBLAJE	
<p>Empaque RF: empaque de Neopreno, diámetro 8", hermético ANSI 150.</p> <p>Perno M22: tornillo de cabeza hexagonal M22 x 114.3 mm, de acero inox. T-304, rosca parcial.</p> <p>Arandela M22: plana A2 de acero inox. T-304, DIN 125, métrico.</p> <p>Tuercas M22: Mxthn-019, 3/4 d 19.05 mm, de acero inox., cuerda estándar.</p> <p>Material de aporte: electrodo tipo ER308, soldadura para acero inoxidable.</p>	<p>-Planta soldadora TIG -Extractor de tuercas -Llave ajustable -Llave mecánica -Equipo de protección</p>	<p>Ensamblaje permanente de las secciones principales del RAnLEF: lecho fluidizado, cámara de expansión y espacio superior.</p> <p>Unión del espacio superior y la cámara de expansión por medio de la soldadura TIG con electrodo ER308.</p>  <p>Unión de la cámara de expansión y el lecho fluidizado por medio de la soldadura TIG con electrodo ER308.</p>  <p>Ensamblaje mecánico de las tapas superior e inferior del RAnLEF, por medio de pernos, tuercas y arandelas, colocación de empaque RF en las bridas para el sellado de las tapas.</p> 	

Tabla 21.- *Proceso de manufactura del depósito de 30 L y base para bomba de recirculación.*

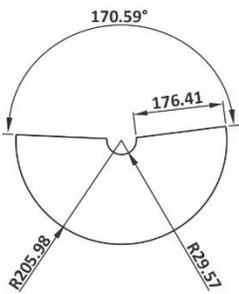
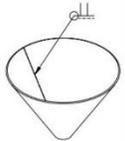
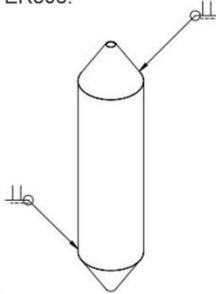
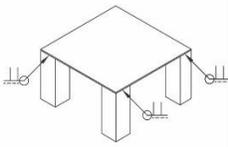
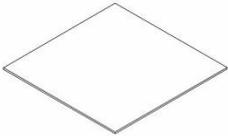
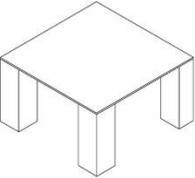
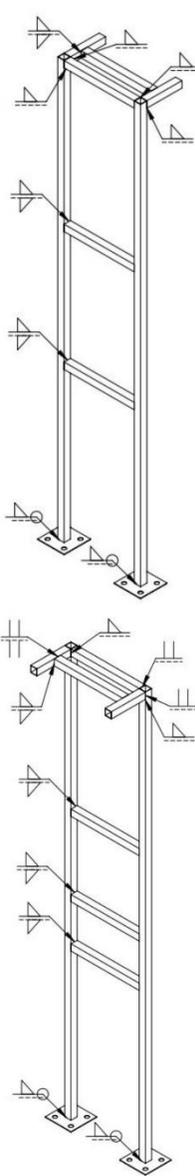
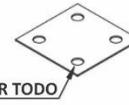
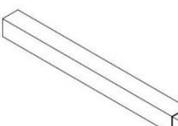
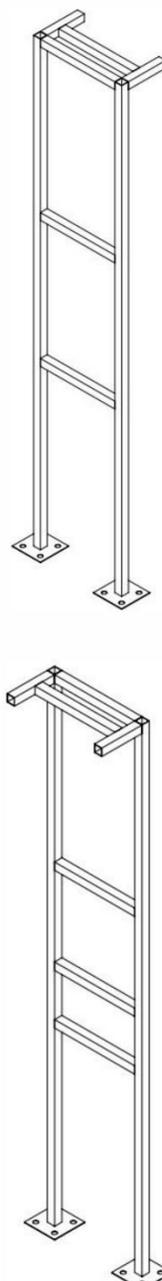
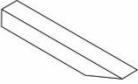
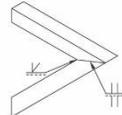
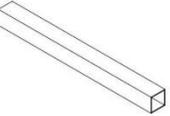
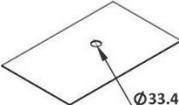
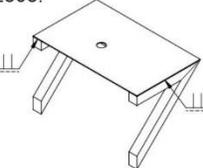
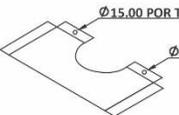
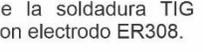
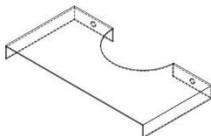
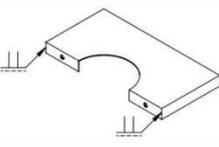
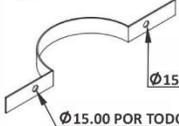
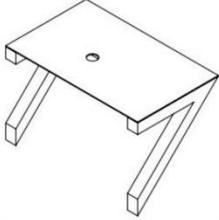
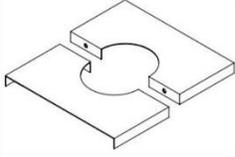
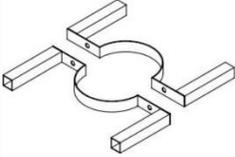
ENTRADA	PROCESO DE MANUFACTURA		PIEZA PROCESADA
MATERIA PRIMA	MAQUINARIA Y HERRAMIENTA	DESARROLLO	COMPONENTES RAnLEF
<p>Cono truncado: lámina de acero inoxidable T-304, calibre 12, acabado 2B.</p> <p>Tubo SCH 5s: tamaño nominal de 8", de acero inoxidable T-304, 150 Lbs.</p> <p>Material de aporte: electrodo acero inoxidable, tipo ER308.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Sierra cinta -Máquina de cizalla -Máquina roladora -Planta soldadora TIG -Esmeriladora -Disco de corte fino -Lima bastarda -Flexómetro -Equipo de protección 	<p>Trazado y corte de la lámina para el armado de dos conos truncados.</p>  <p>Armado de dos conos truncados, rolado y unión de la lámina por medio de la soldadura TIG con electrodo infusible tungsteno.</p>  <p>Armado del depósito 30 L para la tubería de recirculación, unión de las piezas por medio de la soldadura TIG con electrodo ER308.</p>   <p>Corte del tubo SCH 5s para el armado de la depósito 30 L.</p>	<p>DEPÓSITO 30 L</p> 
<p>Base para bomba: lámina de acero inox. T-304, calibre 12, acabado 2B.</p> <p>Perfil cuadrado PTR: perfil cuadrado 2" x 2" acero al carbón MxTRT-017, calibre 12.</p> <p>Material de aporte: electrodo revestido acero inoxidable, tipo E308.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Sierra cinta -Máquina de cizalla -Planta soldadora MMA -Esmeriladora -Disco de corte fino -Lima bastarda -Flexómetro -Equipo de protección 	<p>Corte de los PTR para la base de la bomba de recirculación, 4 piezas.</p>  <p>Armado de la base para la bomba de recirculación, unión de los PTR a la base de lámina por medio de la soldadura MMA con electrodo revestido E308.</p>  <p>Corte de la base de lámina.</p>  <p>Limado y limpieza de las piezas para el armado de la cisterna 30 L y base para la colocación de la bomba de recirculación.</p>	<p>BASE PARA BOMBA</p> 

Tabla 22.- *Proceso de manufactura de la fabricación de la estructura desmontable.*

ENTRADA	PROCESO DE MANUFACTURA		PIEZA PROCESADA
MATERIA PRIMA	MAQUINARIA Y HERRAMIENTA	DESARROLLO	ESTRUCTURA
<p>Poste de esquina: perfil cuadrado PTR 2" x 2", de acero al carbón MxTRT017, calibre 12.</p> <p>Base poste: lámina de acero inoxidable T-304, calibre 12, acabados 2B.</p> <p>Travesaño L= 209.23 mm: perfil cuadrado PTR 2" x 2", de acero al carbón MxTRT-017, calibre 12.</p> <p>Travesaño L= 418.46 mm: perfil cuadrado PTR 2" x 2" de acero al carbón MxTRT017, calibre 12.</p> <p>Material de aporte: electrodo revestido acero inoxidable, tipo E308.</p> <p>Material de aporte: electrodo revestido E6013.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Sierra cinta -Máquina de cizalla -Torno de banco -Broca de 1 3/8" -Planta soldadora MMA -Esmeriladora -Disco de corte fino -Escuadra -Lima bastarda -Flexómetro -Equipo de protección 	<p>Corte de 4 PTR para postes de esquina de la estructura.</p>  <p>La estructura se compone de dos partes, unión de los PTR por medio de la soldadura MMA con electrodo revestido E6013, colocación de los postes de esquina en las bases de lámina por medio de la soldadura MMA con electrodo revestido E308.</p>  <p>Corte de las placas base para los postes de esquina de la estructura, perforación de las bases para pernos de anclaje.</p>  <p>Ø 22.20 POR TODO</p> <p>Corte de 4 PTR para soporte de la base de lámina superior de la estructura.</p>  <p>Corte de 9 PTR para travesaño de la estructura y para soporte de la base de lámina superior.</p>  <p>Limado y limpieza de las piezas para el armado de la estructura.</p>	

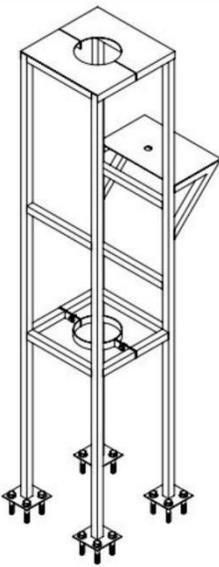
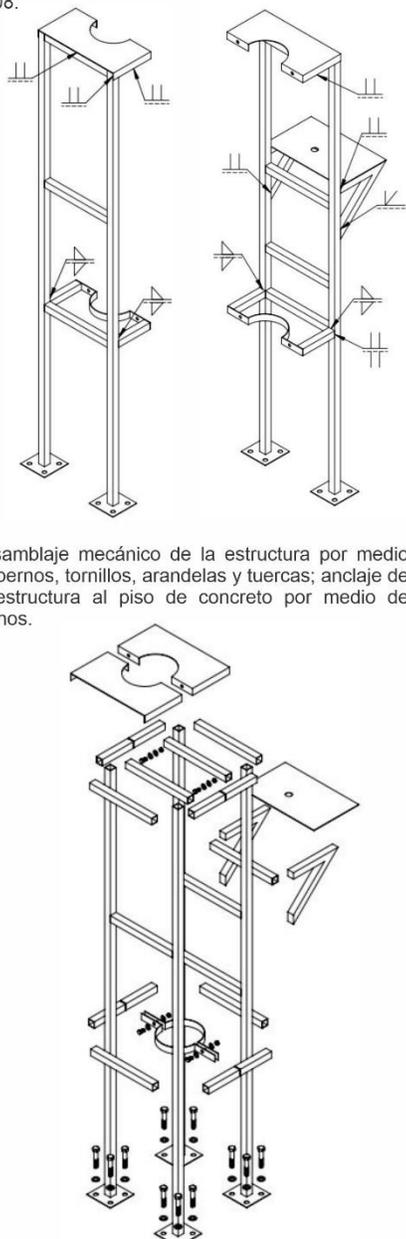
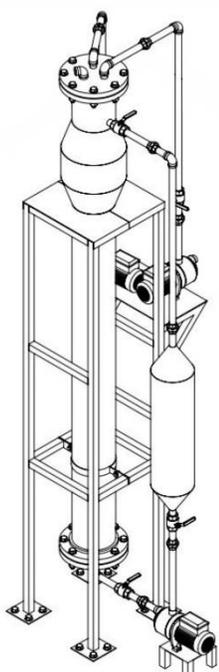
(Continúa en la siguiente pág.)

(Tabla 22. Continuación)

ENTRADA	PROCESO DE MANUFACTURA		PIEZA PROCESADA
MATERIA PRIMA	MAQUINARIA Y HERRAMIENTA	DESARROLLO	COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA
<p>PTR 45°: perfil cuadrado 2" x 2", de acero al carbón MxTRT-017, calibre 12.</p> <p>PTR L= 418.46 mm: perfil cuadrado PTR 2" x 2", de acero al carbón MxTRT-017, calibre 12.</p> <p>Base repisa: lámina de acero inoxidable T-304, calibre 12, acabado 2B.</p> <p>Base de sujeción: lámina de acero inoxidable T-304, calibre 12, acabado 2B.</p> <p>PTR L= 209.23 mm: perfil cuadrado 2" x 2", de acero al carbón MxTRT-017, calibre 12.</p> <p>Abrazadera: lámina de acero inoxidable T-304, calibre 12, acabado 2B.</p> <p>Material de aporte: electrodo acero inoxidable, tipo ER308.</p> <p>Material de aporte: electrodo revestido acero inoxidable, tipo E308.</p> <p>Material de aporte: electrodo revestido E6013.</p>	<p>-Sierra cinta -Máquina de cizalla -Máquina dobladora -Torno de banco -Broca de 1 3/8" -Planta soldadora MMA -Esmeriladora -Disco de corte fino -Lima bastarda -Escuadra -Flexómetro -Equipo de protección</p>	<p>Corte recto y con ángulo de 45° de 4 PTR para soporte de la repisa.</p>  <p>Unión de los PTR por medio de la soldadura MMA con electrodo revestido E6013.</p>  <p>Corte del PTR de longitud 418.46 mm, para la estructura de la repisa.</p>  <p>Corte y perforación de la base de lámina para la repisa.</p>  <p>Armado de la repisa, unión de la base de lámina con los PTR, por medio de la soldadura MMA con electrodo revestido E308.</p>  <p>Trazado, corte y perforación de la lámina, para base de sujeción del RANLEF, 2 piezas.</p>  <p>Unión de las pestañas de la base de sujeción del RANLEF por medio de la soldadura TIG con electrodo ER308.</p>  <p>Doble de las pestañas de la base de sujeción.</p>  <p>Armado de dos abrazaderas, unión de las piezas por medio de la soldadura MMA con electrodo revestido E308.</p>  <p>Corte de 4 PTR para las abrazaderas.</p>  <p>Trazado, corte, rolado, doblez y perforación de la abrazadera, 2 piezas.</p>  <p>Limado y limpieza de las piezas para el armado de la estructura.</p> 	<p>REPISA PARA LAS BOMBAS</p>  <p>BASE DE SUJECIÓN DEL RANLEF</p>  <p>ABRAZADERAS DE SUJECIÓN DEL RANLEF</p> 

(Continúa en la siguiente pág.)

(Tabla 22. Continuación)

ENTRADA	PROCESO DE MANUFACTURA		PIEZA PROCESADA
MATERIA PRIMA	MAQUINARIA Y HERRAMIENTA	ENSAMBLAJE	ESTRUCTURA
<p>Material de aporte: electrodo revestido acero inoxidable, tipo E308.</p> <p>Material de aporte: electrodo revestido E6013.</p>	<p>-Planta soldadora TIG</p> <p>-Planta soldadora por arco eléctrico</p> <p>-Equipo de protección</p>	<p>La estructura se compone de dos partes desmontables. Colocación de la repisa y abrazaderas por medio de la soldadura manual por arco eléctrico (MMA/SMAW) con electrodo revestido E6013. Colocación de las bases de lámina en la parte superior de la estructura por medio de la soldadura MMA con electrodo revestido E308.</p>	<p>ESTRUCTURA DESMONTABLE</p> 
<p>Tornillo M12: tornillo hexagonal M12 x 25 mm milimétrico de acero inox. T-304.</p> <p>Arandela M14: arandela plana M14, acero inoxidable T-304, DIN 125, métrico.</p> <p>Tuerca M12: tuerca hexagonal M12 milimétrica de acero inoxidable T-304.</p> <p>Perno M22: tornillo de cabeza hexagonal M22 x 114.3 mm, de acero inox. T-304, rosca parcial.</p> <p>Arandela M20: plana A2 de acero inox. T-304, DIN 125, métrico.</p>	<p>-Extractor de tuercas</p> <p>-Llave ajustable</p> <p>-Llave mecánica</p>	<p>Ensamblaje mecánico de la estructura por medio de pernos, tornillos, arandelas y tuercas; anclaje de la estructura al piso de concreto por medio de pernos.</p> 	<p>ESTRUCTURA-RANLEF</p> 

En la elaboración de los procesos de fabricación y ensamblaje del RANLEF a nivel planta piloto, se consideró todo lo necesario para su correcta ejecución.

CAPÍTULO V EVALUACIÓN

En este capítulo se muestra el proceso de análisis estático, para verificar el ensamble y la resistencia mecánica del RAnLEF empleando SolidWorks®.

5.1 Verificar la resistencia mecánica de los elementos del RAnLEF mediante el análisis estático por medio del software CAD/CAE

SolidWorks es un software CAD/CAE más utilizado por ingenieros y diseñadores por su rendimiento para diseñar productos en 3D de forma paramétrica, realiza y valida los procesos de ingeniería; la aplicación de este programa está enfocada al diseño de productos, diseño mecánico, ensambles y dibujos para taller. Cuenta con tres diferentes módulos:

- SolidWorks Premium: diseño de producto 3D
- SolidWorks Simulation: análisis y simulación
- SolidWorks Sustainability: diseño sustentable

El sistema CAD (Diseño Asistido por Computadora) es un software que aborda la automatización global del proceso de diseño de un determinado tipo de objeto y el sistema CAE mecánico (Ingeniería Asistido por Computadora) incluye análisis por elemento finito (AEF), para evaluar las características estructurales.

5.1.1 Análisis del elemento finito (AEF)

El análisis de elementos finitos es un método computarizado para predecir cómo reaccionará un objeto ante las fuerzas, la vibración, el calor, el flujo de fluidos y otros efectos físicos del mundo real. Al ser un método computarizado los coeficientes del modelo son automáticamente calculados por el ordenador a partir de la geometría y propiedades físicas de cada elemento. El objetivo de realizar el análisis de elemento finito es conocer los esfuerzos internos, deformaciones y tensiones que actúan sobre el RAnLEF, empleando el módulo SolidWorks Simulation.

5.1.2 SolidWorks Simulation

SolidWorks Simulation puede realizar diferentes tipos de estudios entre ellos el análisis estático, formula las ecuaciones matemáticas que definen el comportamiento de cada elemento y su conectividad con el resto, las ecuaciones tienen en cuenta las cargas impuestas, fuerza, presiones, etc., las restricciones de movimiento del modelo sujeciones y las propiedades mecánicas del material. La resolución de cada una de las ecuaciones planteadas para cada uno de los elementos permite conocer los desplazamientos de cada uno de ellos, así como las tensiones y las deformaciones unitarias. Define los resultados en diferentes colores en las herramientas de Post-Procesado (Gómez, 2010). La simulación permite evaluar el Factor de Seguridad (FDS) y rediseñar el modelo para evitar el fallo en las zonas en las que se tiene elevadas tensiones. Un FDS inferior a la unidad indica una falla del material, es decir el factor de seguridad debe ser ($FDS \geq 1$), la falla del material se representa con color rojo al Post-procesador. Un FDS mayor a la unidad indica que el modelo se encuentra sometido a bajas tensiones y tiene la posibilidad de eliminar material al reducir su peso (optimización).

5.1.3 Teorías de falla

Para la fiabilidad del diseño mecánico se hace uso de las teorías de falla, es importante asegurar que cada parte de la máquina sea segura para trabajar en condiciones razonables previsibles, para ello es necesario hacer un análisis de esfuerzos, donde los valores calculados en los componentes se comparen con el esfuerzo del diseño, o con valor permitido bajo condiciones de operación. La forma de calcular el esfuerzo de diseño depende de la manera de aplicar la carga y del tipo de material.

Existen diferentes métodos para predecir una falla, mostrados en la Tabla 23, los factores que intervienen son: la naturaleza de las cargas (estática, repetida e invertida o fluctuante), el tipo de material (dúctil o frágil), la cantidad de actividad de diseño y análisis que se pueda justificar con la naturaleza del componente o producto que se diseñe (Mott, 2006).

Tabla 23.- *Tipo de predicción de fallas.*

Método de predicción de fallas	Empleos
Esfuerzo normal máximo	Esfuerzo estático uniaxial en materiales frágiles
Mohr modificado	Esfuerzo estático biaxial en materiales frágiles
Resistencia de fluencia	Esfuerzo estático uniaxial en materiales dúctiles
Esfuerzo cortante máximo	Esfuerzo estático biaxial en materiales dúctiles [moderadamente conservador]
Energía de distorsión (Von Mises)	Esfuerzo estático biaxial y triaxial en materiales dúctiles [buen método]
Goodman	Esfuerzo fluctuante en materiales dúctiles [un poco conservador]
Gerber	Esfuerzo fluctuante en materiales dúctiles
Soderberg	Esfuerzo fluctuante en materiales dúctiles [moderadamente conservador]

Fuente: Diseño de elementos de máquinas (Mott, 2006).

Los métodos de predicción de fallas se determinan a partir de la ejecución del análisis estático.

Método de la energía de distorsión para esfuerzos estáticos biaxiales o triaxiales en materiales dúctiles

Se ha demostrado que el método de la energía de distorsión es el mejor estimador de la falla para materiales dúctiles bajo cargas estáticas o para esfuerzos normales, cortantes o combinados totalmente reversibles. Requiere la definición del nuevo término esfuerzo de Von Mises, representado por el símbolo σ' que se puede calcular para esfuerzos biaxiales, como los esfuerzos principales máximos y mínimos σ_1 y σ_2 :

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad [10]$$

Se predice que existe falla cuando $\sigma' > s_y$ (resistencia de fluencia) en el método para el esfuerzo biaxial se requiere que el esfuerzo aplicado en la tercera dirección ortogonal σ_z sea cero.

Para diseñar se puede aplicar el factor de diseño N a la resistencia de fluencia, y entonces emplear la ecuación.

$$\sigma' < \sigma_d = \frac{s_y}{N} \quad [11]$$

De la ecuación [11] se obtiene la ecuación de factor de seguridad:

$$N = \frac{s_y}{\sigma'} \quad [12]$$

5.1.4 Análisis estático

El análisis estático permite conocer cómo se deforma el modelo ensayado bajo la acción de cargas y cómo estas se transmiten a través del mismo. El análisis calcula los desplazamientos, las deformaciones unitarias, las tensiones y las fuerzas de reacción que se producen sobre el modelo estudiado cuando se somete a la acción de cargas y a unas restricciones de movimiento (sujeciones), de acuerdo al análisis realizado permitirá conocer si el modelo puede llegar a romper y en caso de hacerlo, por donde se iniciará la fractura (Gómez, 2010).

La aplicación del análisis estático de una pieza mediante SolidWorks Simulation se realiza aplicando un sistema de ecuaciones lineales de equilibrio en cada uno de los elementos finitos establecidos por el mallado del sólido. El cálculo inicial del análisis estático determina los desplazamientos de cada uno de los nodos, calcula la deformación unitaria y las tensiones para cada uno de los puntos como se muestra en la Figura 17.

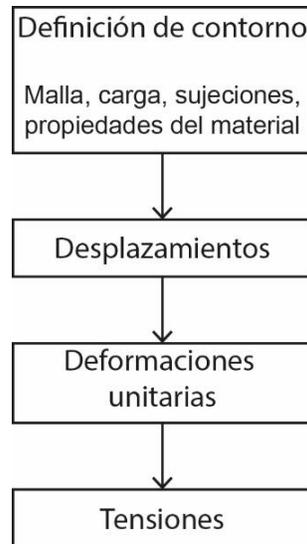


Figura 17.- Etapas en la realización de un análisis (Gómez, 2010).

Inicialmente se debe mallar el modelo, definir las propiedades mecánicas del material, las restricciones de movimiento y las cargas a las que se desea someter. Mediante el software CAE por elementos finitos (AEF) se realizarán estudios de análisis estático de la estructura y el análisis de la presión interna del reactor, aplicando las etapas antes mencionadas.

5.2 Estudio del análisis estático estructural

En esta sección se realiza el estudio del análisis estático de la estructura para el montaje del RAnLEF. Se describen las propiedades de los dos tipos de aceros propuestos para la fabricación de la estructura, así como los cálculos y datos necesarios para la realización del estudio.

5.2.1 Cálculo de las cargas aplicadas a la estructura

Se consideró la densidad de las vinazas mezcaleras cercana a la del agua. Por lo tanto, se calcula con la densidad de $H_2O = 997 \text{ kg/m}^3$.

En la Tabla 24 se muestran las masas del fluido (vinazas), RAnLEF, tuberías y bomba centrífuga aplicadas a la estructura las cuales se calcularon mediante el software SolidWorks.

Tabla 24.- *Cargas aplicadas a la estructura.*

Carga		Masa	Masa total
Carga 1	Fluido	113.16 kg	
	RAnLEF	147.98 kg	
	Tuberías	21.5 kg	
			282.64 kg
Carga 2	Bombas-tuberías	53.44 kg	53.44 kg
Carga 3	Tablero	13 kg	13 kg

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de las cargas aplicadas en la estructura

$$F = mg \quad [13]$$

Donde:

m : masa [kg]

g : aceleración de la gravedad [m/s^2]

Cálculo del peso de la carga 1

$$F_1 = (282.64 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) = 2772.7 \text{ N}$$

Cálculo del peso de la carga 2

$$F_2 = (53.44 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) = 524.25 \text{ N}$$

Cálculo del peso de la carga 3

$$F_3 = (13 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) = 127.53 \text{ N}$$

La estructura tendrá 3 áreas de carga, mostradas en la Figura 18, la mayor fuerza es la del RAnLEF con un peso de 2772.7 N, la cual es el resultado de la suma del peso del fluido y de la tubería.

La segunda carga es la que comprende el peso de 2 bombas, más el peso de la tubería, definiendo el peso final de 524.25 N.

La última carga aplicada a la estructura es la carga del tablero de control con un peso de 127.53 N.

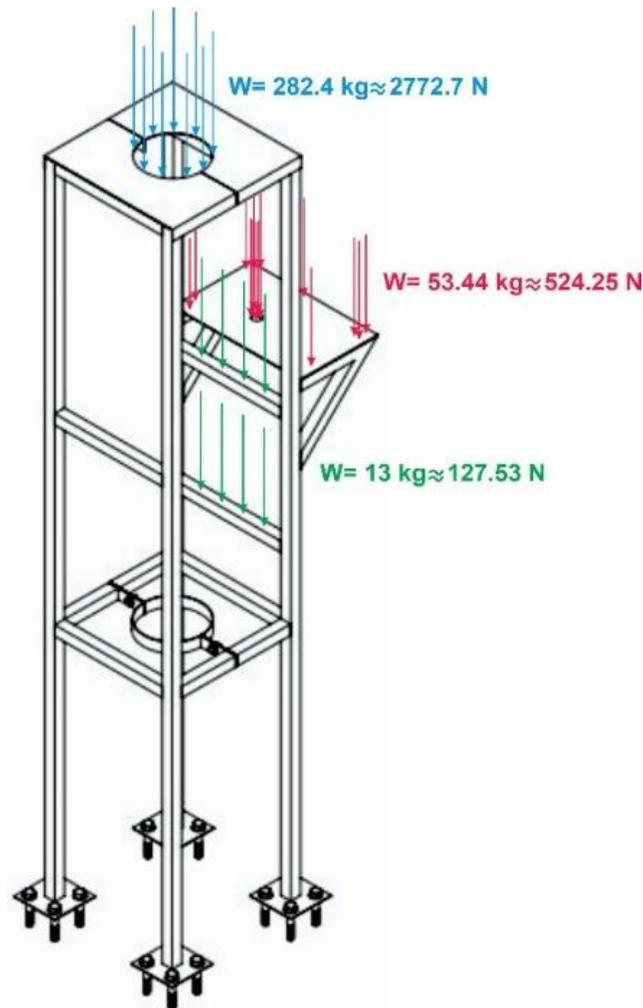


Figura 18.- Diagrama de aplicación de cargas a la estructura. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades del material empleado para la fabricación de la estructura:

Acero inoxidable AISI 304

- Densidad= 8000 kg/m³
- Módulo elástico= 1.9e+11 N/m² ≈ 190 GPa
- Límite elástico=206807000 N/m²
- Resistencia a la fluencia= 310 MPa
- Elongación= 40%

Acero galvanizado

- Densidad= 7870 kg/m³
- Módulo elástico= 2e+11 N/m² ≈ 200 GPa
- Límite elástico=203943242.6 N/m²

El análisis se efectuó en SolidWorks Simulation, mediante estudios estáticos que incluye conexiones, sujeciones, cargas externas y malla:

Sujeciones: se aplicaron 4 sujeciones fijas, en la cual será anclada la estructura al piso, como se observa en la Figura 19.

Una vez definidas las cargas a aplicar en la estructura se realiza el AEF.

Cargas externas: las cargas que actúan sobre la estructura.

- Fuerza 1= 2772.7 N
- Fuerza 2= 524.25 N
- Fuerza 3= 127.53 N

Malla:

- Densidad de malla: fina, el tamaño fino permite obtener resultados más precisos.
- Parámetros de mallado: malla basada en curvatura.

Tipo de resultado: Tensión nodal Von Mises

Los colores cálidos (rojo, amarillo) representan las mayores tensiones mientras que los colores más fríos (azules y verdes) representan las menores tensiones en el modelo.

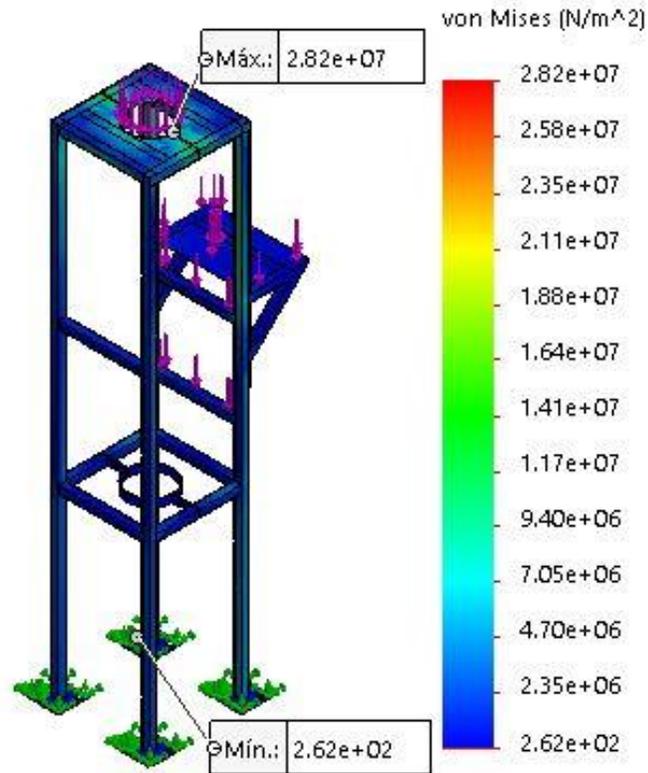


Figura 19.- Tensión.

La máxima tensión que presenta la estructura es $2.82e+07$ N/m² en la arista con mayor carga mostrada en la Figura 19. La tensión define la intensidad de las fuerzas aplicadas sobre el modelo por unidad de sección.

Tipo de resultado: Desplazamiento

Los colores cálidos (rojo, amarillo) representan las zonas con mayores deformaciones mientras que los colores más fríos (azules y verdes) representan las zonas que prácticamente no se han deformado.

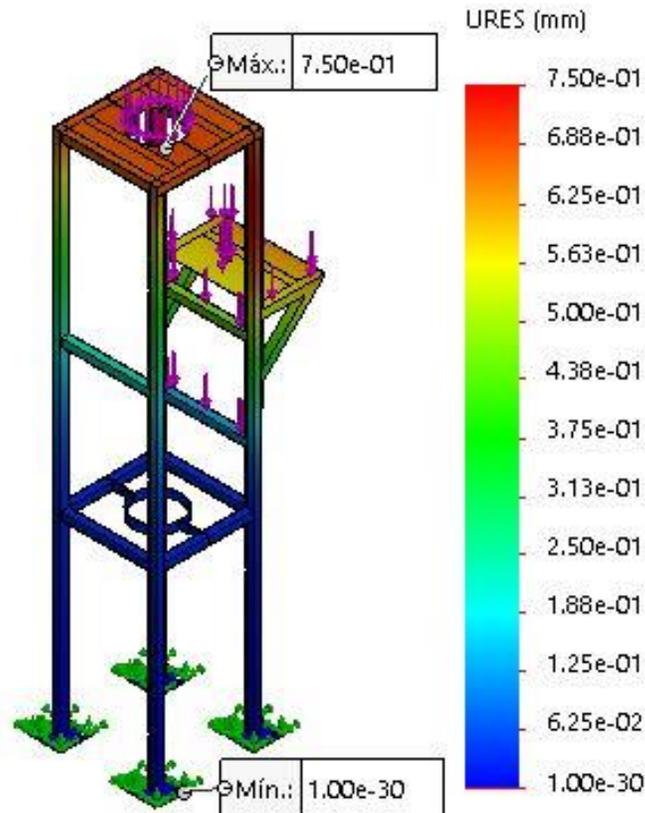


Figura 20.- Desplazamiento.

El máximo desplazamiento del análisis estático de la estructura es 7.50e-01 mm en la arista con mayor carga, como se muestra en la Figura 20. El análisis presentó valores muy pequeños de desplazamiento, por lo que demuestra que los materiales empleados para la fabricación de la estructura soportaran las cargas aplicadas.

Tipo de resultado: Factor de seguridad (FDS)

Distribución de Factor de seguridad: FDS mín. (Tensión de Von Mises máx.) = 5.7 ver fig. 21a); FDS mín. (Tensión de cortadura máx. Tresca) = 5.1 ver fig. 21b).

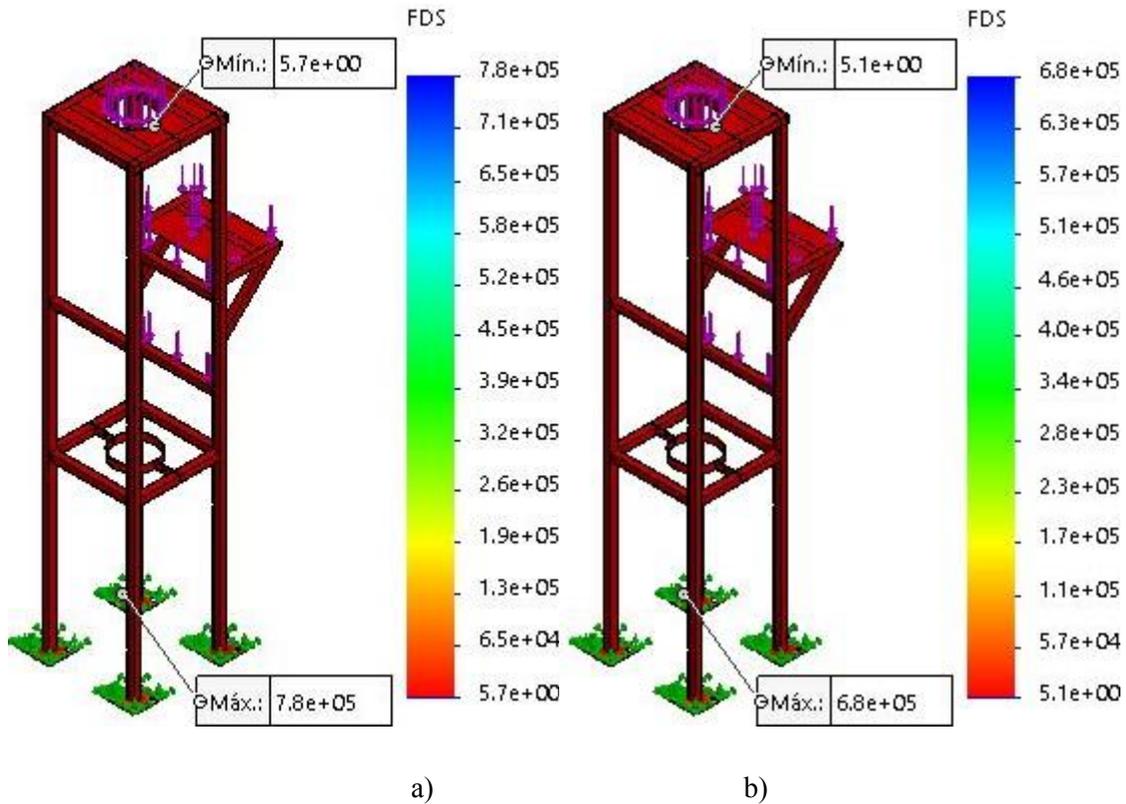


Figura 21.- a) Tensión de Von Mises máx. y b) Tensión de cortadura máx. (Tresca).

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis, el diseño presenta un factor de seguridad mínimo de 5.7, el cual es predominante en la arista de la base de la estructura, indicando que las cargas aplicadas son mayores en esa área, pero aun así son capaces de soportar 5.7 veces esas cargas, lo cual hace factible el diseño final de la estructura al no presentar ningún problema de deformación permanente, con los parámetros de diseño utilizados y los materiales propuestos, en tensión Von Mises es aceptable.

5.3 Estudio del análisis de esfuerzos en recipientes a presión de pared delgada

En este apartado se determinan las ecuaciones para realizar el análisis de recipientes a presión de pared delgada, análisis que se realizará en las tres partes principales del reactor aplicando la presión hidrostática ejercida por el peso del líquido sobre las paredes. Los recipientes de pared delgada constituyen una aplicación importante del análisis de esfuerzo plano. Como sus paredes oponen poca resistencia a la flexión, puede suponerse que las fuerzas internas ejercidas sobre una parte de la pared son tangentes a la superficie del recipiente ver Fig.22.

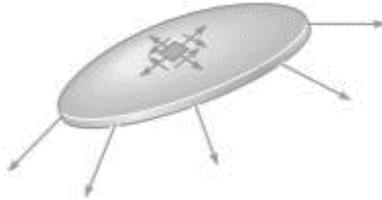


Figura 22.- Distribución de esfuerzos supuesta en recipientes a presión de pared delgada (Beer, 2017).

Los esfuerzos normales σ_1 y σ_2 son los esfuerzos principales. El esfuerzo σ_1 se conoce como esfuerzo tangencial o de costilla; el esfuerzo σ_2 es el esfuerzo longitudinal, r es el radio interior y t espesor de pared, mostrados en la Figura 23.

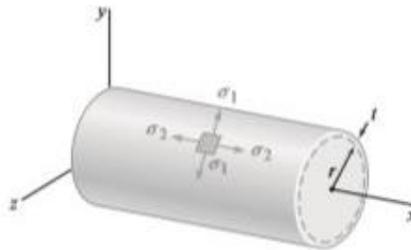


Figura 23.- Recipiente cilíndrico presurizado (Beer, 2017).

La ecuación de equilibrio $\Sigma F_z = 0$:

$$\sigma_1 (2t\Delta x) - P(2r\Delta x) = 0 \quad [14]$$

y al despejar el esfuerzo de costilla σ_1

$$\sigma_1 = \frac{Pr}{t} \quad [15]$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_1 = \frac{Pr}{t} \quad [16]$$

Para determinar el esfuerzo longitudinal σ_2 , se realizará una sección perpendicular al eje x y se considerará el cuerpo libre que consta de la pared del recipiente y de su contenido (Figura 24).

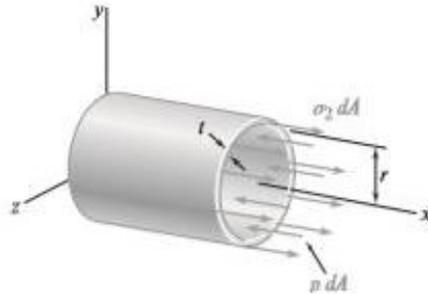


Figura 24.- Diagrama de cuerpo libre (Beer, 2017).

Las fuerzas que actúan en este cuerpo libre son las fuerzas internas elementales $\sigma_2 dA$ en la sección de pared y las fuerzas elementales de presión $p dA$ ejercidas sobre la posición de fluido incluido en el cuerpo libre. El área de la sección de fluido es πr^2 y que el área de la sección de pared puede obtenerse multiplicando la circunferencia $2\pi r$ del cilindro por su espesor de pared t , la ecuación de equilibrio es:

$$\Sigma F_z = 0: \quad \sigma_2(2\pi r t) - P(\pi r^2) = 0 \quad [17]$$

Y al despejar el esfuerzo longitudinal σ_2 :

$$\sigma_2 = \frac{Pr}{2t} \quad [18]$$

Las ecuaciones [1] y [2] el esfuerzo de costilla σ_1 es el doble del esfuerzo longitudinal σ_2 :

$$\sigma_1 = 2\sigma_2 \quad [19]$$

Presentando el círculo de Mohr a través de los puntos A y B que corresponden respectivamente a los esfuerzos principales σ_1 y σ_2 (Figura 25).

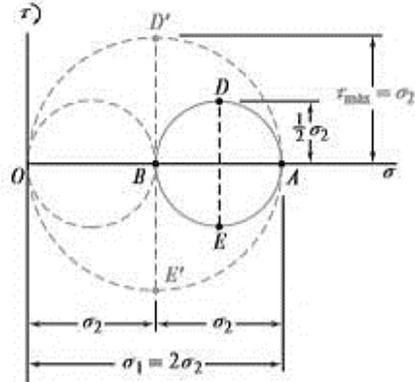


Figura 25.- Círculo de Mohr (Beer, 2017).

El esfuerzo cortante máximo en el plano es igual al radio del círculo, se obtiene:

$$\tau_{\text{máx(en el plano)}} = \frac{1}{2} \sigma_2 = \frac{Pr}{4t} \quad [20]$$

Este esfuerzo corresponde a los puntos D y E y se ejerce sobre un elemento obtenido la rotación de 45° del elemento original de la Figura 25, dentro del plano tangente a la superficie del recipiente. Sin embargo, el esfuerzo cortante máximo en la pared del recipiente es mayor. Es igual al radio del círculo de diámetro OA y corresponde a una rotación de 45° alrededor de un eje longitudinal y fuera del plano de esfuerzo.

$$\tau_{\text{máx}} = \sigma_2 = \frac{Pr}{2t} \quad [21]$$

Los recipientes a presión de pared delgada son una importante aplicación del análisis del esfuerzo plano (2017, Beer). Usando las ecuaciones para recipientes a presión de pared delgada, es posible determinar el estado de esfuerzos plano en cualquier punto dentro del cuerpo cilíndrico

Retomando lo anterior, se resuelve un ejercicio de la literatura empleando las ecuaciones establecidas y el desarrollo del modelado en SolidWorks® para analizar los esfuerzos identificados en el recipiente, con la finalidad de comprobar y demostrar los resultados obtenidos del análisis y los resultados calculados a partir de las ecuaciones (ver Anexo B).

Aplicando los pasos realizados en el ejercicio de la literatura, se hallan los esfuerzos del RAnLEF a partir de las ecuaciones definidas anteriormente y realizando el análisis mediante el software CAD/CAE. A continuación, se calcula la presión hidrostática para determinar la presión que ejerce el fluido sobre las paredes y el fondo del RAnLEF.

5.3.1 Cálculo de la presión hidrostática

Cálculo de la presión hidrostática ejercida por el peso del residuo líquido (vinazas) sobre las paredes y el fondo del RAnLEF, dato importante para realizar el análisis estático a presión. De acuerdo a los análisis químicos realizados por Roble-Gonzáles se determinó que la densidad de las vinazas mezcaleras es cercana a la del agua. Por lo tanto, se calcula con la densidad de H₂O= 997 kg/m³.

Cálculo de la presión hidrostática

$$P = \rho * g * H_{LF} \quad [22]$$

Donde:

P : Presión hidrostática [Pa]

ρ : Densidad del líquido [kg/m³]

g : Aceleración de la gravedad [m/s²]

H_{LF} : Altura del lecho fluidizado [m]

Sustituyendo valores

$$P = (997 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(2.68 \text{ m})$$

$$P = 26211.93 \text{ Pa} \approx 0.02621193 \text{ MPa}$$

A continuación, se describen las propiedades del acero inoxidable 304 material propuesto para la fabricación del RAnLEF, así como los datos necesarios para la realización del estudio.

Acero inoxidable AISI 304

- Densidad= 8000 kg/m³
- Módulo elástico= 1.9e+11 N/m² ≈ 190 GPa
- Límite elástico=2.06807e+08 N/m²
- Resistencia a la fluencia= 310 MPa
- Elongación= 40%

Sujeciones: se aplicaron 2 sujeciones fijas

- 1 Arista, tipo: geometría fija
- 1 Cara, tipo: sobre caras cilíndricas

Cargas externas: Entidades 6 caras

- Presión= 26211.9 N/m²

Malla:

- Densidad de malla: fina
- Parámetros de mallado: malla estándar.

Estudio: Análisis Estático (Presión interna)

Cálculo del esfuerzo normal máximo

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_1 = \frac{Pr}{t} \quad [16]$$

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo normal máximo (σ_1) N/mm² [MPa]

P : Presión [MPa]

r : Radio interior [m]

t : Espesor [m]

Datos:

$$P = 0.02621193 \text{ MPa}, t = 0.00277 \text{ m}, r = 0.108155 \text{ m}$$

Sustituyendo valores

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{(0.02621193 \text{ MPa})(0.108155 \text{ m})}{0.00277 \text{ m}} = 1.02 \text{ MPa}$$

El resultado del análisis de esfuerzo normal máximo realizado en SolidWorks se muestra en la Figura 26.

Calculo del esfuerzo cortante máximo

$$\tau_{m\acute{a}x} = \sigma_2 = \frac{Pr}{2t} \quad [21]$$

Donde:

$\tau_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo cortante máximo (σ_2) N/mm² [MPa]

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{(0.02621193 \text{ MPa})(0.108155 \text{ m})}{2(0.00277 \text{ m})} = 0.51 \text{ MPa}$$

El resultado obtenido de las ecuaciones [16] y [21] se sustituyen en la ecuación [10] para calcular el esfuerzo Von Mises.

Tipo de resultado: Esfuerzo normal máximo

Los colores cálidos (rojo, amarillo) representan las mayores tensiones mientras que los colores más fríos (azules y verdes) representan las menores tensiones en el modelo.

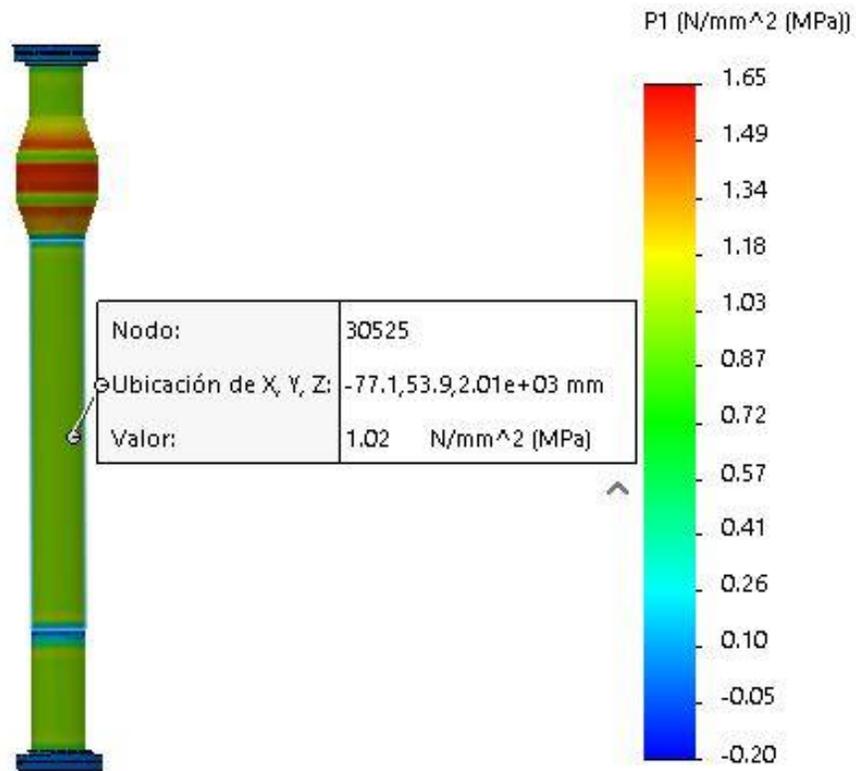


Figura 26.- Esfuerzo normal máximo.

El valor identificado mediante el análisis del esfuerzo normal máximo es 1.02 MPa, mostrado en la Figura 26.

Cálculo del esfuerzo Von Mises

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad [10]$$

Donde:

σ' : Esfuerzo Von Mises N/mm² [MPa]

σ_1 : Esfuerzo normal máximo [MPa]

σ_2 : Esfuerzo cortante máximo [MPa]

Sustituyendo valores

$$\sigma' = \sqrt{1.02^2 + 0.51^2} - (1.02)(0.51) = 0.88 \text{ MPa}$$

Tipo de resultado: Esfuerzo Von Mises

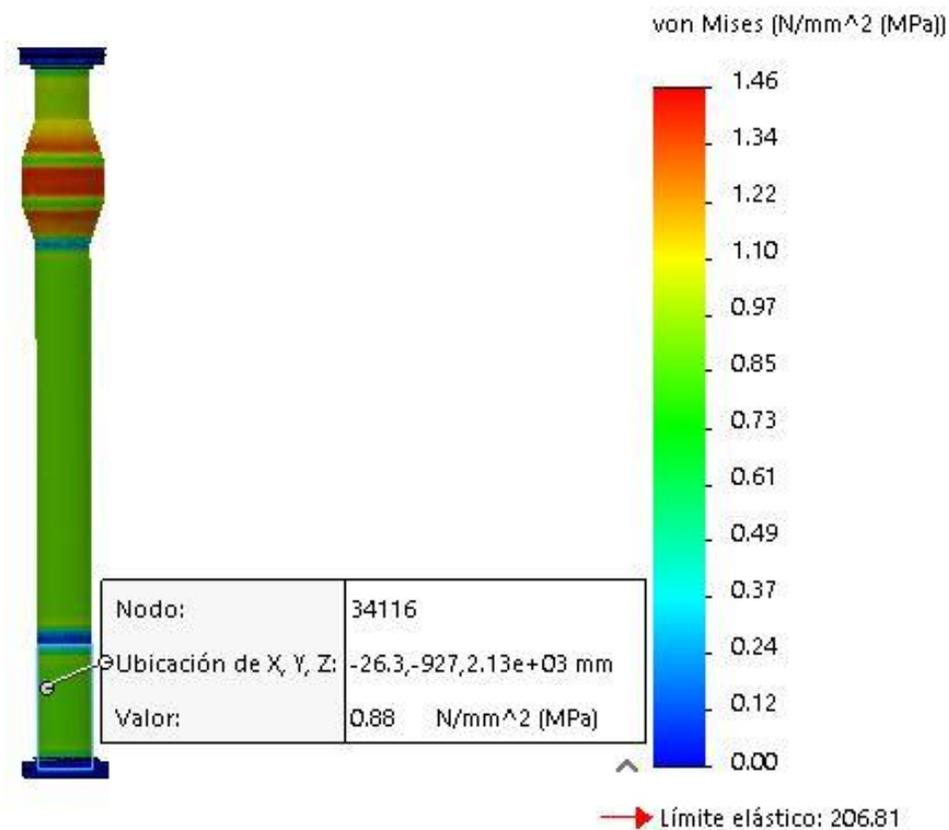


Figura 27.- Esfuerzo Von mises.

El valor identificado por el análisis del esfuerzo Von Mises es de 0.88 MPa y el límite elástico= 206.81, es la máxima tensión que puede soportar el material sin que se produzcan deformaciones permanentes, mostrados en la Figura 27.

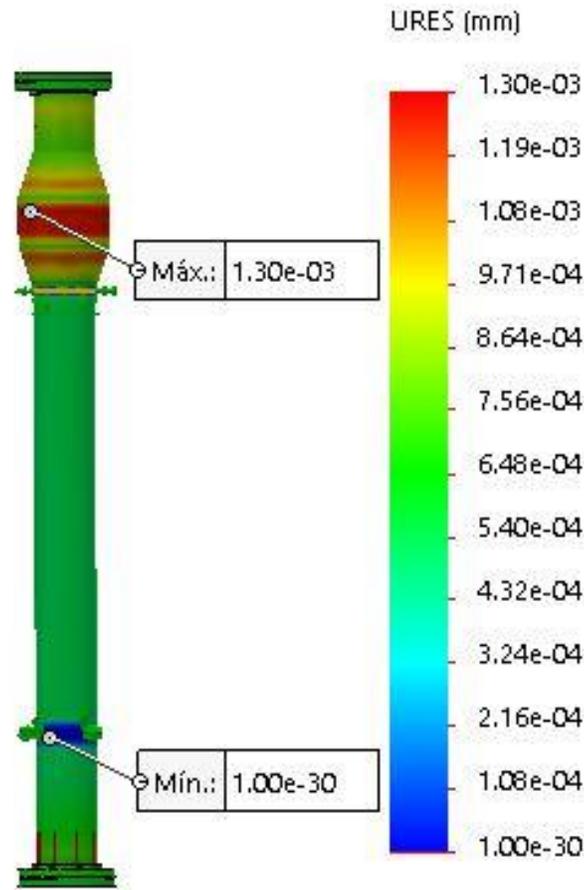
Tipo de resultado: Desplazamiento estático

Figura 28.- Desplazamiento.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de elemento finito realizado en SolidWorks, el diseño presenta un desplazamiento máximo de $1.30 \text{ e}^{-03} \text{ mm}$ en la cámara de expansión y un desplazamiento mínimo de $1.00 \text{ e}^{-30} \text{ mm}$ en la zona del lecho fluidizado, como se observa en la Figura 28. El análisis presentó valores muy pequeños de deformación, por lo que demuestra que los materiales empleados para la fabricación del RANLEF soportaran las cargas aplicadas.

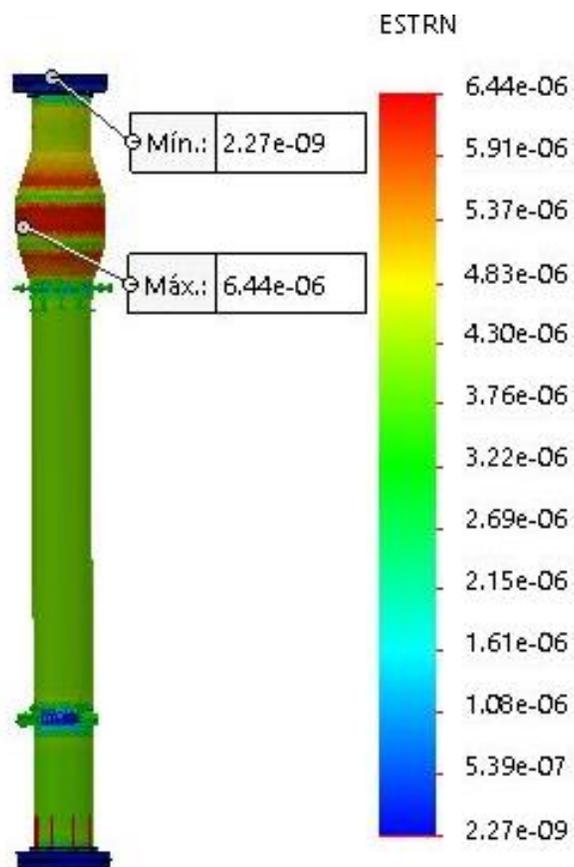
Tipo de resultado: Deformación unitaria estática

Figura 29.- Deformación unitaria.

El diseño presenta la deformación unitaria máxima de 6.44×10^{-6} en la cámara de expansión y la deformación mínima de 2.27×10^{-9} en la tapa superior como se muestra en la Figura 29.

Tipo de resultado: Factor de seguridad (FDS)

El color rojo indica el FDS mínimo y el color azul indica el FDS máximo.

Distribución de Factor de seguridad: FDS mín. (Tensión de Von Mises máx.) = $1.4 \cdot 10^2$ ver Fig. 30a); FDS mín. (Tensión de cortadura máx.) = $1.2 \cdot 10^2$ ver Fig. 30b).

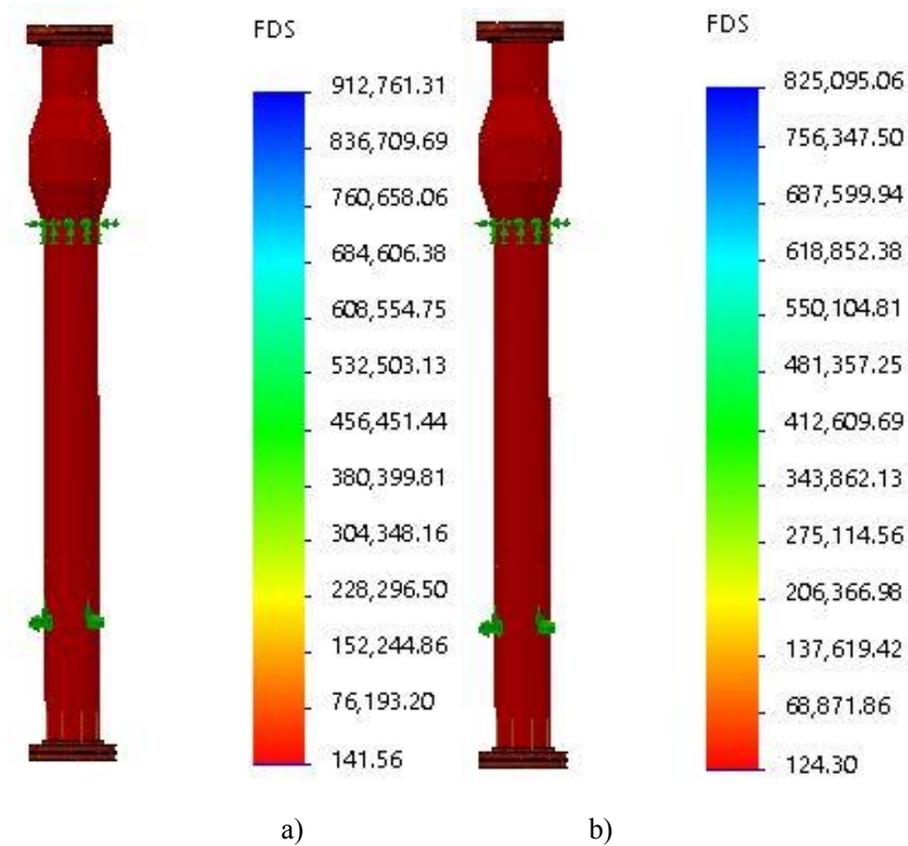


Figura 30.- a) Tensión de Von Mises máx. y b) Tensión de cortadura máx. (Tresca).

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de elemento finito, el diseño presenta un factor de seguridad mínimo de 141.56, debido a la calidad del material aplicado presentó un factor alto, lo cual hace mucho más factible la construcción del RAnLEF con los parámetros de diseño utilizados y los materiales propuestos en tensión Von Mises es aceptable.

5.4 Cálculo de la longitud total de la tubería de alimentación de vinazas en el RAnLEF

En este apartado se realizan los cálculos para determinar la longitud total de la tubería de alimentación de vinazas en el RAnLEF, así como el cálculo de la potencia de la bomba centrífuga utilizada para sustraer las vinazas.

5.4.1 Descripción de alimentación de vinazas al RAnLEF

El RAnLEF se operará en un sistema semi-continuo, para lo cual se establecerán diferentes velocidades de carga orgánica (B_v), la cual se define de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$B_v = \frac{DQO \cdot Q}{V_{LF}} \quad [23]$$

Donde:

DQO= Demanda química de oxígeno presente en las vinazas ($\frac{mgO_2}{m^3}$)

Q= Caudal de alimentación de vinazas sin tratar ($\frac{m^3}{d}$)

V_{LF} = Volumen del lecho fluidizado (m^3)

Una vez establecida las B_v , con la cual se operará el RAnLEF, se sustraerá del reactor un volumen equivalente a un determinado tiempo de retención celular (TRC) y se alimentará el mismo volumen de vinazas sin tratar.

Ejemplo para:

TRC= 1 d (parámetro de operación variable)

V_{LF} = 0.070 m^3 (parámetro de operación fijo)

El caudal de alimentación se define como:

$$Q = \frac{V_{LF}}{TRC} \quad [24]$$

$$Q = 0.070 \frac{m^3}{d} = 8.1 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s}$$

Por lo tanto, se estarían sustrayendo del RAnLEF 0.070 m³ de vinazas tratadas, diariamente con la bomba centrífuga 2 y se adicionaría la misma cantidad de vinazas sin tratar, con la bomba centrífuga 1.

5.4.2 Cálculo de la potencia de la bomba centrífuga

Considerando la ecuación de Bernoulli para el balance de energía mecánica del fluido desde el punto 1 de succión al punto 3 de descarga.

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho} + h_B = h_3 + \frac{v_3^2}{2g} + \frac{P_3}{\rho} + h_{f1-3} \quad [25]$$

Donde:

h_1 = Cota 1, altura del nivel 1

$\frac{v_1^2}{2g}$ = Energía cinética de una unidad de masa de fluido en el nivel 1

$\frac{P_1}{\rho}$ = Trabajo mecánico realizado sobre el fluido por las fuerzas, externas a la corriente, que lo empujan dentro del tubo, nivel 1 (la cual está a presión atmosférica)

h_B = Cabeza de energía que suministra la bomba

h_3 = Altura del nivel de agua a la bomba más la altura de la bomba a la descarga

$\frac{v_3^2}{2g}$ = Energía cinética de una unidad de masa de fluido a la descarga

$\frac{P_3}{\rho}$ = Trabajo mecánico realizado sobre el fluido por las fuerzas, externas al corriente recuperado del fluido que sale del tubo

h_{f1-3} = Perdida de fricción que existe en toda la línea, desde la tubería de succión hasta la tubería de descarga

Consideraciones:

h_1 = 0 Nivel cero

$\frac{v_1^2}{2g} = 0$ El nivel se mantiene constante

$P_1 = P_3$ Se encuentran a presión atmosférica

Eliminando los términos mencionados anteriormente de la ecuación [25], se obtiene:

$$h_B = h_3 + \frac{v_3^2}{2g} + h_{f1-3} \quad [26]$$

Perdidas por fricción h_{f1-3}

$$h_{f1-3} = \frac{v_3^2}{2g} \left[f \frac{L}{D} + \sum k_c + k_x \right] \quad [27]$$

Donde:

f = Factor de fricción de Darcy

L = Longitud de la tubería (m)

D = Diámetro interno de la tubería (m)

V = Velocidad media del fluido ($\frac{m}{s}$)

g = Aceleración de la gravedad (9.80665) ($\frac{m}{s^2}$)

k_c = Aditamento por codo de 90°

k_x = Aditamento distinto de codo de 90°

f depende del número de Reynolds

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} \quad [28]$$

Donde:

μ = Viscosidad del agua $1.005 \times 10^{-3} Pa \cdot s$

$$\rho_{H_2O} = 998 \frac{Kg}{m^3}$$

Cuando:

$Re > 4000$ es régimen turbulento

$Re < 2000$ entonces:

$$f = \frac{64}{Re} \quad [29]$$

$D = 0.02664$ m de diámetro interno para tubería de acero inoxidable de 1" cédula 40

Cálculo de la velocidad media del fluido (v_3)

$$v_3 = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad [30]$$

Considerando el caudal de alimentación de vinazas al RAnLEF de $Q = 0.070 \frac{m^3}{d}$

$$Q = 8.1 \times 10^{-7} \frac{m^3}{s}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi * (0.02664 \text{ m})^2}{4} = 5.57 \times 10^{-4} m^2$$

$$v_3 = 1.45 \times 10^{-3} \frac{m}{s}$$

Cálculo del número de Reynolds

Sustituyendo los valores de velocidad media del fluido, viscosidad y diámetro interno de la tubería en la ecuación [28]

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{1.45 \times 10^{-3} * 0.02664 * 998}{1.005 \times 10^{-3}} = 38.4$$

Por lo tanto, el factor de fricción de Darcy es igual a:

$$f = \frac{64}{Re} = 1.66$$

Cálculo de las pérdidas por fricción empleando la ecuación [27]

$$h_{f1-3} = \frac{v_3^2}{2g} \left[f \frac{L}{D} + \sum kc + kx \right]$$

Como primer paso se determinó la longitud total (L) de la tubería considerando las cotas mostradas en la Figura 31.

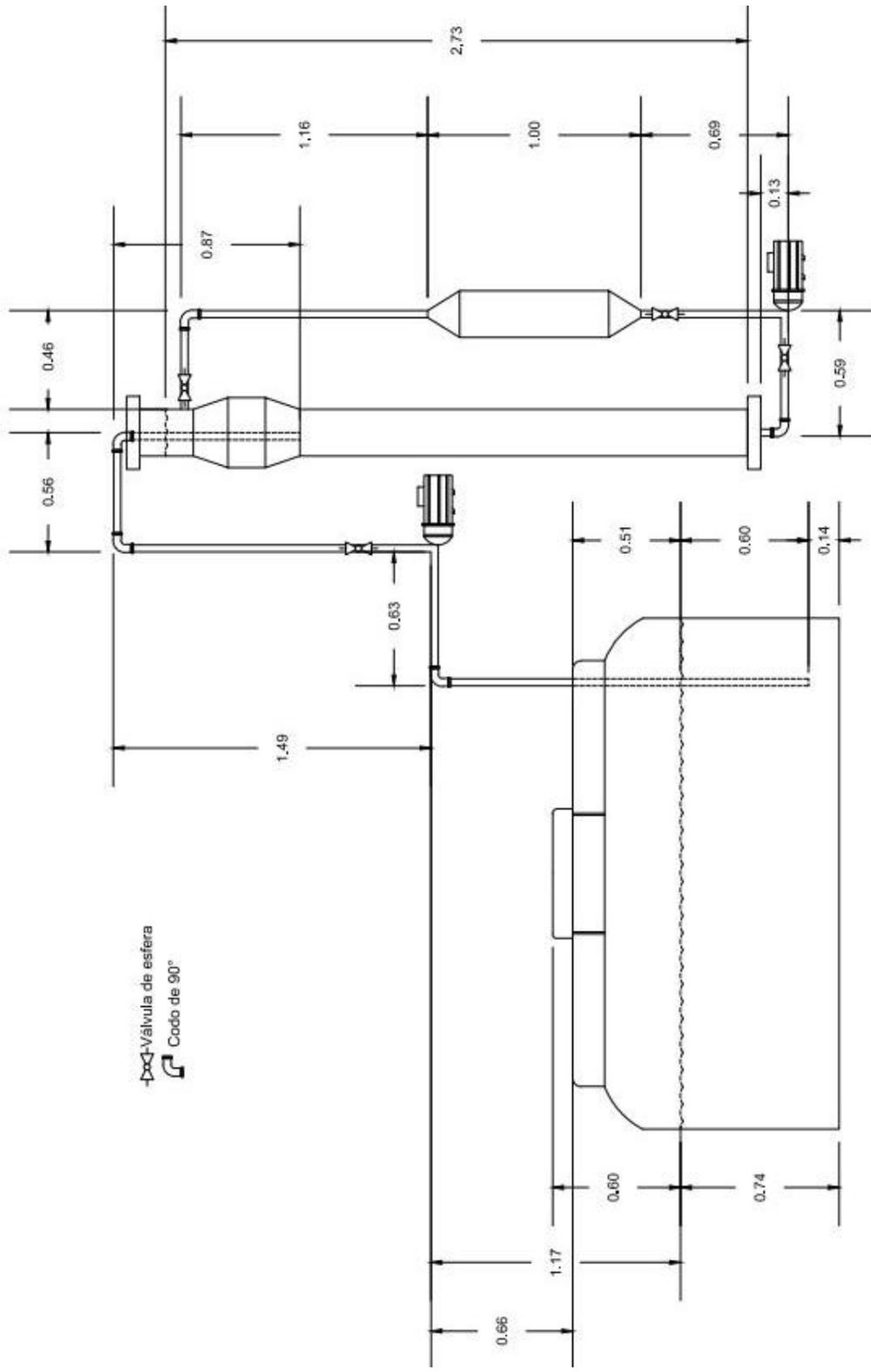


Figura 31. - Esquema para el cálculo de la longitud total de la tubería de alimentación de vinazas en el RAnLEF.

h_1 = Longitud del nivel de la cisterna a la bomba= 1.17 m

h_2 = Longitud de la ubicación de la bomba a la altura de descarga= 1.49 m

L_1 = Longitud de la bomba al RAnLEF + longitud de la cisterna a la bomba=

$$0.56 \text{ m} + 0.63 \text{ m} = 1.19 \text{ m}$$

$$h_1+h_2+L_1= 3.85 \text{ m}$$

L_{s1} = Longitud sumergida a partir del nivel de la cisterna= 0.60 m

L_{s2} = Longitud sumergida en el RAnLEF= 0.87 m

$$h_3= h_1+h_2+L_1+L_{s1}+L_{s2}= 5.32 \text{ m}$$

Cálculo de pérdida de fricción por aditamentos

k_c = Aditamento por codo de 90° = 0.9

Número de codos de 90° = 3

K_v = Aditamento de válvula esférica= 10

Número de válvulas esféricas= 1

$$\Sigma_{\text{accesorios}} = 0.9 * 3 + 10 * 1 = 12.7$$

Sustituyendo los valores en la ecuación [27]

$$h_{f1-3} = \frac{v_3^2}{2g} \left[f \frac{L}{D} + \sum k_c + k_x \right] = 1.1 \times 10^{-7} \text{ m} * \left[1.66 * \frac{5.32 \text{ m}}{0.02664 \text{ m}} + 12.7 \right] = 3.8 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Cálculo de cabeza de energía que suministra la bomba h_B

$$h_B = h_3 + \frac{v_3^2}{2g} + h_{f1-3}$$

$$\frac{v_3^2}{2g} = \frac{(1.45 \times 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2(9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})} = 1.1 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$h_B = 5.32 \text{ m} + 1.1 \times 10^{-7} \text{ m} + 3.8 \times 10^{-5} \text{ m} = 5.32 \text{ m}$$

Se puede observar que no existe pérdida por fricción debido a la longitud y el número de accesorios presentes en la instalación.

Cálculo de la Potencia de la bomba

$$P_B(\text{hp}) = \frac{Q\rho gh_B}{746 e} \quad [31]$$

Donde:

$$Q = \text{caudal de alimentación} = 8.1 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\rho = \text{densidad del fluido} = 998 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$g = \text{aceleración de la gravedad} = 9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$h_B = 5.32 \text{ m}$$

Factor de conversión

$$1 \text{ hp} = 746 \text{ W}$$

Sustituyendo los valores antes mencionados en la ecuación [31].

$$P_B = \frac{Q\rho gh_B}{746 e} = \frac{8.1 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 998 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 5.32 \text{ m}}{746 \text{ W}} = \frac{0.042 \frac{\text{Kgm}^2}{\text{s}^3}}{746 \text{ W}} = 5.7 \times 10^{-5} \text{ hp}$$

Debido a que el valor calculado para la potencia de la bomba centrífuga, que se requiere para realizar la alimentación y purga de vinazas en el RAnLEF, es inferior a cualquier capacidad de bombas centrífugas existentes en el mercado, se propone una bomba centrífuga de la menor capacidad, la cual corresponde a 0.25 hp.

Para la bomba de recirculación de vinazas en el RAnLEF se realizarán pruebas para obtener la velocidad mínima de fluidización y caudal operativo, tomando como base la ecuación de Ergun (McCabe et al., 2007). Por lo que se propone utilizar una bomba centrífuga de 2 hp y un variador de velocidad, con lo cual se ensayaran diversos caudales y se determinará la velocidad mínima de fluidización.

5.5 Disponibilidad de equipos y herramientas en los talleres de la UTM para la manufactura del RAnLEF

La Universidad Tecnológica de la Mixteca UTM cuenta con dos talleres: Metalmecánica y Manufactura, existen diferentes áreas para la ejecución de las operaciones de producción, cada estación de trabajo cuenta con equipos y herramientas de apoyo para la elaboración y ensamblado de las piezas.

En la siguiente tabla se describe el tipo de trabajo a realizar, que herramientas o equipos se requiere para fabricar las piezas del RAnLEF y los talleres que cuentan con equipos que se requiere para realizar el trabajo.

Tabla 25.- *Herramientas y equipos de los talleres de la UTM.*

Trabajo	Herramienta	Equipo	Taller
Barrenado de bridas	Broca de 1 3/8"	Torno de banco	Manufactura
Corte de tubos	Arco con segueta Escuadra	Sierra cinta	Metalmecánica
Corte de lámina	Disco de corte fino	Máquina de cizalla Esmeriladora	Metalmecánica
Rolado de lámina	Vernier	Roladora	Metalmecánica
Unión con soldadura	Arco soldadura	Máquina de soldadura TIG Máquina de soldadura MMA	Metalmecánica
Pulido de piezas Rebabas	Lima bastarda	Pulidora	Metalmecánica

Los talleres de la UTM facilitan la fabricación de las piezas que son necesarias manufacturar para cumplir con su función, ya que cuentan con suficientes herramientas y equipos para manufacturar los componentes del RAnLEF.

CAPÍTULO VI PROTOTIPO VIRTUAL

Este capítulo es dedicado a mostrar el Reactor Anaerobio de Lecho Fluidizado, para el tratamiento de Vinazas Mezcaleras, con volumen de 123 L a nivel planta piloto de Acero Inoxidable 304, con apoyo de láminas de presentación de producto y dibujos técnicos. Resultado de investigaciones, cálculos, análisis y evaluaciones, presentados en los capítulos anteriores.

A continuación, se muestran las características y especificaciones del prototipo virtual elaborado.



Reactor Anaerobio de Lecho
Fluidizado nivel planta piloto
de acero inoxidable para el
tratamiento de Vinazas
Mezcaleras



Características

Modelo: RAnLEF-VM

Marca: S.T.A.R-V

Especificaciones

Dimensiones: 2915.60 mm x 329.00 mm

Material: Acero Inoxidable T-304

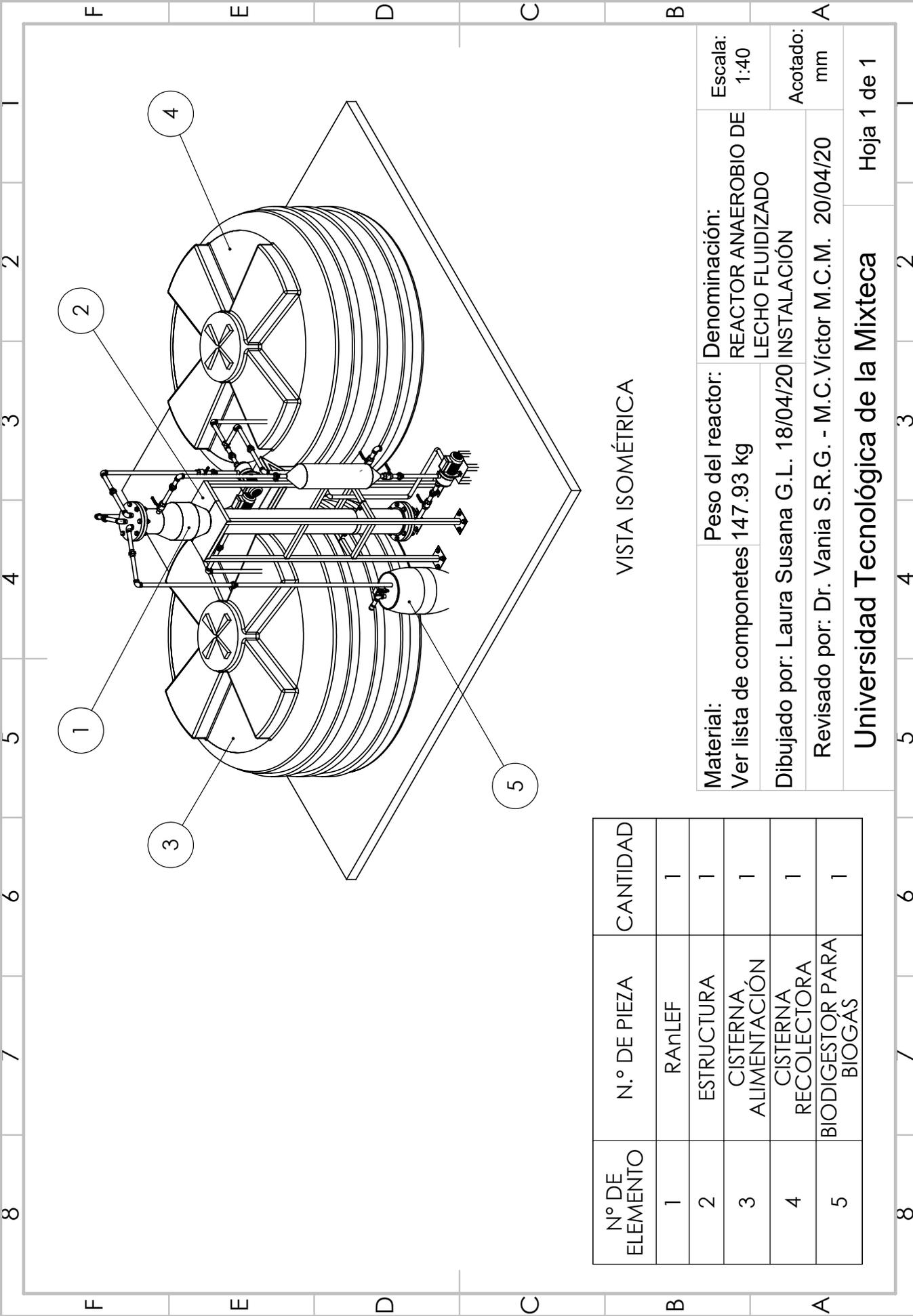
Color: Plateado

Peso: 169.48 kg

Categoría: Reactor industrial

6.1 Dibujos técnicos de los componentes del RAnLEF

El dibujo técnico se emplea para representar piezas o partes de maquinaria. En esta sección se muestran los dibujos técnicos del RAnLEF a nivel piloto.

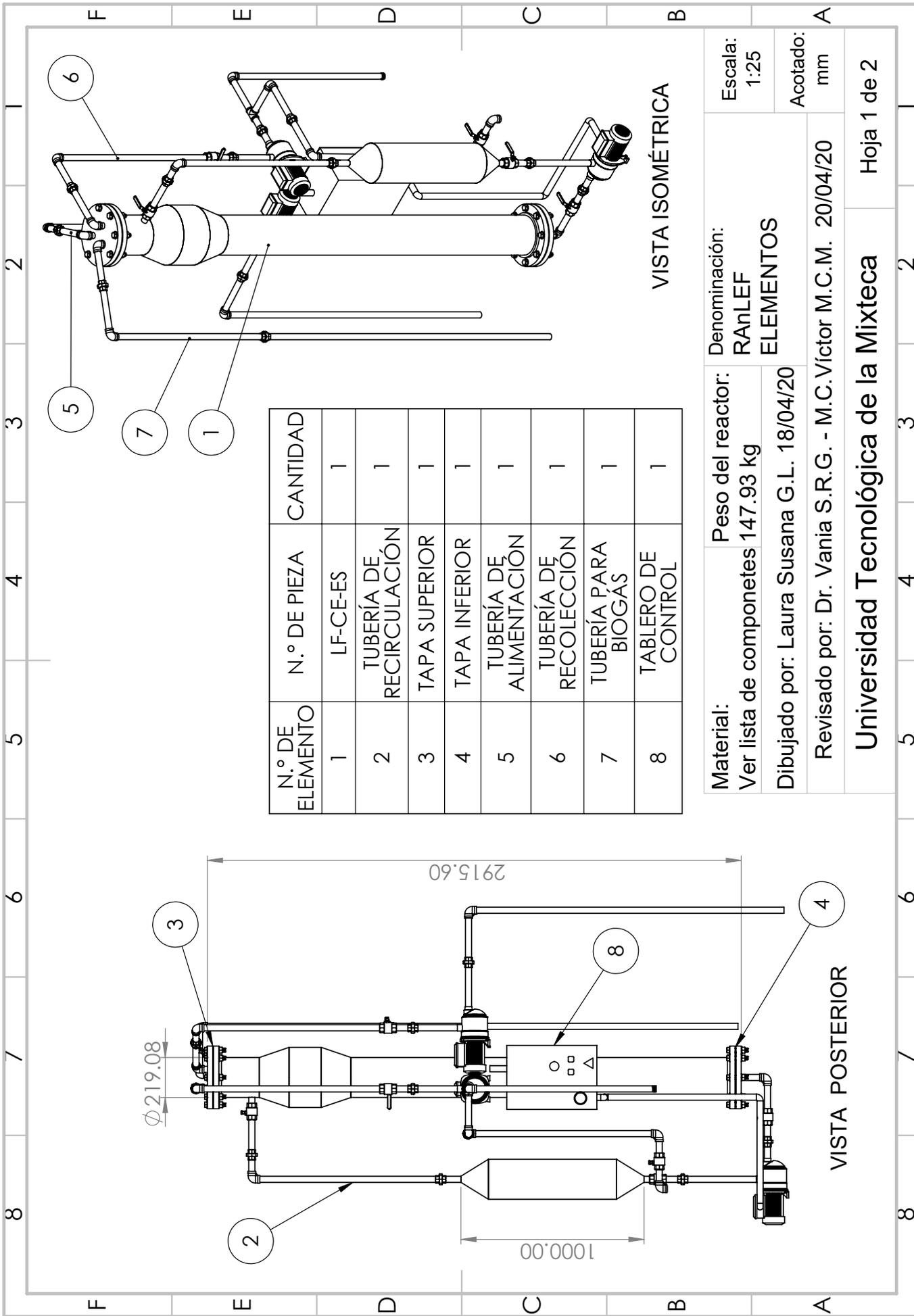


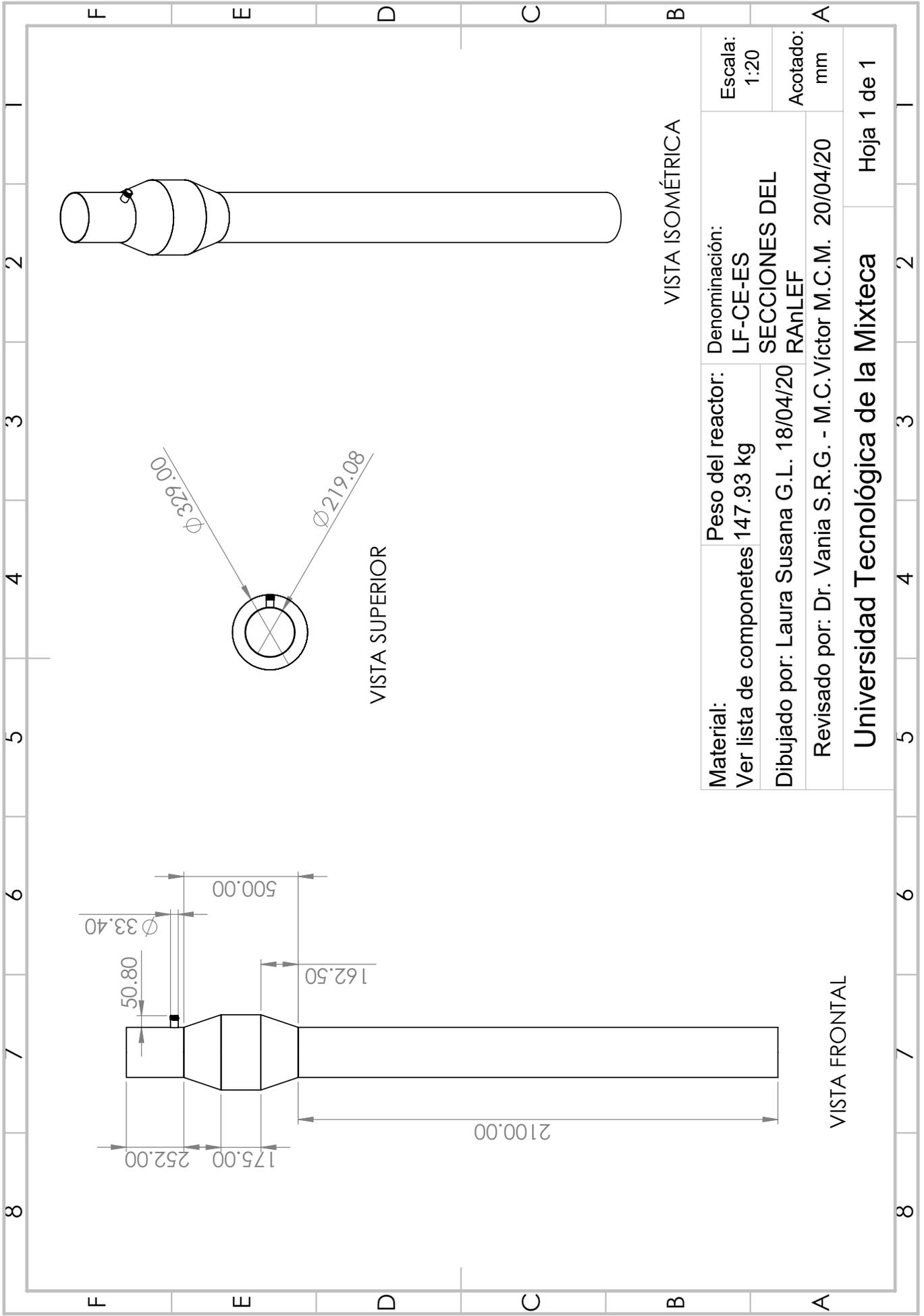
VISTA ISOMÉTRICA

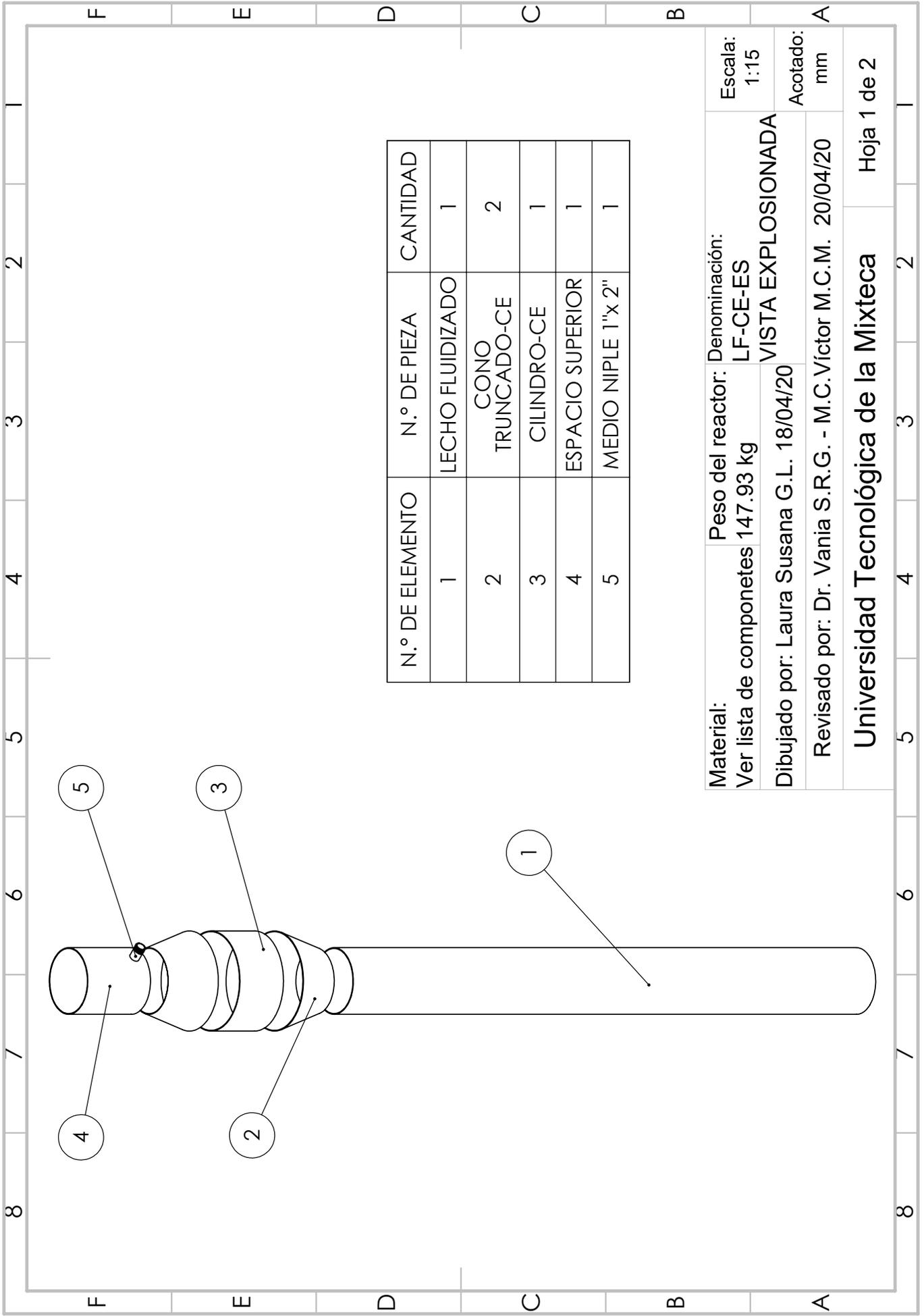
Nº DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	RANLEF	1
2	ESTRUCTURA	1
3	CISTERNA ALIMENTACIÓN	1
4	CISTERNA RECOLECTORA	1
5	BIODIGESTOR PARA BIOGAS	1

Material: Ver lista de componentes	Peso del reactor:	Denominación:	Escala:
	147.93 kg	REACTOR ANAEROBIO DE LECHO FLUIDIZADO	1:40
Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20		INSTALACIÓN	Acotado: mm
Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C.Víctor M.C.M. 20/04/20			

Universidad Tecnológica de la Mixteca Hoja 1 de 1



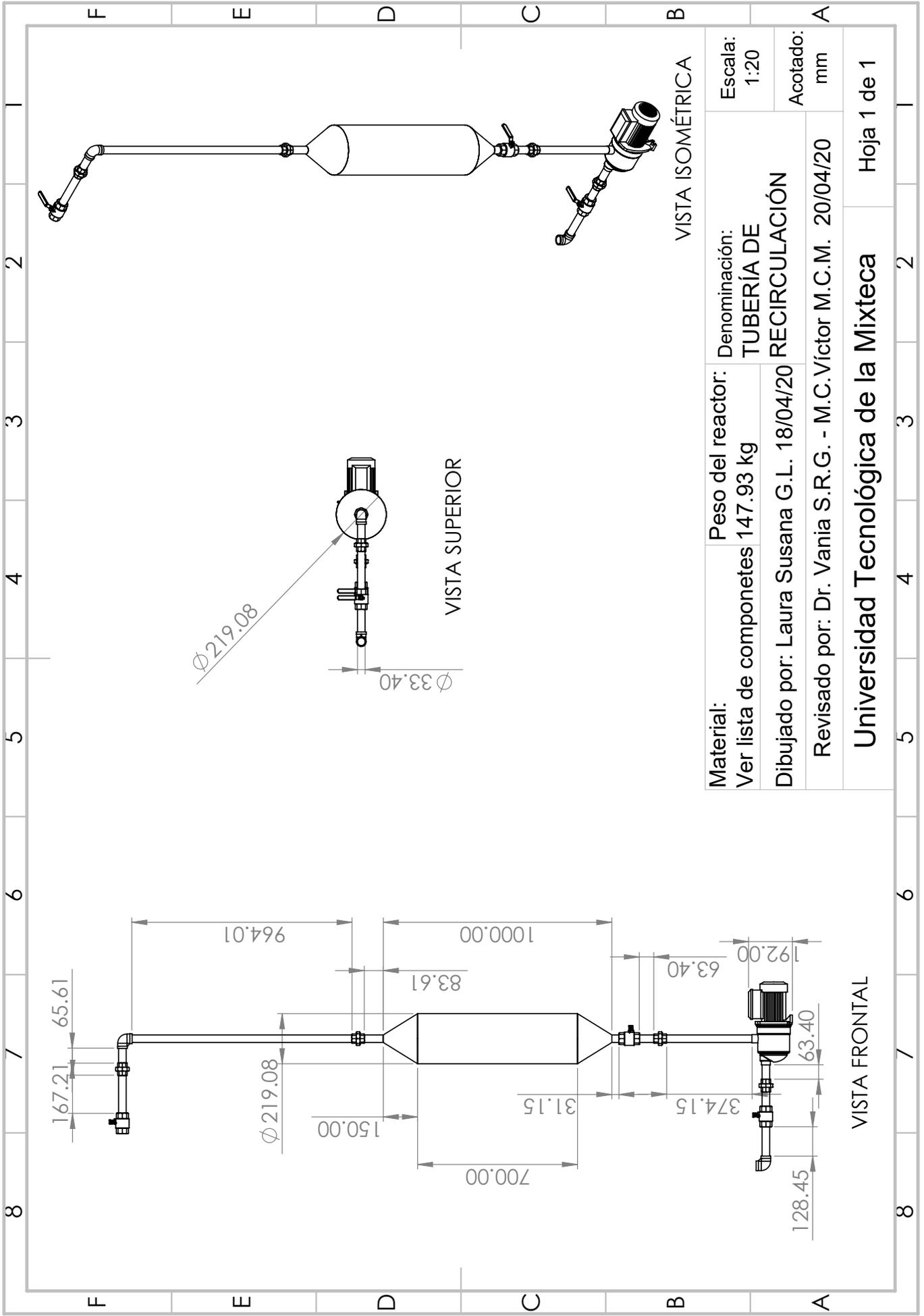


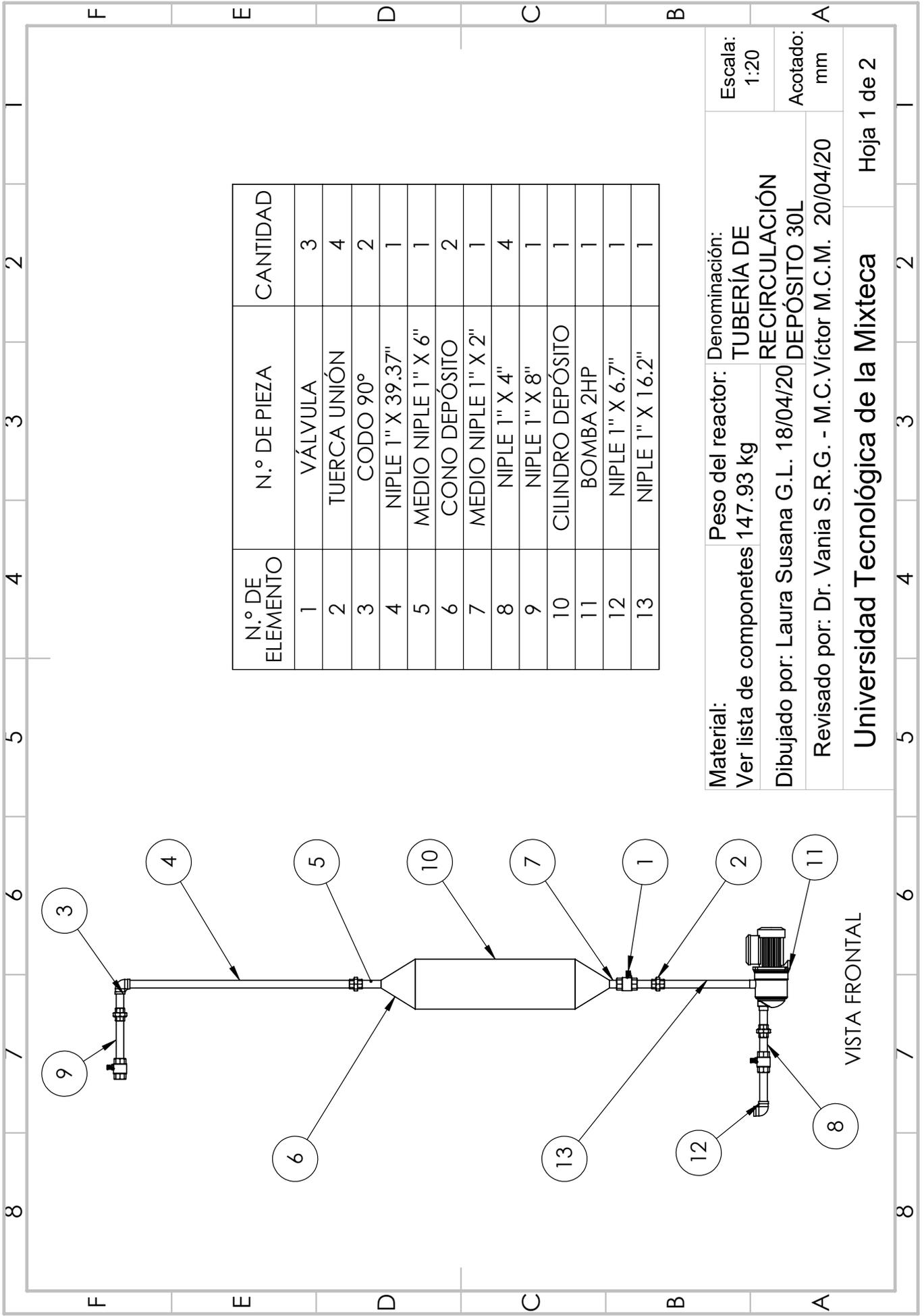


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	LECHO FLUIDIZADO	1
2	CONO TRUNCADO-CE	2
3	CILINDRO-CE	1
4	ESPACIO SUPERIOR	1
5	MEDIO NIPLÉ 1"X 2"	1

Material: **Peso del reactor:** Denominación:
 Ver lista de componentes 147.93 kg LF-CE-ES
 Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20 VISTA EXPLOSIONADA
 Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20 Acotado: mm

Universidad Tecnológica de la Mixteca Hoja 1 de 2





N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	VÁLVULA	3
2	TUERCA UNIÓN	4
3	CODO 90º	2
4	NIPLE 1" X 39.37"	1
5	MEDIO NIPLE 1" X 6"	1
6	CONO DEPÓSITO	2
7	MEDIO NIPLE 1" X 2"	1
8	NIPLE 1" X 4"	4
9	NIPLE 1" X 8"	1
10	CILINDRO DEPÓSITO	1
11	BOMBA 2HP	1
12	NIPLE 1" X 6.7"	1
13	NIPLE 1" X 16.2"	1

Material:

Ver lista de componentes

Peso del reactor:

147.93 kg

Denominación:

TUBERÍA DE
RECIRCULACIÓN
DEPÓSITO 30L

Escala:
1:20

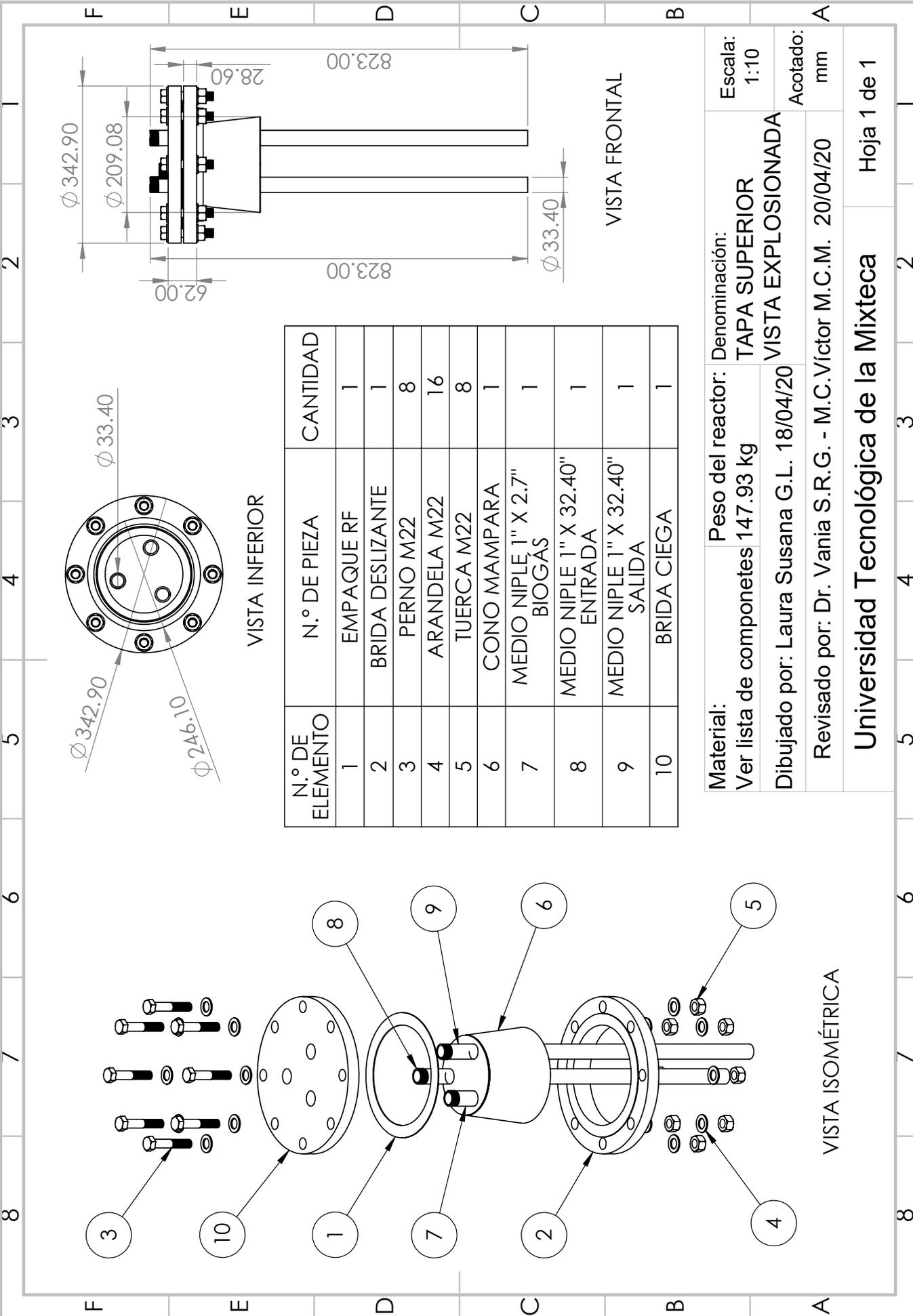
Acotado:
mm

Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20

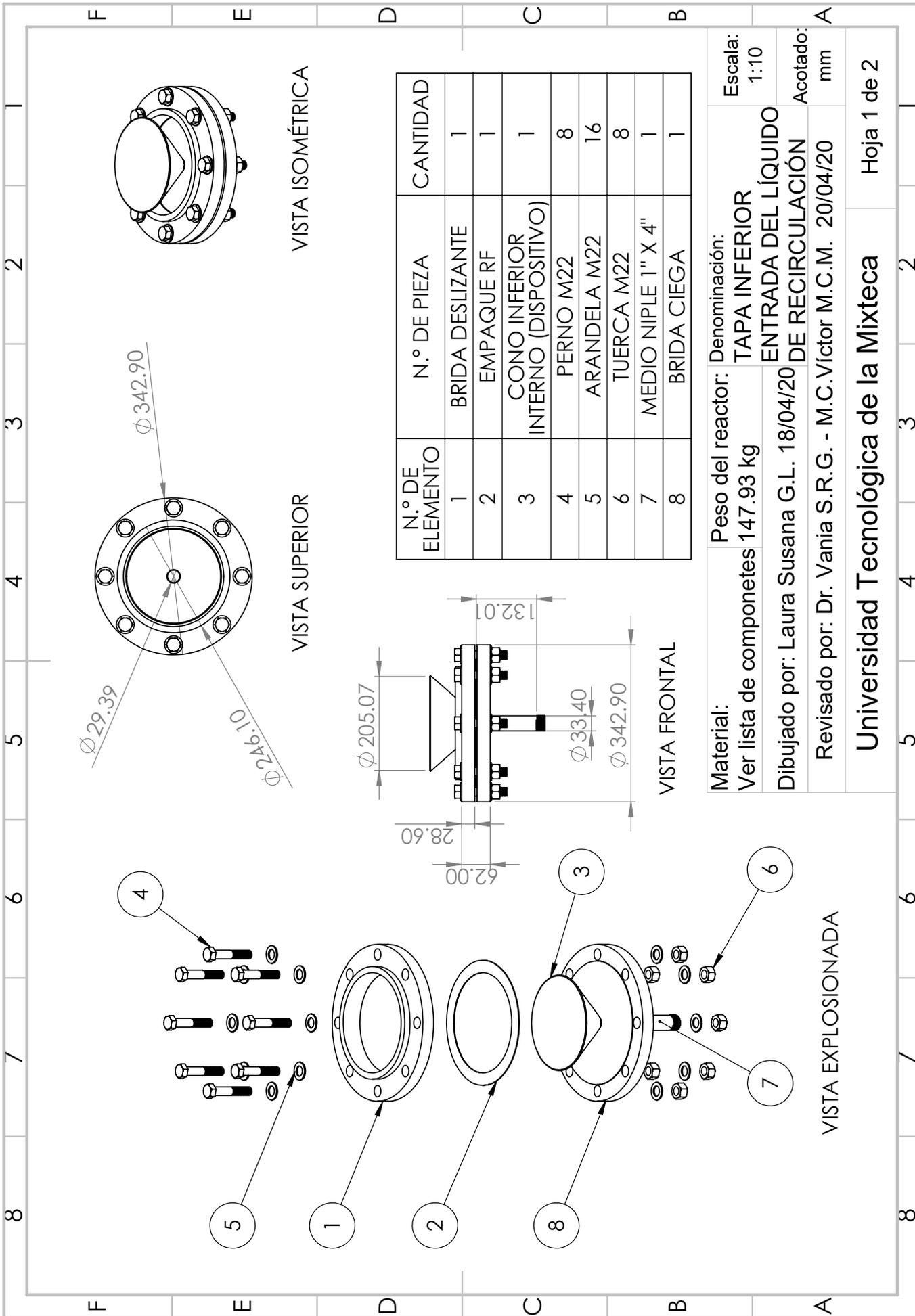
Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20

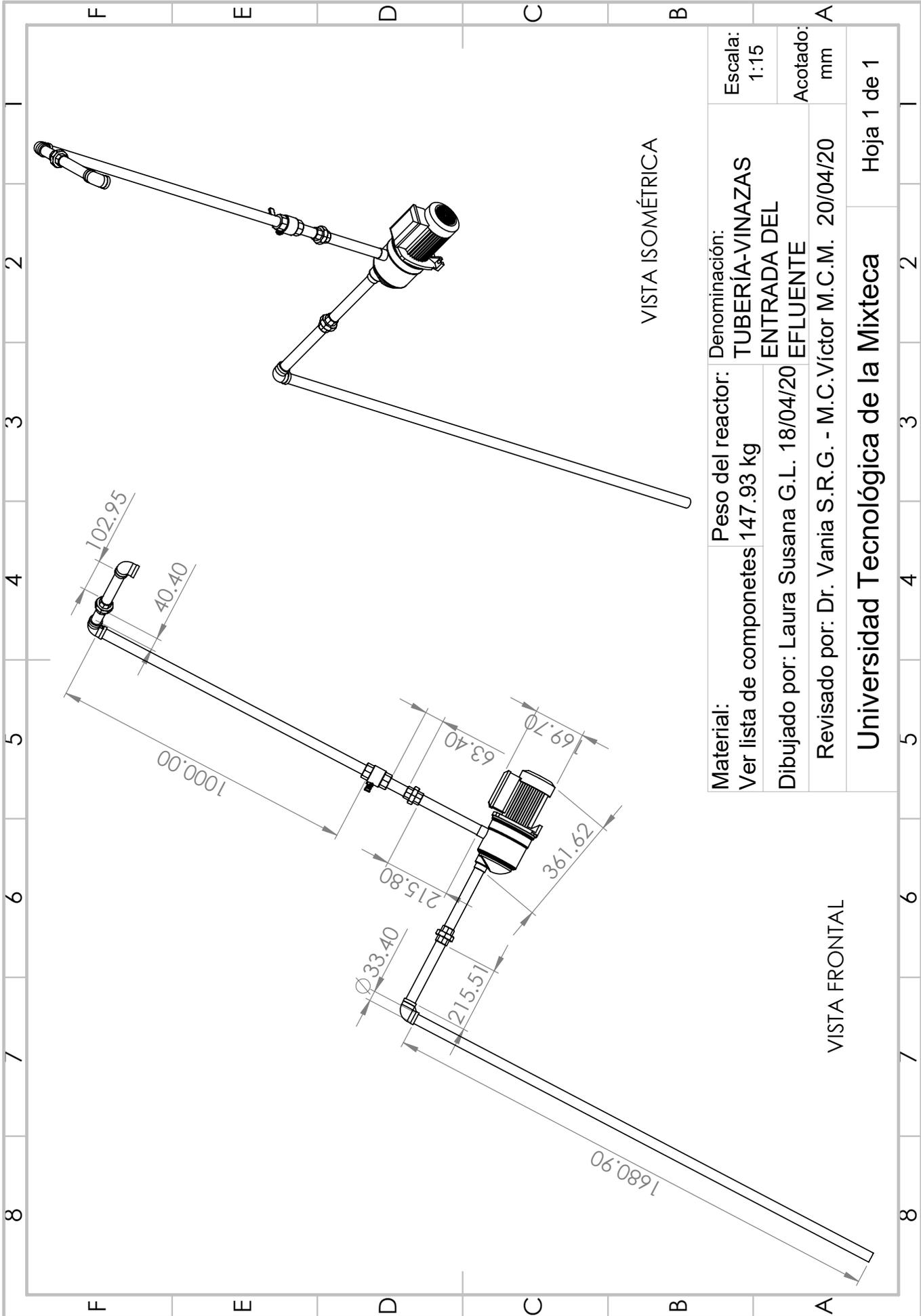
Universidad Tecnológica de la Mixteca

Hoja 1 de 2



Material: Ver lista de componentes
 Denominación: TAPA SUPERIOR
 Escala: 1:10
 Dibuñado por: Laura Susana G.L. 18/04/20
 VISTA EXPLOSIONADA
 Acotado: mm
 Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20



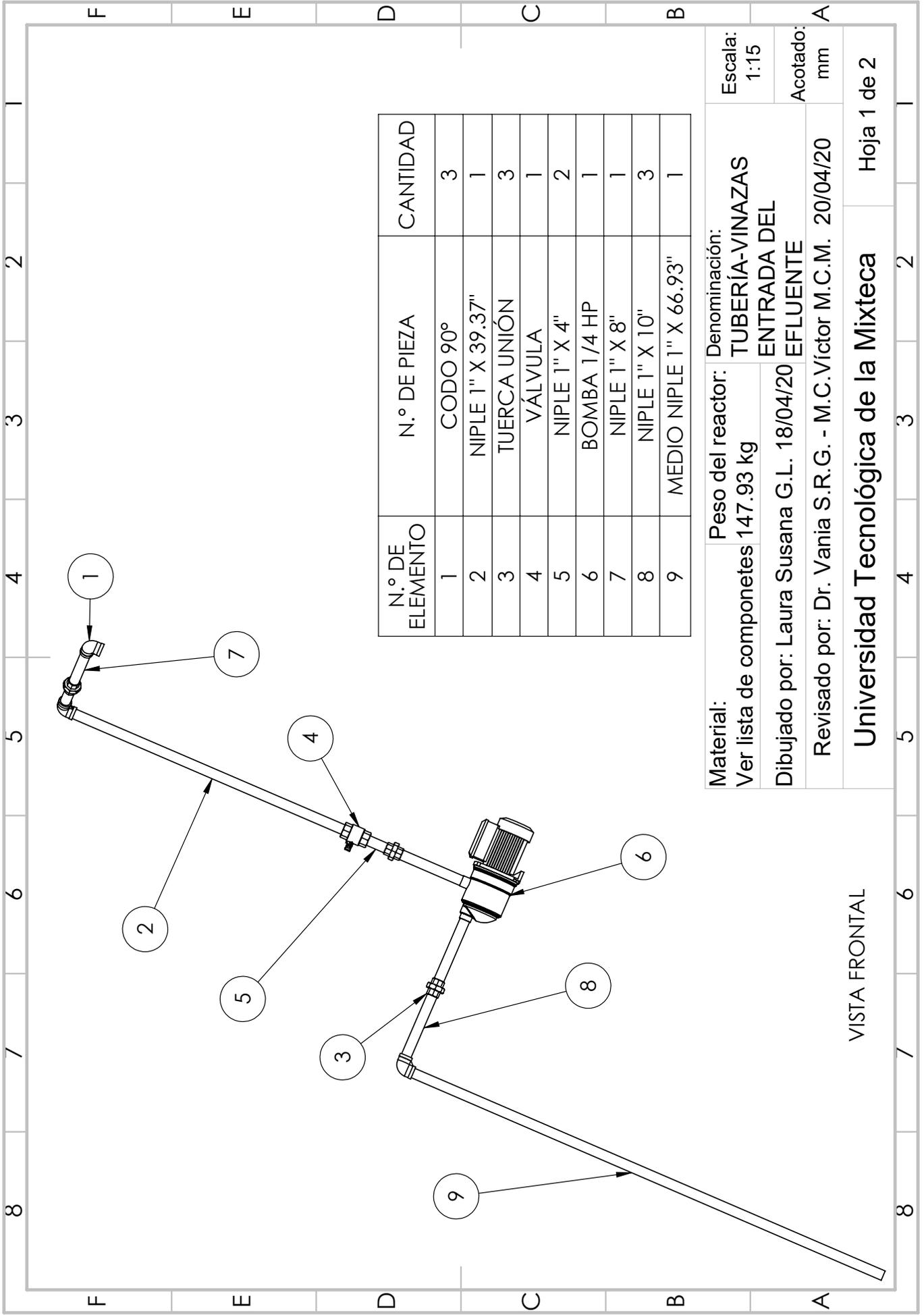


Material: Ver lista de componentes	Peso del reactor: 147.93 kg	Denominación: TUBERÍA-VINAZAS		Escala: 1:15
		ENTRADA DEL EFLUENTE		Acotado: mm
Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20		Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C.Víctor M.C.M. 20/04/20		A

Universidad Tecnológica de la Mixteca Hoja 1 de 1

VISTA FRONTAL

VISTA ISOMÉTRICA



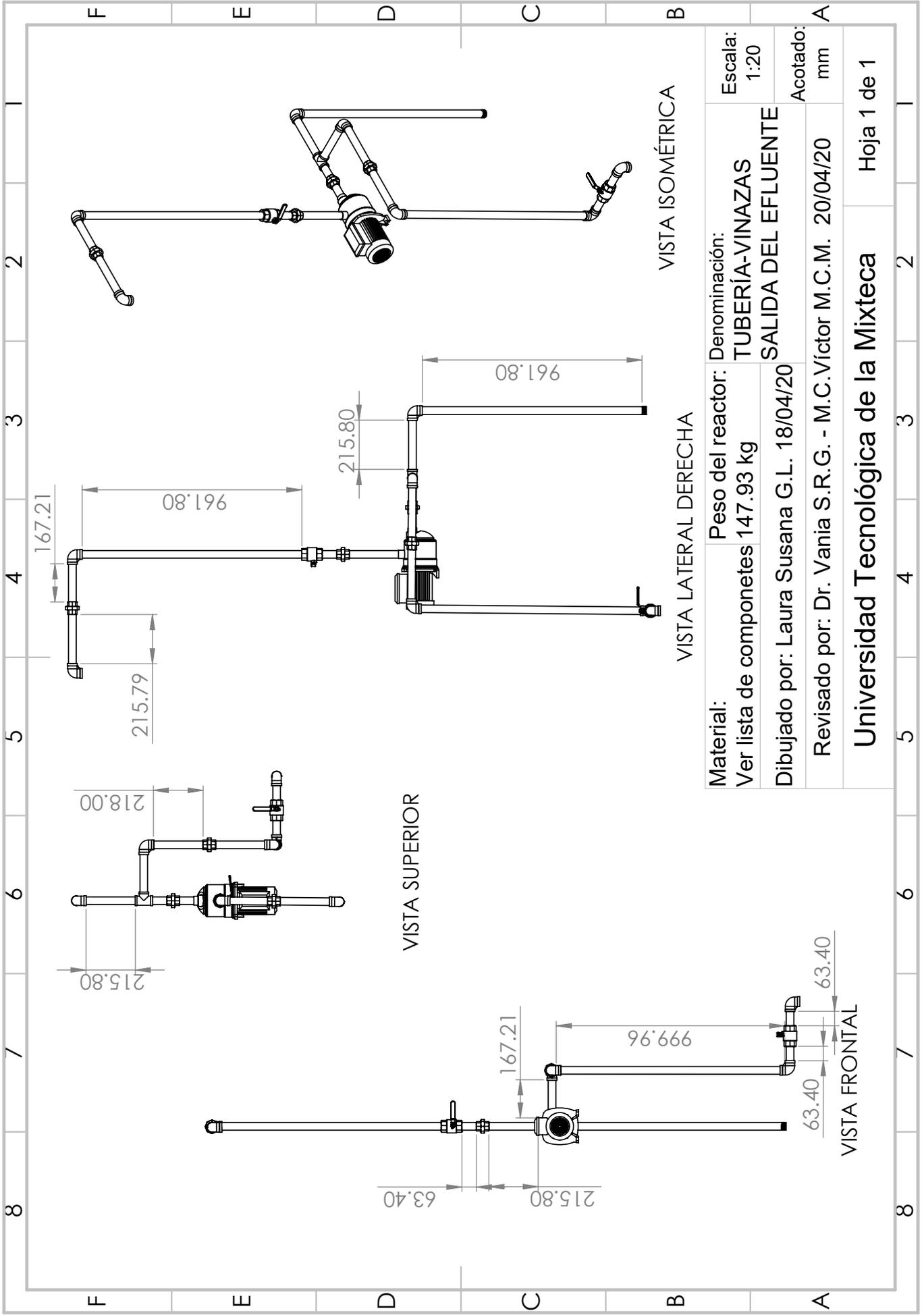
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	CODO 90º	3
2	NIPLE 1" X 39.37"	1
3	TUERCA UNIÓN	3
4	VÁLVULA	1
5	NIPLE 1" X 4"	2
6	BOMBA 1/4 HP	1
7	NIPLE 1" X 8"	1
8	NIPLE 1" X 10"	3
9	MEDIO NIPLE 1" X 66.93"	1

Material: **Peso del reactor:** Denominación:
Ver lista de componentes 147.93 kg **TUBERÍA-VINAZAS**
Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20 **ENTRADA DEL**
Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20 **EFLUENTE**

Escala: 1:15
Acotado: mm

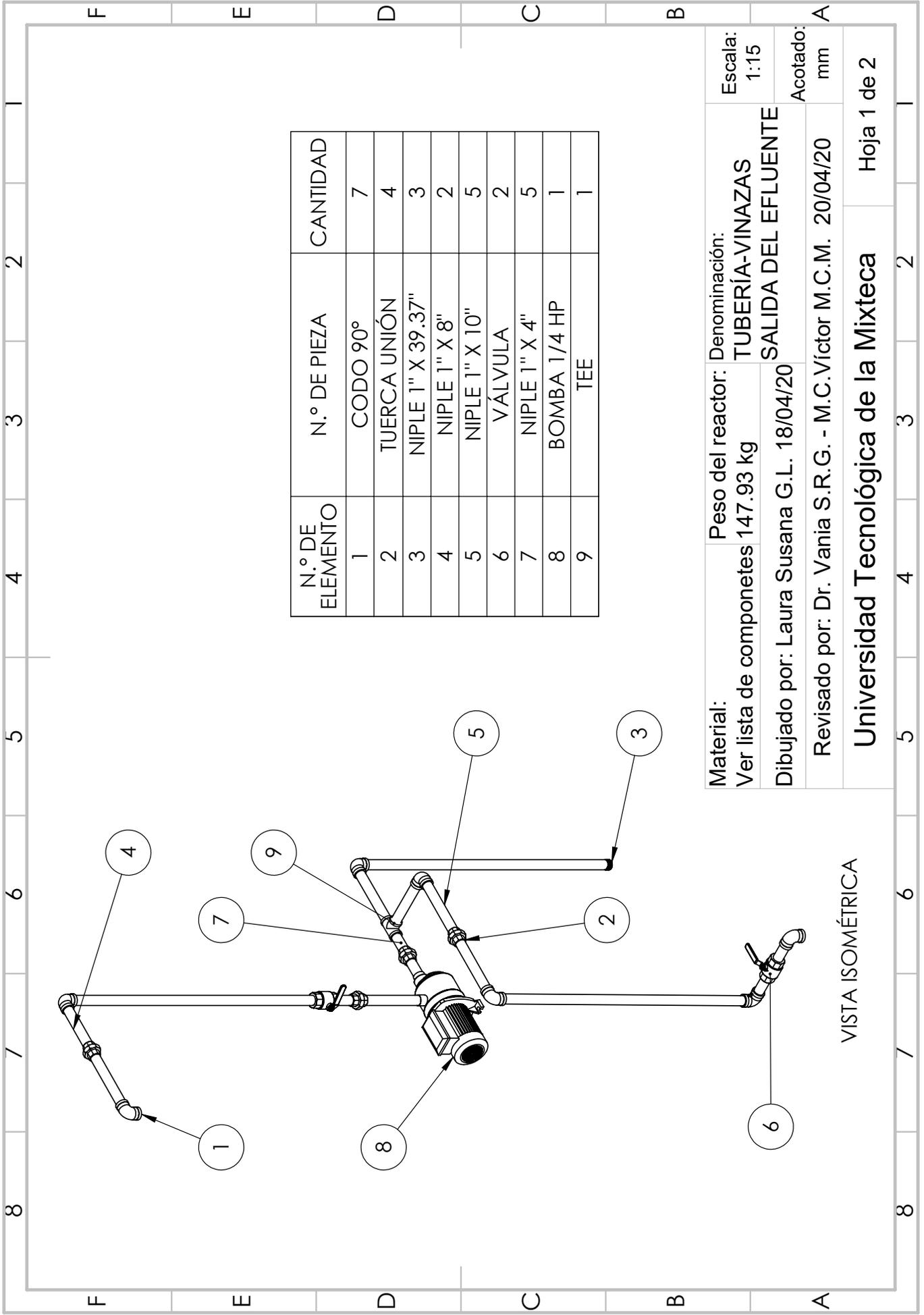
VISTA FRONTAL

Hoja 1 de 2



Material: Ver lista de componentes	Peso del reactor: 147.93 kg	Denominación: TUBERÍA-VINAZAS	Escala: 1:20
Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20		SALIDA DEL EFLUENTE	
Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20		Acotado: mm	

Universidad Tecnológica de la Mixteca Hoja 1 de 1



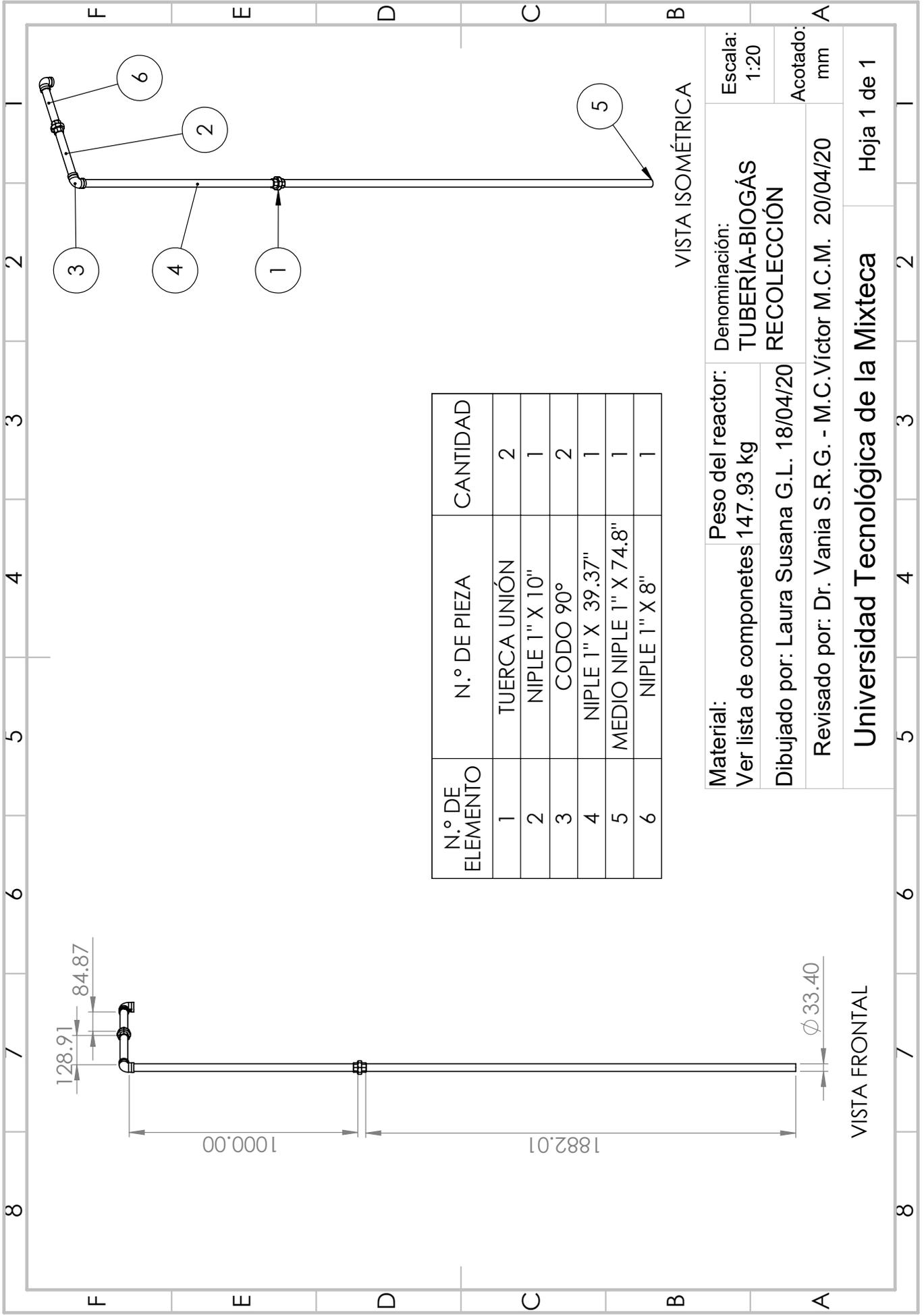
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	CODO 90º	7
2	TUERCA UNIÓN	4
3	NIPLE 1" X 39.37"	3
4	NIPLE 1" X 8"	2
5	NIPLE 1" X 10"	5
6	VÁLVULA	2
7	NIPLE 1" X 4"	5
8	BOMBA 1/4 HP	1
9	TEE	1

Material: Ver lista de componentes
 Peso del reactor: 147.93 kg
 Denominación: TUBERÍA-VINAZAS
 Escala: 1:15

Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20
 Denominación: SALIDA DEL EFLUENTE
 Acotado: mm

Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20

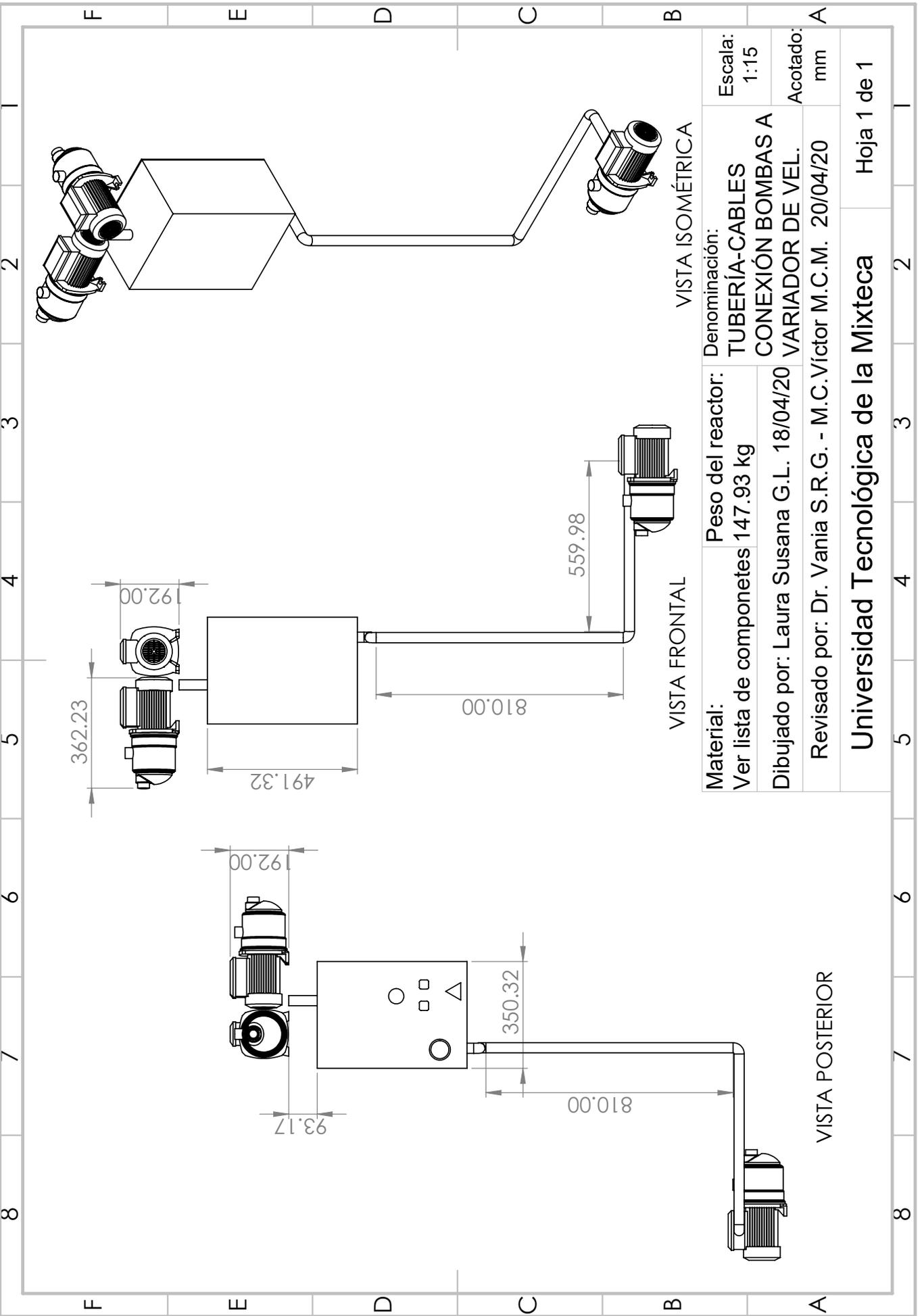
Universidad Tecnológica de la Mixteca Hoja 1 de 2

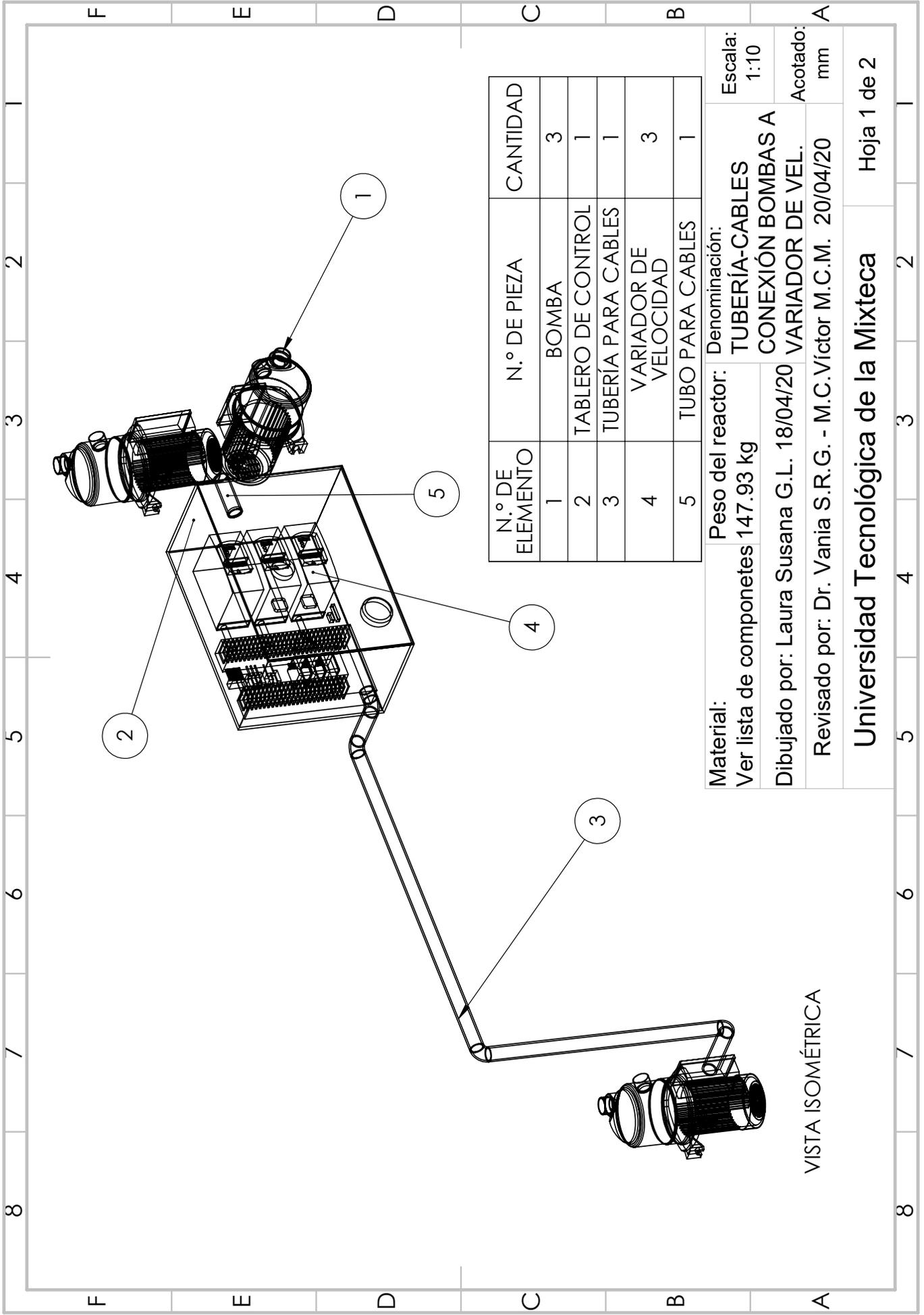


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	TUERCA UNIÓN	2
2	NIPLE 1" X 10"	1
3	CODO 90°	2
4	NIPLE 1" X 39.37"	1
5	MEDIO NIPLE 1" X 74.8"	1
6	NIPLE 1" X 8"	1

Material: Ver lista de componentes
 Denominación: TUBERÍA-BIOGÁS RECOLECCIÓN
 Escala: 1:20
 Acotado: mm
 Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20
 Peso del reactor: 147.93 kg
 Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20

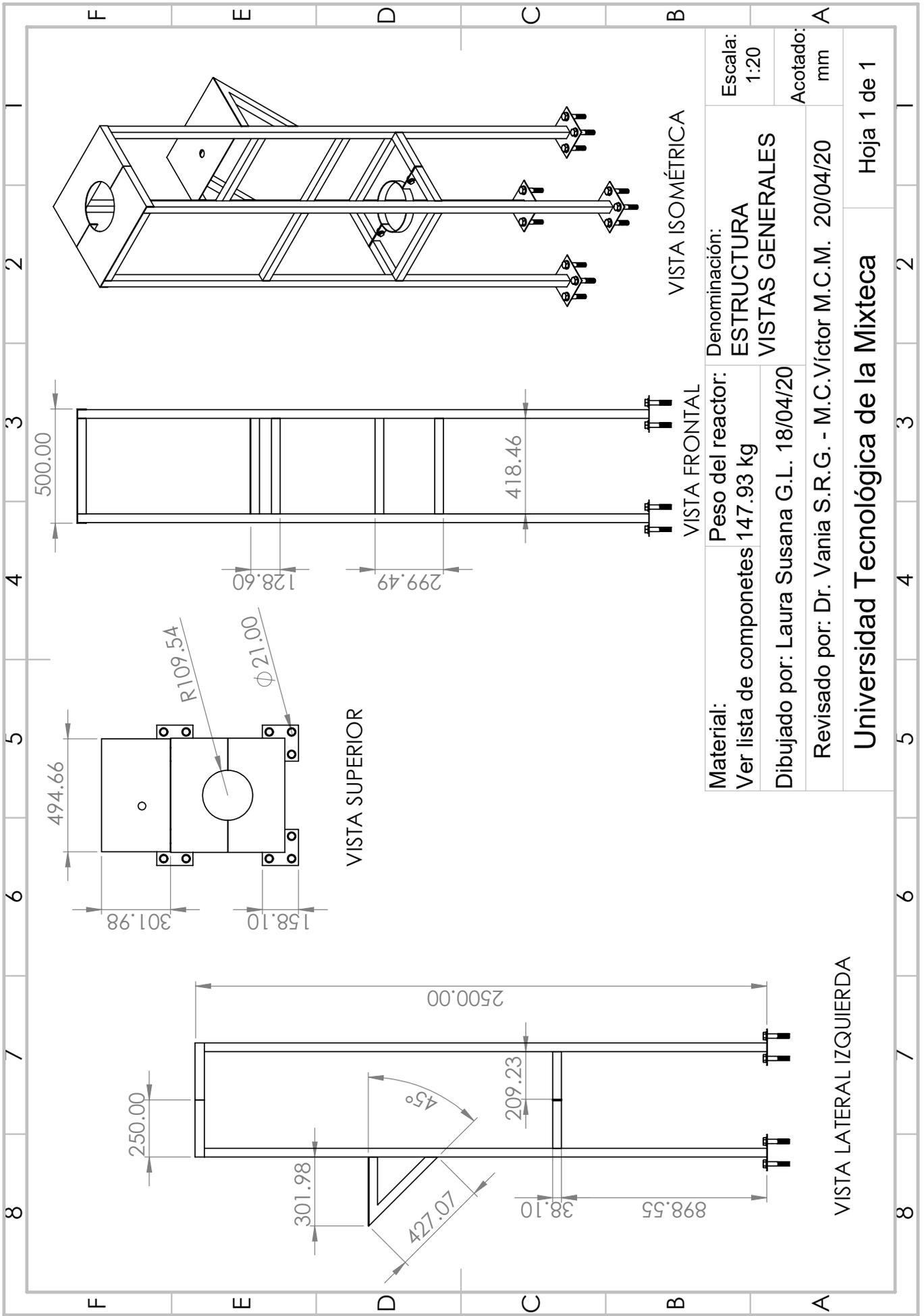
Universidad Tecnológica de la Mixteca
 Hoja 1 de 1





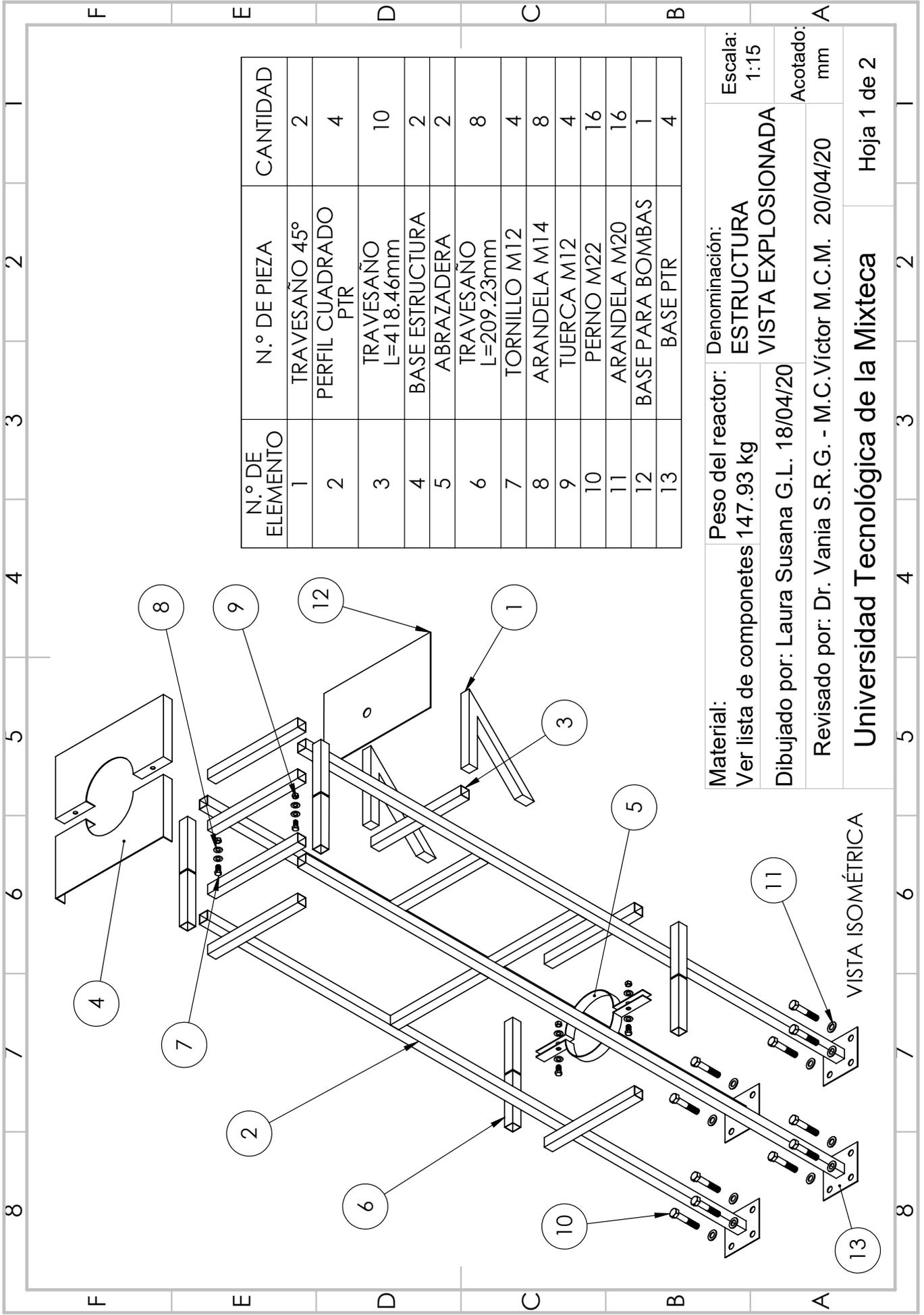
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	BOMBA	3
2	TABLERO DE CONTROL	1
3	TUBERÍA PARA CABLES	1
4	VARIADOR DE VELOCIDAD	3
5	TUBO PARA CABLES	1

Material: **Peso del reactor:** Denominación:
 Ver lista de componentes 147.93 kg TUBERÍA-CABLES
 Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20 CONEXIÓN BOMBAS A
 Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20 VARIADOR DE VEL.
 Escala: 1:10
 Acotado: mm



Material: Ver lista de componentes	Peso del reactor: 147.93 kg	Denominación: ESTRUCTURA VISTAS GENERALES	Escala: 1:20
Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20		Acotado: mm	
Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20		Hoja 1 de 1	

VISTA LATERAL IZQUIERDA



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	TRAVESAÑO 45º	2
2	PERFIL CUADRADO PTR	4
3	TRAVESAÑO L=418.46mm	10
4	BASE ESTRUCTURA	2
5	ABRAZADERA	2
6	TRAVESAÑO L=209.23mm	8
7	TORNILLO M12	4
8	ARANDELA M14	8
9	TUERCA M12	4
10	PERNO M22	16
11	ARANDELA M20	16
12	BASE PARA BOMBAS	1
13	BASE PTR	4

Material: Ver lista de componentes 147.93 kg

Peso del reactor: 147.93 kg

Denominación: ESTRUCTURA VISTA EXPLOSIONADA

Escala: 1:15

Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20

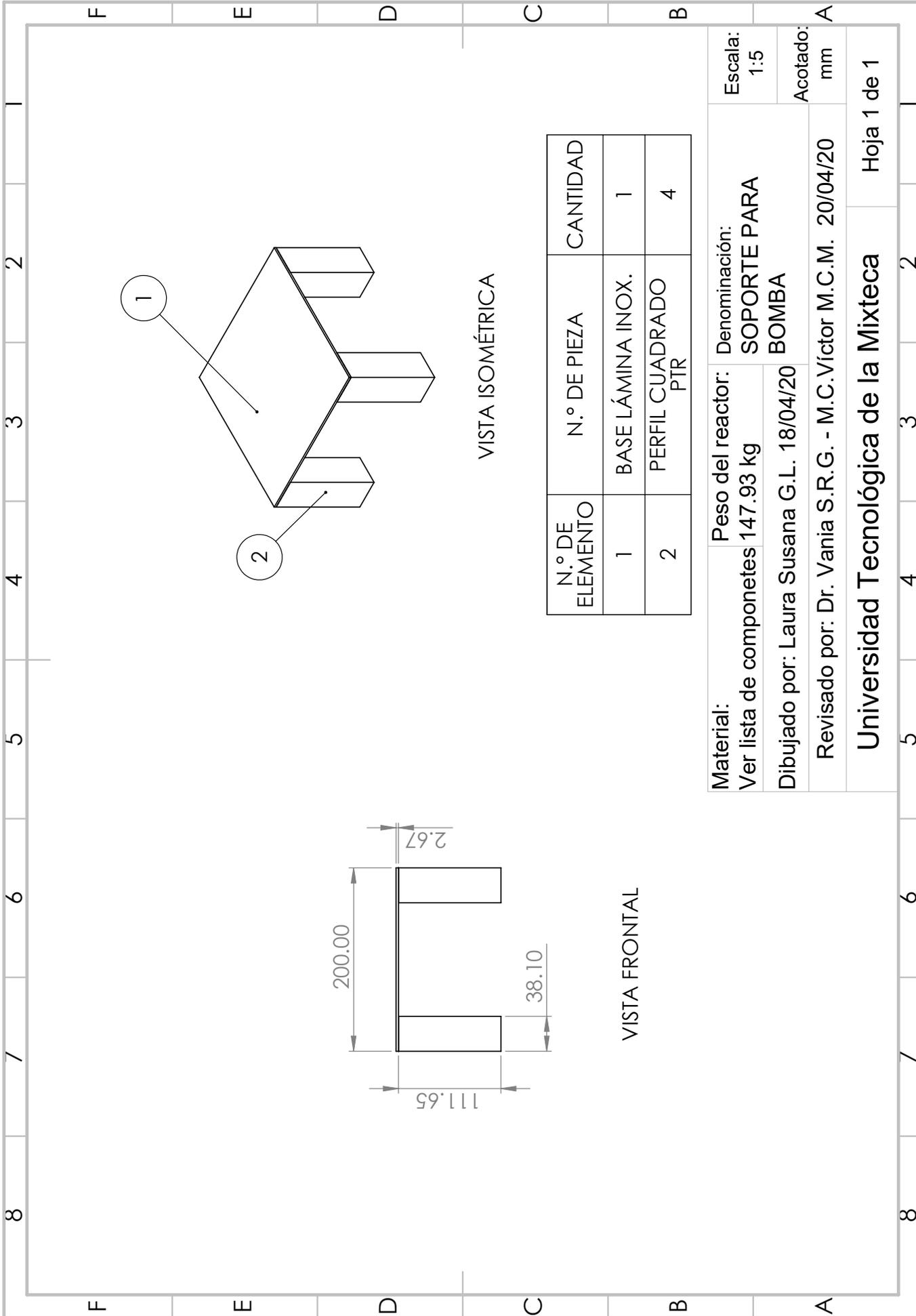
Acotado: mm

Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20

Universidad Tecnológica de la Mixteca

Hoja 1 de 2

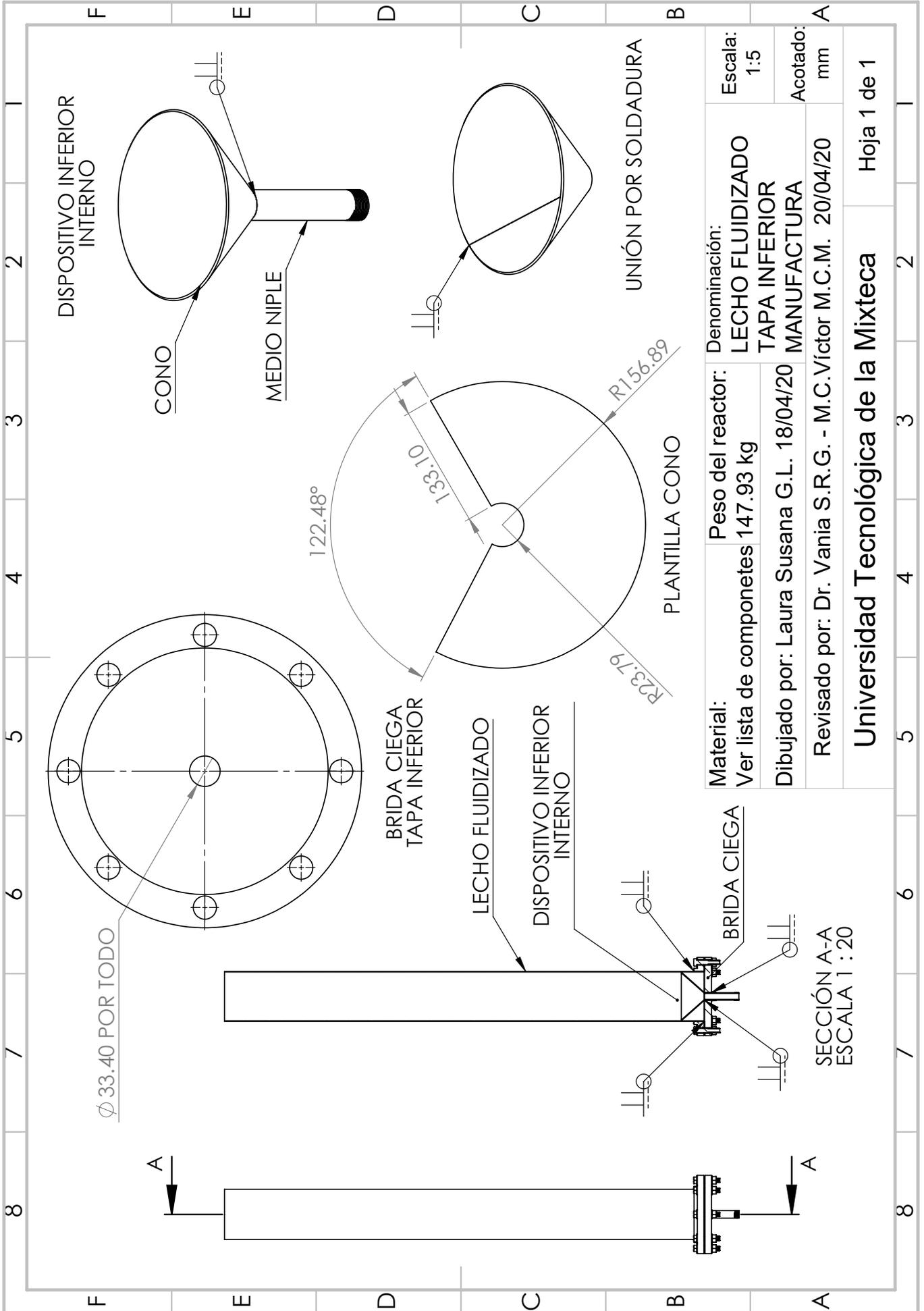
VISTA ISOMÉTRICA



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	BASE LÁMINA INOX.	1
2	PERFIL CUADRADO PTR	4

Material: Ver lista de componentes
 Peso del reactor: 147.93 kg
 Denominación: SOPORTE PARA BOMBA
 Escala: 1:5
 Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20
 Acotado: mm
 Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20

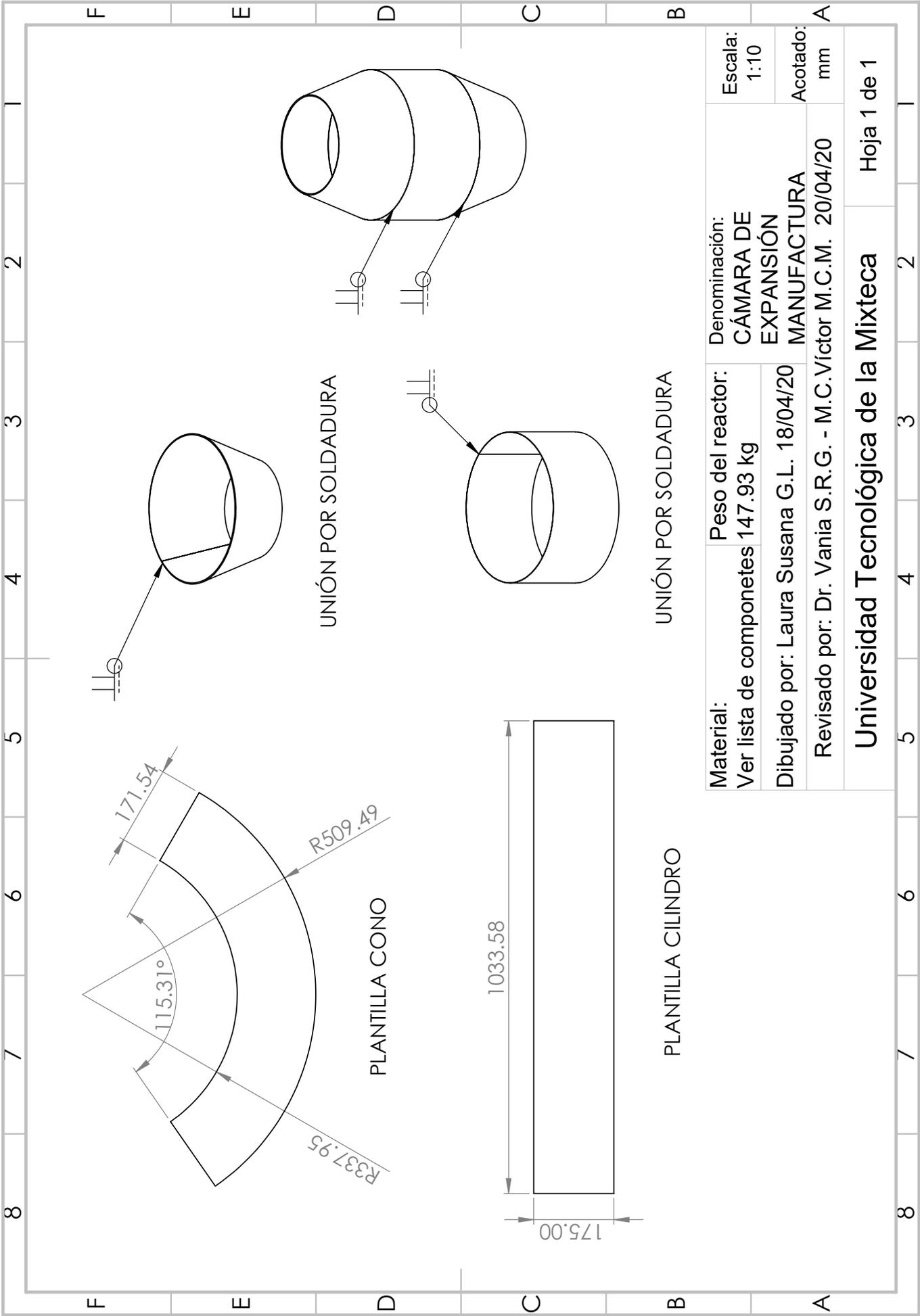
Universidad Tecnológica de la Mixteca Hoja 1 de 1



Material: Ver lista de componentes	Denominación:		Escala: 1:5
	Peso del reactor: 147.93 kg	LECHO FLUIDIZADO TAPA INFERIOR MANUFACTURA	
Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20		Acotado: mm	
Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20			

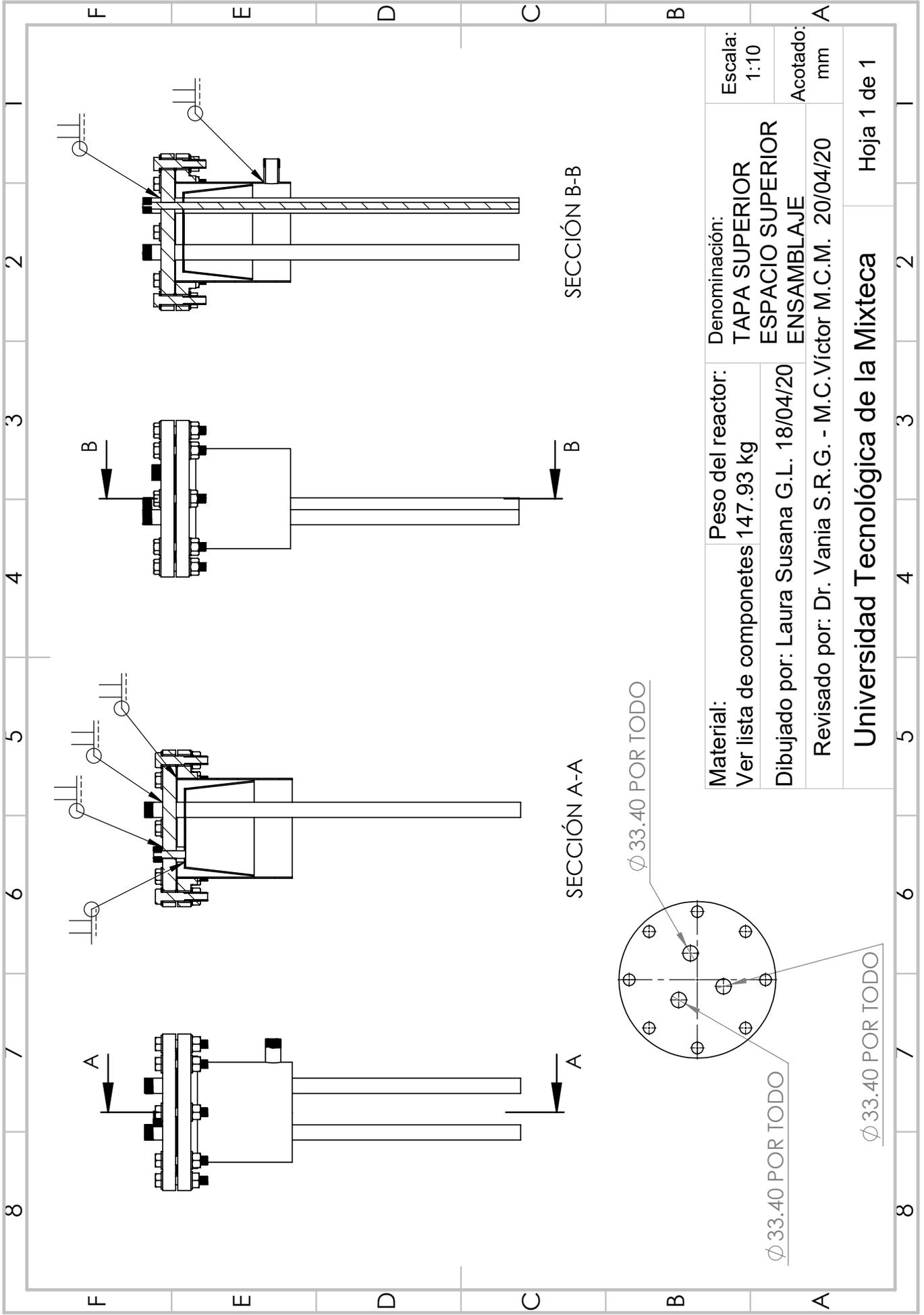
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 20

Universidad Tecnológica de la Mixteca Hoja 1 de 1

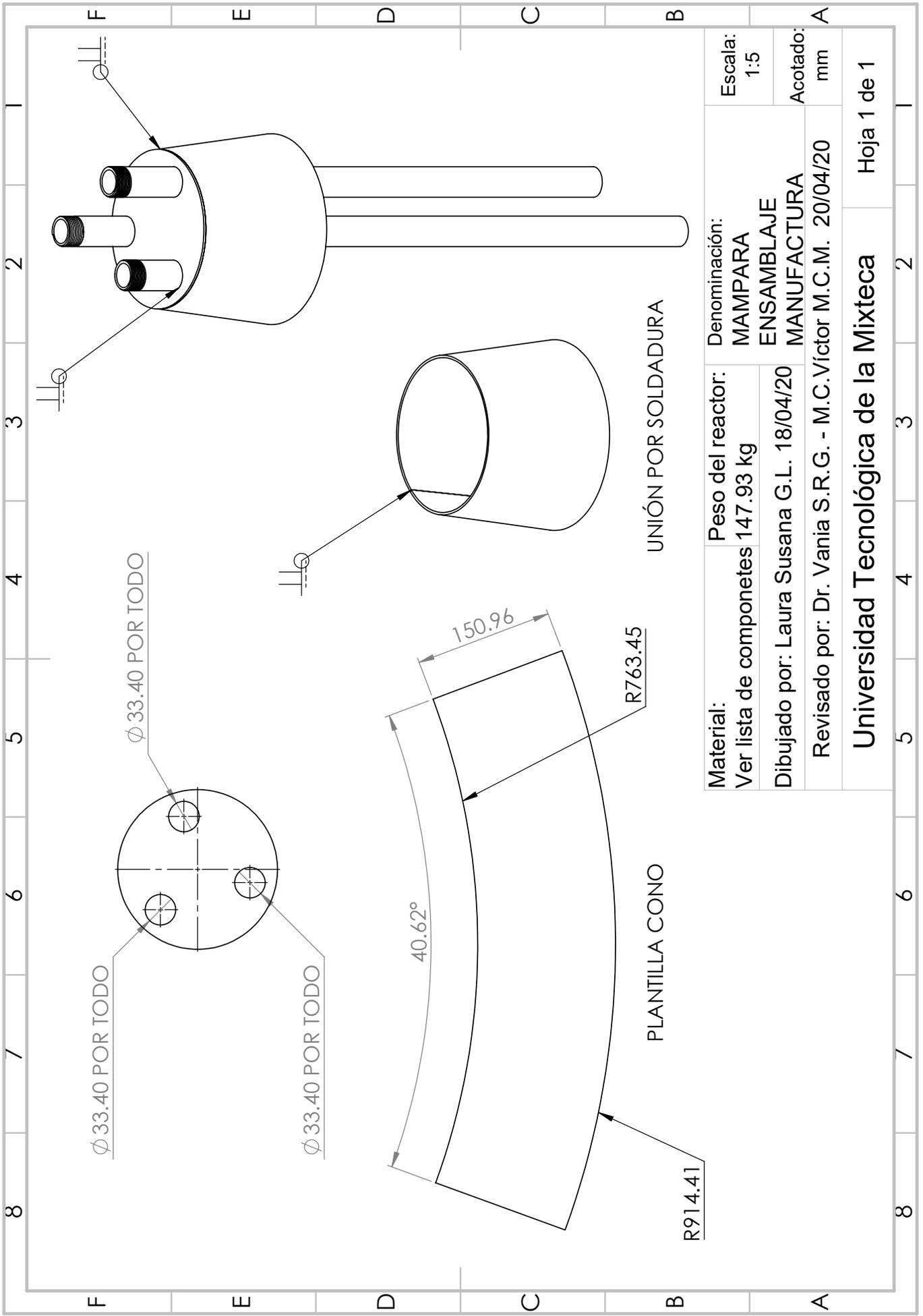


Material:	Peso del reactor:	Denominación:	Escala:
Ver lista de componentes	147.93 kg	CÁMARA DE EXPANSIÓN	1:10
Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20	MANUFACTURA		Acotado:
Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C.Víctor M.C.M. 20/04/20			mm

Universidad Tecnológica de la Mixteca Hoja 1 de 1

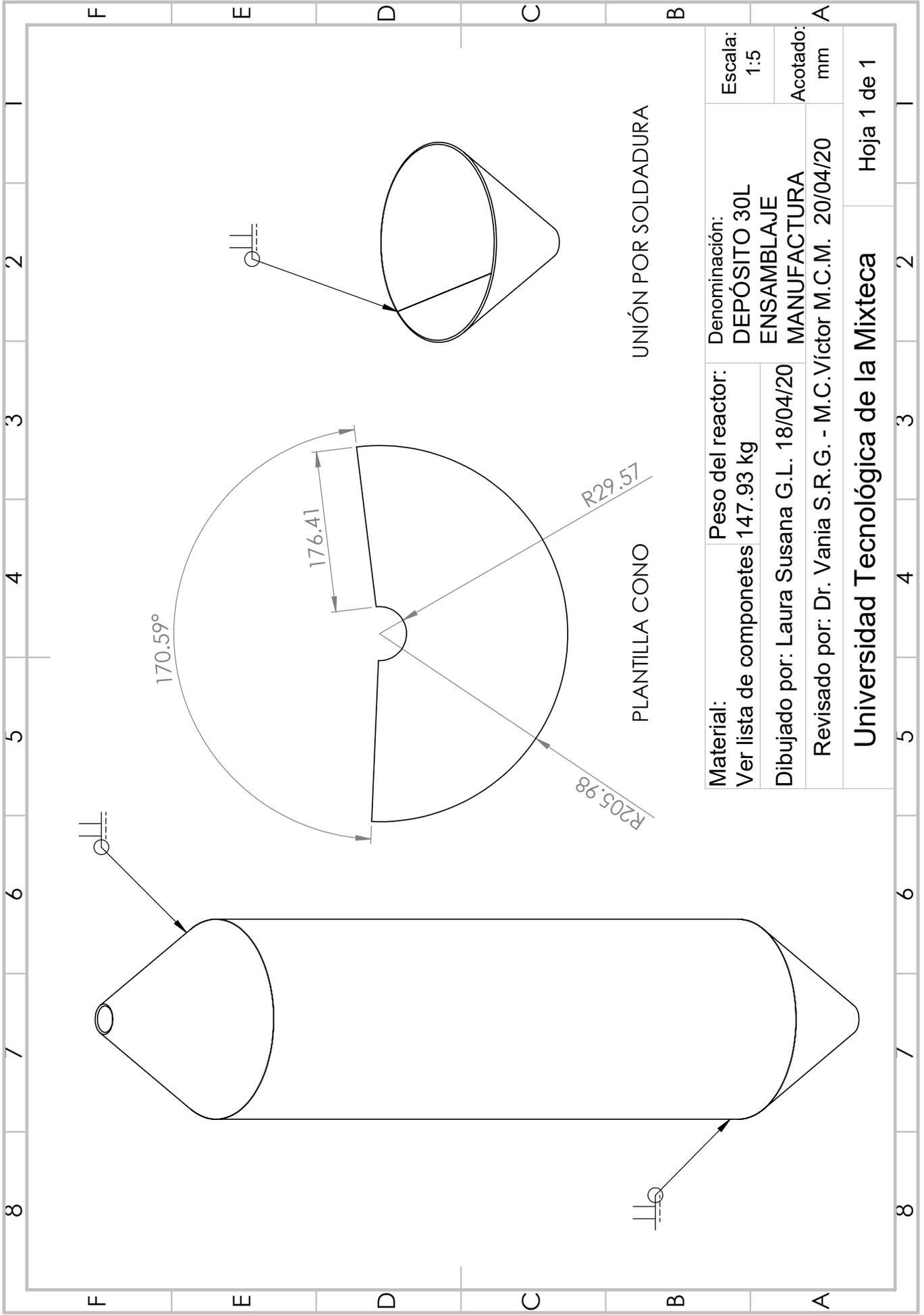


Material: Ver lista de componentes	Peso del reactor: 147.93 kg	Denominación: TAPA SUPERIOR ESPACIO SUPERIOR ENSAMBLAJE	Escala: 1:10
Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20		Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20	Acotado: mm
Universidad Tecnológica de la Mixteca		Hoja 1 de 1	



Material:	Peso del reactor:	Denominación:	Escala:
Ver lista de componentes	147.93 kg	MAMPARA	1:5
Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20		ENSAMBLAJE	Acotado:
Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20		MANUFACTURA	mm

Universidad Tecnológica de la Mixteca
 Hoja 1 de 1



Material: Ver lista de componentes	Peso del reactor:	Denominación: DEPÓSITO 30L ENSAMBLAJE MANUFACTURA	Escala: 1:5
	147.93 kg		
Dibujado por: Laura Susana G.L. 18/04/20		Acotado: mm	
Revisado por: Dr. Vania S.R.G. - M.C. Víctor M.C.M. 20/04/20			

6.2 Lista de componentes estándares necesarios para la manufactura del RAnLEF

De las piezas mostradas en los planos, se hizo un vaciado de datos en la siguiente tabla, eligiendo únicamente los componentes estándares y materia prima para realizar la manufactura.

Tabla 26.- Listado de componentes estándares.

N°	Pieza	Descripción	Cant.
1	Codo 90°	Codo 90° de 1" NPT de acero inoxidable tipo 304, roscas internas (hembra).	12
2	Válvula	Válvula Esfera 2 piezas de 1" paso total de acero inoxidable 304, presión: 1000 Psi. Roscado NPT.	6
3	Tuerca unión	Tuerca unión de 1", de acero inoxidable 304, roscado NPT.	11
4	Tee	Conexión Tee de 1" NPT, de acero inoxidable 304, clase #150.	1
5	Niple 1"x 4"	Conexión niple 1"x4", roscado: NPT, cédula 40, acero inoxidable 304.	11
6	Niple 1"x 6.7"	Conexión niple 1"x 6.7", roscado NPT, cédula 40, acero inoxidable 304.	1
7	Niple 1"x 8"	Conexión niple 1"x8", roscado: NPT, cédula 40, acero inoxidable 304.	4
8	Niple 1"x 10"	Conexión niple 1"x10", roscado: NPT, cédula 40, acero inoxidable 304.	8
9	Niple 1"x 16.2"	Conexión niple 1"x 16.2", roscado NPT, cédula 40, acero inoxidable 304.	1
10	Niple 1"x 39.37"	Conexión niple 1"x 39.37", roscado: NPT, cédula 40, acero inoxidable 304.	5
12	Medio niple 1"x 2"	Conexión medio niple 1"x2", roscado NPT, cédula 40, acero inoxidable 304.	2
13	Medio Niple 1"x 4"	Conexión medio niple 1"x4", roscado NPT, cédula 40, acero inoxidable 304.	1
14	Medio niple 1"x 6"	Conexión medio niple 1"x6", roscado NPT, cédula 40, acero inoxidable 304.	1
15	Medio niple 1"x 32.40" Entrada	Conexión niple 1" x 32.40", roscado NPT, cédula 40, acero inoxidable 304.	1

(Continúa en la siguiente pág.)

(Tabla 26. Continuación)

N°	Pieza	Descripción	Cant.
16	Medio Niple 1"x 32.40" Salida	Conexión niple 1" x 32.40", roscado NPT, cédula 40, acero inoxidable 304.	1
17	Medio Niple 1"x 66.93"	Conexión niple 1" x 32.40", roscado NPT, cédula 40, acero inoxidable 304.	1
18	Codo 90° cobre	Conexión codo 90° \varnothing 1", roscado NPT, cédula 40, cobre. Marca: Foset	2
19	Tuerca unión cobre	Conexión tuerca unión \varnothing 1", roscado NPT, cédula 40, cobre.	2
20	Niple 1"x 8" cobre	Conexión niple 1" x 8", roscado NPT, cédula 40, cobre.	1
21	Niple 1"x10" cobre	Conexión niple 1" x 10", roscado NPT, cédula 40, cobre.	1
22	Niple 1"x 39.37" cobre	Conexión niple 1" x 39.37", roscado NPT, cédula 40, cobre.	1
23	Medio niple 1"x 2.7" cobre-Biogás	Conexión medio niple 1" x 2.7", roscado NPT, cédula 40, cobre.	1
24	Medio niple 1"x 74.8" cobre	Conexión niple 1" x 74.8", roscado NPT, cédula 40, cobre.	1
25	Arandela M22	Arandela plana A2 acero inoxidable grado 304, DIN 125, métrico, tamaño de tornillo M22.	32
26	Tuerca M22	Tuerca de acero inoxidable. Mxthn-019, $\frac{3}{4}$ d 19.05mm, cuerda estándar.	16
27	Perno M22	Tornillo de cabeza hexagonal M22x114.3mm, acero inoxidable grado 304, rosca parcial.	32
28	Perno M22	Tornillo de cabeza hexagonal M22x114.3mm, acero inoxidable grado 304, rosca parcial.	32
29	Tornillo M12	Tornillo hexagonal M12x25mm milimétrico de acero inoxidable 304.	4
30	Tuerca M12	Tuerca hexagonal M12 milimétrica de acero inoxidable grado 304.	4
31	Arandela M14	Arandela plana M14, acero inoxidable grado 304, DIN 125, métrico.	8
32	Arandela M20	Arandela plana M20, acero inoxidable grado 304, DIN 125, métrico.	16

(Continúa en la siguiente pág.)

(Tabla 26. Continuación)

N°	Pieza	Descripción	Cant.
33	Brida ciega	Brida Ciega $\varnothing 8''$ de acero inoxidable grado 304, 150 Lbs. Norma de fabricación: ASTM-A-182. ANSI B16.5.	2
34	Brida slip on o deslizante	Brida slip on $\varnothing 8''$ de acero inoxidable Tipo 304 clase 150 Libras. Norma de fabricación: ASTM-A-182. ANSI B16.5.	2
35	Empaque RF	Empaque de Neopreno, $\varnothing 8''$, hermético ANSI 150.	2
36	ECO STAR	Cuerpo relleno ECO STAR, cilíndrico, material de fabricación polipropileno virgen. No. Piezas/m ³ : 87,000.	1 m ³
37	Lámina calibre 12	Lámina calibre 12 acero inoxidable tipo 304, acabado 2B, medida 4x10 FT.	1
38	Tubo SCH 5s	Tubo tamaño nominal $\varnothing 8''$ L= 6mts. de acero inoxidable AISI 304, SCH 5s, ASTM A.312 ANSI B36.10.	1
39	Perfil cuadrado PTR	Perfil cuadrado acero al carbón MxTRT-017, calibre 12 2x2''	2
40	Tubería para cables	Tubo $\varnothing 1''$ L=6.40m de acero hueco cédula 40.	1
41	Electrodos ER308	Soldadura inoxidable electrodo tipo ER308 de 3/32'' 3 kilos.	1paq.
42	Electrodos E308	Soldadura inoxidable electrodo tipo E308 de 3/32'', 2 kilos.	1paq.
43	Electrodos E6013	Electrodo revestido E6013 de 3/32'', para acero al carbón, 3 kilos.	1paq.

Tabla 27.- *Listado de componentes eléctricos.*

N°	Pieza	Descripción	Cant.
1	Bomba centrífuga ¼ hp	Bomba centrífuga acero inoxidable 1/4 hp, voltaje: 127 v, marca: Surtek, succión: 1", descarga: 1", rosca NPT.	2
2	Bomba centrífuga 2 hp	Bomba centrífuga acero inoxidable 2 hp, voltaje: 220 v, marca: Pedrollo, succión: 1", descarga: 1", rosca NPT.	1
3	Tablero de control	Tablero de control para tres bombas centrífugas trifásicas, con sensor de presión y sensor de nivel de agua.	1
4	Variador de velocidad	Variador de velocidad Siemens micromaster 440v, 47-63Hz.	3

Tabla 28.- *Listado de sistema de almacenamiento.*

N°	Pieza	Descripción	Cant.
1	Cisterna Rotoplas	Cisterna Rotoplas de 5000L	2
2	Biodigestor para biogás	Tambo de plástico 60L con tapa y aro. Marca: Envases Mart México.	1

6.3 Costo final de componentes estándares

El costo final mostrado en la Tabla 29, es una aproximación del costo que se requerirá en la construcción del prototipo del RAnLEF tomando en cuenta todos los componentes comerciales. A continuación, se presenta el resumen del importe total de todos los elementos del RAnLEF:

Tabla 29.- *Importe total de los componentes estándares.*

Componentes	Importe con letra	Importe con número
GENERALES	CIENTO VEINTE MIL CIENTO NOVENTA Y NUEVE PESOS 43/100 M.N.	\$ 120,199.43
ELÉCTRICOS	CINCUENTA Y SIETE MIL SEISCIENTOS NOVENTA Y DOS PESOS 36/100 M.N.	\$ 57,692.36
SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	VEINTICUATRO MIL TRESCIENTOS CUARENTA Y CUATRO PESOS 58/100 M.N.	\$ 24,344.58
TOTAL DE FABRICACIÓN DEL RANLEF	** DOSCIENTOS DOS MIL DOSCIENTOS TREINTA Y SEIS PESOS 37/100 M.N. **	\$ 202,236.37
		I.V.A. (16%) \$ 32,357.82
		TOTAL \$ 234,594.19

La primera aproximación del costo de fabricación del RAnLEF es de \$234,594.19 MXN, costo inicial a cubrir, al cual se le debe agregar el costo de las materias primas a manufacturar, la mano de obra empleada durante todos los procesos, el costo de diseño del sistema y demás consideraciones que conlleve la realización de un proyecto.

6.4 Lista de componentes a manufacturar

De los planos obtenidos y su despiece, se separaron los componentes a manufacturar, mostrados en la Tabla 30, en la que se puede consultar los materiales recomendados para su fabricación de cada uno de ellos.

Tabla 30.- *Listado de componentes a manufacturar.*

N°	Pieza	Material	Cantidad
1	Cono Mampara	Lámina calibre 12 acero inoxidable grado 304, acabado 2B.	1
2	Cono cámara de expansión (CE)	Lámina calibre 12 acero inoxidable grado 304, acabado 2B.	2
3	Cilindro CE	Lámina calibre 12 acero inoxidable grado 304, acabado 2B.	1
4	Cono inferior interno (dispositivo)	Lámina calibre 12 acero inoxidable grado 304, acabado 2B.	1
5	Cono cisterna	Lámina calibre 12 acero inoxidable grado 304, acabado 2B.	2
6	Cilindro cisterna	Tubo tamaño nominal $\varnothing 8''$ L= 6mts. de acero inoxidable AISI 304, SCH 5s, ASTM A.312 ANSI B36.10.	1
7	Estructura	Perfil cuadrado PTR, acero al carbón MxTRT-017, calibre 12, 2x2". Lámina calibre 12, acero inoxidable.	1
8	Abrazaderas	Lámina calibre 12 acero inoxidable grado 304, acabado 2B.	2
9	Soporte para bomba	Perfil cuadrado PTR, acero al carbón MxTRT-017, calibre 12, 2x2". Lámina calibre 12, acero inoxidable.	1

CAPÍTULO VII CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se resumen las principales conclusiones obtenidas a través del desarrollo de esta tesis, se proponen mejoras y nuevos retos para darle continuidad al trabajo desarrollado.

7.1 Conclusiones

Para el logro de los objetivos y metas de este proyecto fue necesario el desarrollo de los siguientes puntos:

1.- Se realizaron los cálculos de las tres principales zonas del RAnLEF, a partir de las relaciones geométricas reportadas en la literatura para configuraciones de reactores, seleccionando las RG más adecuadas para el dimensionamiento de los componentes.

Para el dimensionamiento del lecho fluidizado, se calcularon varias relaciones geométricas, altura del lecho fluidizado (H_{LF}) y diámetro del lecho fluidizado (D_{LF}), reportadas en la literatura.

La RG que se utilizó para determinar las dimensiones del diámetro y altura de la sección correspondiente al lecho fluidizado del RAnLEF con un volumen de 70 L fue la siguiente:

$$\frac{H_{LF}}{D_{LF}} = 10$$

Obteniendo las dimensiones a NPP del lecho fluidizado:

Diámetro: $D_{LF}=0.207 \text{ m} \approx 20.7 \text{ cm}$

Altura: $H_{LF}=2.1 \text{ m} \approx 210 \text{ cm}$

La RG utilizada para el escalamiento de la segunda sección (CE) del RAnLEF con un volumen de 42 L es la siguiente:

$$\frac{H_{CE}}{D_{CE}} = 1.8$$

Se obtuvieron las dimensiones de la Altura y diámetro correspondientes a la sección de la cámara de expansión del RAnLEF:

Diámetro: $D_{CE} = 0.329 \text{ m} \approx 32.9 \text{ cm}$

Altura: $H_{CE} = 0.5 \text{ m} \approx 50 \text{ cm}$

Se calcularon las dimensiones de la altura correspondiente a la sección del espacio superior del RAnLEF, así como su volumen en función a las alturas del lecho fluidizado, donde se empleó las siguientes RG:

$$\frac{H_{ES}}{H_{LF}} = 0.12$$

Obteniendo como resultado las siguientes dimensiones:

Altura: $D_{CE} = 0.252 \text{ m} \approx 25.2 \text{ cm}$

Volumen: $H_{CE} = 8.6 \text{ L} \approx 0.0086 \text{ m}^3$

Las cuales se emplearon para realizar el escalamiento del RAnLEF a NPP.

2.- Se realizó el desarrollo del concepto y el diseño en el nivel sistema, se muestra la información que se utilizó para la generación de las especificaciones del producto, así como los cálculos para el escalamiento de los componentes del RAnLEF con base a las relaciones geométricas, definiendo las dimensiones de los componentes principales, seleccionando los materiales adecuados para su fabricación y el material de soporte para el lecho fluidizado.

Se desarrollaron dos conceptos con las siguientes características:

- Concepto 1, se consideró la entrada del líquido de recirculación por la parte inferior de la tapa.
- Concepto 2, la entrada del líquido de recirculación fue propuesta en la parte lateral.

3.- Los materiales considerados para la construcción de los componentes principales del prototipo a NPP fueron los aceros inoxidable de la serie 300 austeníticos:

- Lámina tipo AISI 304 calibre 12 con acabado 2B laminado en frío, recocido y decapado.
- Tubo de 8 pulgadas con cédula 5s, acero inoxidable ASTM 312, según AISI B36.19 y B36.10, calidad AISI 304.

Para el lecho fluidizado se empleará un tubo con dimensiones y calidad especificada, la cámara de expansión será fabricada con lámina y el espacio superior con tubo.

Las piezas y conexiones roscados NPT comerciales propuestos son de acero inoxidable grado 304.

Para la fabricación de la mampara, cono inferior y el tanque de recirculación se consideró la lámina en acero inoxidable tipo AISI 304 calibre 12 con acabado 2B laminado en frío, recocido y decapado. La estructura y la base de la bomba de recirculación serán fabricadas con lámina de acero inoxidable tipo AISI 304 calibre 12 y perfil cuadrado PTR en acero al carbón MxTRT-017, calibre 12, 2 x 2 pulg.

4.- Se modeló y se detalló el prototipo 1 en SolidWorks®, aplicando los materiales especificados para su fabricación, considerando los requerimientos de diseño, parámetros establecidos a nivel laboratorio, procesos de manufactura y ensamble.

5.- A partir del modelado se realizaron estudios para verificar la resistencia mecánica de los elementos del RAnLEF mediante el análisis estático por medio del

software CAD/CAE. Se emplearon las cargas que actúan sobre la estructura para determinar su máxima tensión, desplazamiento y el factor de seguridad, para soportar el peso del RAnLEF, los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes: La máxima tensión de la estructura identificada en la arista con mayor carga es de $2.82e+07 \text{ N/m}^2$ y el máximo desplazamiento del análisis estático de la estructura es $7.50e-01 \text{ mm}$. La estructura presenta un factor de seguridad mínimo de 5.7, lo cual hace factible la construcción de la estructura con los parámetros de diseño utilizados y los materiales propuestos, en tensión Von Mises es aceptable.

Se calculó la presión hidrostática que ejerce el peso de las vinazas mezcaleras sobre las paredes y el fondo del RAnLEF, obteniendo una presión de $\rho=26211.93\text{Pa}$, dato importante que se sustituyó en las ecuaciones de esfuerzo normal máximo y esfuerzo cortante máximo para corroborar los resultados del estudio del análisis de esfuerzos de la presión interna del RAnLEF realizado en SolidWorks® mediante el método de elementos finitos, comprobando la resistencia mecánica de los materiales empleados para la fabricación de los componentes principales. El resultado de la ecuación calculada y el valor identificado en el software determinó el valor del esfuerzo normal máximo de 1.02 MPa . Se mostraron las tensiones en el modelo, los colores en la leyenda definen las tensiones: los colores cálidos representan las mayores tensiones, mientras que los colores más fríos representan las menores tensiones. Se calculó el esfuerzo cortante máximo y el resultado fue de 0.51 MPa que se sustituyó en la fórmula para calcular el esfuerzo Von Mises.

El valor que se identificó en el análisis del esfuerzo Von Mises fue de 0.88 MPa y el límite elástico= 206.81 , es la máxima tensión que puede soportar el material sin que se produzcan deformaciones permanentes. El diseño presentó un desplazamiento máximo de $1.30 \text{ e}^{-03} \text{ mm}$ en la cámara de expansión y un desplazamiento mínimo de $1.00 \text{ e}^{-30} \text{ mm}$ en la zona del lecho fluidizado, la deformación unitaria máxima fue de 6.44 e^{-06} en la cámara de expansión y la deformación mínima de 2.27 e^{-09} en la tapa superior, finalmente se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 141.56, lo cual hace factible la construcción del RAnLEF con los parámetros de diseño utilizados y los materiales propuestos en tensión Von Mises es aceptable.

6.- Se diseñó el logotipo que identifica el RAnLEF, para su comercialización.

7.- Finalmente se presentó el render del producto: Reactor Anaerobio de Lecho Fluidizado (RAnLEF), de 123 L a nivel planta piloto de acero inoxidable T-304, se mostraron los detalles con apoyo de láminas de presentación de producto y dibujos técnicos.

8.- Conforme a la descripción de los procesos de manufactura, se determinó las herramientas y equipos de trabajo que se emplearán para la fabricación del RAnLEF, los talleres de la UTM metalmecánica y manufactura cuentan con suficientes herramientas y equipos para manufacturar los componentes del RAnLEF.

7.2 Trabajos futuros

Durante el desarrollo del proyecto se detectaron diferentes temas de investigación para el enriquecimiento de este proyecto a nivel social y académico, los cuales son:

- Evaluación del proceso de manufactura para cada uno de los componentes a fin de mejorar el tiempo y trabajo en cada uno de los procesos de fabricación.
- Construcción del prototipo funcional del RAnLEF, con el que se evalúe el funcionamiento y la interacción de los componentes. Asimismo, la realización de pruebas de la fluidización.
- Simulación del flujo de las vinazas dentro del RAnLEF, mediante el software SolidWorks CAD/CAE.

REFERENCIAS:

- Academia de Ingeniería de México. (2016). *Técnicas de escalamiento aplicadas al diseño de procesos químicos*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/AcademiaDelIngenieriaMx/tecnicas-de-escalamiento-aplicadas-al-diseno-de-procesos-quimicos>
- Aceros y Tuberías . (s.f.). *Catálogo de Bridas ANSI/ASME*. Obtenido de <https://acerosytuberias.com.mx/wp-content/uploads/pdf/catalogo-de-bridas-ansi-asme.pdf>
- Acharya, B.K., Mohana, S. y Madamwar, D. (2008). Anaerobic treat of distillery spent wash-A study on upflow anaerobic fixed film bioreactor. *BioresourceTechnology*, 99(11), pp. 4621-4626. . doi:10.1016/j.biortech.2007.06.060
- Acuña, R. (6 de Octubre de 2016). *Adimensionamiento y escalamiento de bioprocesos*. Obtenido de https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/52616039/ADIMENSIONAMIENTO_Y_ESCALAMIENTO_DE_BIOPROCESOS__Biotecnologia_Practica.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DBIOTECNOLOGIA_PRACTICA_BIOTECNOLOGIA_PRA.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC
- Albarez, R., Chiaranda, B.C., Ferrira, R.G., Franca, A.L.P., Honório, C.D., Rodriguez, J.A.D., Ratusznei, S.M. y Zaiat, M. (2016). Anaerobic Biological Treatment of Vinasse for Environmental Compliance and Methane Production. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 178(1), pp. 21–43.
- Alibaba. (1999-2019). *Global trade starts here. China*. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Anaerobic-fluidized-bed-reactor-Efficient-biofilm-60433732396.html?spm=a2700.galleryofferlist.normalList.11.64331c95titP6G>
- ALINOX. (2016). *CATALOGO-ALINOX*. Obtenido de <https://alinox.es/wp-content/uploads/2016/06/CATALOGO-ALINOX.pdf>
- Anaya-Duran, A. y Pedroza-Flores, H. (2008). Escalamiento el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 23(1), pp. 31-39.
- Aracil, M. (2018). *Soldadura y corte de los aceros inoxidables* . Obtenido de <https://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/Soldadura-y-corte-de-los-aceros-inoxidables-on-line.pdf>
- Balaguer, M.D., Vicent, M.T. y París J.M. (1992). Anaerobic fluidized bed reactor with sepiolite as support for anaerobic treatment of vinasse. *Biotechnology Letters*, 14(5), pp. 433-438.

- Beer, P. F. (2015). *Mecánica de Materiales*. Obtenido de file:///E:/DOCUMENTOS/Desktop/Ferdinand%20P.%20Beer_%20E.%20Russell%20Johnston,%20Jr._%20John%20T.%20DeWolf_%20David%20F.%20Mazurek%20-%20Mecánica%20de%20Materiales%20(2017,%20McGraw-Hill).pdf
- Beltrán, F. J., Álvarez, P. M., Rodríguez, E., García-Araya, J. F., Rivas, J. (2001). Treatment of high strength distillery wastewater (Cherry Stillage) by integrated aerobic biological oxidation and ozonation. *Biotechnol. Prog*, 17, pp. 462.
- Belzunce, F. J. (2001). *Aceros y fundiciones: estructuras, transformaciones, tratamientos termicos y aplicaciones*. Universidad de Oviedo. Obtenido de <https://aceroplatea.es/docs/documento138.pdf>
- Borja, R., Alba, J., Martín, A., Mancha, A. (1998). Influencia de velocidad de carga orgánica sobre el proceso de digestión anaerobia de aguas de lavado de aceitunas de almazara en reactores de lecho fluidizado. *Grasas y Aceites*, 49(1), pp. 42-49. Obtenido de <https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/7787/718.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Budynas, G. R. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Obtenido de file:///E:/DOCUMENTOS/Desktop/Diseño%20en%20Ingeniería%20mecánica%209no%20Edición.pdf
- Buffiere P., Moletta R. & Fonade C. (1995). Continuous operations of a fluidized bed bioreactor for anaerobic digestion: residence time effect on degradation kinetics. *Biotechnology Letters*, 17(8), pp. 833-838.
- Buitrón, G. y Carvajal, C. (2010). Biohydrogen production from Tequila vanasses in an anaerobic sequencing batch reactor: effet of inicial substrate concentration, temperature and hydraulic retention time. *Bioresource Technology*, 101(23), pp. 9071-9077. doi:10.1016/j.biortech.2010.06.127
- Cabrera-Díaz, A. y Díaz-Marreno, M.A. (2013). Tratamiento de vinaza cubana en un reactor anaerobio empacado de flujo ascendente. (I. S. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Ed.) *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(2), pp. 41-49. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382013000200004
- Capasso, R., Cristinzio, G., Evidente, A., Scognamiglio. (December de 1992). Isolation, spectroscopy and selective phytotoxic effects of polyphenols from vegetable wastewaters. *Phytochem*, 31, pp. 4125-4128.
- Capote, L.V. (Noviembre de 2009). *Temas para la educación*. Revista digital para profesionales de la enseñanza. Obtenido de <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd6113.pdf>

- Carhuas-Pérez, W.D. & Velasquez-Gutiérrez D.J. (2018). Determinación de las condiciones de operación y diseño del proceso de coagulación para el tratamiento de vinazas de cartavio run company S.A.C. *Tesis de pregrado*. Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.
- Castillejos-Villalobos F. (2009). Disminución de la materia orgánica biodegradable presente en vinazas de mezcaleras mediante digestión anaerobia. *Tesis de pregrado*. Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca.
- Chanfón, Lorenzo . (2 de Abril-Junio de 2014). Centro Azúcar. Trimestral. Recuperado de <http://centrozucar.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2014/2/6.pdf>.
- Coca, M., Peña, M., González, G. (September de 2005). Variables affecting efficiency of molasses fermentation wastewater ozonation. *Chemosphere*, 60, pp. 1408-1415.
- CONAGUA SINA. (2018). *Plantas de tratamiento de agua residual (nacional)*. Obtenido de <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=plantasTratamiento&ver=reporte&o=3&n=nacional>
- Conesa. (s.f.). *Reactores de lecho fluidizado*. Obtenido de Universidad de Alcalice : https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/15296/6/Tema6_rlf_RUA.pdf
- Converti, A., Zilli, M., Del Borgui, M. y Ferraiolo, G. (1990). The fluidized bed reactor in the anaerobic treatment of wine wastewater. *Bioprocess Engineering*, 5, pp. 49-90.
- De Bazúa, C.D., Cabrero, M.A. y Poggi, H.M. (1991). Vinasses biological treatment by anaerobic and aerobic processes: laboratory and pilot-plant tests. *Bioresource Technology*, 35(1), pp. 87-93. doi:10.1016/0960-8524(91)90086-Y
- De Cuba, S. (2016). Escalado y dimensionamiento de una planta piloto para la producción de un extracto acuoso de Chuquiraga jussieu J. F. Gmel. *Tecnología Química*, 36(3), pp. 2224-6185. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000300001
- Díaz, M., Madejon, E., López, F., López, R., Cabrera, F. (2002). Optimization of the rate of vinasse/grape marc for co-composting process. *Process Biochem*, 37, pp. 1143-1150.
- Díaz-Baez, M.C. (1987). Reactores anaeróbicos de alta tasa. *Ingeniería e Investigación*, 4(2), pp. 11-18.
- Die erste. (s.f.). *ANSI Bridas (Acero forjado y Acero Fundido)*. Obtenido de <http://www.die-erste.com/es/product-299338/Deslizable-Slip-on-ANSI-Clase-150-Bridas-Acero-Forjado-y-Acero-Fundido.html>
- Diez, V., Fdz-polanco, F., García, P. A. (1992). Biofilm growth in an anaerobic fluidized bed reactor. *Biofilms-Science and Technology*, 223, pp. 443-448.

- DM. (s.f.). *Distribuidora Metálica S.A de C.V.* Obtenido de https://www.metalica.com.mx/pdf/DM_PLANOS.pdf
- ECOSTAR. (s.f.). Ecodena. México. Obtenido de <https://www.ecodena.com.mx/materiales-plasticos.html>
- España-Gamboa, E., Mijangos-Cortés, J. O., Hernández-Zárate, G., Domínguez-Maldonado, J.A. y Alzate-Gaviria, L. M. (2012). Methane production by treating vinasses from hydrous ethanol using a modified UASB reactor. *Biotechnology for Biofuels*, 5(82), pp. 1754-6834. doi:10.1186/1754-6834-5-82
- Espinosa-Meza, D.E., Rivera-González, G. & Maldonado-Ángeles, B.E. (2017). Caracterizando la producción y organización de los mezcaleros en Matatlán, México “Capital mundial del mezcal”. *SCIELO*, 27(50). doi:10.24836/es.v27i50.465
- Estrada-Vázquez, C., Poggi-Alvarado, H.M., Hernández-Vera, R., Fernández-Villagómez, G., Magaña-Plaza, I. y Hernández González, A. (1998). Biological post-treatment of an anaerobically-treated black liquor spills wastewater from kraft pulp mills. *Purdea industrial waste conference. Ann. Arbor. Sci., Chelsea, Mich.* , 493-503.
- EXPANSIÓN. (28 de Agosto de 2018). Oaxaca busca frenar inclusión de más estados en la denominación del origen del mezcal. *EXPANSIÓN*, 1-1.
- Fitzgibbon, F.J., Nigam, P., Singh, D., Marchant, R. (1995). Biological treatment of distillery waste for pollution-remediation. *J. Basic Microbiol*, 35(5), pp. 293-301.
- Fluida Potencia. (2015). *Potencia Fluida S.A de C.V.* . Obtenido de <http://potenciafluida.com.mx/index.html>
- García, E. P. A. y Hidalgo, M. D. (2005). Influence of substrate feed patterns on biofilm development in anaerobic fluidized bed reactors (AFBR). *Process Biochemistry*, 40, pp. 2509-2516. doi:10.1016/j.procbio.2004.10.007
- García-García, I., Bonilla-Venceslada, J.L., Jiménez-Peña, P.R., Ramos-Gómez, E. (August de 1997). Biodegradation of phenol compounds in vinasse using *Aspergillus terreus* and *Geotrichum candidum*. *Water Res*, 31(8), pp. 2005-2011.
- GNC Caldería. (2016). *Tipo de soldadura que se utiliza para acero inoxidable*. Obtenido de <http://www.gnccaldereria.es/que-tipo-de-soldadura-se-utiliza-para-acero-inoxidable/>
- Gomes, B.V., Duda, R.M., Vantini, J.S., Pine, O.W., Tiraboschi, F.M. y Oliveira, R.A. (2017). Improved methane production from sugarcane vinasse with filter cake in thermophilic UASB reactors, with predominance of *Methanothermobacter* and *Methanosarcina* archaea and *Thermotogae* bacteria. *Bioresource Technology*, 244, 371-381. doi: 10.1016/j.biortech.2017.07.106.

- Gómez, S. (2010). *SolidWorks Simulation*. Madrid, España: RA-MA.
- Gouvêa-de Godoi, L.A., Foresti, E. & Rissato-Zamariolli, D.M.H. (July de 2017). Down-flow fixed-structured bed reactor: An innovative reactor configuration applied to acid mine drainage treatment and metal recovery. *Journal of Environmental Management*, 197, PP. 597-604. doi:10.1016/j.jenvman.2017.04.027
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. D.F., México: Editorial Mexicana.
- Gutiérrez, Julian Camilo. (2009). *Aplicabilidad de las metodologías del diseño de producto en el desarrollo y creación de páginas web y diseños gráficos*. Obtenido de Departamento de ingeniería de diseño de producto Medellín:
https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/302/JulianCamilo_GutierrezR._2009.pdf?sequence=1
- INDURA. (2010). *Manual de Aceros Inoxidables*. Obtenido de
<http://www.indura.cl/Descargar/Manual%20de%20Aceros%20Inoxidables?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Fcl%2Fbiblioteca%2Fd7a1a8fe99fe4b6a9fbed6412df7e93c.pdf>
- INEGI. (2016). "*Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas*". Obtenido de
<http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx#>
- INSUMEX. (s.f.). *Los expertos en tubería de acero al carbón en México*. Obtenido de
https://tuberiadeacero-carbon.com/?gclid=EAlaIQobChMIItISS2v3p5AIVEdbACh2BQwlsEAAYASAAEgL-cPD_BwE
- Jácome-Burgos A., Suárez-López, J., Ures-Rodríguez, P. (Septiembre de 2014). *Reactores de lecho fluidizado (FT-BIO-007)*. Obtenido de
<https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Reactores+de+lecho+fluidizado.pdf/6ca7e2f6-d323-926d-9055-6e05bbed7fde>
- Jafari, J., Mesdaghinia, A., Nabizadeh, R., Farrokhi, M., Mahvi, A. H. (2013). Investigation of Anaerobic Fluidized Bed Reactor/ Aerobic Moving Bed Bio Reactor (AFBR/MMBR) System for treatment of Currant Wastewater. *Iranian J. Publ. Health.*, 42(8), pp. 860-867.
- Jafari, J., Mesdaghinia, A., Nabizadeh, R., Hoseini, M., Kamani, H. y Mahvi, A.H. (2014). Influence of upflow velocity on performance and biofilm characteristics of Anaerobic Fluidized Bed Reactor (AFBR) in treating high-strength wastewater. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 12, pp. 139. doi:10.1186/s40201-014-0139-x.
- Jáuregui, J.A., Méndez, H.O, González, V., Snell, R., Alcaraz, V. y Godon, J.J. (2014). Anaerobic treatment of tequila vinasses under seasonal operating conditions: Start-up, normal operation and restart-up after a long stop and starvation period. *Bioresource Technology*, 168, pp. 33-40. doi:10.1016/j.biortech.2014.04.006

- Jiménez, A. M., Borja, R., Martín, A., Raposo, F. (2006). Kinetic analysis of the anaerobic digestion of untreated vinasses and vinasses previously treated with *Penicillium decumbens*. *J. Environ. Manage*, 80, pp. 303-310.
- Jiménez, A.M., Borja, R., Martín, A. (November de 2003). Aerobic-anaerobic biodegradation of beet molasses alcoholic fermentation wastewater. *Process Biochem*, 38, pp. 1275-1284.
- JN Aceros. (16 de Octubre de 2018). *Acero Inoxidable 304 Y 316: Distintos Grados Ofrecen Resistencia Única A La Corrosión*. Obtenido de <https://jnaceros.com.pe/blog/acero-inoxidable-304-316-resistencia-corrosion/>
- JN Aceros. (20 de Septiembre de 2019). *Ventaja de los tubos de acero inoxidable en la distribución del agua*. Obtenido de <https://www.jnaceros.com.pe/blog/>
- JN Aceros. (23 de Abril de 2021). *Todo Lo Que Tienes Que Saber Sobre El Acero Inoxidable 304*. Obtenido de <https://jnaceros.com.pe/blog/propiedades-acero-inoxidable/>
- Juárez Ana, A. A. (Marzo de 2015). Estudio hidrodinámico de un reactor de lecho fluidizado en paralelo con diferentes configuraciones. *Energía Química y Física*, pp. 288- 294.
- Kanimozhi, R. & Vasudevan N. (2014). Effect of organic loading rate on the performance of aerobic SBR treating anaerobically digested distillery wastewater. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16, pp. 467-476. doi:10.1007/s10098-013-0639-X
- Kannabiran, B., Pragasam, A. (1993). Effect of distillery effluent on seed germination, seedling growth and pigment content of *Vigna mungo* (L.) Hepper (CVT9). *Geobioscience*, 20, pp. 108-112.
- Lalov, I. G., Krysteva, M.A. & Phelouzat, J.L. (2001). Improvement of biogas production from venasse via covalently immobilized methanogens. *Bioresource Technology*, 79(1), pp. 83-85. doi:10.1026/S0960-8524(01)00045-1
- Lalov, I.G., Krysteva, M.A., Phelouzat, J.L. (August de 2001). Improvement of biogas production from vinasses via covalently immobilized methanogens. *Bioresource Technology*, 79, pp. 83-85. doi:10.1016/S0960-8524(01)00045-1
- Latif, M.A., Ghufuran, R., Wahid, Z.A. y Ahmad, A. (2011). *Integrated application of upflow anaerobic sludge blanket reactor for the treatment of wastewaters*. *Water Res.*, 45, 4683-4699.
- León, R. (2019). Escalamiento de Biorreactores [youtube]. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=OoXQzM8J0lw>
- López-López, A., Davila-Vazquez, G., León-Becerril, E., Villegas-García, E., y Gallardo-Valdez, J. (2010). Tequila vinasses: generation and full scale treatment processes. *Reviews in*

Environmental Science and Bio/Technology, 9(2), pp. 109–116. doi:10.1007/s11157-010-904-9.

- Madejón, E., López, R., Murillo, J.M. & Cabrera, F. (March de 2001). Agricultural use of three (sugar-beet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 84, pp. 55-65.
- Mane, J.D., Modi S., Nagawade, S., Phadnis, S.P., Bhandari, V.M. (2006). Treatment of spentwash using chemically modified bagasse and colour removal studies. *Bioresour Technol*, 97, pp. 1752-1755.
- Marino-Marmolejo, E.N., Corbalá-Robles, L., Cortez-Aguilar, R.C., Contreras-Ramos, S.M., Bolaños-Rosales, R.E. y Davila-Vazquez, G. (2015). Tequila vinasses acidogenesis in a UASB reactor with Clostridium predominance. *SpringerPlus*, 4, pp. 419. doi:10.1186/s40064-015-1193-2.
- Marques dos Reis, C., Fronja-Carosia, M., Kimiko-Sakamoto, I., Amancio-Varesche, M.V. y Luiz-Silva, E. (2015). Evaluation of hydrogen and methane production from sugarcane vinasse in an anaerobic fluidized bed reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(27), pp. 8498-8509. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.04.136.
- McCabe, W.L., Smith, J.L. & Harriot, P. (2007). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. *McGraw-Hill/Interamericana*, Séptima edición.
- Méndez, A.H., Snell, C.R., Alcaraz, G.V., González, Á.V. y Pelayo, O.C. (2010). Anaerobic treatment of Tequila vinasses in a CSTR-type digester. *Biodegradation*, 21, pp. 357-363. doi:10.1007/s10532-009-9306-7
- METALIUM. (2014). *Metalium acero al carbono*. Puebla. Obtenido de <https://metalium.mx/acero-al-carbono>
- Metalografía. (26 de Julio de 2012). *Aceros inoxidables*. Obtenido de <http://blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables/>
- MIPSA. (2019). *Clasificación del acero*. Obtenido de <https://www.mipsa.com.mx/dotnetnuke/Sabias-que/Clasificacion-del-acero>
- Molina-Cortés, A., Sánchez-Motta, T., Tobar-Tosse, F. y Quimbaya, M. (2019). Spectrophotometric Estimation of Total Phenolic Content and Antioxidant Capacity of Molasses and Vinasses Generated from the Sugarcane Industry. *Waste and Biomass Valorization*, pp. 1-11. doi:10.1007/s12649-019-00690-1
- Moran-Salaza, R. G., Sanchez-Lizarraga, A. L., Rodriguez-Campos, J., Davila-Vazquez, G., Marino-Marmolejo, E. N., Dendooven L., y Contreras-Ramos, S. M. (2016). Utilization of vinasses as soil amendment: consequences and perspectives. *Springer Plus*.

- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. Obtenido de https://jorgegonzalezconeio.files.wordpress.com/2010/11/disec3b1o_mecanico_mott_4ed.pdf
- Normas, B. (1994). *Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-1994, Bebidas alcohólicas. Mezcal. Especificaciones*. Obtenido de <http://www.colpos.mx/bancodenormas/noficiales/NOM-070-SCFI-1994.PDF>
- Oaxaca, G. d. (s.f.). *PLAN ESTATAL DE DESARROLLO 2016-2022*. Obtenido de finanzasooaxaca.gob.mx: https://www.finanzasooaxaca.gob.mx/pdf/planes/Plan_Estatal_de_Desarrollo_2016-2022.pdf
- Ortiz Bardales, P. (07 de Marzo de 2014). *Reactores Anaerobios*. Obtenido de <https://1793ho.files.wordpress.com/2014/03/2g-tratamiento-anaerobio-po2014.pdf>
- Palma Felipe, Pérez Pilar y Meza Vinicio. (2016). *Diagnóstico de la cadena de valor mezcal en las regiones de Oaxaca*. Obtenido de <http://www.coplade.oaxaca.gob.mx/wp-content/uploads/2017/04/Perfiles/AnexosPerfiles/6.%20CV%20MEZCAL.pdf>
- Pant, D. y Adholeya, A. (2007). Biological approaches for treatment of distillery wastewater: A review. *Bioresource Technol*, 98, pp.2321-2334.
- Peña, M., Coca, M., González, G., Rioja, R., García, M.T. (June de 2003). Chemical oxidation of wastewater from molasses fermentation with ozone. *Chemosphere*, 51, pp. 893-900.
- Pérez, M., Romero, L.I. & Sales, D. (June de 1999). Anaerobic Thermophilic fluidized bed treatment of industrial wastewater: effect of F:M relationship. *Chemosphere*, 38(14), pp. 3443-3461.
- Pérez-García, M., Romero-García, L.I., Rodríguez-Cano, R. & Sales-Márquez, D. (2005). High rate anaerobic thermophilic technologies for distillery wastewater treatment. *Water Sci. Technol*, 51(1), pp. 191-198.
- Plan Rector. (2019). *Siente mezcal*. Obtenido de Sistema Producto Maguey-Mezcal: http://www.sientemezcal.com/desarrollo_productivo_agroindustrial_y_de_productos.php#
- Retes, J. (2014). *Biorremediación de vinazas de la industria tequilera y mezcalera mediante tratamiento fisicoquímico y biológico (Tesis doctoral)*. Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes.
- Robles- González, V., Galíndez-Mayer, J., Rinderknecht-Seijas, N. y Poggi-Varaldo, H.M. (2012). Treatment of mezcal vinasses: A review. *Journal of Biotechnology*, 157, pp. 524-546. doi:10.1016/j.jbiotec.2011.09.006

- Robles-González, V., Poggi-Varaldo, H.M., Galíndez-Mayer, J. y Ruiz-Ordaz, N. (2018). Combined Treatment of Mezcal Vinasses by Ozonation and Activated Sludge. *WATER ENVIRONMENT RESEARCH*, 90, pp. 927-938. doi:10.2175/106143017X15054988926433
- Robles-González, V.S. y Poggi-Varaldo H.M. (2017). Obtención de Biometano a partir del tratamiento de vinazas mezcaleras. *International Energy Conference: IEC2017, ISSN: 2448-3624*, pp. 323-332.
- Rodríguez, C. A., & De la Cerna, H. C. (2017). El mezcal, su producción y tratamiento de residuos. *Alianzas y Tendencias*, 2(8), pp. 10-14.
- Sánchez, S. (16 de Abril de 2020). *Exportaciones de mezcal se desploman 80% por pandemia de coronavirus*. (Forbes México) Obtenido de <https://www.forbes.com.mx/negocios-exportaciones-mezcal-desplomam-pandemia-coronavirus/>
- Sangave, P.C., Gogate, P.R. & Pandit A.B. (2007). Combination of ozonation with conventional aerobic oxidation for distillery wastewater treatment. *ScienceDirect*, 68(1), pp. 32-41. doi:10.1016/053
- Sangave, P.C., Gogate, P.R. & Pandit, A.B. (2007). Ultrasound and ozone assisted biological degradation of thermally pretreated and anaerobically pretreated distillery wastewater. *SciennceDirect*, 68(1), pp. 42-50. doi:10.1016/052
- Strong, P.J. & Burgess, J.E. (May de 2008). Treatment Methods for Wine-Related and Distillery Wastewaters: A Review. *Bioremediation Journal*, 12(2), pp. 70-87. doi:10.1080/10889860802060063
- Tejada, M., García-Martínez, A.M., Parrado. (2009). Effects of a vermicompost composted with beet vinasse on soil properties, soil losses and soil restoration. *CATENA* 77(3), pp. 238-247.
- Thanapimmetha, A., Srinophakun, P., Amat, S. & Saisriyoot, M.,. (2017). Decolorization of molasses-based distillery wastewater by means of pulse electro-Fenton process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), pp. 2305-2312. doi:10.1016/j.jece.2017.04.030
- Turan, M. (2000). Mechanisms of Biofilm Detachment in Anaerobic Fluidized Bed Reactors. *Environmental Technology*, 21(2), pp. 177-183. doi:10.1080/09593330.2000.9618898
- Universidad de Sonora. (2017-2018). Escalamiento. Sonora. Obtenido de <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-de-sonora/introduccion-a-la-ingenieria-quimica/ensayos/resumen-escalamiento-plantas-piloto/2852338/view>
- Vega-Vera, N.V. y Pérez-Akaki, P. (2017). Oaxaca y sus regiones productoras de mezcal: un análisis desde cadenas globales de valor. *Perspectivas Rurales*, 15(29), pp. 103-132.

- Viguera-Carmona, S., Vian-Pérez, J., Velásco-Pérez, A. y Zafra-Jiménez, G. (2016). Diseño y operación de un reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con lecho de lodos (RAFAELL) para la producción de metano. *Sistemas Experimentales*, 3(8), pp.1-7.
- Vlyssides, A.G., Israilides, C.J., Loizidou, M., Karvouni, G., Mourafeti, V. (1997). Electrochemical treatment of vinasse from beet molasses. *Water Sci. Technol*, 36(2-3), pp. 271-278.
- Wei, C., Zhang, T., Feng, C., Wu, H., Deng, Z., Wu, C. y Lu B. (2011). Treatment of food processing wastewater in a full-scale jet biogas internal loop anaerobic fluidized bed reactor. *Biodegradation*, 22, pp. 347-357. doi:10.1007/s10532-010-9405-5.

ANEXOS

A. Proveedores de tubos de acero inoxidable

A1.- Dimensiones de tubos comerciales (TC) sin costura de acero inoxidable ASTM.

RAnLEF Nivel Planta Piloto		Dimensiones de los tubos de acero inoxidable comercial									
Relación altura/diámetro H_{LF}/D_{LF}	Diámetro del lecho fluidizado D_{LF}		Tamaño Diámetro Nominal NPS	Diámetro exterior O.D		Cédula SCH	Espesor de la pared WT		Diámetro interior I.D		
	Mm	In		Mm	In		mm	in	mm	in	
15	181	7.126	8	219.075	8.625	140	20.625	0.812	177.825	7.001	
12	195	7.677	8	219.075	8.625	XS(80)	12.7	0.500	193.675	7.625	
10	207	8.149	8	219.075	8.625	20	6.35	0.250	206.375	8.125	
8	223	8.779	10	273.05	10.750	XXS(140)	25.4	1.000	222.25	8.750	
6	246	9.685	10	273.05	10.750	80	15.088	0.594	242.875	9.562	

Nota. Disponibles en la empresa Potencia Fluida S.A. de C.V. proveedores de México.

Tabla A2.- Dimensiones de tubos comerciales (TC) ASTM A312.

RAnLEF Nivel Planta Piloto		Dimensiones de los tubos de acero inoxidable con y sin costura, calidad: 304, 304L, 316 y 316L									
Relación altura/diámetro H_{LF}/D_{LF}	Diámetro del lecho fluidizado D_{LF}		Tamaño Diámetro Nominal NPS	Diámetro exterior O.D		Cédula SCH	Espesor de la pared WT		Diámetro interior I.D		
	Mm	In		Mm	In		mm	in	mm	in	
15	181	7.126	No Existe (NE)	---	---	---	---	---	---	---	
12	195	7.677	NE	---	---	---	---	---	---	---	
10	207	8.149	8	219.075	8.625	---	0.5	12.7	206.375	8.125	
8	223	8.779	8	219.075	8.625	0.322	8.18	---	210.895	8.302	
6	246	9.685	NE	---	---	---	---	---	---	---	

Nota. Disponibles en la empresa In Aceros, proveedores de Nuevo León.

Tabla A3.- Dimensiones de tubos comerciales (TC) ASTM A312.

RAnLEF Nivel Planta Piloto		Dimensiones de los tubos de acero inoxidable comercial ASTM A312				Características Tubería PIPE
Relación altura/diámetro H_{LF}/D_{LF}	Diámetro del lecho fluidizado D_{LF}	Tipo de inoxidable	Cédula SCH	Diámetro in	Mm	
15	Mm 181	304, 304L,	5, 10, 40	1/2 - 14	12.7-355.6	Tubería de conducción de fluidos
12	195	316L				Tiene muy baja tasa de corrosión generalizada en agua.
10	207					Fácil de doblar y cortar
8	223					Excelente resistencia a la gama completa de agua potable incluyendo diferentes niveles de cloruros.
6	246					Su vida útil es de más de cincuenta años. No requiere ningún recubrimiento adicional.

Nota. Disponibles en la empresa mexicana Prominox.

Los grados austeníticos son aleaciones no magnéticas, los aceros hierro-cromo-níquel (serie 300) es el más común de este grupo, debido a que son los más resistentes a la corrosión de todos los grupos.

B. Modelo y análisis de recipiente a presión de pared delgada

7.106.- El tanque de almacenamiento presurizado, tiene un diámetro exterior de 3.3 m y un espesor de pared de 18 mm. Cuando la presión interna del tanque es de 1.5 MPa, determine los esfuerzos normal y cortante máximos en el tanque.

Usando las ecuaciones para recipientes a presión de pared delgada, es posible determinar el estado de esfuerzos plano en cualquier punto dentro de la tapa del extremo esférico y dentro del cuerpo cilíndrico.

- a) Cuerpo cilíndrico del tanque. El estado de esfuerzos dentro de cualquier punto en el cuerpo cilíndrico, se determina el esfuerzo normal máximo $\sigma_{m\acute{a}x}$ y el esfuerzo cortante máximo $\tau_{m\acute{a}x}$ usando las ecuaciones [16] y [21]. Se describe

$$P = 1.5 \text{ MPa}, t = 0.018 \text{ m}, r = 1.65 - 0.018 = 1.632 \text{ m}$$

Sustituyendo valores

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_1 = \frac{Pr}{t} = \frac{(1.5 \text{ MPa})(1.632 \text{ m})}{0.018 \text{ m}} = 136 \text{ MPa}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \sigma_2 = \frac{Pr}{2t} = \frac{(1.5 \text{ MPa})(1.632 \text{ m})}{2(0.018 \text{ m})} = 68 \text{ MPa}$$

Modelado del tanque de almacenamiento presurizado desarrollado en SolidWorks®

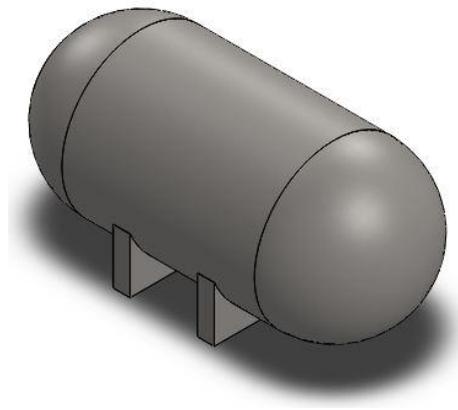


Figura B1.-Tanque de almacenamiento presurizado.

Tipo de resultado: Análisis esfuerzo normal máximo

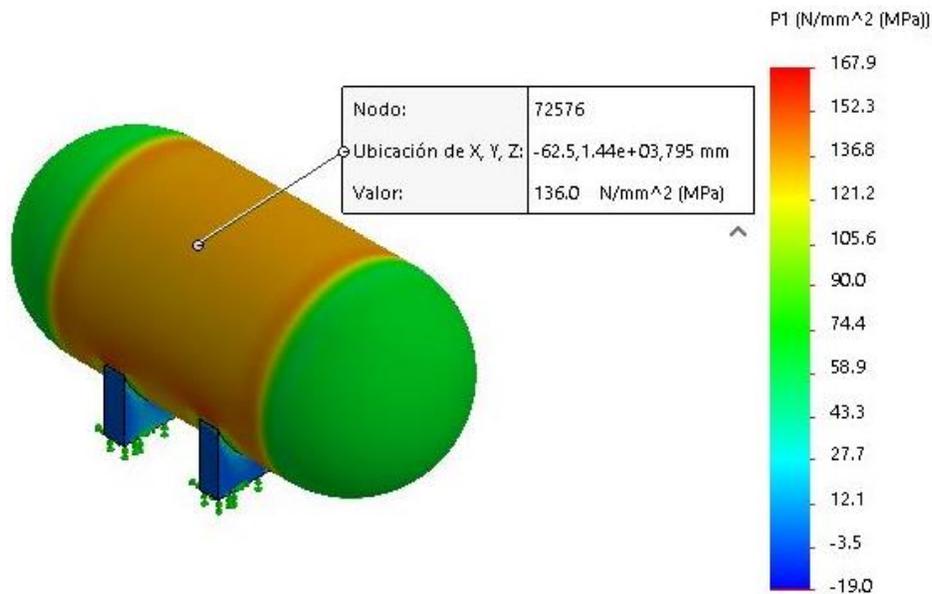


Figura B2.-Esfuerzo normal máximo

El estado de esfuerzo normal máximo es 136 MPa, valor identificado dentro del cuerpo cilíndrico, como se muestra en la Figura B2.

- b) Cuerpo cilíndrico del tanque. El estado de esfuerzos dentro de cualquier punto en el cuerpo cilíndrico, se determina el esfuerzo Von Mises σ' sustituyendo los valores de $\sigma_{m\acute{a}x}$ y $\tau_{m\acute{a}x}$ usando la ecuación [10].

Se describe

$$\sigma_1 = 136 \text{ MPa}, \sigma_2 = 68 \text{ MPa}$$

Sustituyendo valores

$$\sigma' = \sqrt{136^2 + 68^2 - (136)(68)} = 117.7 \text{ MPa}$$

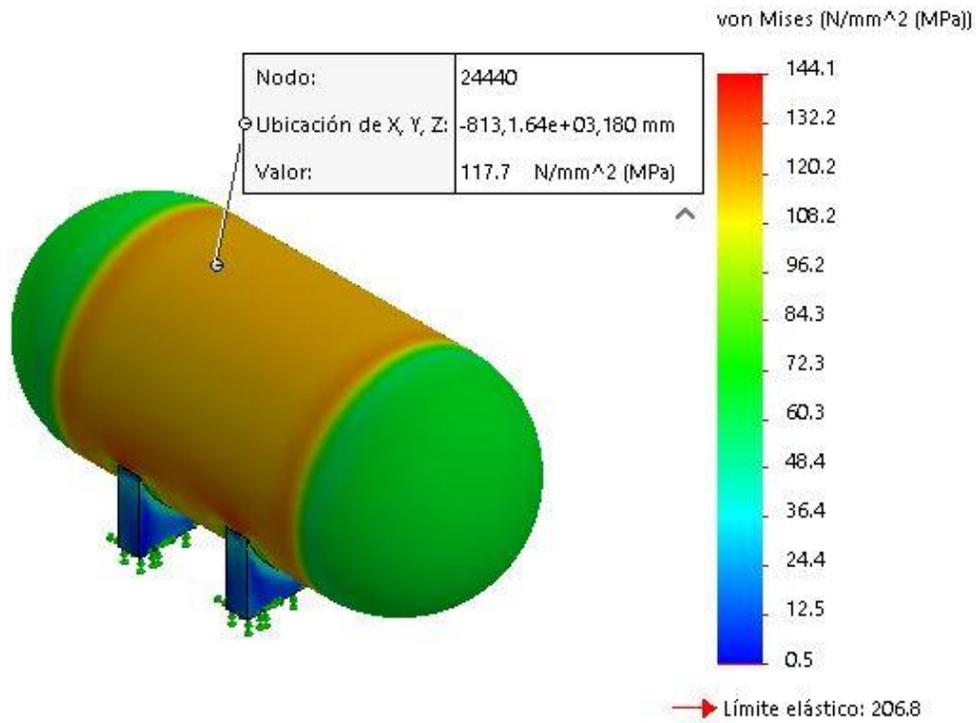
Tipo de resultado: Análisis esfuerzo Von Mises

Figura B3.- Esfuerzo Von Mises

El esfuerzo Von Mises identificado dentro del cuerpo cilíndrico es 117.7 MPa como se muestra en la Figura B3 con un límite elástico de 206.8 MPa.

C. Propuestas del diseño de logotipo STAR-V (Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales-Vinazas)

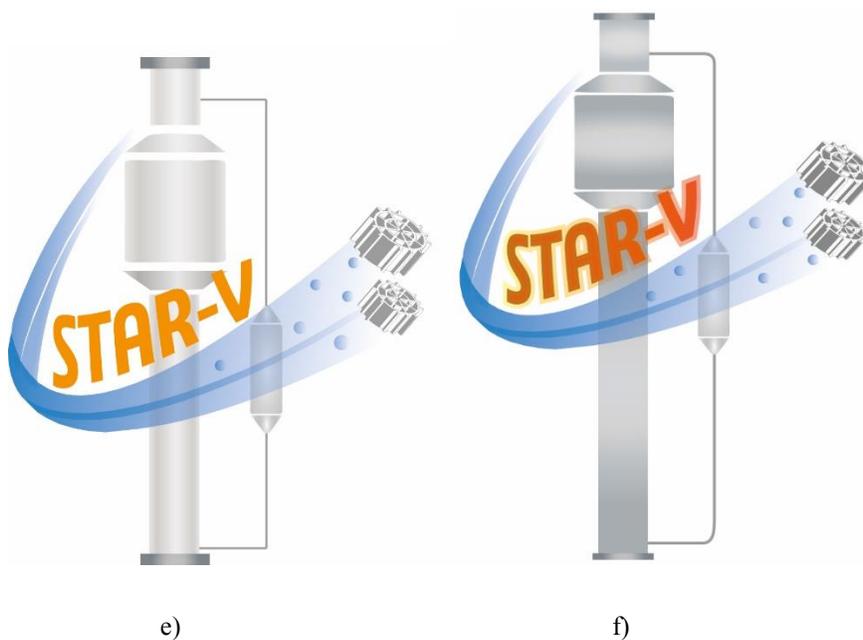
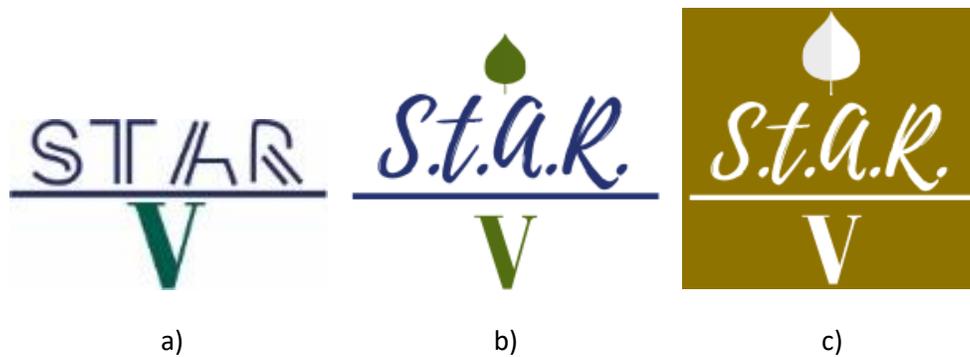


Figura C1.- a) Logotipo 1 STAR-V; b) Logotipo 2 STAR-V; c) Logotipo 3 STAR-V; d) Logotipo 4 STAR-V; e) Logotipo 5 STAR-V; f) Logotipo 6 STAR-V.