

Máquina de wet-laid nonwoven de fibra de carbono reciclada (rCF)

de la Torre Santiago

Cosatto Lucía

Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Escuela de Ingeniería Mecánica

Rosario, Argentina

2026

Máquina de wet-laid nonwoven de fibra de carbono reciclada (rCF)

de la Torre Santiago

Cosatto Lucía

Proyecto Final / Informe de Tesis de Ingeniería Mecánica presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero/a Mecánico/a

Directores:

Ing. Sismondi Pedro – Ing. Sismondi Juan – Ing. Guillermo

Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Escuela de Ingeniería Mecánica

Rosario, Argentina

Año 2026

A nuestras familias, por ser el pilar fundamental en nuestras vidas, brindándonos su apoyo incondicional, comprensión y aliento constante para alcanzar cada una de nuestras metas.

A nuestros amigos, por la compañía incondicional, los momentos compartidos dentro y fuera de la facultad, y el apoyo mutuo durante todos estos años de formación profesional y personal.

A todos ellos, nuestro más profundo y sincero agradecimiento por acompañarnos a finalizar esta etapa.

Agradecimientos

Llegar al final de este camino y culminar nuestro proyecto final de Ingeniería Mecánica no hubiese sido posible sin el apoyo de quienes estuvieron presentes en cada etapa. Este trabajo representa no solo años de estudio, dedicación y esfuerzo compartido, sino también el respaldo constante de personas e instituciones que confiaron en nuestro potencial y nos brindaron las herramientas necesarias para alcanzar esta meta.

Queremos expresar nuestro más sincero reconocimiento a la universidad pública, gratuita y de calidad. Una institución que cobra vida gracias al compromiso, la vocación y el conocimiento de cada docente que, día a día y con enorme voluntad, no solo nos transmitió los fundamentos técnicos de la ingeniería, sino también los valores éticos y el espíritu crítico indispensables para ejercer la profesión al servicio de la sociedad.

A nuestras familias, por ser el pilar fundamental que sostuvo todo este recorrido. Su amor incondicional, su paciencia infinita y su esfuerzo diario hicieron posible que hoy estemos aquí. Gracias por creer en nosotros incluso en los momentos de mayor incertidumbre, por celebrar cada examen aprobado y por recordarnos siempre la importancia de perseverar para alcanzar nuestros sueños.

Finalmente, a nuestros amigos y compañeros de ruta, quienes convirtieron los desafíos cotidianos en recuerdos imborrables. Gracias por las largas jornadas de estudio compartidas, las charlas necesarias y el apoyo mutuo frente a cada entrega. Su compañía no solo hizo el trayecto más ameno, sino que nos formó profundamente como personas, recordándonos el valor del trabajo en equipo, la empatía y la verdadera amistad.

Resumen

El presente Informe de Tesis aborda el diseño de una máquina para la producción de mantas no tejidas (non-woven) compuestas por fibras de carbono recicladas (rCF), mediante el proceso de wet-laid o formación en suspensión húmeda. El diagnóstico del proceso evidenció que la naturaleza hidrofóbica de las fibras de carbono recicladas, junto con los residuos de matriz remanentes de la pirólisis, dificulta su dispersión homogénea y favorece la aparición de defectos críticos tales como "ropes", "bundles", heterogeneidad de gramaje y anisotropía mecánica.

Se propone el desarrollo de una línea de producción integrada compuesta por un sistema de tanques de mezcla y reserva, un mezclador de geometría optimizada, un headbox presurizado, una rampa inclinada de deposición con sacudidor transversal y succión por zonas, y una etapa final de secado térmico mediante rodillos calientes. El objetivo es obtener un mat con gramaje controlado de 200 ± 10 g/m², un espesor uniforme de 0,50 ± 0,05 mm y una porosidad o contenido de vacíos inferior al 1%.

El diseño contempla la validación de los subsistemas críticos mediante simulaciones CFD cuando resulte aplicable, y la definición de los parámetros objetivo a partir del estudio de bibliografía especializada en procesos wet-laid.

Palabras clave: fibra de carbono reciclada, rCF, wet-laid, non-woven, mat, isotropía, gramaje, dispersión de fibras.

Abstract

This Thesis Report addresses the design of a machine for producing non-woven mats made of recycled carbon fibers (rCF) through the wet-laid process, or wet suspension forming. Process diagnosis revealed that the hydrophobic nature of recycled carbon fibers, together with residual matrix left over from pyrolysis, hinders homogeneous dispersion and favors critical defects such as "ropes", "bundles", grammage heterogeneity, and mechanical anisotropy.

An integrated production line is proposed, composed of a mixing and storage tank system, an optimized-geometry mixer, a pressurized headbox, an inclined forming ramp with a transverse shaker and zone suction, and a final thermal drying stage using heated rollers. The goal is to obtain a mat with a controlled grammage of 200 ± 10 g/m², a uniform thickness of 0.50 ± 0.05 mm, and a void content below 1%.

The design contemplates the validation of critical subsystems through CFD simulations where applicable, and the definition of target parameters based on the study of specialized wet-laid process literature.

Keywords: recycled carbon fiber, rCF, wet-laid, non-woven, mat, isotropy, grammage, fiber dispersion.

Contenido

Agradecimientos **3**
Resumen **4**
Abstract **5**
Contenido **6**
Introducción **9**
Problemática y necesidad detectada **11**
Objetivos y alcance del proyecto **12**
Objetivo general **12**
Objetivos específicos **12**
Alcance del proyecto **12**
Resultado esperado **12**
Capítulo 1: Análisis del proceso wet-laid de mats rCF **13**
1.1 Descripción general del proceso **13**
1.2 Requerimientos del producto **13**
1.2 Material a procesar: fibra de carbono reciclada (rCF) **14**
1.3 Aditivos del proceso: rol de la carboximetilcelulosa (CMC) **15**
1.3 Capacidad y parámetros de producción **15**
1.4 Condiciones de trabajo y defectos críticos a evitar **16**
1.5 Aplicaciones del producto y relación con los requerimientos técnicos 16
Capítulo 2: Desarrollo conceptual de la planta **17**
2.1 Descripción general del equipo 17
2.2 Alternativas evaluadas **17**
2.2.1 Mezclador 17
2.2.2 Headbox 18
2.3 Selección de la solución adoptada **18**
2.4 Principio de funcionamiento **19**
2.5 Circuito de recirculación y balance hídrico **21**
2.6 Configuración del proceso y control de variables **21**
Capítulo 3: Diseño mecánico del sistema **22**
3.1 Sistema de tanques: mezclador y reserva **22**
3.1.1 Tanque mezclador 22
3.1.2 Tanque de reserva 22
3.2 Sistema de mezclado (mixer) **23**
3.3 Headbox y unidad de distribución **24**
3.4 Rampa inclinada y sistema de deposición **24**
3.5 Ausencia de sacudidor transversal 25
3.6 Succión por zonas **26**

3.6.1 Primera etapa de secado 26
3.6.2 Segunda etapa de secado 26
3.7 Rodillos calientes y consolidación térmica 27
3.8 Diseño final obtenido 28
Capítulo 4: Sistema de tanques 30
4.1 Indroduccion al capitulo 30
4.2 Tanque mezclador 30
4.2.1 Fundamento de la Geometría General 30
4.2.2 Volumen útil y tiempo de residencia 30
4.2.3 Dimensionamiento del diámetro y la altura 31
4.2.4 Deflectores 32
4.2.5 Conexiones, entradas y salida 32
4.2.6 Materiales 33
4.2.7 Regulación de variables 33
4.3 Tanque de reserva 34
4.3.1 Fundamento de la Geometría General 34
4.3.2 Volumen útil, diámetro y altura 35
4.3.3 Agitación, descarga y recirculación 35
4.4 Diseño final obtenido 36
Capítulo 5: Headbox y sistema de deposición 37
5.1 Introducción al capítulo 37
5.2 Función y geometría de sección cambiante 37
5.3 Dimensiones adoptadas 37
5.4 Tubos de descarga 38
5.5 Estudio CFD 39
5.6 Presión de operación y sistema de bombeo 41
5.7 Material y construcción 42
5.8 Control de altura de la rampa y acumulación de mezcla 42
5.9 Integración headbox-rampa y control de espuma 43
5.10 Diseño final obtenido 44
Capítulo 6: Mesa de formación inclinada, Sistemas de Vacío y Recirculación de Agua 47
6.1 Introducción al capítulo 47
6.2 Disposición general de la mesa de formación 47
6.2.1 Justificación de la tela inclinada 47
6.2.2 Tela comercial escogida 48
6.2.3 Roles funcionales de los rodillos 48
6.3 Deshidratación por vacío 49
6.3.1 Criterio de diseño: perfil de vacío creciente 49

6.3.2 Consistencia final objetivo y su fundamento 50
6.4 Sistema de deshidratación por vacío 50
6.4.1 Fundamento normativo 50
6.4.2 Zonificación y niveles de vacío 51
6.5 Recuperación y reutilización del agua extraída 51
6.6 Diseño final obtenido 52
Capítulo 7: Memoria de cálculo - síntesis y trazabilidad 55
7.1 Alcance del capítulo 55
7.2 Tabla de síntesis de parámetros de diseño 55
7.3 Ecuación general de gramaje y balance de masa del proceso 56
7.4 Diagrama de correlación de parámetro 57
7.5 Sedimentación de fibra individual (Ley de Stokes) — resultado ya aplicado 58
7.6 Dimensionamiento del Motor del Mezclador Primario 58
7.6.1 Criterio de diseño adoptado 58
7.6.2 Parámetros de diseño 58
7.6.3 Velocidad de rotación 59
7.6.4 Potencia y torque 59
7.6.5 Resultado final 59
7.7 Cálculo de caudales y balance de masa 60
7.7.1 Balance de caudales del lazo de aproximación 60
7.8 Selección y dimensionamiento de bombas 61
Capítulo 8: Simulaciones y verificaciones 62
8.1 Introducción y alcance 62
8.2 Simulación CFD del headbox 62
8.2.1 Parámetros de diseño y configuración general del headbox 62
8.2.2 Estudio paramétrico del porcentaje de recirculación 63
8.2.3 Verificación de trayectorias de flujo en el punto de diseño 65
8.3 Simulación CFD del tanque mezclador 67
8.3.1 Parámetros de diseño y configuración general del tanque de mezcla 67
8.3.2 Verificación del torque de agitación 68
8.3.3 Campos de velocidad y zonas de baja velocidad 68
8.3.4 Trayectorias de fluido e intensidad de turbulencia 72
8.4 Síntesis del capítulo 74
Conclusión 76
Recomendaciones 77
Bibliografía 78
Anexo A: Fichas técnicas 80
Anexo B: Memória de cálculo y diseño 81
Anexo C: Planimetría 82

Introducción

Este proyecto consiste en el diseño y la optimización de una maquinaria para la producción de mantas no tejidas (non-woven) compuestas por fibras de carbono recicladas (rCF). El proceso empleado es el wet-laid o formación en suspensión húmeda, el cual utiliza una solución acuosa de fibras para formar un velo continuo. El producto objetivo es un mat con un gramaje controlado de 200 ± 10 g/m², un espesor uniforme de 0,50 ± 0,05 mm y una porosidad o contenido de vacíos inferior al 1%.

Estas mantas de rCF se utilizan principalmente como esqueleto en materiales compuestos estructurales y secundarios de una gran variedad de productos. Sus aplicaciones abarcan sectores de alta exigencia como el automotriz (paneles), aeroespacial, deportivo (raquetas, bicicletas), industria ferroviaria y el desarrollo de blindajes contra interferencia electromagnética. Por lo que la reestructuración de las rCF en materiales que conserven las principales características de las fibras de carbono vírgenes es de vital importancia para que el reciclado sea útil en sí mismo.

La calidad del producto final depende críticamente de la precisión mecánica de la línea de producción. Una máquina con un diseño o una operación deficientes genera defectos que inhabilitan el material para su uso industrial, tales como la formación de "ropes" y "bundles" (cuerdas o nudos de fibras entrelazadas), heterogeneidad o "clumps" (grumos o zonas de baja densidad), falta de isotropía (alineación preferencial de las fibras) y defectos de consolidación (humedad residual y porosidad interna elevadas).

El desafío central de la ingeniería en este proceso radica en las etapas de mezclado y deposición. Las fibras de carbono son hidrofóbicas por naturaleza y, tras el proceso de pirólisis para su reciclaje, conservan residuos de matriz que dificultan su separación individual y correcta distribución homogénea en la suspensión. El diseño de ambas etapas debe ser preciso. Para el caso del tanque de mezclado, es importante disminuir la formación de vacíos dentro del mismo y controlar la agitación excesiva ya que puede quebrar los filamentos frágiles. Por otro lado, en la etapa de deposición, se necesita de una unidad de distribución (headbox) capaz de distribuir de forma pareja la totalidad de la suspensión en el ancho de trabajo de la máquina. Además, un drenaje muy veloz arrastra las fibras finas y desorganiza el velo antes de que se consolide, impidiendo lograr la homogeneidad necesaria para aplicaciones de alto desempeño.

La solución técnica desarrollada consiste en una línea de producción integrada que optimiza cada fase de la etapa húmeda para garantizar la isotropía y uniformidad del material. Los componentes principales del sistema son:

- Sistema de Mezclado y Doble Contención: geometría optimizada para una dispersión rápida de las fibras en agua junto a un agente ligante químico (CMC), con un tanque de reserva que mantiene la suspensión homogénea y la despacha según

los requerimientos de la línea, y un tanque de mezclado donde las fibras se dispersan de forma uniforme. Se incluye la utilización de un mezclador diseñado para tener la posibilidad de variar el ángulo de ataque de las paletas de modo de aumentar el grado de control sobre el proceso de mezclado en tiempo real durante la producción.

- Unidad de Distribución y Rampa Inclinada: la pulpa se descarga mediante un sistema de distribución compuesto por múltiples tubos de liberación que seccionan el flujo sobre una rampa inclinada, permitiendo operar con suspensiones de alta dilución (baja consistencia).
- Cinta de producción, con Sacudidor Transversal y Succión por Zonas: cinta motorizada con un mecanismo de sacudido transversal que complementa la dispersión de las fibras sobre la malla, junto con cajas de succión que realizan una extracción de agua de manera controlada.
- Secado Térmico y Consolidación: prensado mecánico suave y rodillos calentados por vapor saturado que evaporan la humedad residual para llevar el mat a su humedad final objetivo.
- Monitoreo y Bobinado: sistema de medición integrado que escanea en tiempo real el perfil de humedad, peso y espesor, de modo de retroalimentar al sistema de control y actuar sobre las variables del proceso.

El sistema completo se modelará y se validarán los resultados a partir de simulaciones CFD cuando sea aplicable, obteniendo los valores objetivo a partir del estudio del tema en papers y bibliografía especializada.

Problemática y necesidad detectada

Las fibras de carbono recicladas (rCF), obtenidas mediante procesos de pirólisis a partir de residuos de materiales compuestos, presentan características que dificultan su reincorporación directa en procesos productivos convencionales. Su naturaleza hidrofóbica, sumada a los residuos de matriz remanentes del proceso de reciclado, favorece la aglomeración de fibras y dificulta su dispersión homogénea en medio acuoso.

Los sistemas de agitación convencionales, basados en baffles (deflectores) estáticos, generan zonas de estancamiento ("puntos muertos") donde las fibras tienden a acumularse en lugar de dispersarse, mientras que niveles de agitación excesivos pueden fracturar los filamentos, reduciendo su longitud efectiva y, con ello, su capacidad de refuerzo mecánico en el material compuesto final.

En la etapa de deposición, un drenaje de agua demasiado veloz arrastra las fibras más finas y desorganiza el velo antes de que este logre consolidarse, mientras que un drenaje insuficiente no permite fijar a tiempo la disposición aleatoria de las fibras lograda en la rampa y significa un costo energético mayor en la etapa de secado.

Ambos escenarios comprometen la homogeneidad de gramaje, la isotropía mecánica y el contenido de vacíos del producto final, parámetros críticos para su empleo en aplicaciones estructurales de alta exigencia que son objetivo para la viabilidad del proceso industrial.

Frente a este escenario, se detecta la necesidad de desarrollar una línea de producción específicamente diseñada para las particularidades de la fibra de carbono reciclada, que resuelva de manera integrada las etapas de mezclado, deposición, consolidación y secado, garantizando un producto con propiedades reproducibles y aptas para su uso como refuerzo estructural y comercialización.

Objetivos y alcance del proyecto

Objetivo general

Diseñar una máquina de formación mediante el proceso wet-laid para la producción de mantas non-woven de fibra de carbono reciclada (rCF), capaz de garantizar isotropía mecánica, homogeneidad de gramaje y bajo contenido de vacíos en el producto final.

Objetivos específicos

- Analizar los requerimientos del proceso wet-laid aplicado a fibra de carbono reciclada y los parámetros objetivo del producto (gramaje, espesor, porosidad).
- Desarrollar el diseño conceptual del sistema de mezclado, evaluando distintas geometrías de agitación para minimizar la formación de ropes, bundles y puntos muertos.
- Diseñar el sistema de tanques (mezclador y reserva) que garantice la dispersión y estabilización de la suspensión.
- Diseñar la unidad de distribución (headbox) y el sistema de deposición sobre rampa inclinada, incluyendo el sacudidor transversal y las cajas de succión por zonas.
- Diseñar la etapa de secado por succión.
- Desarrollar la memoria de cálculo de los subsistemas críticos del proceso.
- Validar el comportamiento de los subsistemas críticos mediante simulaciones CFD cuando sea aplicable.

Alcance del proyecto

El alcance del presente trabajo comprende el desarrollo de ingeniería conceptual y de diseño preliminar de la máquina, incluyendo el modelado general del sistema, la selección de criterios constructivos, el dimensionamiento inicial de los componentes principales (tanques, mezclador, headbox, rampa y sistema de succión) y las validaciones mediante cálculo y simulación cuando corresponda. Teniendo como parámetro de funcionamiento, que se permita la modificación de las variables más cruciales que afecten el producto final.

Resultado esperado

Como resultado del presente proyecto se espera lograr un sistema de mezclado capaz de generar un régimen turbulento que minimice la aparición de defectos característicos del proceso, tales como ropes, bundles y zonas de heterogeneidad. Asimismo, se busca definir una geometría de headbox acorde que permita alcanzar una distribución óptima del caudal a lo ancho de la máquina, garantizando una alimentación uniforme hacia la rampa de formación. En conjunto, se espera obtener un manto de calidad, apto para su aplicación en materiales compuestos estructurales y de alto desempeño.

Capítulo 1: Análisis del proceso wet-laid de mats rCF

1.1 Descripción general del proceso

El mecanismo de wet-laid o formación en suspensión húmeda es un método de fabricación de no tejidos (non-woven) originado en la industria papelera, adaptado en este proyecto para el procesamiento de fibra de carbono reciclada. El principio consiste en dispersar fibras cortas en un medio acuoso hasta lograr una suspensión homogénea, y luego depositar esa suspensión sobre una malla permeable que retiene las fibras mientras el agua es drenada por gravedad, succión o ambas. El resultado es un velo (web) de fibras entrelazadas de forma aleatoria, que posteriormente se consolida térmica o mecánicamente para obtener el mat final.

Frente a métodos alternativos de fabricación de no tejidos como el dry-laid (deposición en seco por cardado o air-laid) o el spunlaid, el wet-laid resulta especialmente adecuado para fibras cortas y quebradizas como la rCF, ya que el medio acuoso amortigua el manejo mecánico de la fibra y permite una distribución más homogénea y aleatoria que los métodos en seco, reduciendo así el riesgo de rotura de filamentos y facilitando la orientación isotrópica del velo.

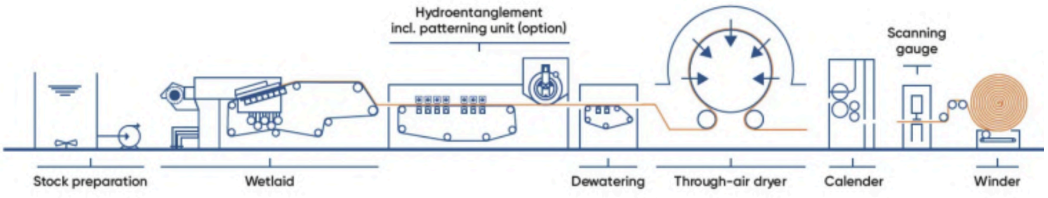


Figura 1: Modelización simplificada de las etapas de una máquina de wet-laid.

1.2 Requerimientos del producto

El producto objetivo es un velo no tejido (non woven mat) de fibra de carbono reciclada (rCF) de alta uniformidad e isotropía en el plano, concebido como preforma de refuerzo para materiales compuestos poliméricos (termoestables y termoplásticos) en aplicaciones estructurales y semiestructurales (industria automotriz, aeroespacial y deportiva).

Las especificaciones técnicas y tolerancias requeridas para el producto terminado en rollo son las siguientes:

- Gramaje: 200 ± 10 g/m² (con un Coeficiente de Variación transversal y longitudinal CV inferior al 3%)

- Espesor: 0,50 ± 0,05 mm
- Porosidad / contenido de vacíos: inferior al 1%
- Humedad residual: inferior al 0,3%

Estos parámetros condicionan el diseño de todos los subsistemas de la línea, desde el caudal de suspensión requerido hasta la energía térmica necesaria en la etapa de consolidación. No son independientes entre sí: el gramaje y el espesor definen conjuntamente la densidad aparente del velo, mientras que la porosidad y la humedad residual condicionan su aptitud para ser impregnado con resina en etapas posteriores del proceso productivo (fuera del alcance de esta máquina, pero determinante para el diseño de la misma). Por este motivo, cada subsistema de la línea, desde el tanque mezclador hasta los rodillos calientes, debe diseñarse teniendo en cuenta su impacto directo sobre alguno de estos cuatro valores. El gramaje depende principalmente del caudal de fibra seca entregado por el headbox y de la velocidad de línea; el espesor, de la combinación entre ángulo de rampa y velocidad de malla; la porosidad, de la calidad de dispersión lograda en el mezclador y de la velocidad de drenaje en la rampa; y la humedad residual, del desempeño conjunto de la succión de secado y los rodillos calientes.

1.2 Material a procesar: fibra de carbono reciclada (rCF)

Las fibras de carbono recicladas provienen de procesos de pirólisis de residuos de materiales compuestos (recortes de producción o piezas de fin de vida útil). La pirólisis consiste en calentar el residuo en una atmósfera controlada, generalmente sin oxígeno o con oxígeno limitado, hasta temperaturas del orden de 450 a 600°C, suficientes para descomponer la matriz polimérica sin destruir la estructura del filamento de carbono. Es el método de reciclado más utilizado a nivel industrial, dado que permite recuperar fibra limpia con un consumo energético moderado y sin el uso de solventes químicos agresivos propios de los métodos de reciclado químico.

La calidad mecánica de la fibra recuperada depende fuertemente de los parámetros del proceso de pirólisis (temperatura, atmósfera, duración de la exposición térmica y de la etapa de oxidación superficial). Bajo condiciones de proceso bien controladas, la bibliografía reporta retenciones de resistencia a la tracción de hasta el 90% respecto de la fibra virgen, mientras que procesos térmicos menos optimizados típicamente retienen valores superiores al 70%, umbral considerado aceptable para la remanufactura de piezas compuestas de alto desempeño. Algunos estudios reportan condiciones específicas, como pirólisis a 600°C durante 30 minutos seguida de oxidación superficial a 450°C durante 15 a 20 minutos, que permiten alcanzar retenciones superiores al 90% en resistencia a la tracción y al 84% en módulo de elasticidad, valores que pueden tomarse como referencia de un proceso de pirólisis bien controlado.

Dado que este proyecto no cuenta con un proveedor de rCF definido, se adopta como estándar de calidad de referencia una fibra recuperada por pirólisis con retención de propiedades mecánicas del orden del 80–90% respecto de la fibra virgen, aproximando la materia prima de diseño a ese estándar reportado en bibliografía. Bajo este criterio, para los cálculos de sedimentación desarrollados en la memoria de cálculo (Ley de Stokes adaptada) y las simulaciones se adoptan una densidad de fibra de 1800 kg/m³ y un diámetro de filamento de aproximadamente 6×10^{-6} m (6 µm), valores propios de la fibra de carbono convencional que la rCF conserva al no verse alterada su sección transversal por el proceso de pirólisis.

Por último, de sus propiedades mecánicas, la rCF conserva, tras el reciclado, restos de matriz que dificultan su separación individual, consideraremos el efecto de dicho parámetro como mínimo y casi un teórico de fibra perfecto. Se obtienen como resultados fibras cortas e imperfectas, esta condición de fibra condiciona directamente decisiones de diseño a adoptar en el proyecto el nivel de cizalla del mezclador (que debe abrir bundles sin fracturar los filamentos).

1.3 Aditivos del proceso: rol de la carboximetilcelulosa (CMC)

La fibra de carbono es hidrofóbica por naturaleza: a diferencia de las fibras naturales o sintéticas hidrofílicas empleadas habitualmente en procesos wet-laid, la rCF no se moja espontáneamente en agua. Esta condición favorece la formación de aglomerados (bundles) si el sistema de mezclado no aporta suficiente energía mecánica, y a la vez puede generar flotación o segregación de la fibra si la suspensión no se mantiene en movimiento constante. Para contrarrestar este comportamiento, el sistema incorpora carboximetilcelulosa (CMC) en una proporción de 0,3–0,5%, un aditivo que cumple una doble función a lo largo del proceso.

Durante la etapa de mezclado y en el tanque de reserva, el CMC actúa como agente estabilizante de la suspensión, aumentando la viscosidad del medio acuoso para retardar la sedimentación de las fibras hidrofóbicas (efecto que se refleja directamente en el cálculo de velocidad de sedimentación de Stokes, donde la viscosidad µ del fluido es un parámetro determinante). Durante la etapa de secado térmico en los rodillos calientes, el mismo CMC cumple una segunda función: al evaporarse el agua, pasa de estado líquido a película sólida, actuando como ligante definitivo que ayuda a fijar los puntos de contacto entre fibras y otorga al mat una mayor integridad mecánica para el bobinado.

Esta doble función, de dispersante en frío y ligante en caliente, es la razón por la cual la temperatura de los rodillos calientes debe controlarse con precisión: una temperatura insuficiente no cura el CMC y el mat pierde cohesión; una temperatura excesiva puede degradarlo, con el mismo resultado.

1.3 Capacidad y parámetros de producción

La capacidad de la línea se define a partir de la velocidad de la malla transportadora, sincronizada en 10 m/min con el resto de la línea, y del ancho útil de formación de la máquina. Estos parámetros, junto con el gramaje objetivo, determinan el caudal de suspensión y de fibra seca que debe procesar el sistema (ver memoria de tanques, Capítulo 4).

1.4 Condiciones de trabajo y defectos críticos a evitar

El diseño de la línea debe evitar los siguientes defectos, identificados como críticos para la aptitud del producto en aplicaciones estructurales:

- "Ropes" y "Bundles": formación de cuerdas o nudos de fibras entrelazadas debido a turbulencias descontroladas o agitación inadecuada.
- Heterogeneidad (Clumps): grumos o zonas de baja densidad que provocan variaciones inaceptables en el gramaje superficial.
- Falta de isotropía: alineación preferencial de las fibras en la dirección del rollo, generando debilidad mecánica en las demás direcciones.
- Defectos de consolidación: humedad residual y porosidad interna elevadas que merman la resistencia mecánica final durante el moldeo posterior.

1.5 Aplicaciones del producto y relación con los requerimientos técnicos

El mat de rCF fabricado por esta línea está pensado como un producto de aplicación genérica, destinado a actuar como esqueleto de refuerzo en materiales compuestos estructurales y secundarios de una amplia variedad de industrias. Esta diversidad de aplicaciones posibles es, en gran medida, la razón de fondo por la cual la isotropía mecánica es un requisito no negociable del diseño: al no apuntar a un uso único con una dirección de carga conocida de antemano, el material debe comportarse de manera equivalente en todas las direcciones del plano. De ahí se desprende la necesidad de una rampa de deposición que rompa la alineación preferencial inducida por el flujo de salida del headbox.

Principalmente, servirá como refuerzo en materiales compuestos estructurales y secundarios. Entre las aplicaciones identificadas se encuentran paneles para la industria automotriz, componentes aeroespaciales, artículos deportivos (raquetas, bicicletas), piezas para la industria ferroviaria y blindajes contra interferencia electromagnética (EMI).

Capítulo 2: Desarrollo conceptual de la planta

2.1 Descripción general del equipo

El equipo propuesto está compuesto por un sistema de tanques (mezclador y reserva), un sistema de bombeo y dilución, un headbox, una rampa inclinada de deposición, un sistema de succión por zonas (drenaje, secado, y recirculación de agua mediante filtros), y una etapa final de consolidación térmica mediante rodillos calientes.

Son entonces seis subsistemas principales, integrados en una línea continua:

1. Sistema de tanques (mezclador y reserva), donde se prepara y estabiliza la suspensión de agua, fibra y CMC para producir.
2. Sistema de bombeo y dilución, que ajusta la consistencia de la suspensión antes de su ingreso al headbox.
3. Headbox, es el conjunto que distribuye la pulpa de forma uniforme sobre el ancho útil de la máquina.
4. Rampa inclinada de deposición, con sacudidor transversal integrado, donde ocurre la transición de suspensión líquida a velo de fibras.
5. Sistema de succión por zonas, que cubre tanto el drenaje inicial bajo la rampa como la etapa de secado por vacío posterior, junto con la recirculación y reciclado de agua mediante un sistema de filtros.
6. Etapa final de consolidación térmica mediante rodillos calientes, donde se cura el CMC y se fija la estructura definitiva del mat.

2.2 Alternativas evaluadas

2.2.1 Mezclador

Para el sistema de mezclado se evaluaron dos geometrías de agitación, con el objetivo común de eliminar puntos muertos y maximizar la dispersión homogénea de las fibras sin comprometer su integridad:

- **Mezclador de geometría tipo oloide:** genera un movimiento de rotación no uniforme que produce patrones de flujo transversales y cambiantes en toda la masa del fluido, orientados a eliminar los puntos muertos característicos de los agitadores de eje fijo.
- **Mezclador de dos hélices con entrada superior:** dos elementos de agitación operando de forma simultánea y sincronizada, generando un entrecruzado de flujos que favorece una turbulencia elevada. Que permita la regulación de la interacción con el fluido.

Ambas alternativas se evaluaron bajo los mismos criterios de diseño establecidos para el mezclador. En función a nuestros objetivos, la versión de dos hélices permitirá una regulación precisa de su funcionamiento permitiendo cambiar parámetros a tiempo real.

2.2.2 Headbox

Para la unidad de distribución también se evaluaron dos configuraciones geométricas del headbox:

- **Headbox de sección constante:** un colector de área transversal uniforme en toda su longitud, que recibe la pulpa desde un único punto de ingreso (la bomba) y la distribuye lateralmente hacia los tubos de descarga ubicados a lo largo del ancho de la máquina.
- **Headbox de sección cambiante:** un colector cuya área transversal disminuye de forma progresiva a medida que se aleja del punto de ingreso de la pulpa.

La diferencia entre ambas alternativas no es solo geométrica, sino que responde directamente al problema identificado para esta unidad: garantizar que cada tubo de liberación reciba el mismo caudal y la misma consistencia de fibra. En un headbox de sección constante, a medida que la pulpa avanza a lo largo del colector va perdiendo caudal en cada tubo de descarga sucesivo, lo que provoca una caída progresiva de velocidad y presión interna hacia el extremo más alejado del ingreso. Esa caída de presión se traduce en una descarga desigual entre tubos, los más cercanos a la bomba entregan más pulpa que los más alejados, generando justamente el defecto de bandas de distinta densidad (variación de gramaje) que se busca evitar.

2.3 Selección de la solución adoptada

Se descartó la opción de mezclador tipo oloide por una limitación de orden geométrico: para lograr un patrón de flujo transversal efectivo con esta geometría, el tanque mezclador debería tener un volumen considerablemente mayor al necesario según el balance de masa del proceso, lo cual encarece y sobredimensiona innecesariamente el subsistema sin un beneficio proporcional en la calidad de dispersión. Además de impedir la fácil regulación de variables, como sección de contacto y velocidad baja por su tamaño y trazo dentro del tanque.

Se adoptó, en consecuencia, el mezclador de dos hélices de entrada superior. Además de resolver la limitación geométrica anterior, esta alternativa presenta ventajas adicionales que reforzaron la decisión: una mayor facilidad de fabricación y de modulación del equipo respecto de la geometría oloide (al tratarse de elementos de agitación de forma más simple y estandarizable), y resultados favorables tanto en el comportamiento del flujo generado como en el consumo energético del sistema de agitación.

Por lo ya explicitado en la sección anterior, el headbox deberá ser de sección cambiante para mantener una distribución lo más uniforme posible. La recirculación del caudal impactará en esa uniformidad, y estudiaremos el punto de funcionamiento más óptimo.

2.4 Principio de funcionamiento

El proceso se esquematiza de la siguiente manera: la fibra y el agua ingresan al tanque de mezclado, donde se dispersan homogéneamente. La suspensión pasa al tanque de reserva, que la despacha de forma continua hacia un punto de dilución mediante una bomba de cavidad progresiva. En ese punto, se une la suspensión proveniente del tanque de reserva con agua limpia para diluir la suspensión considerablemente hasta alcanzar la consistencia del headbox. La pulpa diluida ingresa al headbox, que la distribuye uniformemente sobre la rampa inclinada. Bajo la rampa, el agua comienza a ser drenada por gravedad asistida por vacío. El agua extraída pasa por un separador aire-agua para proteger los equipos de succión y un sistema de filtros que permite limpiar y acondicionar el agua para luego recircular el agua clarificada de vuelta a al tanque principal para que se puede derivar al punto de dilución y al tanque de mezcla o reserva, cerrando el circuito hídrico del proceso.

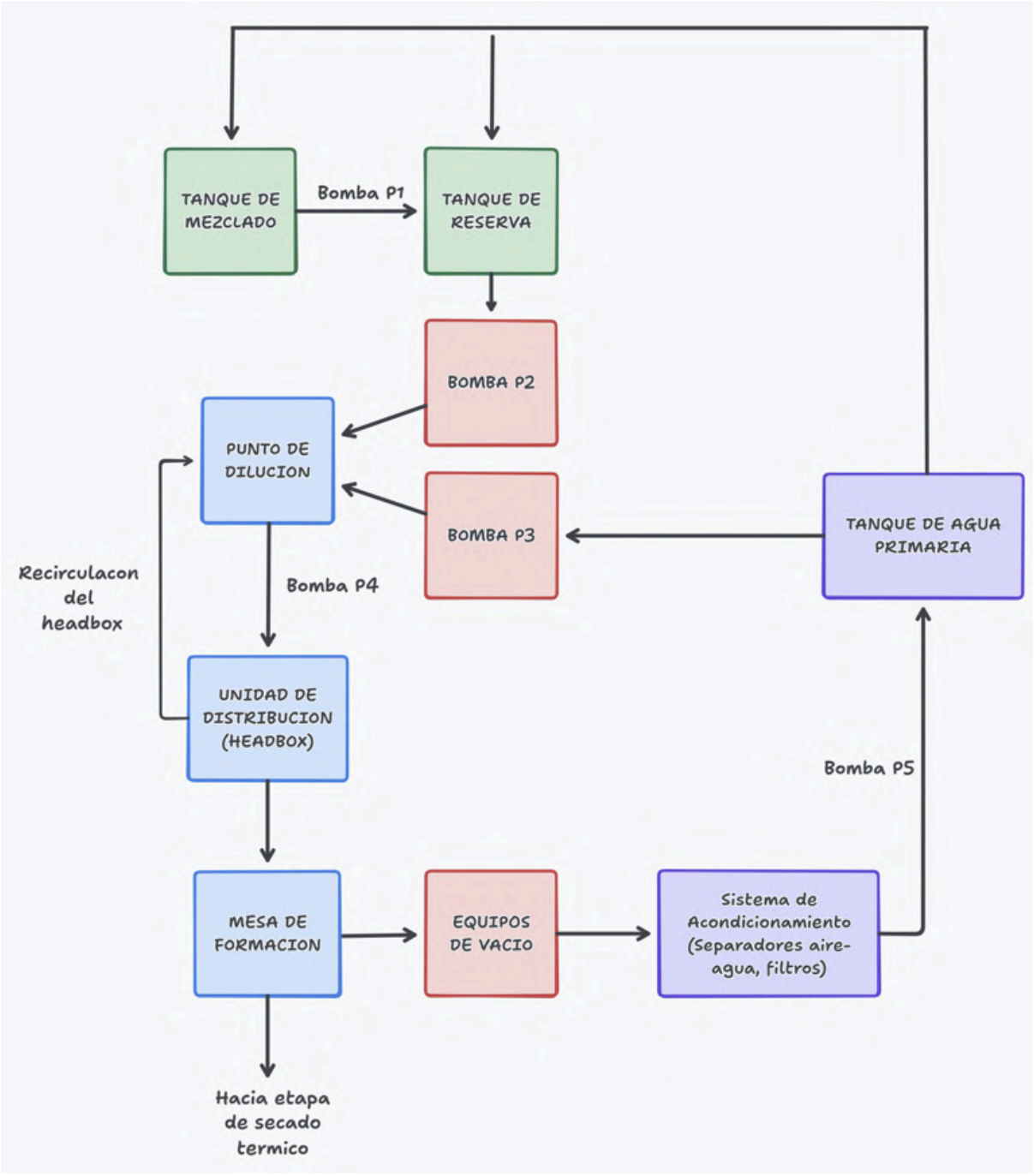


Figura 2: Esquema del sistema planteado.

2.5 Circuito de recirculación y balance hídrico

Dado que el proceso opera con suspensiones de baja consistencia (menor al 1%), el volumen de agua involucrado es considerablemente mayor al de fibra procesada, lo que hace indispensable un circuito de recirculación para que el consumo de agua fresca de la línea sea sostenible. Como previamente se explicó, el agua extraída por el sistema de vacío se conduce hacia un sistema de filtros en serie, cuya función es retirar los finos de fibra arrastrados. Desde los filtros, el agua pasa a un tanque de reserva principal de recirculación, del cual se permite reincorporar al proceso como agua de dilución sin ninguna etapa adicional de reproceso o acondicionamiento previo.

Esta simplificación del circuito de recirculación fue una decisión consciente de acotar el alcance: el eventual ajuste de concentración de CMC o el tratamiento del agua recirculada quedan fuera del foco principal de este proyecto, que se concentra en el diseño mecánico de la línea de formación.

2.6 Configuración del proceso y control de variables

El control de todos los equipos de la planta se centraliza en un sistema de control, que gestiona de forma integrada las siguientes variables de proceso:

- **Velocidad de agitación del mezclador:** se define un valor nominal de operación, con capacidad de ajuste en un entorno razonable en torno a ese valor. Esto permite adaptar el nivel de cizalla aplicado a la suspensión según el tipo de fibra procesada, ya que fibras más largas o más resistentes al corte pueden requerir mayor velocidad para lograr una dispersión homogénea, mientras que fibras más delicadas se benefician de una agitación más suave que evite su degradación.
- **Ángulo de ataque del mezclador:** las paletas permiten variar su ángulo de ataque, lo que modifica la cantidad de energía mecánica transmitida al fluido. Un ángulo más agresivo incrementa la turbulencia y acelera la homogeneización de la mezcla, mientras que uno más suave reduce el esfuerzo de corte sobre las fibras. Esta variable se ajusta en conjunto con la velocidad de agitación para adaptar la intensidad de mezcla a los requerimientos de cada tipo de fibra, sin comprometer su integridad estructural.
- **Nivel de vacío en la rampa (drenaje inicial):** en procesos de formación húmeda a baja consistencia, la bibliografía de referencia en sistemas de cajas de succión reporta rangos de vacío del orden de 10 a 33 kPa para esta etapa de drenaje inicial, valores que se adoptan como referencia de partida para el ajuste del sistema.
- **Nivel de vacío en la etapa de secado por succión:** por tratarse de una etapa de extracción más brusca ya que se debe vencer la resistencia capilar del agua intersticial, se ubica en el rango de alto vacío reportado en bibliografía, entre 15 y 40 kPa en operación estándar, pudiendo extenderse hasta 65-70 kPa en líneas de mayor velocidad.

Capítulo 3: Diseño mecánico del sistema

El sistema de preparación de la suspensión se compone de dos volúmenes principales de operación: un tanque de mezcla y un tanque de reserva, los cuales trabajan de manera integrada para garantizar una alimentación continua y homogénea hacia la etapa de formación. Si bien ambos recipientes contienen la misma suspensión acuosa de fibra de carbono reciclada, cumplen funciones diferenciadas dentro del proceso.

3.1 Sistema de tanques: mezclador y reserva

3.1.1 Tanque mezclador

El tanque mezclador constituye el subsistema encargado de contener y acondicionar la suspensión acuosa de fibra de carbono reciclada en condiciones aptas para su transferencia al tanque de reserva. Su función no se limita al almacenamiento temporal del fluido, sino que define el entorno físico e hidráulico dentro del cual ocurre la dispersión de las fibras y se alcanza el estado de homogeneidad requerido.

Desde el punto de vista funcional, el tanque debe cumplir simultáneamente con las siguientes exigencias:

- Contener el volumen de trabajo necesario de acuerdo con el caudal de suspensión exigido, el gramaje objetivo (200 g/m²), la velocidad de producción (v = 10 m/min) y el nivel de dilución de la mezcla.
- Proporcionar un tiempo de residencia suficiente para que el sistema de agitación logre la dispersión buscada, sin que una permanencia excesiva favorezca reagrupamientos o inestabilidades.
- Favorecer una circulación interna adecuada, evitando zonas muertas o geometrías que promuevan acumulaciones locales de fibra, condición que, como se definió en el Capítulo 2, fue precisamente la que descartó la geometría de mezclador tipo oloide por requerir un volumen de tanque desproporcionado.
- Permitir una carga y descarga controladas de agua, fibra y aditivos, así como facilitar inspección, limpieza y mantenimiento.
- Servir de soporte estructural y geométrico al sistema mezclador de doble hélice y a los elementos auxiliares (conexiones, sensores, tapas, drenajes, deflectores).

Los parámetros a definir para este tanque incluyen el caudal de suspensión, el volumen útil ($V_{mezcla} = Q \cdot t_{mezcla}$), la geometría (diámetro interno, altura de líquido, relación altura/diámetro, forma del fondo, deflectores, ubicación de la descarga) y el tiempo de residencia necesario para promover la apertura de bundles y evitar la formación de ropas.

3.1.2 Tanque de reserva

El tanque de reserva constituye el subsistema encargado de almacenar y estabilizar la suspensión ya dispersada, asegurando una alimentación continua y homogénea hacia la etapa de formación. A diferencia del tanque mezclador, no debe inducir niveles elevados de cizalla ni promover procesos intensivos de dispersión, sino mantener la suspensión en estado homogéneo evitando sedimentación, flotación o reagrupamiento de fibras.

Debe cumplir con las siguientes exigencias funcionales:

- Almacenar un volumen suficiente para asegurar la continuidad del proceso ante variaciones en la generación de mezcla o el consumo de la línea.
- Mantener la homogeneidad de la suspensión, evitando separación de fases o zonas de distinta concentración de fibra.
- Permitir una descarga continua y controlada hacia la etapa de formación, con caudal y concentración estables.
- Operar dentro de un rango de niveles que asegure su función de amortiguación, por encima de un volumen mínimo operativo.
- Evitar zonas muertas o de acumulación de material, facilitando la renovación completa del volumen contenido.

Los parámetros a definir incluyen el volumen útil, la geometría (diámetro, altura de líquido, relación altura/diámetro, forma del fondo, disposición de entradas y salidas) y las condiciones de agitación, que deben ser de baja intensidad para mantener una mínima turbulencia sin inducir los fenómenos indeseados mencionados.

3.2 Sistema de mezclado (mixer)

El mixer tiene la función crítica de deshacer los paquetes de fibras y dispersar los filamentos individuales de forma homogénea en el medio acuoso, venciendo las fuerzas de atracción interfibras propias de la hidrofobicidad de la rCF.

Específicamente, el diseño del mixer busca:

- Evitar la formación de "ropes" y "bundles", impidiendo que las fibras se enreden entre sí debido a vórtices o regímenes de flujo inadecuados.
- Eliminar puntos muertos, garantizando que no existan zonas de estancamiento (como suele ocurrir con bafles estáticos convencionales).
- Preservar la integridad de la fibra, logrando la dispersión sin niveles de cizalla tan elevados que fracturen los filamentos.

La eficiencia del mezclado impacta directamente en la homogeneidad del gramaje, la isotropía mecánica, la resistencia a la tracción y la calidad de impregnación posterior del material.

Parámetros objetivo definidos a partir de bibliografía y a definir:

- Régimen de flujo: mantener turbulencia constante y uniforme dentro de lo posible.
- Velocidad de agitación: objetivo a definir a través de simulaciones.
- Geometría: se evalúan un mezclador tipo oloide (patrones de flujo transversales que eliminan puntos muertos) y un mezclador de dos hélices independientes (entrecruzado de flujos, alta turbulencia).
- Asistencia química: integración de CMC (0,3–0,5%) para estabilizar la suspensión y prevenir la sedimentación rápida de la fibra.

3.3 Headbox y unidad de distribución

El headbox tiene como función asegurar que la suspensión llegue a la rampa inclinada con una energía y un caudal uniformes en todo el ancho de la máquina. Es un sistema de distribución cerrado que recibe la pulpa desde el tanque de dilución, actuando como cámara de compensación que transforma el flujo puntual de la bomba en un frente de flujo uniforme hacia los tubos de descarga.

Sus objetivos son la distribución transversal uniforme (mismo caudal y consistencia en cada tubo de liberación), el mantenimiento de la suspensión (presión interna suficiente para evitar sedimentación o puntos muertos) y el control de la energía de salida (regular la velocidad de impacto de la pulpa sobre la rampa, evitando vacíos y vórtices).

Un funcionamiento deficiente del headbox se traduce en variación de gramaje por descarga desigual entre tubos, formación de grumos por baja presión interna, e inestabilidad del velo por flujo pulsante.

3.4 Rampa inclinada y sistema de deposición

El sistema de deposición transfiere la pulpa desde el headbox hacia la malla de formación, permitiendo la evacuación del agua y dejando una red de fibras entrelazadas sobre la cinta transportadora. Busca que las fibras se depositen de forma aleatoria, garantizando isotropía, controla el gramaje y evita el realineamiento o reagrupamiento de fibras por efecto del flujo de salida.

La rampa inclinada es el componente donde ocurre la transición crítica de fase líquido-sólido. A diferencia de las máquinas papeleras planas, la inclinación es necesaria para manejar los altos volúmenes de agua requeridos por suspensiones de baja consistencia (menores al 1%). Un ángulo demasiado pronunciado genera acumulación sectorizada de fibras, mientras que una inclinación insuficiente aumenta el riesgo de defectos de vacíos en la malla; por ello el ángulo debe ser controlable externamente según la densidad y el caudal de suspensión.

La combinación entre el ángulo de la rampa, la velocidad de la malla transportadora y la altura de la tapa regulable, define el espesor objetivo de 0,50 ± 0,05 mm u otro necesario de obtener una vez iniciada la producción.

La siguiente figura es un ejemplo de la máquina a la cual queremos diseñar para la aplicación específica de producción de velos de fibra de carbono reciclada.

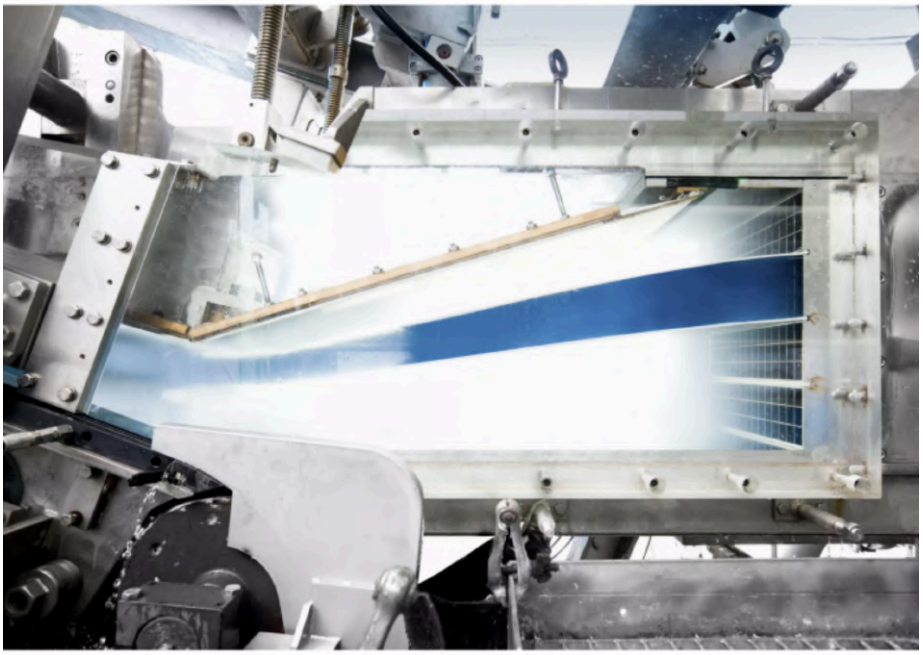


Figura 3: Ejemplificación de un sistema de deposición, fabricante Voith.

3.5 Ausencia de sacudidor transversal

El diseño no incorpora un sacudidor transversal. Este mecanismo, habitual en máquinas papeleras de mayor velocidad, consiste en imprimir una vibración transversal a la tela formadora con el objetivo de contrarrestar la alineación preferencial de fibras en la dirección de la máquina, inducida por la diferencia de velocidad entre el chorro de salida del headbox y la tela, y mejorar así la formación del velo.

Tras el análisis de los mecanismos involucrados, las velocidades de flujo y los caudales adoptados, se determinó que este dispositivo resulta innecesario para la escala y configuración de esta línea: su empleo se justifica principalmente en máquinas de mayor porte y velocidad, donde la alineación direccional de fibras es más pronunciada y requiere de una corrección mecánica activa. En este diseño, la disposición aleatoria de las fibras se logra mediante la selección de las bombas, la presión de trabajo, la velocidad de línea y principalmente por la inclinación de la rampa, que en conjunto son suficientes para evitar tanto la alineación preferencial como la sedimentación, sin necesidad de un mecanismo de agitación mecánica adicional sobre la malla.

3.6 Succión por zonas

3.6.1 Primera etapa de secado

Bajo la rampa inclinada se ubica la primera etapa de deshidratación del mat. Dada la elevada dilución con la que la suspensión ingresa al sistema, gran parte del agua libre se elimina inicialmente por drenaje gravitacional, favorecido por la pendiente de la rampa. La succión aplicada en esta etapa actúa como complemento de dicho drenaje, no como su mecanismo principal, y se mantiene deliberadamente en un nivel de vacío bajo.

Esta moderación es funcionalmente necesaria: una extracción brusca del líquido arrastraría consigo las fibras finas, generando zonas de baja densidad o vacíos locales en el velo. Al operar con vacío reducido, la succión "congela" la red de fibras en su disposición aleatoria antes de que puedan reordenarse, asegurando una porosidad uniforme, condición fundamental para la posterior impregnación con resina.

Las variables de diseño definidas para esta etapa fueron el caudal de extracción, establecido en función del porcentaje de humedad deseado a la salida de la rampa, y la velocidad de extracción, ajustada para conservar la distribución de fibras lograda por el drenaje gravitacional previo. A partir de estas variables se procedió al diseño de las cajas de succión a medida de la línea.

3.6.2 Segunda etapa de secado

Posterior al drenaje inicial en la rampa, se aplica una segunda etapa de succión, de mayor intensidad, mediante alojamientos solidarios a la cinta transportadora. Su objetivo es retirar el agua intersticial (aquella retenida entre fibras) de modo que la etapa posterior de secado térmico deba encargarse únicamente del agua superficial remanente. Además de consolidar la estructura mediante la compactación que ejerce la presión del aire sobre las fibras, esta etapa mejora la eficiencia energética global del proceso: cada gramo de agua removido por succión es un gramo que no requerirá, más adelante, energía adicional en la etapa de secado.

Esta etapa está compuesta por los siguientes elementos:

- **Equipo de vacío**: genera la diferencia de presión necesaria para vencer la resistencia capilar del agua retenida en la red de fibras.
- **Conductos de drenaje**: conducen la mezcla de aire y agua hacia el separador, garantizando la estanqueidad del sistema.
- **Ranuras de succión**: abertura superior de la caja de succión en contacto con la malla; su ancho y geometría determinan el área efectiva sobre la que actúa el diferencial de presión.

- **Cajas de succión**: estructuras estancas ubicadas debajo de la malla transportadora, que actúan como cámaras de vacío.
- **Separador de agua y aire**: recipiente intermedio que separa el líquido (recirculado al proceso) del aire (dirigido al equipo de vacío), protegiendo a este último del ingreso de agua líquida.

Los parámetros que gobernaron el dimensionamiento de esta etapa fueron el nivel de vacío (presión diferencial, superior al aplicado en la rampa) y la geometría de las cajas de succión (cantidad de cajas, cantidad y ancho de las ranuras), que en conjunto determinan el área efectiva sobre la que actúa dicho vacío. A partir de estos parámetros se calculó el caudal de aire, con el objetivo de sostener el nivel de vacío definido a medida que el mat se seca y comienza a permitir el paso de aire. Este mismo caudal exige, aguas abajo, un separador capaz de evitar que el aire arrastre gotas de agua hacia el equipo de vacío. Cabe señalar que un nivel de vacío mal regulado podría, en principio, sobreconsolidar la estructura fibrosa por efecto del propio diferencial de presión. Este efecto no fue cuantificado en el presente trabajo, y se deja planteado como una consideración de diseño a evaluar en desarrollos posteriores.

3.7 Rodillos calientes y consolidación térmica

La etapa de los rodillos calientes constituye la fase final de consolidación térmica y secado. En este punto, el mat ya posee una estructura física definida pero requiere la eliminación de la humedad residual. Mientras la succión previa retira el agua libre o intersticial, los rodillos calientes evaporan el agua atrapada en los poros y sobre la superficie de los filamentos. El calor permite además que la carboximetilcelulosa (CMC) pase de estado líquido a película sólida, actuando como ligante definitivo que une las fibras y fija la resistencia a la tracción e integridad física necesarias para el bobinado.

El sistema opera por transferencia de energía térmica mediante contacto directo: la manta pasa entre cilindros metálicos calentados internamente (usualmente por vapor saturado), y a medida que el agua se evapora, el ligante químico se solidifica "congelando" la disposición azarosa de las fibras lograda en la rampa.

Variables de diseño a controlar:

- Temperatura de los rodillos: suficiente para la evaporación completa, pero estrictamente regulada para evitar degradar el CMC.
- Presión de contacto: fuerza ejercida por los rodillos sobre la manta, vital para controlar la densidad y el espesor final.
- Velocidad de transferencia: sincronizada con el resto de la línea a 10 m/min.
- Tensión de la banda: controlada para evitar arrugas, pliegues o desgarros antes de la consolidación total.

Los cálculos de esta sección, escapan al alcance de este proyecto ya que no influyen de manera directa en los objetivos propuestos para el producto. Se explicita a manera de explicación teórica y propuesta conceptual.

3.8 Diseño final obtenido

A partir de las alternativas evaluadas en el Capítulo 2 y del dimensionamiento y las decisiones de diseño desarrolladas a lo largo de este capítulo, se obtuvo el modelo final de la línea, representado en la figura a continuacion. Esta vista integra en un único conjunto los seis subsistemas descriptos conceptualmente en el capítulo anterior, permitiendo visualizar tanto la disposición física de los equipos como las interconexiones de tuberías que materializan el circuito de proceso y de recirculación hídrica descripto.

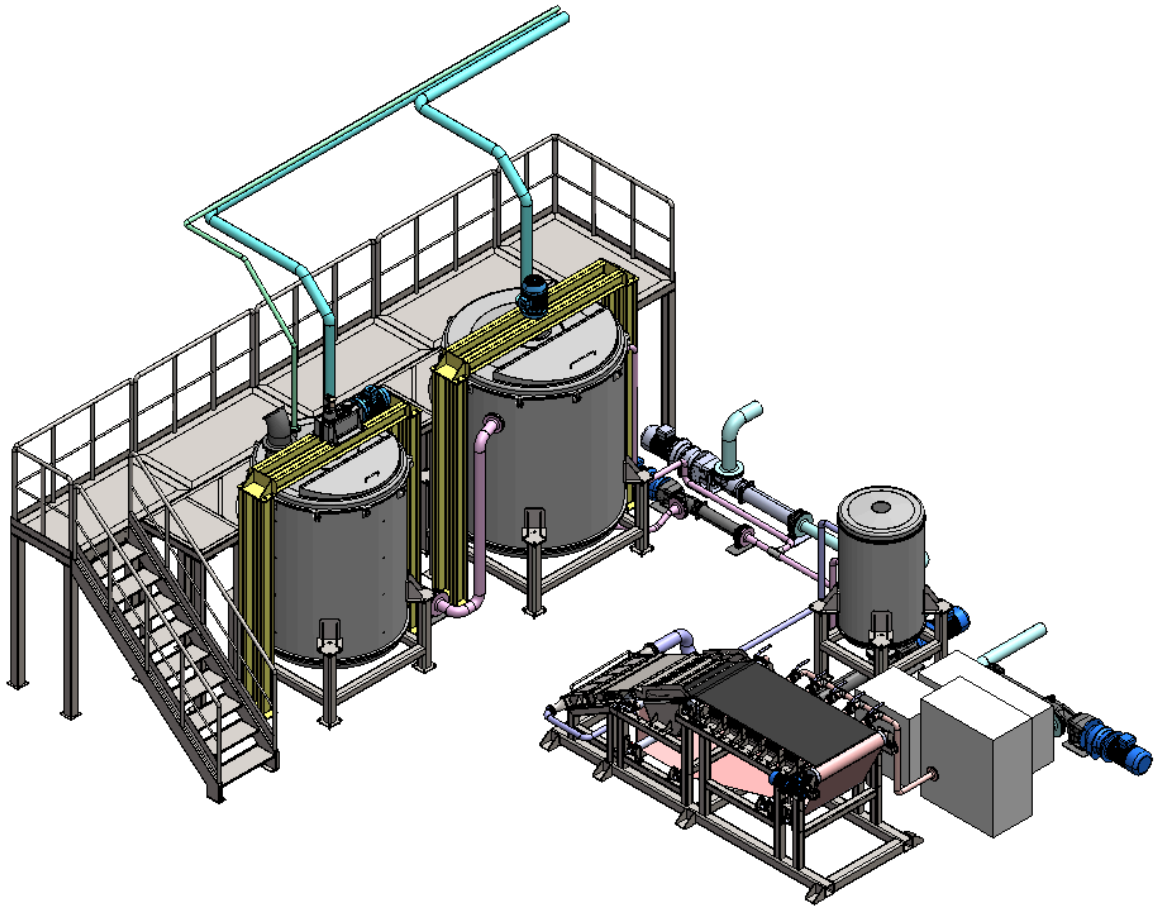


Figura 4: Modelo 3D completo de todo el sistema.

Sobre la plataforma elevada, con acceso mediante escalera y baranda perimetral, se ubican los dos tanques del sistema de preparación de suspensión: el tanque mezclador y el tanque de reserva, cada uno con su motorreductor de accionamiento superior correspondiente al mezclador de doble hélice adoptado. Las tuberías superiores vinculan la carga de fibra,

CMC y agua hacia el mezclador, mientras que la descarga del tanque de reserva desciende hacia el conjunto de bombeo y dilución, ubicado a nivel de piso junto a las bombas de cavidad progresiva. Sobre este mismo nivel se distinguen el headbox y la rampa inclinada con la mesa de formación, donde ocurre la deposición de la suspensión descripta. Por debajo de la rampa y adosado a la mesa se ubica el sistema de succión por zonas, vinculado mediante las cañerías correspondientes al sistema separador de agua-aire y al equipo de vacío representado por los bloques de mayor volumen sobre el extremo derecho del layout.

Cabe aclarar que el modelado 3D del presente proyecto se limitó a los subsistemas efectivamente dimensionados en este trabajo: los tanques de mezcla y de reserva, el punto de dilución, el headbox, la mesa de formación con su rampa inclinada, el sistema de vacío, y la ubicación y selección de las bombas. Quedan fuera del alcance del modelado la etapa de secado térmico posterior (rodillos calientes), el bobinado del producto final, y la selección de instrumentos de medición y control, dado que, en función de la escala y los objetivos definidos para este proyecto, dichos aspectos exceden el nivel de detalle requerido y quedan planteados como líneas de desarrollo futuro.

En los siguientes capítulos se entrará en detalle para cada uno de estos subsistemas mencionados, presentando la memoria de cálculo y los criterios de dimensionamiento que sustentan las decisiones adoptadas en el presente capítulo.

Capítulo 4: Sistema de tanques

4.1 Indroduccion al capitulo

Este capítulo desarrolla el diseño del sistema de preparación de suspensión, compuesto por el tanque mezclador y el tanque de reserva. Ambos recipientes contienen la misma suspensión acuosa de fibra de carbono reciclada a una consistencia de trabajo del 0,5 % v/v, pero cumplen funciones diferenciadas y complementarias dentro del proceso.

Se aborda la geometría de cada tanque y su fundamento, el dimensionamiento de volúmenes y la selección de los parámetros de operación que, en conjunto, garantizan una alimentación continua, homogénea y estable hacia el headbox.

4.2 Tanque mezclador

4.2.1 Fundamento de la Geometría General

El tanque mezclador adopta una configuración cilíndrica vertical con fondo cónico. La geometría cilíndrica vertical es la configuración estándar para aplicaciones de mezclado: el flujo axial descendente generado por los impulsores impacta contra el fondo y es redirigido hacia arriba por las paredes, cerrando el ciclo de circulación. Además permite disponer un sistema de deflectores simétrico y facilita la fabricación en acero inoxidable. El fondo cónico favorece a la funcionalidad del tanque, en específico las siguientes características puntuales:

- Vaciado completo: la suspensión de rCF (0,5% v/v, con fibras de densidad ρf = 1800 kg/m³) tiende a sedimentar incluso bajo agitación suave. El fondo cónico dirige gravitacionalmente toda la suspensión hacia el punto de drenaje, donde se ubica la válvula de salida, evitando el volumen residual de fibras sedimentadas en los bordes que dejaría un fondo plano.
- Ausencia de zonas muertas en el fondo: un fondo plano con deflectores genera ángulos rectos pared-fondo donde la velocidad del fluido cae a casi cero, formando "tapones" compactos de fibra (log defects) fuera del ciclo de dispersión. El fondo cónico elimina esos ángulos.

El ángulo de cono adoptado es inferior a 30° respecto a la horizontal, dentro de la recomendación de bibliografía técnica de diseño de tanques de mezclado (Dynamix Inc.), que establece 15° como valor ideal y acepta hasta 30° antes de que la profundidad del cono dificulte la mezcla en su interior.

4.2.2 Volumen útil y tiempo de residencia

El punto de partida del dimensionamiento es el caudal de suspensión que debe procesar la línea en condiciones de operación continua. A partir del balance de masa de la línea (gramaje objetivo, velocidad de malla y ancho útil) se obtiene el flujo másico de fibra seca y, dividiendo por la consistencia de trabajo, el caudal volumétrico de suspensión:

$$\dot{m}_f = v \cdot W \cdot G = 10\ m/min \cdot 1{,}0\ m \cdot 0{,}200\ kg/m^2 = 2\ kg/min$$

$$Q_s = \dot{m}_f / rho = 2\ kg/min / 1002.2\ kg/m3 = 399.1\ L/min \approx 400\ L/min$$

El volumen de lote que debe producir el tanque mezclador en cada ciclo equivale al volumen que la línea consume durante el tiempo que dura ese ciclo de mezclado:

$$V_lote = Qs \cdot t_ciclo = 400\ L/min \cdot 10\ min = 4.000\ L$$

El tiempo de ciclo, t_ciclo = 10 minutos, es el parámetro individual de mayor peso en el dimensionamiento, ya que define tanto el volumen del tanque mezclador como la restricción de tamaño del tanque de reserva. Este valor incluye a su vez el tiempo asociado a las operaciones de carga, control de nivel y descarga propias de cada ciclo. Se establece como un parámetro base conservador con un margen de seguridad que, en la práctica, garantiza una cobertura holgada para las condiciones de operación previstas.

Al volumen de lote calculado se le aplica un margen del 20 %, práctica estándar en tanques de mezclado para absorber el volumen libre que ocupa la espuma generada durante la agitación vigorosa y el oleaje superficial en arranque y paro, sin riesgo de desbordamiento. El volumen total adoptado resulta:

$$V_total = 4.000\ L \cdot 1{,}20 = 4.800\ L$$

4.2.3 Dimensionamiento del diámetro y la altura

Con el volumen total de diseño determinado, el paso siguiente es obtener las dimensiones geométricas del tanque: su diámetro interno y su altura de líquido. Para ello se impone la relación altura/diámetro H/D como parámetro de diseño.

La relación H/D = 1,2 se seleccionó siguiendo la misma guía técnica de Dynamix, que establece H/D = 0,8 (tanque casi cúbico) como valor ideal, aceptando cualquier valor próximo a 1,0, con un límite superior recomendado de H/D < 1,4 para impulsor único (por encima de ese umbral se recomienda pasar a doble impulsor). Dado que el diseño ya emplea dos impulsores en el mismo eje, H/D = 1,2 resulta admisible, y ofrece además un equilibrio práctico entre ocupación en planta y esbeltez de la columna de agitación.

Con el volumen total de diseño (V_total = 4.800 L) y la restricción H = 1,2 · D, se despeja el diámetro de la ecuación de volumen de un cilindro

$$D = [4 \cdot V_{total} / (\pi \cdot k)]^{1/3} = [4 \cdot 4.8\ m^3 / (\pi \cdot 1{,}2)]^{1/3} = (5{,}858\ m^3)^{1/3} = 1{,}72m$$

Se redondeó a D = 1,80 m por practicidad de fabricación, verificando que la diferencia volumétrica resultante era despreciable (< 0,5%), lo que además incorpora un margen geométrico adicional sobre el volumen mínimo requerido. Con ese diámetro, la altura de líquido de trabajo resulta:

$$H_{líquido} = k \cdot D = 1{,}2 \cdot 1{,}80\ m = 2{,}16\ m$$

Los valores definitivos adoptados son D = 1,80 m y H = 2,3 m. La diferencia entre la altura calculada (2,16 m) y la adoptada incorpora el margen de resguardo superior (freeboard) para el oleaje y la espuma, coherente con el 20 % de margen ya aplicado al volumen. El detalle de los cálculos se encuentra en la memoria de cálculo.

4.2.4 Deflectores

Según bibliografía consultada, se establece que en tanques cilíndricos centrados sin deflectores el impulsor induce una rotación sólida del fluido, donde todos los elementos del fluido giran a la misma velocidad angular que el impulsor, con prácticamente nulo intercambio entre capas. La incorporación de deflectores rompe ese patrón forzando el flujo radial y axial. Determinante en la aplicación, que requiere una turbulencia alta para la homogeneización de la suspensión. (Se demuestra en el Capítulo 8 la influencia de los mismos en la turbulencia y campo de velocidades del fluido gracias a CFD)

Se incorporan 4 deflectores rectangulares, configuración que la misma fuente identifica como óptima. 3 deflectores resultan suficientes para la mayoría de las aplicaciones, pero 4 es el valor ideal. La necesidad de esta configuración en el contexto específico de dispersión de fibras en proceso húmedo fue validada además por Ramasubramanian et al. (2008), estudio CFD que empleó exactamente este tipo de geometría (tanque cilíndrico con 4 deflectores e impulsor central) para la dispersión de fibras sintéticas, y cuyos resultados mostraron que los deflectores son esenciales para romper el vórtice central y alcanzar la distribución de energía cinética turbulenta requerida.

Se adoptó la sección rectangular como geometría definitiva, verificándose su correcto funcionamiento, con mínima presencia de zonas de estancamiento críticas, mediante las simulaciones CFD desarrolladas en el Capítulo 8.

Las dimensiones adoptadas siguen las guías de Dynamix para suspensión de sólidos:

$$b_d = D / 12 = 1{,}80\ m / 12 = 0{,}150\ m$$

$$s_d = D / 72 = 1{,}80\ m / 72 = 0{,}025\ m$$

Los deflectores se extienden verticalmente por toda la altura de líquido, con una separación del fondo de aproximadamente 50 mm para evitar acumulación de sólidos en la base.

4.2.5 Conexiones, entradas y salida

El tanque mezclador cuenta con tres conexiones principales, cuya ubicación responde en cada caso a criterios funcionales vinculados al proceso de dispersión.

Las entradas de agua, fibra y CMC se ubican en la tapa superior del tanque, distribuidas entre el centro y la periferia. Esta posición dirige la carga directamente hacia la zona de acción del impulsor superior, favoreciendo la incorporación inicial de los componentes a la suspensión. El criterio de operación establece que todos los ingredientes se cargan con el agitador detenido, evitando que la fibra se acumule en la superficie sin sumergirse antes de que comience la agitación.

La salida hacia el tanque de reserva se realiza mediante una válvula de diafragma de fondo rasante (*flush-bottom*) ubicada en el vértice del cono. Esta posición garantiza el vaciado completo del tanque al término de cada ciclo, sin retención de fibra en el punto de drenaje. El diseño de diafragma evita las cavidades internas donde las fibras podrían depositarse, y la configuración *fail-closed* asegura que, ante un corte de suministro de aire o energía, la válvula permanezca cerrada como posición de seguridad.

4.2.6 Materiales

Se recomienda adoptar acero inoxidable 316L para todas las superficies en contacto con la suspensión: cuerpo del tanque, fondo cónico, deflectores y cuerpo de los impulsores. La elección de 316L por sobre el 304 (más habitual y económico) responde a dos factores propios de este proceso:

- El CMC en solución acuosa genera un medio levemente alcalino que puede resultar agresivo sobre el acero 304; el 316L incorpora molibdeno (2–3%), que mejora la resistencia a la corrosión en medios levemente ácidos o alcalinos y por cloruros.
- La fibra de carbono es conductora eléctrica y puede formar un par galvánico con los metales en contacto si se deteriora la capa pasivada del acero, en presencia del electrolito que representa el agua con CMC. El 316L ofrece mayor resistencia a este fenómeno, aunque la baja concentración de fibra en la suspensión hace que el riesgo se considere aceptable incluso con 304.

4.2.7 Regulación de variables

Si bien los parámetros de operación del agitador se establecen a partir del diseño, la experiencia en planta puede revelar la necesidad de ajustar el nivel de cizalla y la energía transmitida a la mezcla sin detener el equipo. Para dar respuesta a esta posibilidad, se incorpora un mecanismo de variación del ángulo de ataque de las paletas de los impulsores en tiempo real.

Cada impulsor está montado en un hub sellado que alberga un sistema de cinco engranajes cónicos: uno central, solidario al eje interno, y cuatro periféricos, uno por paleta, montados sobre sus respectivos ejes de pivote. Cuando el eje interno se desplaza axialmente respecto al eje hueco exterior, un pasador solidario a aquel recorre una ranura helicoidal mecanizada en una pieza central, haciendo girar el conjunto de piñones y modificando simultáneamente el ángulo de ataque de las cuatro paletas. Un simple movimiento lineal del eje interno se traduce así en una variación coordinada del pitch de todos los álabes, permitiendo ajustar la energía transmitida a la suspensión según lo que la operación real demande.

El desplazamiento axial del eje interno es accionado por un actuador lineal eléctrico estacionario. Para trasladar ese movimiento desde el actuador fijo al eje rotante, se interpone un rodamiento de cuatro puntos de contacto. Su anillo externo permanece solidario al actuador sin girar, mientras que el anillo interno gira con el eje, transmitiendo la fuerza axial sin necesidad de componentes hidráulicos. La caja reductora desplaza lateralmente el motor principal mediante un par de engranajes, liberando el eje central para que el eje de paso pueda recorrer en línea recta el camino desde el actuador hasta los hubs de los impulsores.

A continuación se muestran unas imágenes ilustrativas del modelo desarrollado, para más detalle en su construcción se puede referir a su planimetría en el Anexo C.

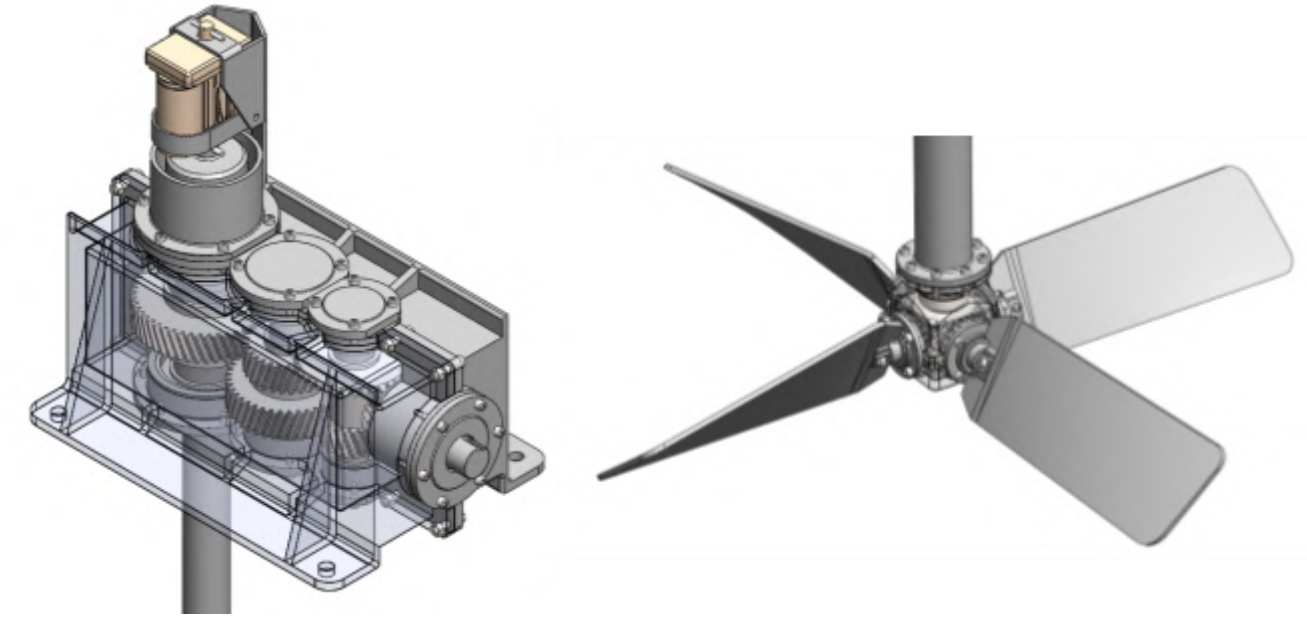


Figura 5: Subconjunto de reductor y paletas en detalle del Mixer.

4.3 Tanque de reserva

El tanque de reserva constituye el subsistema encargado de almacenar y estabilizar la suspensión ya dispersada, asegurando una alimentación continua y homogénea hacia la etapa de formación. A diferencia del tanque mezclador, no debe inducir niveles elevados de cizalla ni promover procesos intensivos de dispersión, sino mantener la suspensión en estado homogéneo evitando sedimentación o reagrupamiento de fibras, y permitir una descarga continua y controlada hacia las bombas de ventilador con caudal y concentración estables. Opera dentro de un rango de niveles definido (por encima de un volumen mínimo operativo y por debajo de un máximo que garantiza la renovación del contenido) funcionando como amortiguador entre el proceso discontinuo de mezclado y el proceso continuo de formación.

4.3.1 Fundamento de la Geometría General

La geometría del tanque de reserva sigue los mismos lineamientos que la del tanque mezclador: configuración cilíndrica vertical con fondo cónico. Las razones que justifican esa elección (vaciado completo, eliminación de zonas muertas y compatibilidad con el sistema de agitación) aplican de igual modo en este caso, por lo que no se reiteran aquí. La diferencia respecto al caso anterior reside únicamente en las dimensiones resultantes del volumen de diseño y en la relación H/D adoptada, que en este caso es 1,05 que refleja un tanque proporcionalmente más ancho respecto a su altura.

4.3.2 Volumen útil, diámetro y altura

Para el cálculo del mismo se tuvo en cuenta el volumen de producción y el tiempo de remanencia del fluido en estado estacionario. Como una comprobación de caso límite planteamos según la decantación de las fibras en agua según su geometría y densidad, que resultó considerablemente mayor al ciclo de operación de los 10 minutos planteados por ciclo completo de mezcla, confirmando que el riesgo de sedimentación dentro de los tiempos de operación es bajo incluso sin agitación activa.

El volumen mínimo queda fijado por la continuidad del proceso: el tanque debe poder alimentar la línea durante un ciclo completo de mezclado sin agotar su contenido. El volumen útil mínimo equivale al consumido por la máquina en ese tiempo, aplicando un margen de seguridad del 20 %:

$$V_{total,min} = 4.000 / 0,8 = 5.000 \text{ L}$$

El volumen máximo está limitado por el tiempo de residencia de la suspensión en el tanque. Una suspensión de rCF que permanece en reposo o bajo agitación suave durante un tiempo excesivo tiende a la reaglomeración de fibras. El límite adoptado es de 20 minutos, lo que equivale a:

$$V_{total,max} = 400 \text{ L/min} \cdot 20 \text{ min} = 8.000 \text{ L}$$

El volumen adoptado final es de 7600L, dentro del rango mencionado. Las dimensiones finales, obtenidas aplicando el mismo procedimiento que en el caso anterior con H/D = 1,05, son D = 2,10 m y H = 2,20 m. El detalle de los cálculos se presenta en la memoria de cálculo.

4.3.3 Agitación, descarga y recirculación

A diferencia del tanque mezclador, el tanque de reserva no requiere un sistema de agitación de alta cizalla. Su función es únicamente mantener la suspensión en movimiento para evitar la sedimentación de fibras y preservar la homogeneidad de concentración. Para ello se incorpora un agitador de paletas simple, de baja velocidad.

La descarga se realiza por el fondo del tanque, desde donde la suspensión es impulsada por las bomba de capacidad progresiva P2 hacia el punto de dilución previo al headbox. Esta posición asegura que el material extraído sea siempre el de mayor densidad, el más propenso a sedimentar.

Cuando la línea no se encuentra en producción activa, el sistema prevé la posibilidad de recircular el contenido del tanque hacia sí mismo. Esta recirculación permite mantener la suspensión en movimiento durante paradas temporales, preservando su homogeneidad sin necesidad de aumentar la agitación mecánica.

En cuanto a los materiales, el tanque de reserva replica la especificación del tanque mezclador: acero inoxidable 316L para todas las superficies en contacto con la suspensión, por las mismas razones de resistencia a la corrosión y compatibilidad con la fibra de carbono ya descritas

4.4 Diseño final obtenido

Una vez completado el desarrollo de este capítulo, se presentan a continuación las vistas del diseño final obtenido para ambos tanques. Se incluye una vista isométrica del tanque de reserva y del tanque mezclador en su posición final dentro del layout propuesto. Se distingue en cada caso el cuerpo cilíndrico con fondo cónico, las estructuras de soporte, el sistema de tuberias y bombas asociadas.

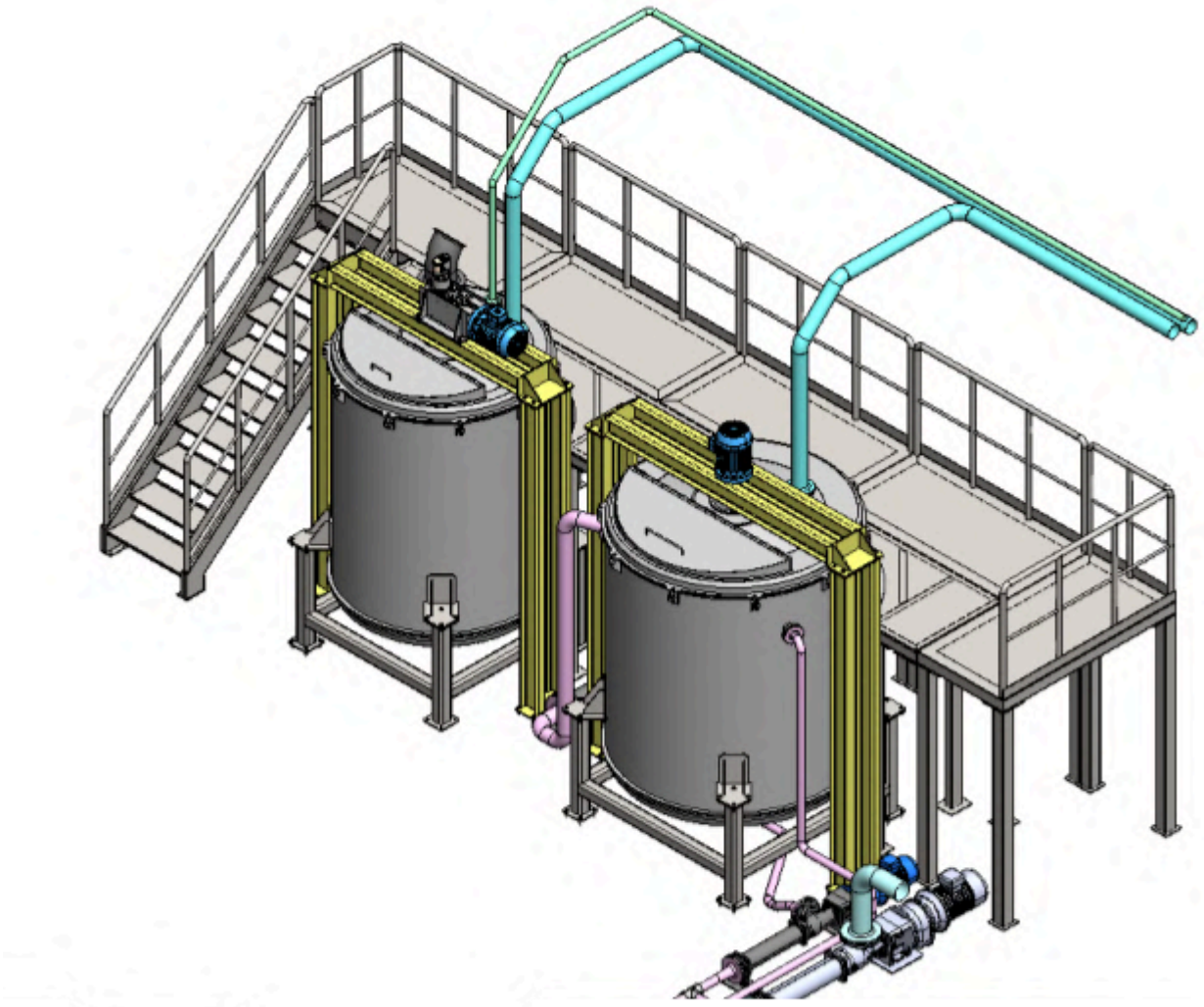


Figura 6: Visualización de tanque de mezclado y tanque de reserva.

Capítulo 5: Headbox y sistema de deposición

5.1 Introducción al capítulo

Este capítulo desarrolla el diseño del headbox, la unidad encargada de recibir la suspensión diluida proveniente del sistema de bombeo y distribuirla de forma uniforme a lo ancho de la máquina, previo a su ingreso a la rampa inclinada de formación. Se aborda el criterio de diseño del colector distribuidor y su dimensionamiento, la geometría de los tubos de descarga y las sucesivas iteraciones que llevaron a la configuración final, los hallazgos de los estudios CFD realizados sobre el sistema, y los aspectos constructivos y de operación del conjunto, incluyendo su integración con la rampa de formación.

5.2 Función y geometría de sección cambiante

El headbox tiene como función distribuir la suspensión hacia la rampa inclinada con energía y caudal uniformes en todo el ancho útil de la máquina. Consiste en un colector de sección rectangular , elegida por facilidad de fabricación, con un extremo de ingreso y un extremo final de sección reducida que transiciona a sección circular, conectado a una línea de recirculación cuya función es mantener la velocidad de flujo constante a lo largo de todo el colector y evitar puntos muertos donde puedan decantar fibras.

El criterio de diseño adoptado es el de velocidad de barrido transversal constante ($v \approx cte$): la sección transversal del colector decrece de forma proporcional al caudal derivado hacia los tubos de descarga en cada punto, compensando la pérdida de masa por derivación de modo de mantener una presión hidrostática uniforme a la entrada de cada uno de los 13 tubos de descarga. Este criterio es el que, en definitiva, garantiza que cada tubo reciba un caudal equivalente independientemente de su posición a lo largo del colector.

Un funcionamiento deficiente del headbox se traduce en variación de gramaje por descarga desigual entre tubos, formación de grumos por baja presión interna, e inestabilidad del velo por flujo pulsante.

5.3 Dimensiones adoptadas

El headbox distribuye un caudal volumétrico total de suspensión $Q = 2400$ L/min a lo largo del ancho útil de la máquina. El dimensionamiento se desarrolla en dos etapas: primero se establece la sección de entrada del colector a partir de una velocidad de barrido objetivo, y luego se determina la sección remanente en el extremo de recirculación mediante un balance de áreas con los tubos de descarga.

El colector se diseña bajo el criterio de distribución cónica decreciente con velocidad controlada: a medida que la suspensión avanza transversalmente y deriva caudal hacia los tubos de descarga, la sección transversal se reduce progresivamente para mantener la energía cinética del fluido y un perfil de presión hidrostática homogéneo en cada derivación, evitando así zonas de estancamiento, gradientes de presión transversal o la formación de vórtices que induzcan aglomeraciones de fibras (ropes/bundles). Se fija además una altura

constructiva H constante en todo el colector, criterio adoptado para simplificar el mecanizado y el montaje lateral.

Ecuación de Continuidad en la Entrada:

$$A_{ent} = Q / V_{ent}$$

El área de paso inicial requerida (A_{ent}) se define a partir del caudal total de alimentación y la velocidad de entrada objetivo (V_{ent}).

Balance de Caudal y Área Residual en el Extremo Final (Salida de Recirculación):

$$A_{sal} = A_{ent} - A_{tubos,\ total}$$

A lo largo del ancho del headbox, un porcentaje mayoritario del caudal se deriva hacia los tubos de descarga que alimentan la rampa inclinada. El área residual en el extremo final del colector corresponde, entonces, a la sección necesaria para evacuar el caudal de recirculación remanente manteniendo la misma velocidad de barrido establecida en la entrada del colector, evitando así la caída de velocidad que favorecería la decantación de fibra y permitiendo una distribución uniforme entre los tubos, demostrado en el Capítulo 8 a partir de CFD.

5.4 Tubos de descarga

El dimensionamiento de los tubos de descarga atravesó varias etapas de diseño, cada una fundamentada en los resultados de las simulaciones CFD realizadas sobre el colector. Las primeras iteraciones se basaron en arreglos de múltiples filas de tubos de menor diámetro, dispuestos en patrón alternado para maximizar la cantidad de puntos de descarga dentro del ancho útil disponible. Sin embargo, al extraer el caudal individual de cada tubo en estas configuraciones, y no solo una muestra parcial de ellos, se identificó una dispersión significativa entre tubos vecinos, sensiblemente mayor a la esperada a partir del criterio de diseño del colector. El análisis de este comportamiento permitió aislar su causa: al existir más de una fila, cada una intercepta el colector en una posición longitudinal distinta, de modo que tubos adyacentes en el arreglo alternado terminan tomando flujo de puntos del colector con condiciones de presión no equivalentes entre sí, generando una dispersión de caudal que el ajuste del porcentaje de recirculación no lograba corregir por tratarse de un efecto de arreglo geométrico y no de balance global de presión.

A partir de este hallazgo, se adoptó como criterio de diseño reducir la descarga a una única fila de tubos, eliminando así la fuente principal de dispersión identificada. Sobre esta base se iteró la cantidad y el diámetro de los tubos, manteniendo siempre el área total de descarga igual a la reducción de sección establecida en el balance de áreas del colector, hasta converger en la configuración final adoptada. Los resultados cuantitativos de uniformidad de caudal correspondientes a esta configuración final se presentan en el Capítulo 8.

El headbox cuenta con 13 tubos de descarga, distribuidos con separación constante entre centros a lo largo de todo el ancho útil, de modo de garantizar un caudal específico idéntico en cada punto de la máquina.

Cada tubo no es un conducto recto simple, sino que incorpora desde el header de alimentación seguido de tres etapas de expansión sucesivas hasta la rampa. La última etapa es una boquilla cónica soldada de sección cuadrada, con una transición circular cuadrada de 170 mm , que desemboca en una cámara de expansión común antes de ingresar en la rampa.

Las secciones se calculan a partir de velocidades objetivo que permiten una desaceleración progresiva y suave del fluido, asegurando la mantención de la distribución de las fibras en la suspensión.

Velocidad objetivo etapa 1	*V1*	2.60	m/s
Velocidad objetivo etapa 2	*V2*	1.80	m/s
Velocidad objetivo etapa 3	*V3*	0.60	m/s

Tabla 1: Velocidades objetivo por etapa para las distintas secciones del headbox.

A partir de estas velocidades y del caudal de producción, mediante ecuaciones de balance de masa, se determinan las áreas y diámetros de cada conducto. Estos conductos responden a un diseño orientado a producción, y se encontrarán soldados al resto de las estructuras que conforman el conjunto del headbox.

5.5 Estudio CFD

Sobre la geometría final de los 13 tubos de descarga se realizó, en primer lugar, un barrido paramétrico del caudal de recirculación, con el objetivo de determinar la configuración que produce la distribución de caudal más uniforme entre los tubos. El desarrollo detallado de este estudio se presenta en el Capítulo 8; a continuación se resume su resultado principal.

Se evaluaron 10 simulaciones variando el caudal de recirculación entre el 8% y el 26%, en incrementos de 2 puntos porcentuales, utilizando el coeficiente de variación (CV) del caudal entre los 13 tubos como métrica de uniformidad.

% Recirculación	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
CV (%)	1,45	1,33	1,21	1,10	0,99	0,92	0,88	0,93	0,99	1,19

Tabla 2: Coeficiente de variación para cada simulación realizada. Ver cap. 8 para más información.

El CV describe una curva en U con mínimo bien definido en 20% de recirculación (CV = 0,88%), confirmado por el hecho de que el valor vuelve a crecer de forma consistente a ambos lados de ese punto.

Este resultado se contrastó con la teoría clásica de distribución de flujo en un distribuidor: dos efectos contrapuestos determinan el perfil de presión a lo largo del header, la pérdida

de carga por fricción, que reduce la presión en la dirección del flujo, y la recuperación de presión dinámica, que la aumenta al desacelerarse el caudal remanente a medida que cada tubo extrae parte del caudal. Un caudal de recirculación insuficiente favorece el segundo efecto, con presión creciente hacia el extremo alejado de la entrada. Uno excesivo favorece al primero. El óptimo es aquel donde ambos efectos se cancelan. Esto se verificó directamente sobre los resultados numéricos: la pendiente del caudal a lo largo de los 13 tubos cambia de signo al atravesar el óptimo. En base a este resultado, se adoptó un caudal de recirculación del 20% como configuración final de diseño. De ahí surge que el punto de diseño del caudal de alimentación al headbox sea de 2400 L/min con 400 L/min recirculados nuevamente hacia el punto de dilución.

El diseño incluye un tubo de verificación de caudal, que incorpora un visor transparente y conecta la entrada del colector con la salida de recirculación. En condiciones ideales de funcionamiento, este visor debería mostrar ausencia de flujo, lo que indicaría que las presiones a la entrada y a la salida del colector son equivalentes, confirmando que la distribución de caudal entre los tubos se mantiene según lo previsto. La aparición de flujo visible en un sentido u otro constituye, entonces, un indicador directo de desbalance en el sistema, útil como herramienta de diagnóstico durante la puesta en marcha y la operación.

Una vez definida esta configuración y validada la uniformidad de caudal entre ellos, se analizó el comportamiento del flujo en la etapa siguiente dentro del propio headbox: el tramo donde los 13 chorros individuales convergen y se funden en un único ducto común, previo a su salida hacia la rampa. El objetivo fue confirmar que el frente de flujo siga estando distribuido de forma pareja en el ancho de la maquina y se mantenga de esa manera hasta impactar con la rampa inclinada. El desarrollo detallado del estudio CFD correspondiente a esta etapa se presenta en el Capítulo 8. En esta sección se describen los hallazgos que motivaron cambios en el diseño de esta zona de convergencia.

La primera configuración analizada consistía en un headbox de caudal ya uniformizado entre los 13 tubos, que descargaban directamente sobre esta cámara de convergencia sin elementos adicionales en su interior. Este análisis reveló dos problemas que no estaban resueltos por el diseño del headbox en sí mismo, aun con el caudal ya uniformizado entre los 13 tubos:

- **Desviación del flujo:** Los 13 chorros individuales, al desembocar dentro de la cámara de convergencia, no se fusionaban de inmediato en un frente homogéneo. Cada chorro conservaba, en esa zona, una componente de dirección propia heredada de su tubo de origen, generando un patrón de flujo con desviaciones laterales localizadas en lugar de una corriente uniforme, el mismo tipo de defecto de distribución transversal que el diseño del colector buscaba evitar desde su concepción, pero reapareciendo ahora en esta etapa interna de convergencia en lugar de en el propio colector.
- **Decantación del flujo:** en las zonas de menor velocidad relativa entre chorros adyacentes, se identificaron condiciones favorables a la decantación, que perder velocidad de arrastre en esas zonas de transición, la suspensión tendía a depositarse de forma no aleatoria en lugar de mantenerse en suspensión hasta la salida hacia la rampa. Este hallazgo resultó relevante para el diseño en su conjunto, ya que confirmó que el punto crítico de riesgo de decantación no se encuentra en el tanque ni en los tubos de descarga individuales, sino específicamente en esta zona

de convergencia dentro del headbox, y que era ahí donde el diseño requería una intervención puntual.

Para corregir ambos problemas se adoptaron dos medidas combinadas:

1. **Ángulo de rampa de 30°**: además de su función original, este ángulo cumple un rol adicional en la corrección de la desviación de flujo: una inclinación de 30° desacelera la componente de flujo en la dirección de avance de la máquina lo suficiente como para que esa componente disipe rápidamente energía cinética por sobre las desviaciones laterales heredadas de cada tubo individual, ayudando a que los 13 chorros se re-alineen en una dirección común apenas impactan la superficie.
2. **Tres slicers**, dispuestos dentro de la cámara de convergencia, en el tramo donde los chorros de los 13 tubos se unen. A diferencia de una cámara de convergencia simple sin elementos internos, que homogeniza parcialmente el frente de flujo pero no necesariamente rompe la memoria direccional de cada chorro individual ni evita las zonas locales de baja velocidad entre chorros adyacentes, los tres slicers generan micro turbulencias controladas en ese tramo. Estas micro turbulencias cumplen una doble función: por un lado, mezclan lateralmente los 13 chorros entre sí, borrando la desviación direccional individual heredada de cada tubo antes de que la suspensión salga del headbox hacia la rampa; por otro, mantienen la velocidad relativa del flujo por encima del umbral necesario para minimizar la decantación localizada identificada, sin que esa turbulencia sea tan intensa como para reintroducir riesgo de alineación preferencial o de daño a la fibra, aspecto que en otras etapas del proceso también se buscó evitar.

El resultado buscado es que la suspensión llegue a la superficie de la malla en un estado azaroso y uniforme: sin la orientación direccional heredada de los tubos individuales, y sin las zonas de decantación localizada que el diseño original (headbox uniforme + rampa a 30° sin elementos adicionales en la transición) no lograba evitar por sí solo.

5.6 Presión de operación y sistema de bombeo

El headbox opera a baja presión manométrica. Su función no es proyectar un chorro de alta velocidad, sino distribuir la pulpa suavemente hacia la rampa inclinada, a las velocidades establecidas en el dimensionamiento del colector y los tubos de descarga.

La alimentación del headbox se realiza mediante la bomba P4, de tipo cavidad progresiva, marca Seepex, serie BN, cuyas especificaciones se encuentran en la memoria de cálculo. Se prefieren bombas de cavidad progresiva sobre las centrífugas convencionales en toda la línea por su capacidad de manejar suspensiones fibrosas sin dañar la fibra por corte.

Esta bomba impulsa el caudal proveniente del punto de dilución hacia el headbox. La componente de recirculación del caudal, descrita en las secciones anteriores, retorna a este mismo punto de dilución, cerrando el circuito y permitiendo que dicho caudal vuelva a ser utilizado en el proceso.

5.7 Material y construcción

El cuerpo del headbox es de acero inoxidable AISI 316L, de terminación pulida (Ra ≤ 0,4 µm). Esta especificación busca evitar la acumulación de fibrillas de carbono conductoras en irregularidades superficiales, resistir el contacto con la solución acuosa de CMC, y evitar corrosión galvánica.

La ausencia de irregularidades superficiales resulta particularmente relevante en este diseño: cualquier discontinuidad geométrica interna constituye, en principio, un punto potencial de baja velocidad local y acumulación de fibra, análogo a las zonas de decantación identificadas y corregidas en la cámara de convergencia de los tubos de descarga. El acabado superficial adoptado responde, entonces, tanto a un criterio sanitario y de resistencia a la corrosión como a una extensión del mismo criterio de diseño aplicado en el resto del headbox: minimizar toda condición que favorezca la sedimentación de fibra fuera de la corriente principal de flujo.

5.8 Control de altura de la rampa y acumulación de mezcla

El ángulo de la rampa ($\theta = 30°$) queda fijo, no es ajustable en operación. La salida de la rampa incorpora una tapa regulable que controla la altura y la acumulación de mezcla en contacto con la malla, accionada mediante un tornillo de precisión. Este elemento cumple, en la práctica, un rol equivalente al de una regla de labio (slice) en máquinas papeleras: no cambia el ángulo de la rampa, pero sí regula el volumen de pulpa retenido en la zona de impacto antes de que comience a ser arrastrado por la malla, funcionando como el ajuste fino de proceso que compensa la falta de un ángulo variable.

El gap de la tapa no determina el espesor final del mat de forma directa, sino que actúa como una variable de ajuste fino secundaria, subordinada a la relación principal ya establecida: el espesor objetivo (0,50 ± 0,05 mm) se define fundamentalmente por la combinación de gramaje (vía caudal y consistencia), velocidad de línea (v = 10 m/min) y densidad de empaquetamiento de la fibra depositada, no por la geometría de esta tapa.

Lo que sí controla el gap de la tapa es el tiempo de acumulación local de la suspensión antes de ser arrastrada por la malla dentro de la longitud de formación fija (L = 0,20 m). Un gap mayor permite que se acumule más volumen de pulpa antes de que el excedente sea desplazado hacia adelante, lo que, a igualdad de caudal de entrada ($Q_{slice} \approx 2000$ L/min), se traduce en una mayor masa de fibra disponible por unidad de superficie de malla en cada instante, y por lo tanto en un mat localmente más grueso; un gap menor fuerza un paso más rápido de la suspensión, con menor acumulación y un mat más delgado.

Como relación de calibración de primera aproximación (a validar empíricamente, no derivada de un balance físico completo del proceso), se propone tratar el ajuste como aproximadamente monótono y de sensibilidad decreciente hacia los extremos del rango de trabajo.

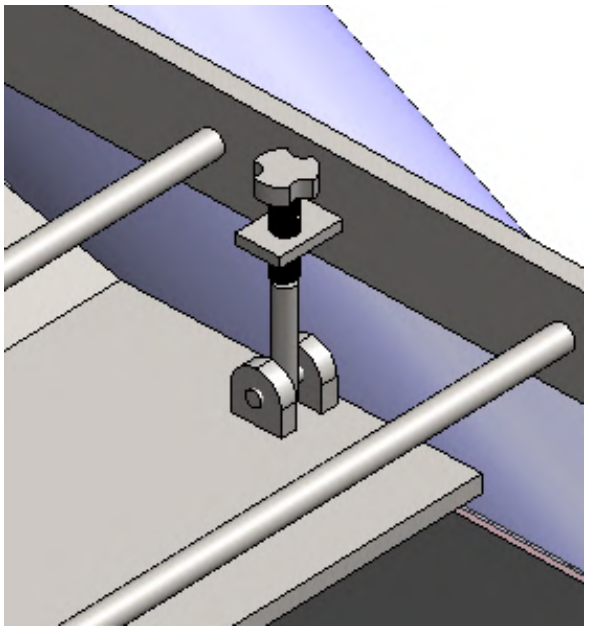


Figura 7: Detalle del tornillo de precisión para el control de la tapa en la rampa.

5.9 Integración headbox-rampa y control de espuma

La descarga del headbox no cae libremente sobre la rampa desde una altura significativa, lo cual generaría desorden en la orientación de las fibras hacia una dirección preferencial. En su lugar, se implementa esa cámara difusora de transición que toma la descarga de los 13 tubos, homogeniza el frente de flujo y lo entrega como una lámina fluida continua, de forma tangente a la malla inclinada.

El ángulo de 30° cumple una doble función en este punto de impacto: aporta la componente gravitacional que ayuda a la desaireación de la pulpa, y ofrece una superficie extendida de contacto con la malla de formación. Gracias a la distancia mínima entre la descarga y la superficie de la malla, se elimina el salpicado y se evita la incorporación de aire, o espuma, en el velo en formación.

Además el labio final se encuentra inclinado 15° con respecto a la cinta y la rampa. Esto a modo de mecanismo de aprovechar la energía cinética de la suspensión para facilitar el colado del agua a través de la malla hacia la caja de succión y ahorrar tiempo y energía de esta sección. Las contenciones laterales de acrílico sirven como encauzadores del flujo y perfeccionadores de la forma del velo, acompañando la etapa de entrada, filtración y salida hacia la última etapa de succión por vacío.

El drenaje es continuo a lo largo del plano inclinado: la primera zona drena principalmente por gravedad, pasando de inmediato a cajas de succión de bajo vacío ubicadas directamente debajo del tramo inclinado de la malla. Por debajo de estas cajas se ubica una batea colectora que canaliza el agua extraída hacia el circuito de recirculación. En el capítulo siguiente se describe en más detalle estos componentes.

5.10 Diseño final obtenido

Una vez completado el desarrollo teórico de este capítulo, se procede a mostrar mediante imágenes el diseño final obtenido para el headbox, resultado de las sucesivas iteraciones de diseño fundamentadas y verificadas mediante los estudios CFD descritos en las secciones anteriores y detallados en el Capítulo 8.

Se presenta, en primer lugar, una vista isométrica del headbox por separado, donde se distingue la secuencia constructiva completa. A continuación, una vista superior permite apreciar con mayor claridad la disposición de los 13 tubos de distribución a lo largo del ancho útil de la máquina, así como la zona de convergencia donde estos se unen antes de continuar hacia la rampa.

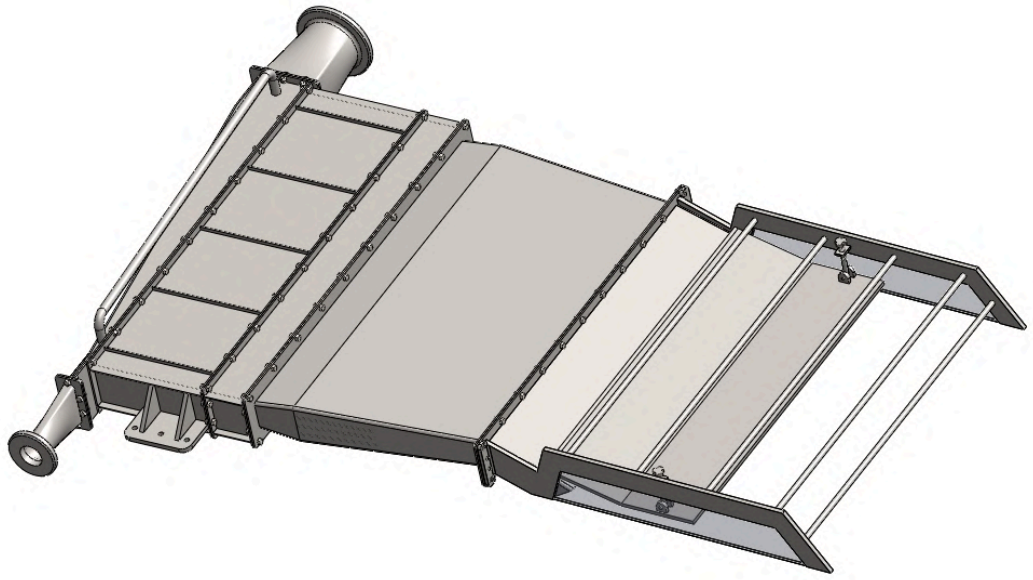


Figura 8-1: Vista del subconjunto de Headbox y Rampa.

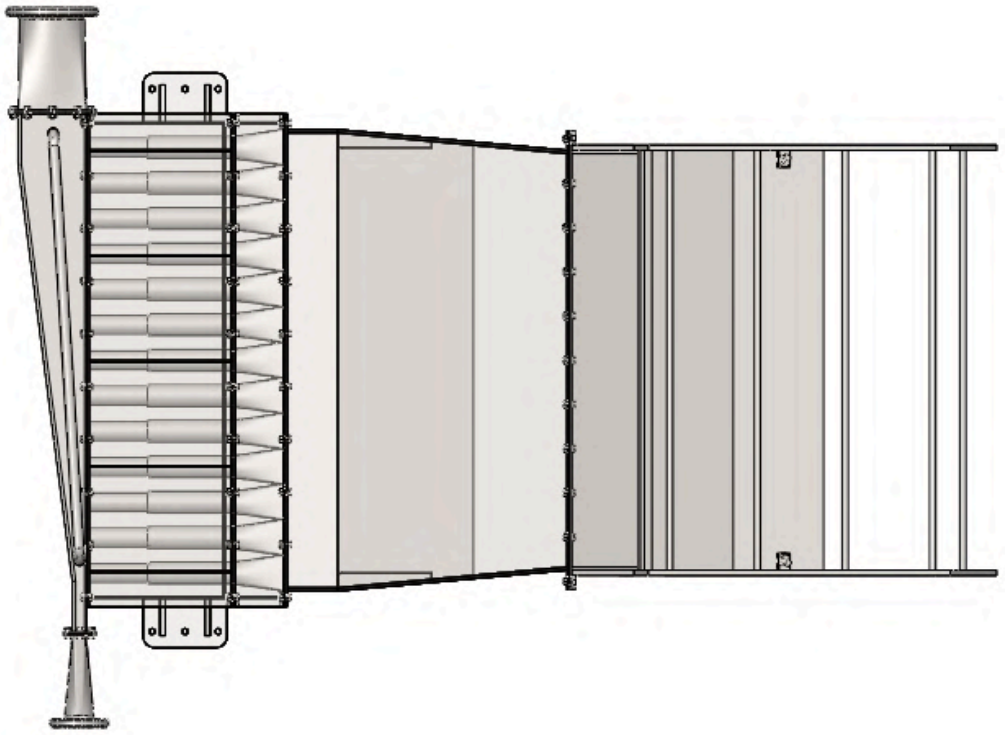


Figura 8-2: Vista superior del subconjunto de Headbox y Rampa.

Finalmente, se incluye una vista isométrica del conjunto montado sobre el resto de la máquina y una sección transversal del mismo, que permite apreciar la geometría interna del headbox y la integración del mismo con la estructura general del sistema de formación.

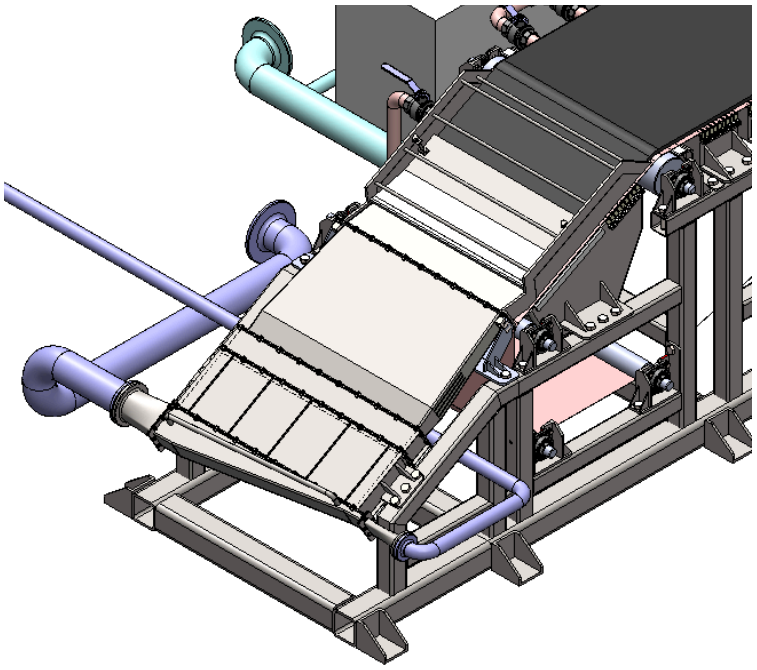


Figura 9-1: Vista del subconjunto de Headbox y Rampa aplicado a la estructura de la cinta.

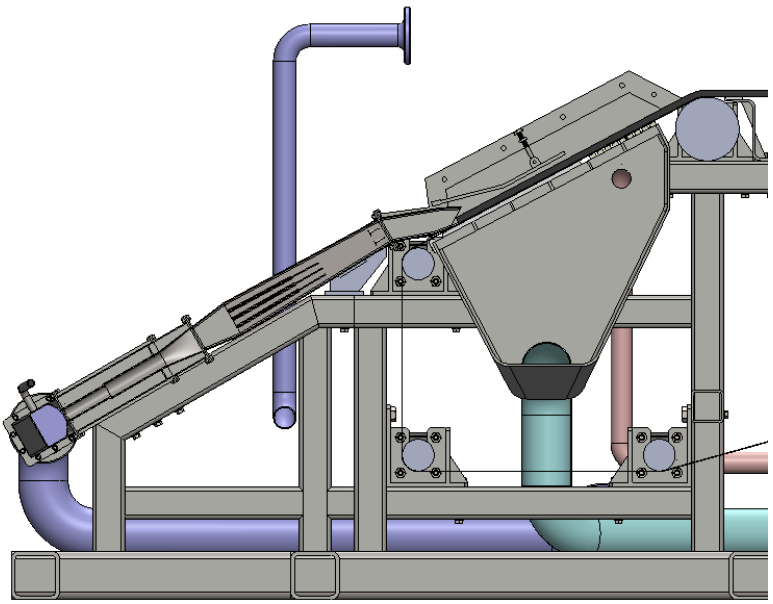


Figura 9-1: Vista en corte del subconjunto de Headbox y Rampa aplicado a la estructura de la cinta.

Capítulo 6: Mesa de formación inclinada, Sistemas de Vacío y Recirculación de Agua

6.1 Introducción al capítulo

Este capítulo desarrolla el diseño físico de la sección de formación de la planta piloto, correspondiente a la propuesta definida en capítulos anteriores: formación sobre tela inclinada con ligante químico (CMC). Se abordan cuatro aspectos: la disposición general de la mesa de formación y su justificación, los roles funcionales de los rodillos que sostienen y guían la tela, el sistema de deshidratación por vacío en sus dos etapas, y el sistema de recirculación para el agua que se extrae durante el proceso

El objetivo principal de esta etapa de la planta es la de permitir la formación del mat de fibra de carbono reciclada a partir de la suspensión diluida, para luego extraer la mayor cantidad de agua posible por medios mecánicos y de vacío antes de que el material ingrese al a la siguiente etapa de secado térmico (fuera del alcance de este trabajo), minimizando así los requerimientos energéticos que esa etapa podría ver.

6.2 Disposición general de la mesa de formación

La mesa de formación se concibe como un lazo cerrado de tela soportado por un conjunto de rodillos y por las cajas de vacío, con un tramo inclinado inicial donde se deposita la suspensión fibrosa y un tramo horizontal posterior donde se completa la deshidratación. La tela se apoya, en el tramo de formación, en contacto deslizante directo sobre la cubierta de las cajas de vacío. El recorrido se compone de:

- Sección inclinada: de 1m de longitud y unos 30 grados respecto a la horizontal, su función es la de deposición de la suspensión y drenaje inicial por gravedad y vacío ligero.
- Sección horizontal: de 2m de longitud, su función es la de consolidación del mat y deshidratación por vacío de mayor intensidad.
- Sección de retorno: Donde se encuentran el sistema de limpieza, alineación y sistema de tensado de la tela. Salvo el sistema de tensado que fue diseñado, los sistemas de acondicionamiento de la tela y alineación se describen de modo conceptual ya que no fueron desarrollados.

6.2.1 Justificación de la tela inclinada

La selección de una configuración de tela inclinada, en lugar de una mesa de formación horizontal convencional, responde a la naturaleza del proceso: la suspensión ingresa al sistema a una consistencia extremadamente diluida (0.1%), condición para la cual una configuración de wire angulada resulta particularmente adecuada al ofrecer una alta capacidad de deshidratación temprana.

Físicamente, la inclinación permite que el drenaje por gravedad comience a actuar inmediatamente en el punto de deposición de la suspensión, antes de que el material

alcance la sección horizontal de mayor exigencia de vacío. Esto reduce la carga de deshidratación que debe asumir el sistema de vacío horizontal y evita someter al mat, todavía sin consolidar, a niveles de vacío elevados que podrían perturbar su formación o generar arrastre excesivo de fibra a través de la tela.

6.2.2 Tela comercial escogida

La tela de formación seleccionada consiste en un monofilamento de poliéster (PET), tejido simple (single layer), modelo PFM-Wetlaid-09502, del fabricante PFM Screen, perteneciente a su línea de producto específica para procesos de formación húmeda . Esta línea se orienta explícitamente a fabricación wet-laid, con aplicaciones declaradas que incluyen mats húmedos de fibra de vidrio y de fibra de carbono.

Propiedad	Valor
Material	Monofilamento de poliéster (PET), capa simple
Diámetro de hilo (urdimbre / trama)	0.5 / 0.5 mm
Densidad de malla	9.5 × 9 hilos/cm
Apertura	0.55 × 0.53 mm
Peso	0.63 kg/m²
Permeabilidad al aire	10.100 m³/m²·h

Tabla 3: Características de la tela comercial elegida.

Debido a que la apertura de malla resulta ampliamente menor a la longitud de fibra empleada, por lo que se espera una retención de fibra prácticamente total. Es por ello que el criterio decisivo de selección fue la permeabilidad/drenaje, no la retención de fibra.

6.2.3 Roles funcionales de los rodillos

La mesa de formación cuenta con siete rodillos, cada uno con una función específica dentro del lazo de tela. Se emplean dos diámetros: 200 mm para el rodillo motriz y un rodillo guía adicional, en el punto de transición entre el tramo inclinado y el horizontal, donde el mayor diámetro favorece un menor esfuerzo de flexión sobre la tela en el cambio de dirección y 100 mm para el resto.

Rodillo	Función	Diámetro
Transición	Cambio de dirección entre el tramo inclinado y el horizontal.	200 mm
Motriz	Accionamiento del lazo de tela, ubicado al final de la zona de formación.	200 mm
Limpieza	Acondicionado con ducha y rasqueta, elimina fibra y ligante residual de la cara de la tela.	100 mm
Alineación	Rodillo autoalineante, corrige desvíos laterales en el tramo de retorno.	100 mm
Tensor	Rodillo montado sobre deslizadera regulable, fija la tensión de operación de la tela.	100 mm
Guía (×2)	Sostienen el recorrido del tramo de retorno.	100 mm

Tabla 4: Descripción funcional de los rodillos utilizados.

El rodillo motriz se ubicó deliberadamente al final de la zona de formación, y no al inicio: en ese punto el material ya perdió la mayor parte del agua libre, por lo que la tracción no perturba la deposición de fibra aguas arriba. El rodillo de limpieza y el de alineación se disponen inmediatamente después del motriz, en el tramo de retorno, antes de que la tela vuelva a ingresar a la zona de formación.

6.3 Deshidratación por vacío

6.3.1 Criterio de diseño: perfil de vacío creciente

El sistema de deshidratación se compone de dos etapas de vacío, con niveles crecientes en la dirección de avance de la tela. Este criterio no es arbitrario sino que responde a dos fenómenos documentados en la bibliografía de diseño de máquinas de papel.

En primer lugar, la resistencia al drenaje aumenta a medida que el mat se consolida y las fibras se alinean bajo el efecto del flujo, lo que exige niveles de vacío progresivamente mayores para continuar extrayendo agua a un ritmo comparable. En segundo lugar, el caudal de aire real que atraviesa el mat es prácticamente nulo antes de que este alcance la denominada línea seca. El caudal de aire aumenta a medida que la hoja se seca más allá de dicha línea (TAPPI TIP 0502-01). Por este motivo, la primera etapa (tramo inclinado) opera dominada por la remoción de agua líquida, con muy baja demanda de aire, mientras que la segunda etapa (tramo horizontal) es la que efectivamente debe dimensionarse para manejar un caudal de aire significativo.

Los niveles de vacío adoptados son coherentes con los rangos documentados para deshidratación de alto vacío en la industria papelera, que sitúan la operación de alto vacío entre −15 y −40 kPa, y con el criterio de diseño de dos zonas de succión operando a niveles de vacío y caudal de aire sucesivamente mayores (TAPPI TIP 0502-01).

6.3.2 Consistencia final objetivo y su fundamento

Se adoptó como objetivo de diseño una consistencia final del mat de 20% de sólidos a la salida de la segunda etapa de vacío, previo al ingreso de la etapa de secado térmico. La deshidratación por vacío tiene un límite físico determinado por la presión capilar de la red de fibras. Dado que la fibra de carbono reciclada es gruesa y no fibrilante, a diferencia de la pulpa celulósica, el tamaño de poro de la red fibrosa es mayor, lo que reduce la presión capilar de retención y permite, en principio, alcanzar una consistencia de salida superior a la habitual en procesos papeleros convencionales que pueden rondar entre el 18 y 22%.

Para alcanzar consistencias sustancialmente mayores sería necesario incorporar una etapa de prensado mecánico, que se excluye deliberadamente de esta configuración de proceso. A diferencia de la pulpa celulósica, cuyas fibras flexibles toleran razonablemente bien la carga compresiva de un nip, la fibra de carbono es intrínsecamente rígida y frágil. Someterla a cargas puntuales de compresión entre rodillos conllevaria un riesgo de fractura de fibra, con la consecuente reducción de su de su capacidad de refuerzo mecánico en el producto final. Esta exclusión es consistente con la decisión de proceso adoptada desde el inicio del proyecto, que responde al mismo criterio de preservar la integridad de la fibra a lo largo de las etapas mecánicas del proceso.

6.4 Sistema de deshidratación por vacío

6.4.1 Fundamento normativo

Para el dimensionamiento del caudal de aire de los equipos de vacío, se utilizó como base normativa el procedimiento de la norma TAPPI TIP 0502-01 (*Paper machine vacuum selection factors*), que provee factores de diseño de caudal de aire por grado de papel/cartón. Por gramaje, el grado tabulado más cercano al del presente diseño corresponde a “Bleached Kraft – SBS Paperboard” (120–300 lb/3000 ft²).

Se deja constancia explícita de una limitación relevante: el rango de velocidad tabulado para dicho grado (750–4000 fpm) excede en un orden de magnitud la velocidad de diseño de la presente línea piloto (≈33 fpm), por lo que la aplicación de los factores de la norma constituye una extrapolación fuera de su dominio de validez original. Dado el carácter académico del presente trabajo, se optó por aceptar esta extrapolación como simplificación razonada, sustentada en que, a menor velocidad, el mayor tiempo de residencia por unidad de longitud de caja tiende a reducir la demanda real de aire, por lo que la aplicación directa de los factores tabulados constituye una estimación conservadora. Se compensa esta incertidumbre aplicando un factor de margen adicional de 2,5 sobre el caudal de aire calculado.

6.4.2 Zonificación y niveles de vacío

Se definieron dos sistemas de vacío independientes, cada uno con su propio ventilador, siguiendo el principio de que el vacío debe aumentar progresivamente a lo largo de la máquina: un nivel bajo al inicio, donde el mat aún no tiene resistencia mecánica ni se ha alcanzado la "línea seca" por lo que no hay paso apreciable de aire, solo agua. Y un nivel más alto en el tramo final, donde ya existe paso de aire a través del mat. En definitiva contamos con,

- **Sistema 1 (etapa inclinada, bajo vacío):** dimensionado mediante el factor de caudal por ancho de tela correspondiente a la ubicación de vacío bajo (*Location 3*, TIP 0502-01).
- **Sistema 2 (etapa horizontal, medio y alto vacío):** dimensionado mediante la fórmula de cubierta ranurada ($Q = ww \times \#ranuras \times ancho\ de\ ranura \times Vf \times \#cajas$), con geometría de ranurado propia, y expansión del caudal de la primera subetapa al nivel de vacío de la segunda mediante la Ley de Boyle, dado que ambas subetapas comparten una única fuente de vacío.

Sistema	Ubicación	Nivel de vacío	Caudal de aire de diseño
1	Tramo inclinado (gravedad + succión ligera)	≈13,5 kPa	≈585 m³/h
2	Tramo horizontal (vacío medio/alto)	≈27-41 kPa (dos etapas)	≈2323 m³/h

Tabla 5: Ubicación, nivel de vacío y caudal de aire para los sistemas de succión.

6.5 Recuperación y reutilización del agua extraída

El agua extraída por ambos sistemas de vacío se reincorpora al circuito de agua de proceso de la planta, reduciendo el consumo de agua fresca. Para ello, la idea es que a la salida de cada caja de vacío, la corriente de agua y aire se dirige a un separador aire-agua, cuya configuración diferirá entre ambas etapas en función de la naturaleza del riesgo dominante en cada una. En el Sistema 1, donde el caudal de agua es ampliamente superior al de aire, un separador simple de tipo gravitacional resulta suficiente. En el Sistema 2, donde el caudal de aire es sustancialmente mayor y existe riesgo de arrastre de gotas hacia el ventilador de vacío, se requiere un separador equipado para tales características.

Una vez separada del aire, el agua recuperada se conduce a través de un sistema de filtrado, con el objeto de remover fibra y ligante residual arrastrados desde el mat, antes de ser reincorporada al circuito de proceso como agua de dilución para la etapa previa al headbox. De esta manera, el sistema de vacío no solo cumple su función de deshidratación del mat, sino que constituye, junto con el filtrado posterior, la fuente principal de agua de proceso reutilizada en la planta.

6.6 Diseño final obtenido

Una vez completado el desarrollo teórico de este capítulo, se procede a mostrar mediante imágenes el sistema completo de formación, que incluye la unidad de distribución (headbox) y la mesa de formación inclinada, junto con las cajas y los sistemas de vacío asociados. Dichos elementos se montan sobre un bastidor conformado por perfiles estructurales cuadrados, soldados entre sí. La elección de este tipo de perfil responde a razones prácticas habituales: sus caras planas facilitan el montaje de los soportes de los rodillos y de las cajas de vacío, y su geometría resulta sencilla de soldar y ensamblar. El bastidor debe acomodar, en una única estructura, tanto el tramo inclinado como el tramo horizontal subsiguiente, definiendo en conjunto la altura y la pendiente final de la mesa de formación. El dimensionamiento estructural del bastidor (selección de perfil, verificación de carga y diseño de las uniones soldadas) no fue desarrollado en el presente trabajo.

Se muestran a continuación una vista isométrica y dos vistas laterales del conjunto, junto con imágenes adicionales que detallan las cajas de vacío diseñadas. Los prismas blancos representados sin mayor nivel de detalle, a los costados del bastidor, corresponden a los sistemas de vacío y a los separadores aire-agua mencionados anteriormente. En violeta se ilustran las tuberías de entrada al headbox y de recirculación del mismo; en celeste, la tubería de desagüe principal de la caja de vacío de la primera etapa, que transporta la mayor parte del líquido extraído; y en rojo, las tuberías de succión de ambas etapas.

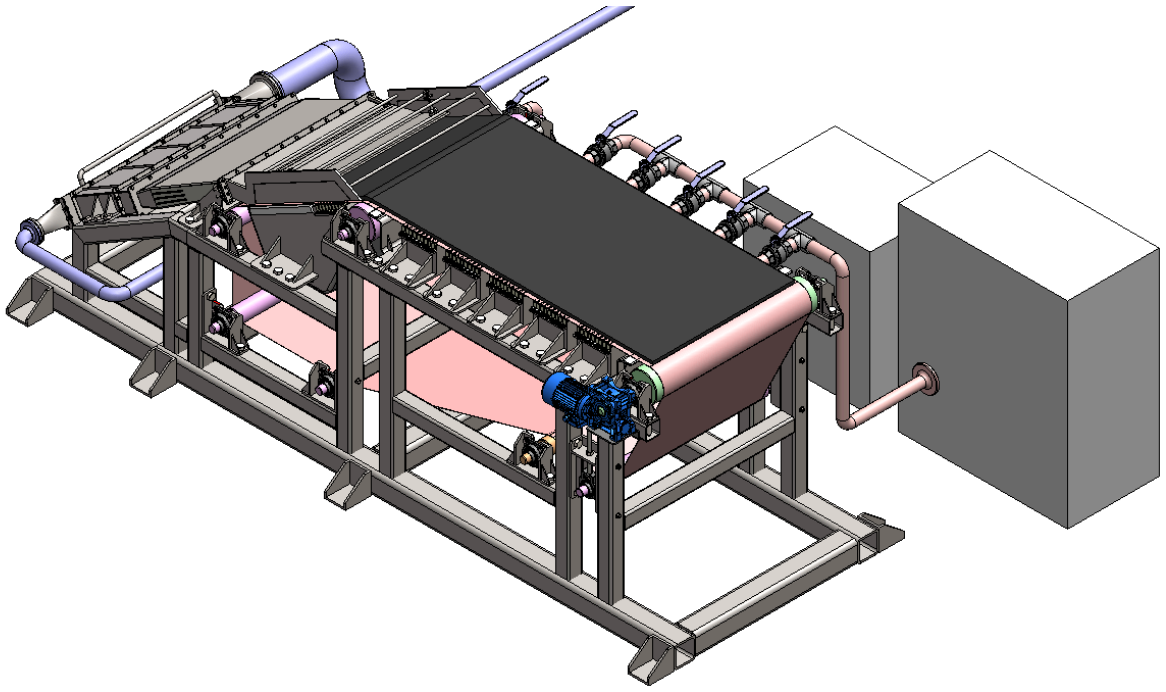


Figura 10-1: Vista del subconjunto de Cinta con los subsistemas aplicados.

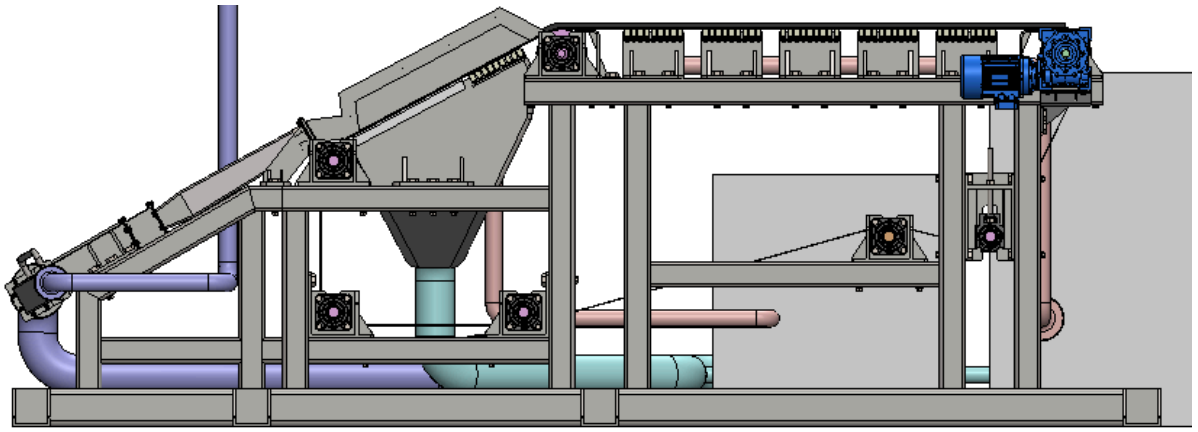


Figura 10-2: Vista lateral del subconjunto de Cinta con los subsistemas aplicados.

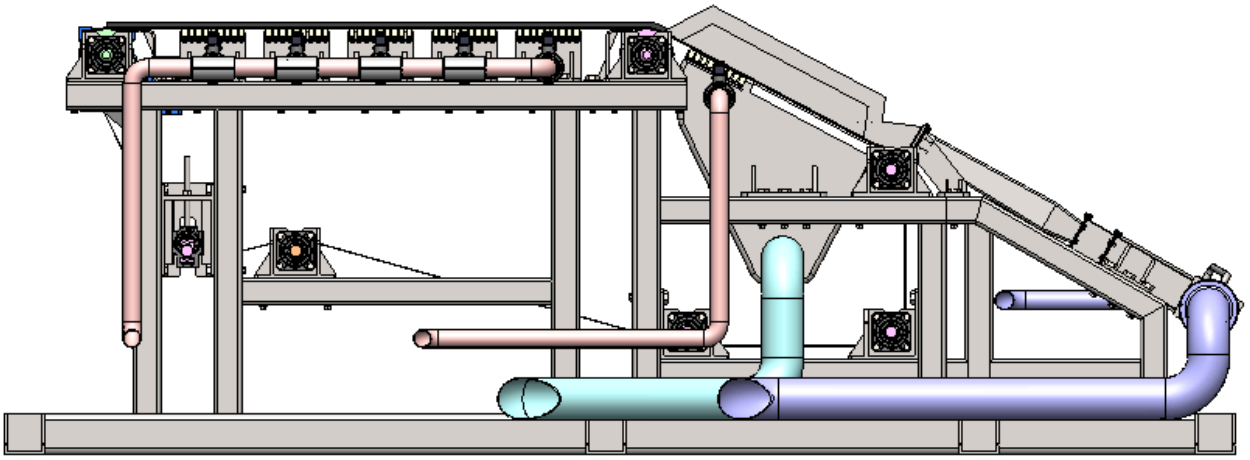


Figura 10-3: Vista del subconjunto de Cinta con los subsistemas aplicados, detalle de conductos.

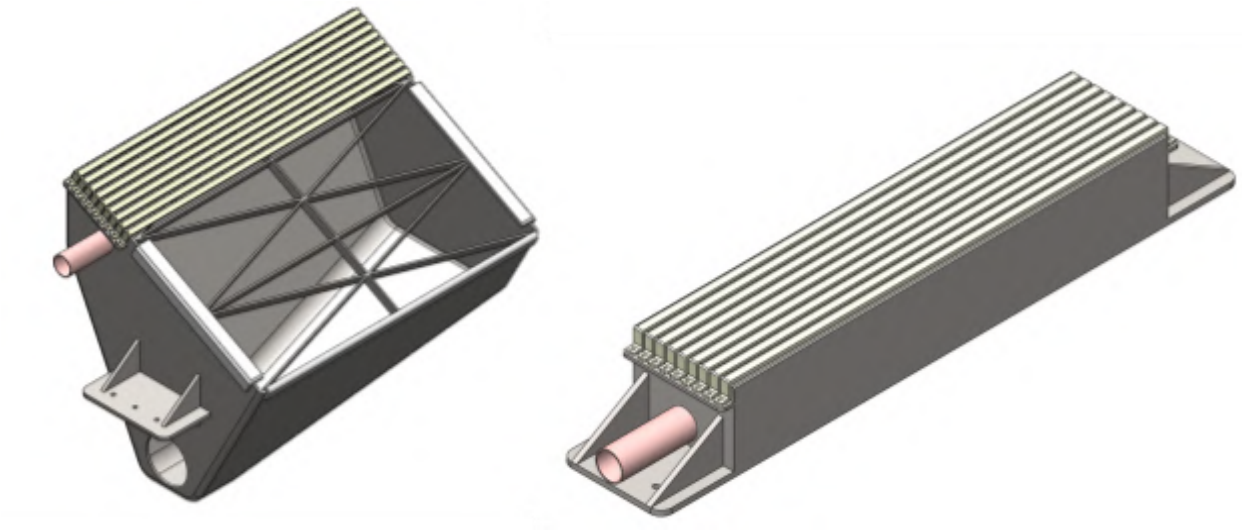


Figura 11: Vista de las cajas del sistema de vacío para el secado.

Capítulo 7: Memoria de cálculo - síntesis y trazabilidad

7.1 Alcance del capítulo

Este capítulo no repite el desarrollo de cálculo de cada subsistema, ese desarrollo ya fue presentado en detalle en los capítulos técnicos correspondientes, y el detalle numérico completo de cada dispositivo se encuentra en la planilla de cálculo (Anexo B). El propósito de este capítulo es doble: presentar las ecuaciones de balance de masa que vinculan a todo el sistema entre sí (y que no pertenecen a un único subsistema), y consolidar en una tabla de síntesis los parámetros de diseño finales adoptados en cada capítulo, de modo de tener en un solo lugar la trazabilidad completa del dimensionamiento de la línea. Además de cálculos de potencias y selección de bombas para explicar el razonamiento detrás de los mismos.

7.2 Tabla de síntesis de parámetros de diseño

Subsistema	Parámetro	Valor adoptado	Capítulo/sección
Proceso general	w, v, G	1 m / 10 m/min / 200 g/m²	Cap. 1
Proceso general	Producción de fibra seca	≈2,0 kg/min (120 kg/h)	Cap. 6, 6.5.1
Tanque mezclador	D, H_líquido, V_total, V_lote	1,80 m / 2,16 m / 5.520 L / 4.800 L	Cap. 3
Mezclador (mixer)	Tipo, D_impulsor, N, Re, Potencia	2× PBT 45°, 0,54 m, 247.6 RPM, Re≈1,35×10⁶, ≈18,5 HP	Cap. 4
Tanque de reserva	Impulsor, D, N, Potencia	Hidrofoil, 0,63 m, ≈70 RPM, ≈70 W	Cap. 3
Circuito de dilución	Q_espeso / Q_dilución / Q Slice	388 / 1552 / 2000 L/min	Cap. 6, 6.4.2
Headbox	H, N° de tubos, presión, Q recirculación óptimo	10 cm / 13 / 10-30 kPa / 20% de Q_slice	Cap. 5
Rampa	θ, L	30° / 0,20 m	Cap. 5

Subsistema	Parámetro	Valor adoptado	Capítulo/sección
Consistencia de proceso	Entrada / fin tramo inclinado / fin tramo horizontal	0,1% / 3% / 20%	Cap. 6, 6.5.2
Vacío — Sistema 1 (rampa)	Nivel / caudal de aire	≈13,5 kPa / ≈585 m³/h	Cap. 6, 6.7.2
Vacío — Sistema 2 (secado)	Nivel / caudal de aire	≈27–41 kPa / ≈2300 m³/h	Cap. 6, 6.7.2
Fibra de diseño	Longitud / diámetro / densidad	6–25 mm / 7×10^{-6} m / 1.800 kg/m³	Cap. 1
CMC	Concentración / rango de curado	0,3–0,5% / 130–180°C (< 180-250°C degradación)	Cap. 1, 4

Tabla 6: Síntesis de parámetros de diseño.

7.3 Ecuación general de gramaje y balance de masa del proceso

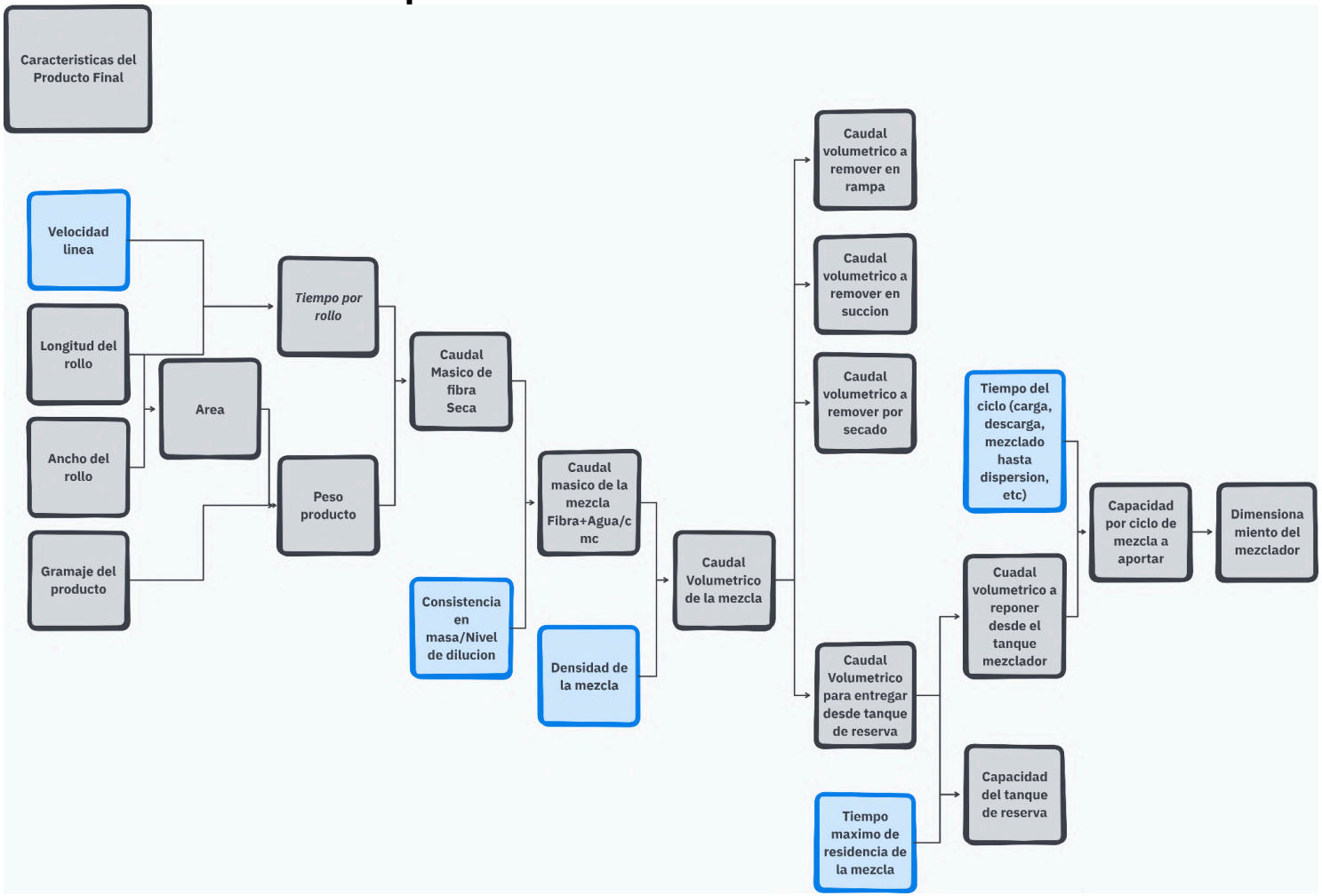
El gramaje o masa superficial (G) queda determinado por la relación entre el caudal de fibra seca que ingresa y la superficie de malla cubierta por unidad de tiempo:

$$G = (Q_{ent} \cdot C) / (v \cdot w)$$

donde G es el gramaje objetivo (200 g/m²), Qent el caudal de suspensión que sale del headbox, C la consistencia de la mezcla, v la velocidad de la malla transportadora (v = 10 m/min, valor confirmado y ya utilizado en todos los capítulos técnicos) y w el ancho útil de formación (w = 1 m).

Esta es la ecuación raíz de todo el dimensionamiento de la línea: de ella se deriva, aplicada en cada punto del proceso con su consistencia correspondiente, tanto el caudal de fibra seca como los caudales de stock espeso, dilución y slice del headbox.

7.4 Diagrama de correlación de parámetro



7.5 Sedimentación de fibra individual (Ley de Stokes) — resultado ya aplicado

La estimación de velocidad de sedimentación de un filamento individual, usando la aproximación de Stokes ajustada por factor de forma:

$$v_s = [g \cdot d_f^2 \cdot (\rho_f - \rho_m)] / (18 \cdot \mu \cdot \phi)$$

fue resuelta y aplicada en el Capítulo 3 para dimensionar el criterio de agitación del tanque de reserva: con df≈7×10⁻⁶ m y (ρf−ρm)=800 kg/m³, la velocidad de caída de un filamento individual resulta del orden de 2×10⁻⁵ m/s (≈0,08 m/hora), despreciable frente a los tiempos de operación del tanque. Este resultado fue el que justificó reformular el criterio de diseño del tanque de reserva de "velocidad de sedimentación" a "recambios de volumen" (turnovers), tal como quedó documentado en el Capítulo 3.

7.6 Dimensionamiento del Motor del Mezclador Primario

7.6.1 Criterio de diseño adoptado

El dimensionamiento del sistema de agitación del tanque mezclador no pudo abordarse mediante los procedimientos estándar de suspensión de sólidos o mezclado (*blending*) de la guía Hayward Gordon, dado que ninguno de ellos modela la ruptura mecánica de haces de fibra cohesionados por fricción entre filamentos. Ante la ausencia de una correlación publicada específica para este fenómeno, se adoptó como variable de diseño la velocidad periférica del impulsor (tip speed), fijada en el extremo superior del rango admisible por la guía Hayward Gordon (2.0–7.6 m/s), con el objetivo de maximizar el corte hidráulico sobre los haces de fibra. Las ecuaciones de potencia, bombeo y geometría utilizadas corresponden a la guía Hayward Gordon (sección *Equation Summary*).

7.6.2 Parámetros de diseño

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro de tanque	T	1.80	m
Altura de líquido	Z	2.00	m
Volumen de batch	V	4.00	m³
Consistencia (fracción volumétrica)	φ	0.005	% v/v
Densidad de la mezcla	ρ_mix	1002.2	kg/m³

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Relación D/T adoptada	D/T	0.30	-
Velocidad periférica adoptada	TS	7.00	m/s

Tabla 7: Parámetros de diseño utilizados para el dimensionamiento del motor.

Se adoptaron dos impulsores de paletas inclinadas (4PBT45), montados sobre un mismo eje, con base en la relación Z/T = 1.11, dentro del límite admisible para configuración de doble impulsor establecido por la guía Hayward Gordon (Z/T ≤ 1.7). El diámetro de impulsor resultante es:

$$D = (D / T) \cdot T = 0{,}30 \cdot 1{,}80\ m = 0{,}540\ m$$

7.6.3 Velocidad de rotación

A partir de la velocidad periférica objetivo:

$$N = TS / (\pi \cdot D) = 7{,}00 / (\pi \cdot 0{,}540) = 4{,}126\ rev/s = 247{,}6\ RPM$$

Se verificó el número de Reynolds del impulsor (Re ≈ 1.21×10^6), confirmando régimen turbulento y validando el uso de un número de potencia constante.

7.6.4 Potencia y torque

$$P = N_P \cdot \rho_{mix} \cdot N^3 \cdot D^5 = 3{,}24 \cdot 1004\ kg/m^3 \cdot (4{,}126\ rev/s)^3 \cdot (0{,}540\ m)^5 \approx 10{,}49\ kW$$

$$Tq = P / (2 \cdot \pi \cdot N) \approx 404{,}7\ N{\cdot}m$$

Aplicando un factor de servicio del 30% (arranque, pérdidas mecánicas y variabilidad de proceso), se obtiene la potencia de motor adoptada:

$$P_{motor} = 1{,}30 \cdot 10{,}49\ kW = 13{,}75\ kW \approx 18{,}44\ HP$$

7.6.5 Resultado final

Resultado	Valor
Velocidad de rotación adoptada	**247.6 RPM**
Torque calculado	**404.7 N·m**

Resultado	Valor
Potencia hidráulica requerida	**10.49 kW**
Potencia de motor adoptada	**13.75 kW (≈ 18 HP)**

Tabla 8: Resultados obtenidos.

Este resultado fue posteriormente contrastado mediante simulación CFD en SolidWorks Flow Simulation (Capítulo 8), obteniéndose un torque simulado de aproximadamente 400 N·m sobre el conjunto impulsor-eje, en concordancia con el valor calculado analíticamente (diferencia ≈1%), lo cual valida el criterio de diseño adoptado.

7.7 Cálculo de caudales y balance de masa

La arquitectura de lazos de proceso se organiza en torno a cuatro elementos principales:

1. **Tanque mezclador:** preparación por lotes.
2. **Tanque de reserva:** stock espeso, con recirculación de agitación para evitar sedimentación durante paradas.
3. **Tanque de dilución:** punto de mezcla entre el stock espeso y el agua de dilución, inmediatamente previo al headbox.
4. **Tanque de agua limpia/blanca (no dimensionado):** recibe el agua extraída en la etapa de deshidratación por vacío, cerrando el circuito de recirculación descrito conceptualmente en el Capítulo 2.

7.7.1 Balance de caudales del lazo de aproximación

Por balance de masa alrededor del tanque de dilución y del headbox, se demuestra que el caudal de recirculación se cancela en la relación de caudales de entrada (Q_espeso + Q_dilución = Q_slice), independientemente del caudal de recirculación elegido, este último es un parámetro de diseño hidráulico del headbox (Capítulo 5, sección 5.6), no una variable del balance de masa del proceso.

Corriente	Caudal	Consistencia	Cómo se obtuvo
Q_slice (headbox → tela)	2,000 L/min	0.1%	Balance de masa: ancho × velocidad × gramaje ÷ consistencia
Q_thick (reserva → tanque dilución, P2)	388 L/min	0.5%	Mismo balance, a consistencia de reserva
Q_dilución	1,552 L/min	-	Q_slice − Q_thick

Corriente	Caudal	Consistencia	Cómo se obtuvo
(agua limpia → tanque dilución, P3)			
Q_recirc headbox	400 L/min	0.5%	Óptimo de uniformidad hallado por CFD (20% de Q_slice)
Q_entrada headbox (P4)	2,400 L/min	-	Dimensionado con 15% de margen (Q_slice × 1.15)
Batch mezclador (P1)	120 m³/h instantáneo	-	4 m³ en 2 min

Tabla 9: Resumen y balance de Caudales del proceso.

7.8 Selección y dimensionamiento de bombas

Para cada bomba del sistema se desarrolló una hoja de cálculo paramétrica: caudal de diseño, diámetro de tubería a partir de una velocidad objetivo de 2,5 m/s, pérdidas de carga por fricción (Darcy-Weisbach, factor de Swamee-Jain) y altura dinámica total (TDH) con un factor de seguridad de 1,4 sobre pérdidas no modeladas explícitamente. Se seleccionaron bombas de cavidad progresiva (Seepex, serie BN), justificadas por su capacidad de manejar suspensiones fibrosas sin dañar la fibra por corte, a diferencia de una bomba centrífuga convencional.

Bomba	Servicio	Caudal de diseño	TDH	Observación
P1	Mezclador → Reserva (lote)	120 m³/h (lote de 4 m³ en 2 min)	≈2,9 m	Trabaja de manera intermitente
P2	Reserva → Tanque dilución (stock espeso)	24 m³/h (400 L/min)	≈3,5 m	Cavidad progresiva
P3	Agua de recirculación → Tanque dilución	≈93 m³/h (1552 L/min)	≈2,1 m	Cavidad progresiva o centrífuga
P4	Tanque de dilucion → Headbox (fan pump)	138 m³/h (2300 L/min)	≈2,0 m	Incluye 15% de recirculación

Bomba	Servicio	Caudal de diseño	TDH	Observación
P5	Filtrado → Agua limpia	Pendiente de definición final	—	Depende del sistema de vacío

Tabla 10: Resumen del dimensionamiento de bombas.

La nomenclatura del fabricante (Seepex BN, caudal de referencia a 350 rpm y etapa de presión) se usó para expresar cada punto de diseño en unidades comparables con catálogo, incluyendo un margen de velocidad de operación del 90% de la velocidad máxima del modelo (500 rpm), para compensar la pérdida de rendimiento por desgaste del rotor/estator a lo largo de su vida útil.

Capítulo 8: Simulaciones y verificaciones

8.1 Introducción y alcance

Este capítulo reúne los resultados de las simulaciones numéricas desarrolladas para validar las decisiones de diseño adoptadas en los capítulos anteriores. Las simulaciones realizadas en SolidWorks Flow Simulation, corresponden a dos sistemas independientes de la máquina de formación: el headbox y el tanque de mezcla.

Sobre el headbox, se presentan dos estudios: (i) un barrido paramétrico sobre el porcentaje de recirculación del manifold distribuidor, con el objetivo de identificar la configuración que minimiza la variabilidad de caudal entre los tubos del banco distribuidor, y (ii) una verificación cualitativa de las trayectorias de flujo dentro del headbox en el punto de diseño seleccionado, orientada a descartar la presencia de vórtices o zonas muertas.

Sobre el tanque de mezcla, se documentarán las simulaciones realizadas para validar los requerimientos de potencia de agitación y para verificar los campos de velocidades y la ausencia de zonas muertas en el interior del tanque, así como la trayectoria de las fibras durante su ingreso y dispersión.

8.2 Simulación CFD del headbox

8.2.1 Parámetros de diseño y configuración general del headbox

El headbox fue dimensionado para una máquina de 1 m de ancho útil, con una consistencia de entrada de 0.1% y una velocidad de línea de 10 m/min. La longitud de fibra utilizada en el diseño es de 3 mm. La sección de distribución fue dimensionada para una velocidad interna de diseño de vm = 2.15 m/s, resultando en una sección de entrada de 157 × 118 mm y una sección de salida (extremo de recirculación) de 27 × 118 mm. El banco distribuidor final está compuesto por 13 tubos dispuestos en una única fila, con un paso entre centros de 85 mm. Para las simulaciones se configuraron con **tres condiciones de borde**:

- **Entrada:** caudal volumétrico prescrito, Q_entrada = Q_slice + Q_recirc, variable según el caso simulado.
- **Recirculación:** caudal volumétrico prescrito, Q_recirc, variable según el caso simulado.
- **Salida a la cinta (slice):** presión atmosférica.

Es decir, tanto la entrada como la recirculación se impusieron como caudales fijos, mientras que la presión atmosférica se aplicó únicamente en la salida hacia la cinta, permitiendo que el caudal remanente (Q_slice) se distribuyera libremente entre los 13 tubos del banco según la respuesta hidráulica del sistema. Al dejar la salida hacia la cinta a presión atmosférica, el caudal efectivamente entregado al slice surge como resultado de la simulación, en función de cómo se distribuye el flujo entre los 13 tubos del banco. Como verificación de consistencia del estudio, se comprobó que en todos los casos simulados el caudal total resultante hacia el slice se aproxima a los 2000 L/min esperados, con variaciones menores entre casos.

8.2.2 Estudio paramétrico del porcentaje de recirculación

Con el objetivo de determinar la configuración de recirculación que produce la distribución de caudal más uniforme entre los 13 tubos del banco distribuidor, se realizó un barrido de 10 simulaciones, variando el porcentaje de recirculación entre 8% y 26%, en incrementos de 2 puntos porcentuales. Las condiciones de borde específicas de cada simulación se resumen en la siguiente tabla.

% Recirculación	Q_ Entrada (L/min)	Q Recirculación (L/min)
8%	2160	160
10%	2200	200
12%	2240	240
14%	2280	280
16%	2320	320
18%	2360	360
20%	2400	400
22%	2440	440
24%	2480	480
26%	2520	520

Tabla 11: Casos de estudio analizados en el estudio parametrico.

Para cada simulación se registró el caudal individual en cada uno de los 13 tubos del banco distribuidor, y se calcularon los estadísticos de media, desviación estándar, coeficiente de variación (CV) y rango (máximo - mínimo) del conjunto de 13 valores. Los resultados se resumen en la siguiente tabla.

% Recirculación	Media (L/min)	Desv. Est.	CV (%)	Rango
8%	153.9	2.243	1.46%	7.5
10%	153.9	2.058	1.34%	6.81
12%	153.89	1.874	1.22%	5.89
14%	153.88	1.699	1.10%	5.42
16%	153.89	1.531	1.00%	4.98
18%	153.89	1.418	0.92%	4.86
20%	153.89	1.356	0.88%	4.7
22%	153.89	1.441	0.94%	4.62
24%	153.89	1.533	1.00%	5.68
26%	153.88	1.832	1.19%	7.13

Tabla 12: Valores estadísticos obtenidos para cada caso de estudio.

Se observa que la media de caudal por tubo permanece prácticamente constante en todo el rango simulado. Esto es consistente con la verificación de que el caudal total resultante hacia el slice se mantuvo, en los distintos casos, cercano a los 2000 L/min esperados, a pesar de no haber sido impuesto como condición de borde, lo cual confirma que las diferencias observadas entre configuraciones corresponden efectivamente a cambios en la distribución del flujo entre tubos, y no a variaciones en el caudal total del sistema.

El coeficiente de variación presenta un comportamiento no monótono respecto al porcentaje de recirculación: parte de 1.46% en R = 8%, desciende de forma continua hasta un mínimo de 0.88% en R = 20%, y vuelve a incrementarse hacia R=26% (1.19%). El mismo patrón se observa en la desviación estándar y en el rango, ambos mínimos también en R=20%. Este comportamiento evidencia lo planteado en el marco conceptual de este trabajo: para valores bajos de recirculación el extremo del manifold recibe un caudal insuficiente para equilibrar la presión estática a lo largo del header, favoreciendo una sobre-entrega de caudal en los tubos más alejados de la entrada; mientras que para valores elevados de recirculación se produce el efecto inverso, con una sobre-corrección que penaliza nuevamente la uniformidad. El mínimo de dispersión observado en R = 20% corresponde, en consecuencia, al punto de balance entre ambos efectos.

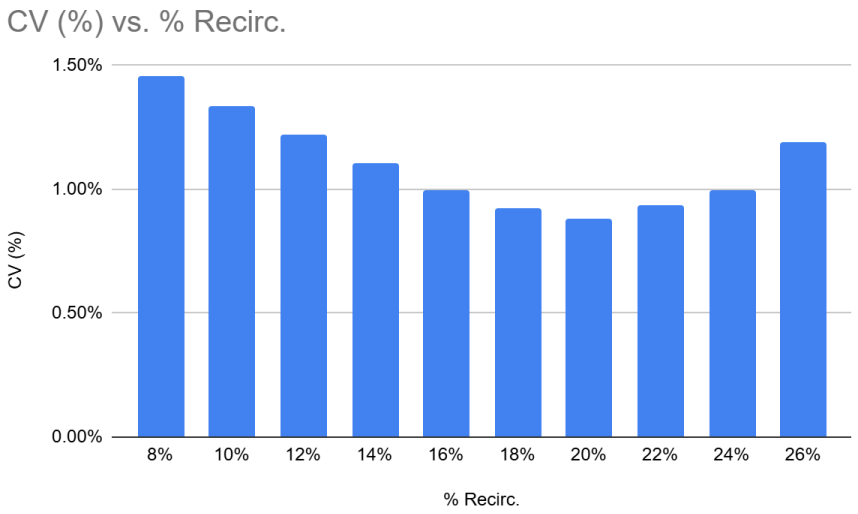


Figura 12: Gráfica de la variación del CV con respecto al porcentaje de recirculación.

Dentro del rango 8–26%, el mínimo coeficiente de variación se obtuvo para R = 20% (CV = 0.88%), con una desviación estándar de 1.356 L/min y un rango de apenas 4.70 L/min entre el tubo de mayor y menor caudal. Este resultado confirma que la geometría de una sola fila de 13 tubos, en conjunto con una recirculación del 20%, produce una distribución de flujo prácticamente uniforme a lo ancho del banco distribuidor.

Por lo mencionado anteriormente, en base a los resultados del estudio paramétrico, se adoptó R = 20% (Q_ Entrada = 2400 L/min, Q_Recirc = 400 L/min) como configuración final de operación del headbox, al ser la que minimiza la variabilidad de caudal entregado a cada tubo del banco distribuidor dentro del rango simulado.

8.2.3 Verificación de trayectorias de flujo en el punto de diseño

Con la configuración de recirculación seleccionada (R = 20%), se realizó una segunda simulación orientada a verificar cualitativamente el comportamiento del flujo dentro del headbox en su totalidad, mediante el análisis de trayectorias de flujo y campos de velocidad, con el objetivo de confirmar que el flujo se distribuye de manera pareja a lo ancho de la máquina, sin la presencia de vórtices ni zonas muertas que pudieran favorecer la sedimentación o acumulación de fibra dentro del manifold o el banco de tubos.

En esta etapa se realizaron dos instancias sucesivas de simulación. En la primera instancia se observó la formación de algunos vórtices localizados dentro de la rampa de salida del headbox. Como medida correctiva se incorporaron placas separadoras de flujo en el interior de la rampa, con el objetivo de compartimentar el flujo y suprimir la formación de dichas estructuras perjudiciales. El diseño y la justificación geométrica de estas placas se detallan en el capítulo correspondiente al diseño del headbox, por lo que aquí solo se hace referencia a su incorporación.

En la segunda instancia, con las placas separadoras ya incorporadas, los resultados fueron favorables respecto a lo esperado: las trayectorias de flujo observadas resultaron parejas a lo ancho de la máquina, sin evidenciarse vórtices claros ni zonas de recirculación local dentro del headbox. Este resultado, en conjunto con la baja dispersión de caudal obtenida en el estudio paramétrico, permite concluir que la geometría final del headbox cumple con los objetivos de distribución uniforme de flujo planteados para el diseño. A continuación se presentan unas imágenes obtenidas de SolidWorks donde se aprecia las trayectorias de fluido con las características mencionadas.

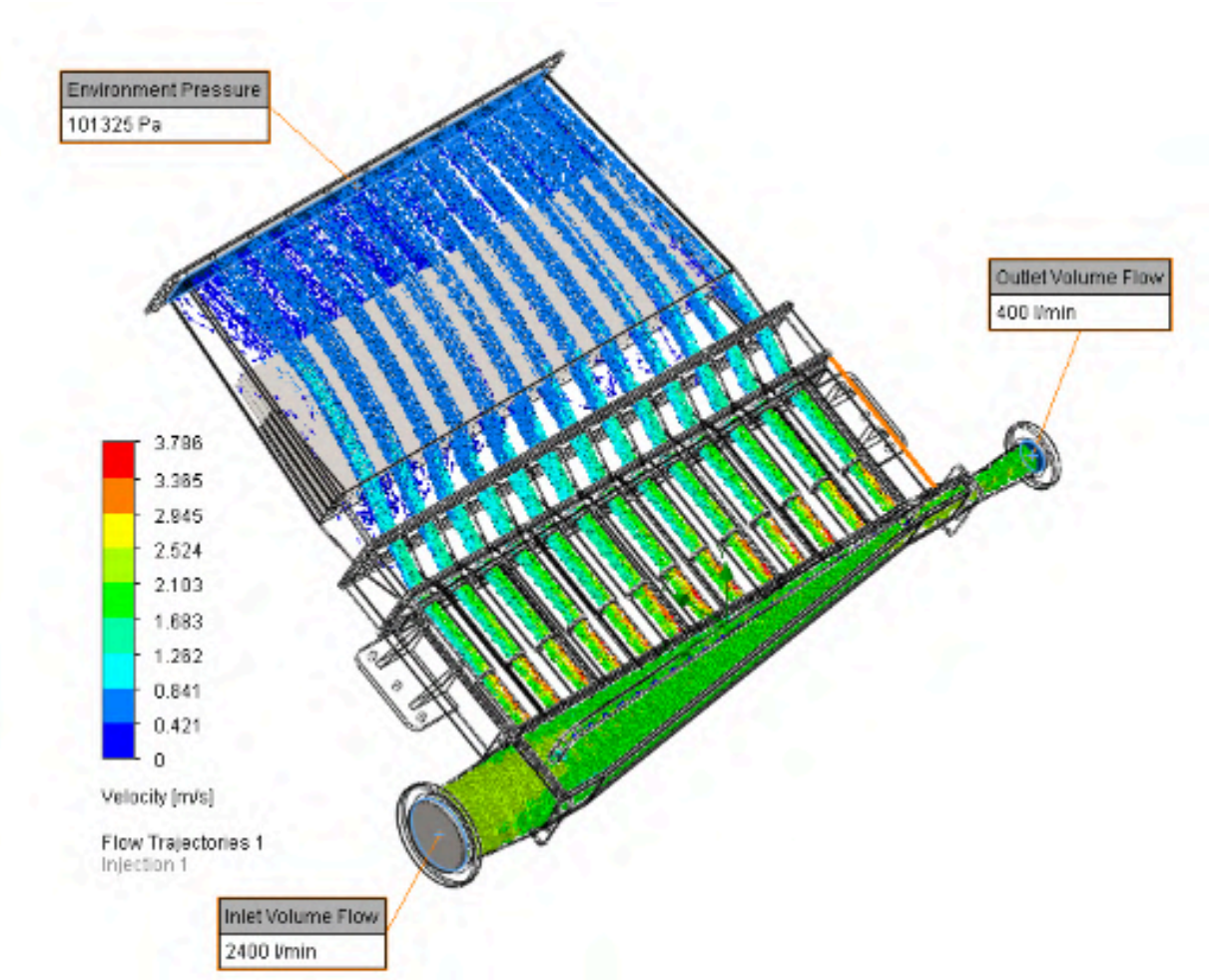


Figura 13-1: Simulación de flujo en Headbox.

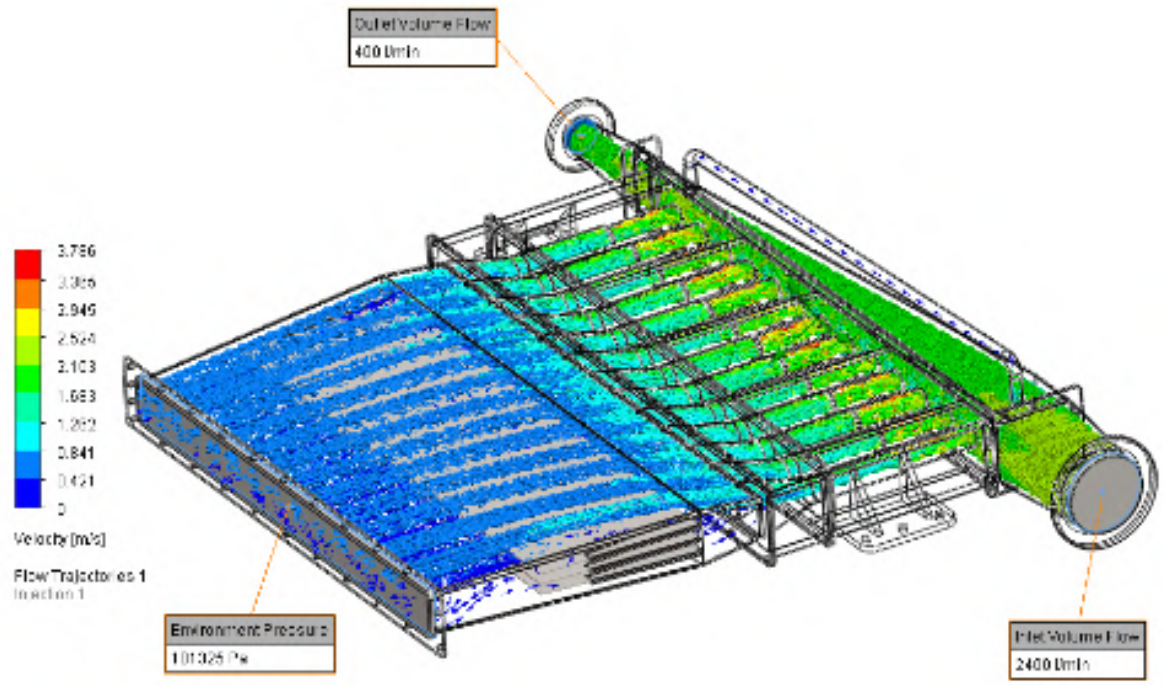


Figura 13-2: Simulación de flujo en Headbox.

8.3 Simulación CFD del tanque mezclador

8.3.1 Parámetros de diseño y configuración general del tanque de mezcla

Con el objetivo de validar los requerimientos de potencia de agitación adoptados en el dimensionamiento analítico del mezclador primario, así como de verificar cualitativamente los campos de velocidad generados en el interior del tanque y la eventual presencia de zonas muertas, se desarrolló una simulación en SolidWorks Flow Simulation. El dominio de cálculo se definió completamente lleno de agua, sin superficie libre, bajo régimen estacionario. Las dos regiones correspondientes a los impulsores fueron modeladas mediante dos regiones rotativas (*sliding mesh*), girando a la velocidad de operación calculada en el dimensionamiento analítico (N = 247.6 RPM). Se incluyeron como paredes reales el eje del mezclador, el cuerpo del tanque y los cuatro deflectores rectangulares.

Como objetivo de estudio se definió el torque resultante sobre la superficie del conjunto mezclador eje-paletas, magnitud que permite contrastar directamente el resultado numérico contra el torque obtenido mediante las ecuaciones de la guía Hayward Gordon. La simulación se ejecutó durante un tiempo total de 1 minuto, tiempo más que suficiente para

alcanzar la convergencia del torque a un valor estacionario y asegurarse que toda la masa líquida esté en movimiento.

8.3.2 Verificación del torque de agitación

El resultado principal de la simulación realizada corresponde a la evolución temporal del torque sobre la superficie del conjunto mezclador, registrado como objetivo de estudio en el periodo simulado. La curva de torque muestra un transitorio inicial breve, asociado al arranque del cálculo y al desarrollo del campo de flujo desde las condiciones iniciales, seguido de una estabilización en torno a un valor prácticamente constante de aproximadamente 400 Nm.

Este resultado se contrasta directamente contra el torque obtenido mediante el dimensionamiento analítico desarrollado en el capítulo correspondiente, calculado a partir de las ecuaciones de potencia de la guía Hayward Gordon. La diferencia entre el valor simulado (400 Nm) y el valor analítico (404.7 Nm) es del orden del 1%, lo cual constituye una validación cruzada favorable del método de dimensionamiento adoptado. La coincidencia obtenida en esta verificación numérica respalda, dentro de las limitaciones propias de un modelo estacionario, la validez del enfoque analítico empleado.

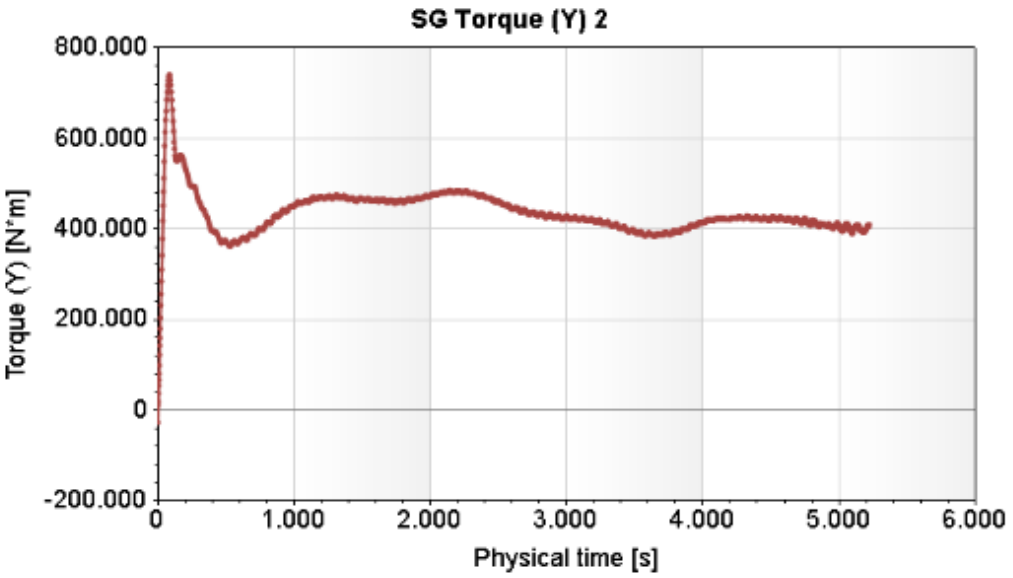


Figura 14: Gráfica de esfuerzo según simulación de mezclado, sobre las paletas.

8.3.3 Campos de velocidad y zonas de baja velocidad

Se analizaron los campos de velocidad resultantes en distintos planos del tanque, tanto en cortes horizontales a diferentes alturas como en un corte transversal vertical que atraviesa el eje del mezclador. En términos generales, los resultados muestran un campo de velocidades bien distribuido en la mayor parte del volumen, con las mayores magnitudes

concentradas en la zona de descarga de ambos impulsores y una disminución progresiva y esperable hacia las regiones más alejadas del eje y hacia las paredes del tanque.

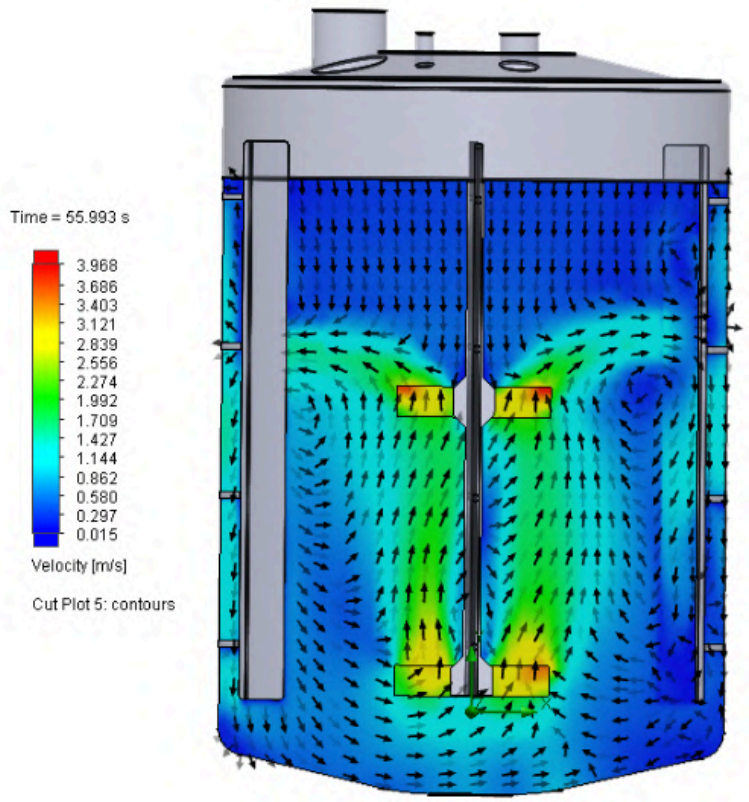


Figura 15: Simulación de flujo en Mixer.

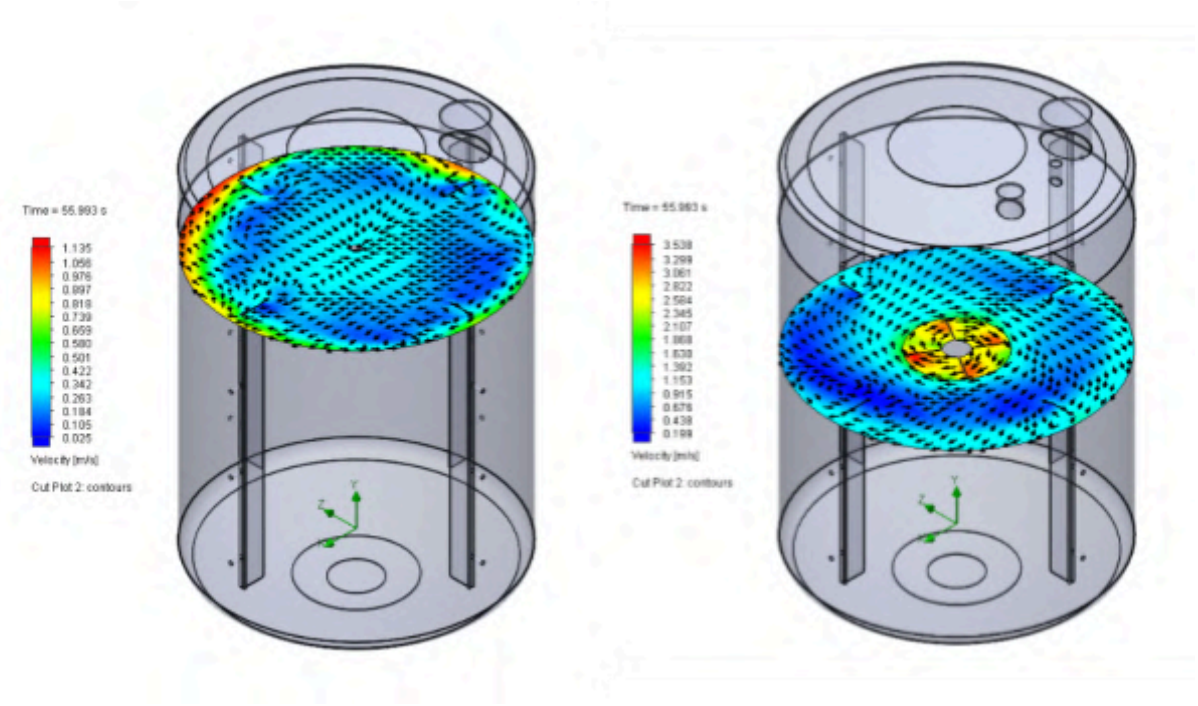


Figura 16-1: Simulación de flujo en Mixer, según altura dentro del tanque.

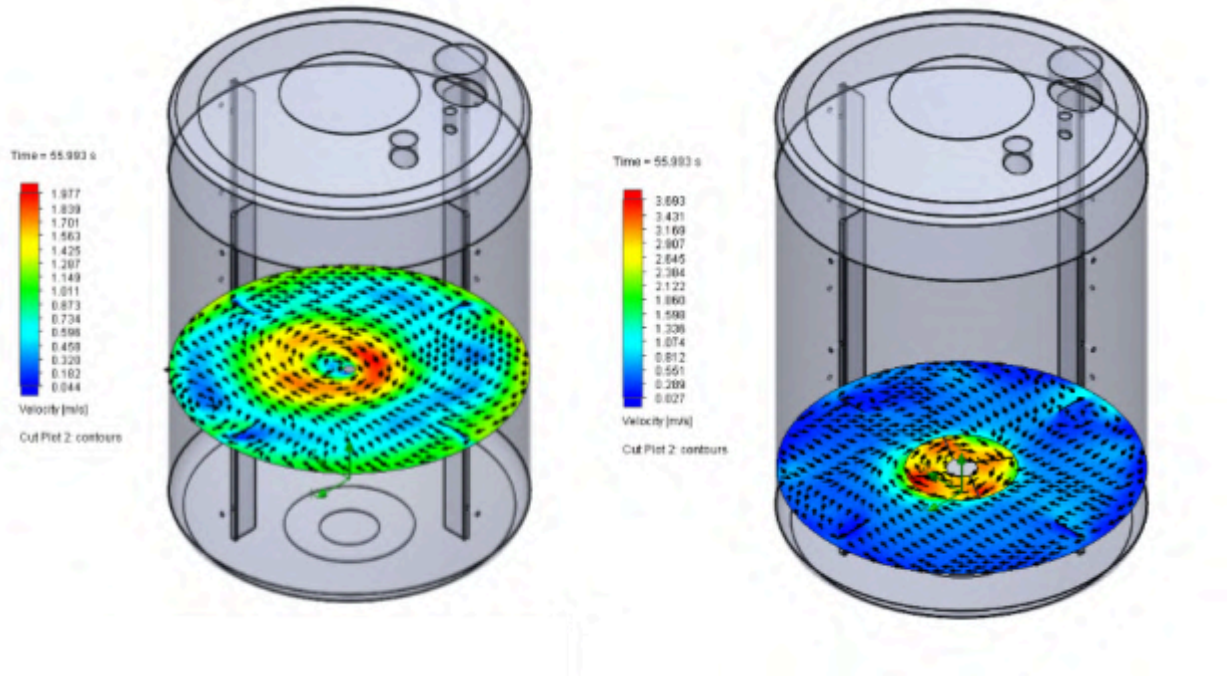


Figura 16-2: Simulación de flujo en Mixer, según altura dentro del tanque.

Con el objetivo de identificar posibles zonas muertas (regiones donde la fibra podría acumularse por insuficiente agitación), se generó una isosuperficie correspondiente a los puntos del dominio con velocidad menor a 0.1 m/s. Los resultados muestran que estas regiones de baja velocidad se restringen a delgadas capas adyacentes a las paredes del tanque, sin formar acumulaciones significativas en el fondo ni en el volumen central. Este comportamiento es físicamente esperable y no debe interpretarse como una deficiencia del diseño. En cualquier simulación con paredes reales rige la condición de no deslizamiento, según la cual la velocidad del fluido en contacto directo con una superficie sólida es nula, desarrollándose una capa límite en la que la velocidad crece progresivamente hasta alcanzar la del flujo principal.

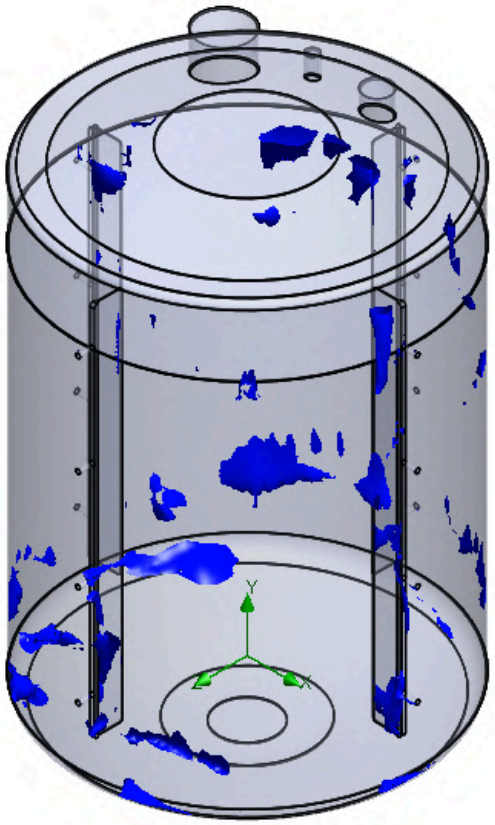


Figura 17: Volúmenes de vacío dentro del tanque de mezclado.

Lo relevante a efectos del diseño es que dichas zonas se mantengan acotadas en espesor y no se extiendan hacia el interior del volumen ni se concentren en zonas críticas como el fondo del tanque, condición que se verifica en los resultados obtenidos. Se concluye entonces que la totalidad del volumen del tanque se encuentra efectivamente en movimiento, sin zonas muertas relevantes para la aplicación.

8.3.4 Trayectorias de fluido e intensidad de turbulencia

Se generaron trayectorias de flujo a lo largo del dominio con el objetivo de evaluar cualitativamente el recorrido del fluido dentro del tanque y descartar la formación de caminos preferenciales o zonas de recirculación local que pudieran favorecer la acumulación de fibra . Las trayectorias obtenidas muestran un patrón de circulación consistente con lo esperado. El fluido es impulsado hacia arriba por cada impulsor, se redirige hacia las paredes y baffles, y retorna hacia el eje completando el recorrido de recirculación. No se observa evidencia de acumulación o estancamiento de partículas a lo largo de las trayectorias visualizadas, lo cual es consistente con la ausencia de zonas muertas relevantes discutida en la sección anterior.

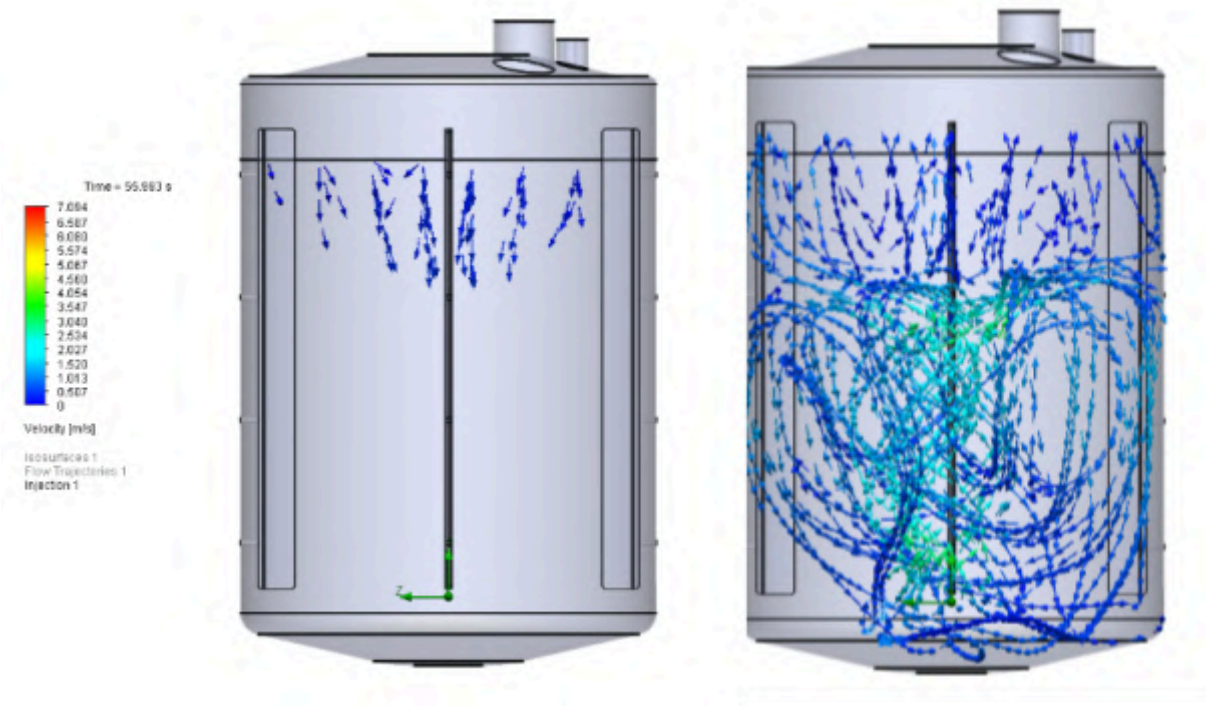


Figura 18-1: Simulación de trayectoria de partículas dentro del tanque.

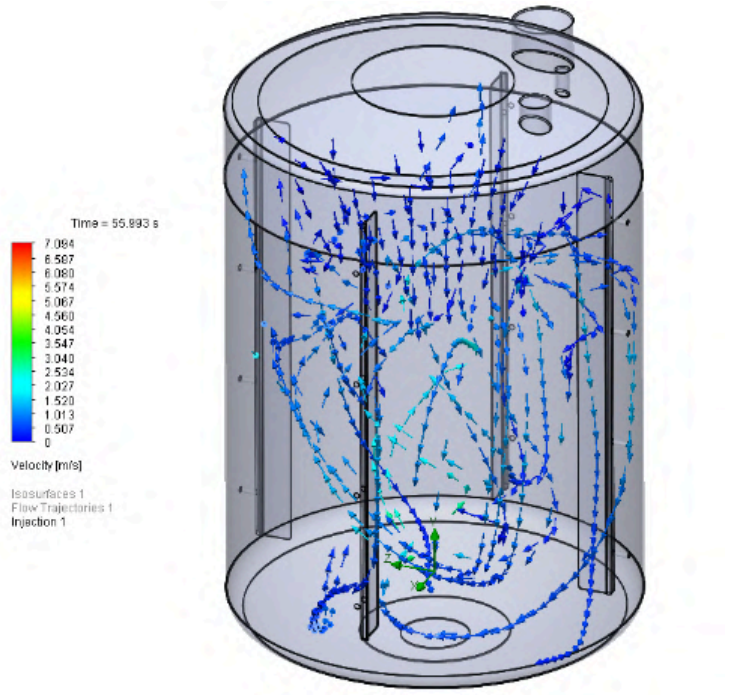


Figura 18-2: Simulación de trayectoria de partículas dentro del tanque.

Complementariamente, se analizó la distribución de la intensidad de turbulencia dentro del tanque. Este mismo cuantifica el grado de caoticidad del flujo en relación a su propia velocidad media en cada punto, y resulta un indicador directamente relevante para la aplicación, dado que el mecanismo físico responsable de la separación de los haces de fibra depende de la generación de fluctuaciones turbulentas de corte, y no únicamente del caudal de bombeo global.

Se generó una isosuperficie correspondiente a los puntos con intensidad de turbulencia menor al 5%. Los resultados muestran que, para este umbral, la región de baja turbulencia relativa se restringe casi exclusivamente a la zona ubicada por encima de los impulsores, coincidente con el núcleo del remolino central que se forma en el eje del tanque. Para el resto del volumen del tanque, la intensidad de turbulencia se mantiene por encima del umbral analizado, lo cual es consistente con el objetivo de generar un campo de corte turbulento extendido, necesario para la dispersión de la fibra.

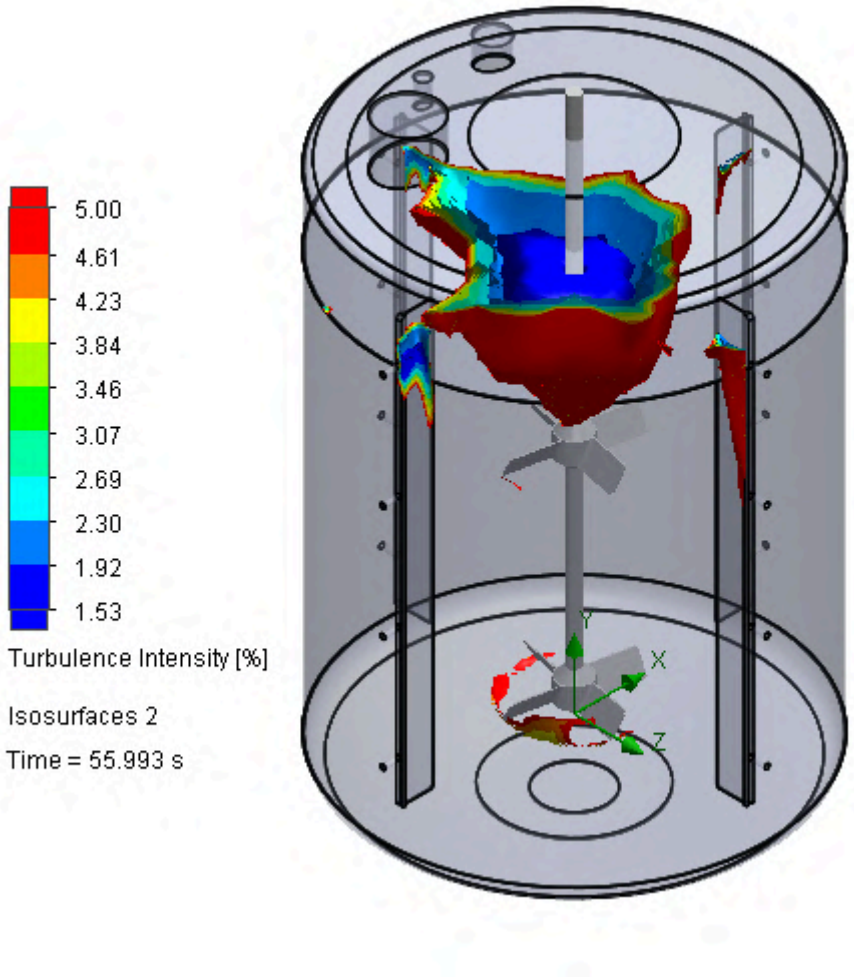


Figura 19: Simulación de zonas de menor turbulencia al momento del mezclado.

8.4 Síntesis del capítulo

Las simulaciones presentadas en este capítulo cumplieron con el doble propósito de, por un lado, ajustar parámetros de diseño que no podían determinarse únicamente por vía analítica y, por otro, contrastar mediante un método numérico independiente las decisiones de diseño adoptadas en los capítulos correspondientes al dimensionamiento del headbox y del tanque de mezcla.

En el caso del headbox, el estudio paramétrico permitió identificar R = 20% como la configuración de recirculación que minimiza la dispersión de caudal entre los 13 tubos del banco distribuidor, resultado que no era anticipable únicamente a partir de las reglas de diseño analíticas empleadas en el dimensionamiento del manifold, y que requirió por lo tanto de la exploración sistemática mediante CFD. La verificación posterior de trayectorias de flujo, tras la incorporación de las placas separadoras en la rampa de salida, mostró un flujo

distribuido de manera pareja a lo ancho de la máquina, sin vórtices ni zonas muertas apreciables.

En el caso del tanque de mezcla, la simulación cumplió un rol fundamentalmente de validación cruzada para el torque necesario de agitación. El análisis de campos de velocidad, zonas de baja velocidad e intensidad de turbulencia complementó esta validación, mostrando un volumen efectivamente en movimiento y un nivel de turbulencia compatible con el mecanismo de separación de haces de fibra.

Conclusión

El desarrollo del presente proyecto final de ingeniería mecánica ha permitido consolidar una propuesta técnica, conceptual y de prediseño rigurosa para la manufactura de mantas no tejidas (*non-woven mats*) a partir de fibras de carbono recicladas (rCF) mediante la adaptación del proceso *wet-laid*. La relevancia de esta investigación radica en dar respuesta a la creciente demanda de valorización de residuos compuestos, transformando un material históricamente complejo de procesar en una preforma estructuralmente homogénea, isotrópica y reproducible.

Desde la perspectiva fluidodinámica e hidromecánica, el diseño abordó con éxito los dos desafíos fundamentales del proceso: la dispersión coloidal y la uniformidad de deposición. La incorporación de carboximetilcelulosa (CMC) como aditivo polifuncional demostró analíticamente su capacidad para estabilizar la suspensión en frío, reduciendo la velocidad terminal de sedimentación a órdenes despreciables mediante el incremento de la viscosidad cinemática, y actuar como agente ligante térmico durante la evaporación posterior. Asimismo, la modelación paramétrica y la validación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) del *headbox* cónico de sección decreciente y 13 tubos de descarga confirmaron que una tasa de recirculación del 20% minimiza el coeficiente de variación transversal a un valor de apenas 0,88%. Este comportamiento, complementado por la implementación de una rampa inclinada a 30° con placas deflectoras internas (*slicers*), garantizó la eliminación de zonas de estancamiento y la ruptura de la memoria direccional del flujo, permitiendo prescindir de mecanismos oscilatorios transversales sin comprometer la orientación azarosa e isotrópica de los filamentos.

En lo referente a la deshidratación y sustentabilidad operativa, la configuración de un sistema de vacío multietapa escalonado (-13,5 kPa en rampa y -27 a -41 kPa en tramo horizontal) demostró ser suficiente para alcanzar una consistencia sólida del 20% previa al secado térmico. Esta estrategia evita el prensado mecánico por rodillos rígidos, preservando la integridad de los filamentos frágiles de carbono frente a solicitaciones de cizalla destructiva. Finalmente, la integración de un circuito cerrado de separación aire-agua y filtrado en serie viabiliza la recirculación de más del 90% del agua de proceso, asegurando la sostenibilidad ambiental y la rentabilidad económica de la planta en concordancia con los principios de economía circular aplicados a la industria de los materiales compuestos.

Recomendaciones

Con el objetivo de extender los alcances del presente trabajo y proyectar su evolución hacia etapas de ingeniería de detalle, prototipado físico y escalado comercial, se formulan las siguientes líneas de desarrollo futuro:

1. **Modelación Multifásica y Reología Compleja:**
   Extender las simulaciones numéricas CFD hacia modelos de flujo multifásico acoplado (Euleriano-Lagrangiano / *Discrete Phase Model* - DPM) que incorporen explícitamente los filamentos individuales de rCF y su rigidez a la flexión. Asimismo, se recomienda caracterizar experimentalmente la reología no newtoniana (comportamiento pseudoplástico y tixotrópico) de la solución agua-CMC bajo diferentes tasas de corte y temperaturas.
2. **Cálculo Estructural y Dinámico por Elementos Finitos (FEA):**
   Llevar a cabo la verificación estructural de la bancada y la plataforma elevada mediante análisis de elementos finitos, evaluando deformaciones bajo cargas estáticas máximas (tanques llenos de pulpa) y solicitaciones dinámicas inducidas por el desbalanceo residual de los grupos motorreductores y las bombas de cavidad progresiva.
3. **Ingeniería Térmica de la Etapa de Consolidación:**
   Desarrollar la memoria de cálculo termodinámico para la batería de rodillos calefaccionados por vapor saturado o aceite térmico. Se debe modelar la cinética de evaporación y transferencia de calor por contacto para predecir con exactitud la curva de temperatura requerida que garantice una humedad residual 0,3% y la polimerización/fijación óptima de la película de CMC sin riesgo de degradación térmica.
4. **Automatización, Control en Lazo Cerrado e Industria 4.0:**
   Diseñar la arquitectura de control automático (PLC/SCADA) e instrumentación de campo, integrando un escáner de medición en línea (óptico/radiométrico) a la salida del secador. Este sistema permitirá monitorear en tiempo real el gramaje (g/m^2), espesor y humedad, modulando automáticamente la velocidad de la bomba de stock espeso (P2), la velocidad de la cinta transportadora y la potencia del sistema de vacío para corregir desviaciones del proceso.
5. **Validación Experimental de Compuestos y Ensayos de Impregnación:**
   Producir lotes experimentales de velo a escala de laboratorio bajo los parámetros hidrodinámicos obtenidos y someterlos a moldeo por transferencia de resina (RTM/HP-RTM) o infusión con matrices termoestables y termoplásticas. Esto permitirá correlacionar la permeabilidad en el plano (K_1, K_2) y la drapeabilidad con las propiedades mecánicas finales a tracción, flexión e impacto del material compuesto consolidado.

Bibliografía

1. Yoon, M., Lee, J., & Kang, C. (2024). Manufacturing of automotive mat using recycled carbon fiber: Obtaining strong physical properties through isotropic fiber orientation and improved adhesion of epoxy resin. Composites and Advanced Materials, 33, 1–11. https://doi.org/10.1177/26349833241275133

2. Cheng, H., Zhou, J., Guo, L., Wang, H., & Qian, Z. (2023). Dispersibility optimization of short carbon fiber suspension for the preparation of carbon fiber aligned mat reinforced composites. Journal of Cleaner Production, 389, 136075. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136075

3. Ghossein, H. K., Hassen, A. A., Paquit, V., Love, L. J., & Vaidya, U. K. (2018). Innovative method for enhancing carbon fibers dispersion in wet-laid nonwovens. Materials Today Communications, 17, 100–108. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.08.001

4. Ramasubramanian, M. K., Shiffler, D. A., & Jayachandran, A. (2008). A computational fluid dynamics modeling and experimental study of the mixing process for the dispersion of the synthetic fibers in wet-lay forming. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 3(1), 11–19. (Reprinted in TAPPI Journal, 9(3), 6–13, 2010).

5. Shamsudin, Z., Yatim, N. M., Mustafa, Z., Sharif, E. A., & Mulyadi, M. (2020). Mechanical properties of wet-laid nonwoven mat reclaimed carbon fibre in polymer composite. Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT), 14(Special Issue AdManTi 2019), 151–160.

6. Wölling, J., Schmieg, M., Manis, F., & Drechsler, K. (2017). Nonwovens from Recycled Carbon Fibres—Comparison of Processing Technologies. Procedia CIRP, 66, 271–276. https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.06.271

7. Yan, X., Wang, X., Yang, J., & Zhao, G. (2021). Optimization of process parameters of recycled carbon fiber-reinforced thermoplastic prepared by the wet-laid hybrid nonwoven process. Textile Research Journal, 91(13–14), 1565–1577. https://doi.org/10.1177/0040517520980112

8. 1Safavi, A., Fathi, S., Babaei, MR., Mansoori, Z., & Latifi, M. (2009). Experimental and numerical analysis of fiber characteristics effects on fiber dispersion for wet-laid nonwoven. Fibers and Polymers, 10(2), 233–240. https://doi.org/10.1007/s12221-009-0233-y

9. Tafreshi, H. V., & Pourdeyhimi, B. (2003). Role of Baffles on Flow Fields Inside Wet-Lay Mixing Tanks and Their Potential Influence on Fiber Dispersion. Textile Research Journal, 73(7), 575–582. https://doi.org/10.1177/004051750307300705

10. Wet End Operations - Handbook for Pulp & Paper Technologists

11. Mastering Mixing Fundamentals - Hayward Gordon.pdf

12. TIP 0502-01 Paper machine vacuum selection factors.pdf

13. Dynamix Inc. *4 impellers: Types and their applications*. https://dynamixinc.com/4-impellers-types-and-their-applications/
14. Dynamix Inc. *Optimal tank design* https://dynamixinc.com/optimal-tank-design/
15. Dynamix Inc. *Baffled by baffles*. https://dynamixinc.com/baffled-by-baffles/
16. *New developments in headbox technology*. New Developments in Headbox Technology.pdf
17. IPPTA-74-93-98-Medium-Speed-Headbox.pdf
18. Mixing Tank with SOLIDWORKS Flow Simulation
19. SOLIDWORKS Flow Simulation Webinar - Rotating Regions
20. Paper Classroom. https://www.youtube.com/@PaperClassroom
21. HydroFormer | Voith
22. Catalogo de bombas SEEPEX

Anexo A: Fichas técnicas

En este anexo se presentan las fichas técnicas correspondientes a los principales componentes seleccionados para el desarrollo del proyecto

- Selección de Bombas
    1. Dimensiones_Bombas_2-SEEPEX-N-Dimensions.pdf
    2. Dimensiones_Bombas-SEEPEX-N-Dimensions.pdf
- Mesa de Formacion
    1. UCT 210 - Unidades de rodamientos de bolas _ SKF.pdf
    2. UCF 210 - Unidades de rodamientos de bolas _ SKF.pdf
    3. Nonwoven Mesh Belts.pdf
- Reductor y Mixer
    1. 6215 - Rodamientos rígidos de bolas _ SKF.pdf
    2. 6306 - Rodamientos rígidos de bolas _ SKF.pdf
    3. 6309 - Rodamientos rígidos de bolas _ SKF.pdf
    4. 7215 BEP - Rodamientos de bolas de contacto angular _ SKF.pdf
    5. 7304 BE-2RZP - Rodamientos de bolas de contacto angular _ SKF.pdf
    6. 7306 BE-2RZP - Rodamientos de bolas de contacto angular _ SKF.pdf
    7. 7309 BE-2RZP - Rodamientos de bolas de contacto angular _ SKF.pdf
    8. 51305 - Rodamientos axiales de bolas _ SKF.pdf
    9. 61805 - Rodamientos rígidos de bolas _ SKF.pdf
    10. Locknuts_DIN981.pdf

Anexo B: Memória de cálculo y diseño

En este anexo se proporciona acceso a la documentación complementaria correspondiente al desarrollo del proyecto. Se incluyen el enlace a la memoria de cálculo, y a la carpeta de diseño, que contiene los archivos y modelos desarrollados en SolidWorks.

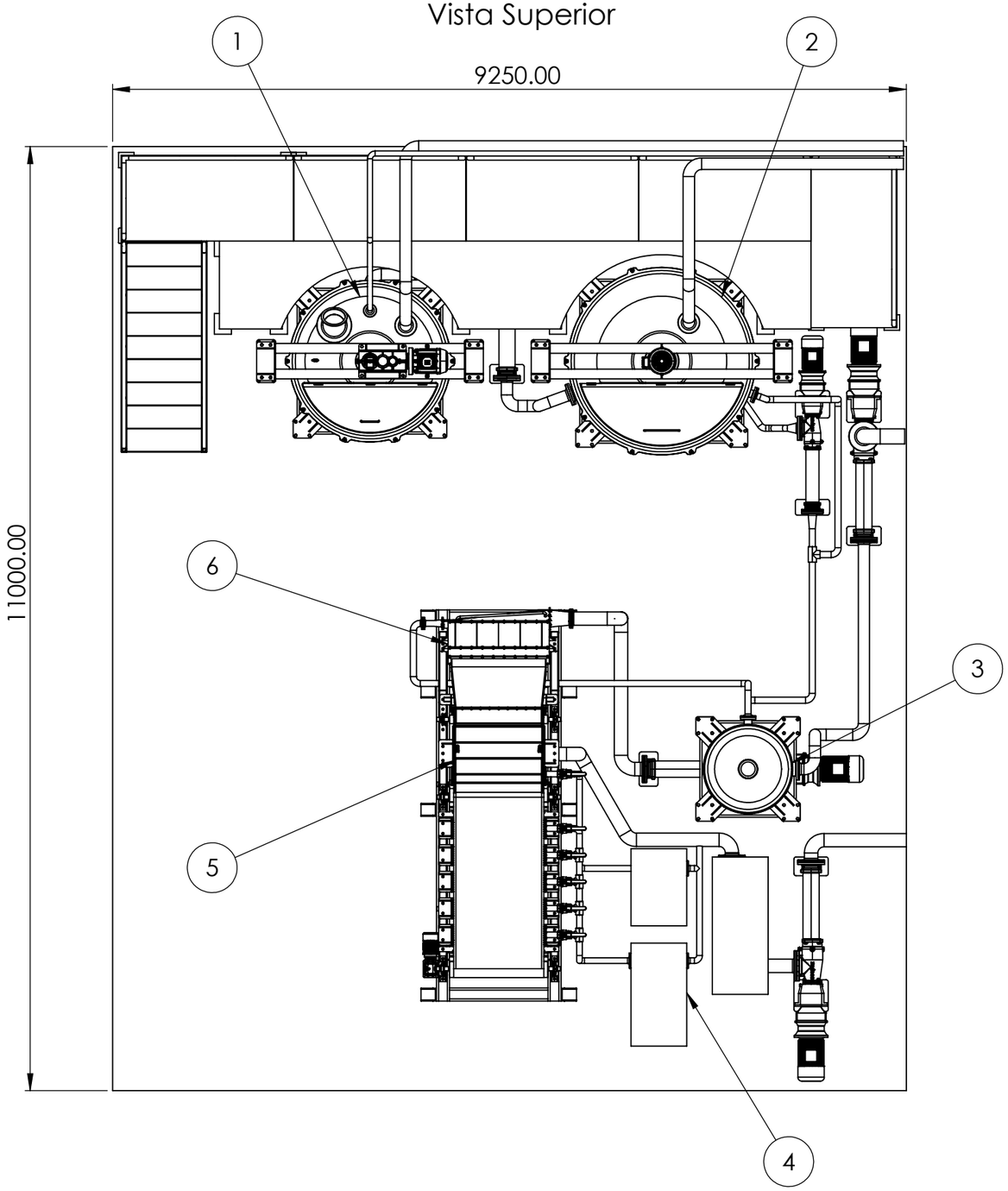
- **Planillas de cálculo** **Hoja De Calculo Proyecto Final**
- **Carpeta de disenio** **Diseño**

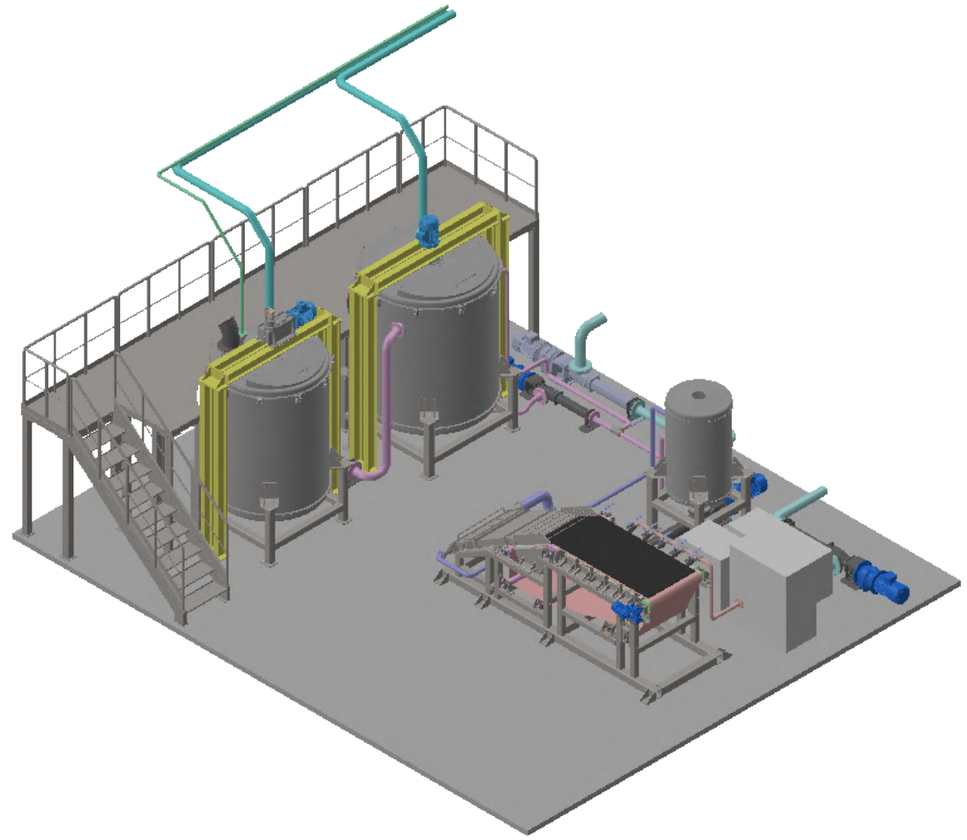
Anexo C: Planimetría

Para la presentación de la planimetría correspondiente al proyecto, se incluye a continuación una tabla con el detalle de los planos elaborados, indicando el conjunto o componente al que hace referencia y la nomenclatura asignada a cada plano.

Titulo	Nomenclatura
Ensamble completo Planta Nonwoven Wetlaid Mat	**Plano 00.00**
Subconjunto Tanque de Mezcla	**Plano 01.00**
Soporte Tanque de Mezcla	**Plano 01.01**
Portico Soporte Conjunto Motoreductor	**Plano 01.02**
Ensamblaje Tanque de Mezcla	**Plano 01.03**
Subconjunto Tanque de Reserva	**Plano 02.00**
Subconjunto Tanque de Dilución	**Plano 03.00**
Subconjunto de Distribución (headbox)	**Plano 04.00**
Distribuidor de Flujo	**Plano 04.01**
Rampa Unificadora de Flujo	**Plano 04.02**
Slice Final	**Plano 04.03**
Subconjunto Cinta Formadora	**Plano 05.00**
Soporte Cinta Formadora	**Plano 05.01**
Soldadura Soporte Cinta Formadora	**Plano 05.02**
Conjunto Caja de Alta Succión	**Plano 05.03**
Conjunto Caja de Baja Succión	**Plano 05.04**
Conjunto Reductor y Paletas	**Plano 06.00**

Vista Superior





Vista Isometrica
Escala 1:90

POS.	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANT
6	Subconjunto de Distribucion	-	04	1
5	Subconjunto de Cinta Formadora	-	05	1
4	Subconjunto de Sistema de Vacio	-	-	1
3	Subconjunto de Tanque de Dilucion	-	03	1
2	Subconjunto de Tanque de Reserva	-	02	1
1	Subconjunto de tanque de Mezcla	-	01	1

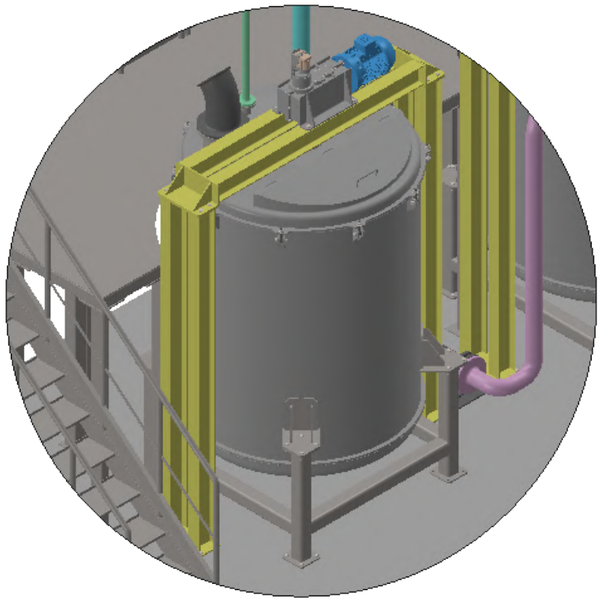
PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

TITULO
ENSAMBLE COMPLETO
PLANTA NON WOVEN WET LAID MAT

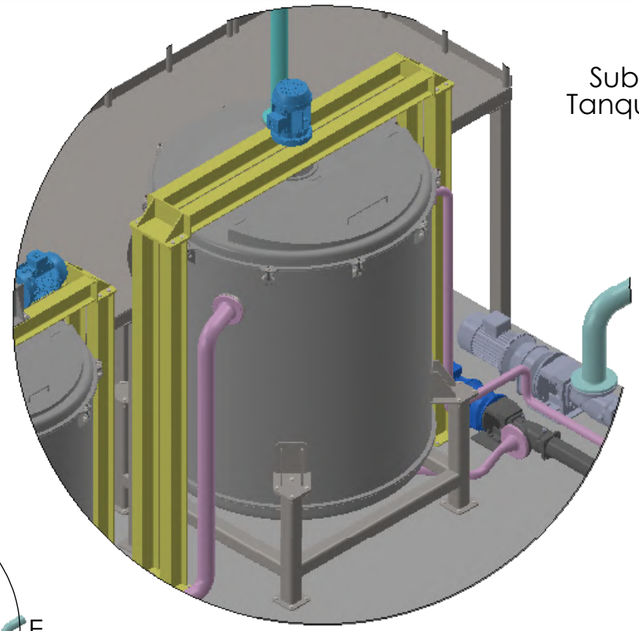
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
	20/08/2026		
APROBO			

ESCALA GENERAL
1:60

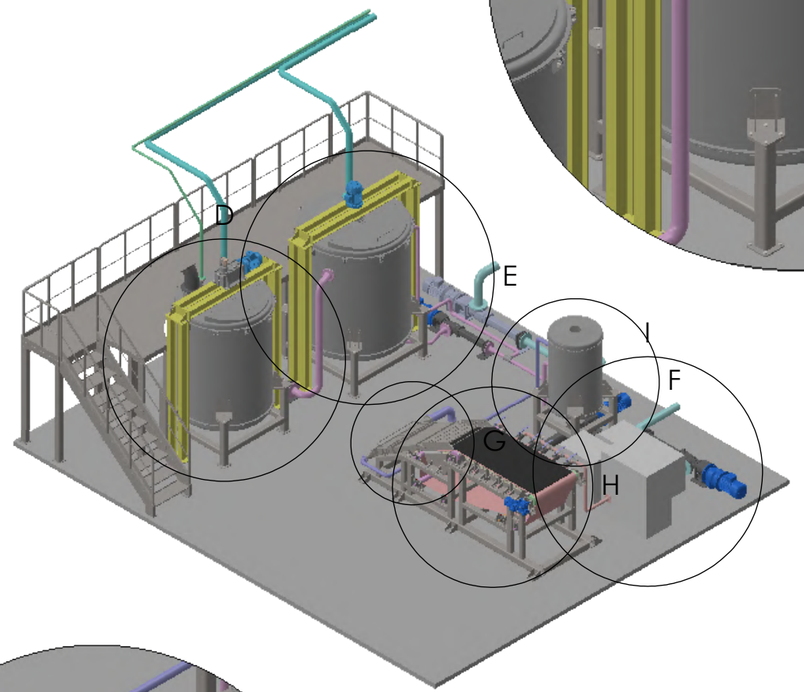
PLANO 00
HOJA 01

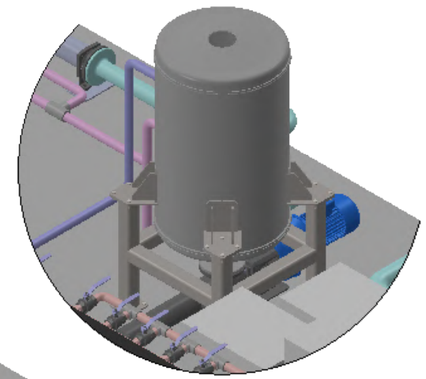


Subconjunto de Tanque de Mezcla

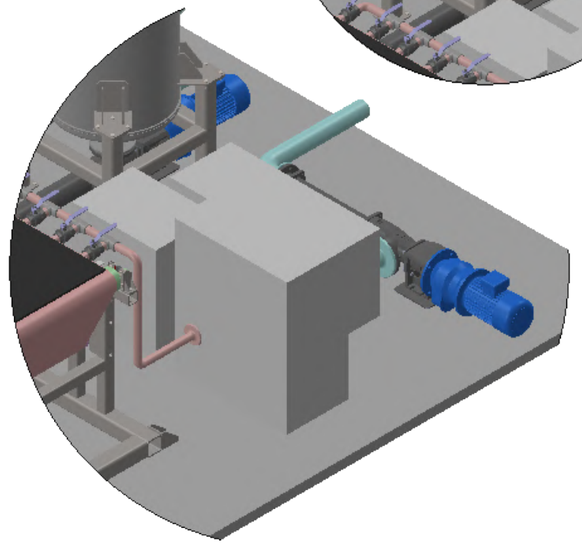


Subconjunto de
Tanque de Reserva

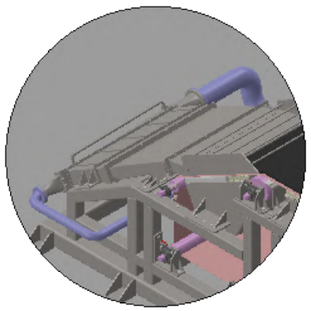




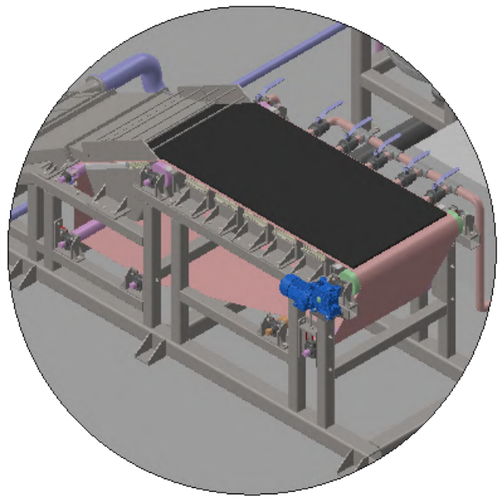
Subconjunto de
Tanque de Dilucion



Subconjunto de Sistema de Vacio

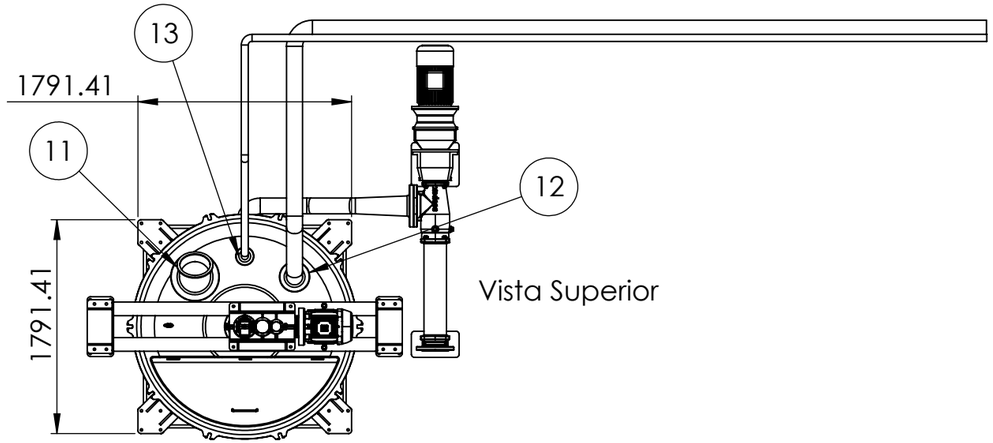


Subconjunto de Distribucion

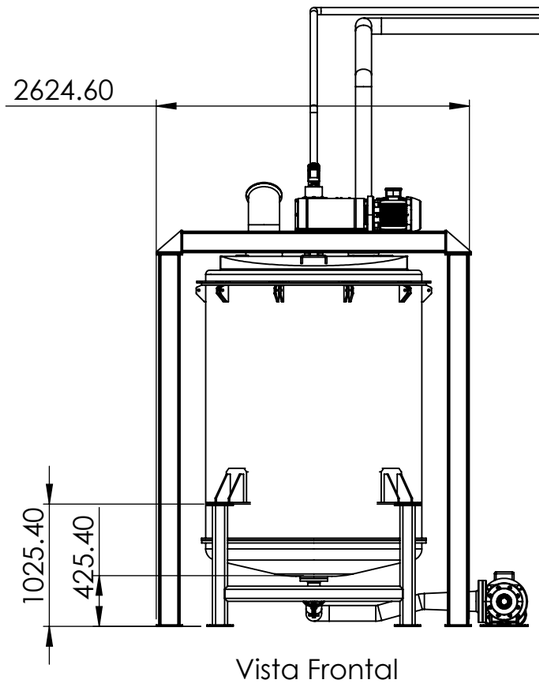


Subconjunto de Cinta Formadora

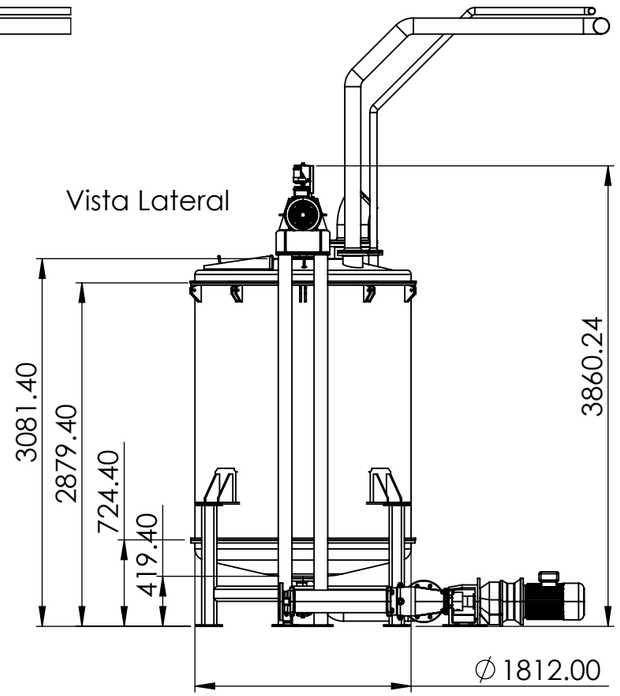
PROYECTO FINAL ESCUELA INGENIERIA MECANICA ROSARIO				TITULO		
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:	ESCALA GENERAL		PLANO 00
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO	1:45		HOJA 02
APROBO						



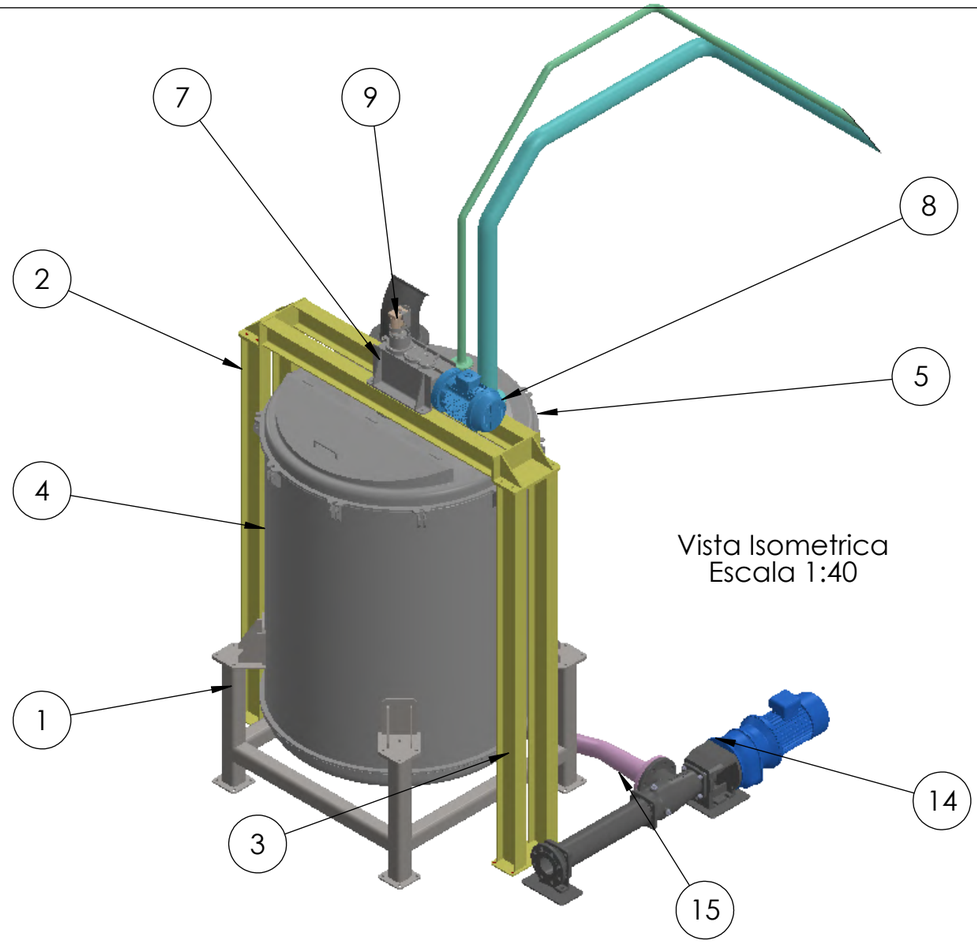
Vista Superior



Vista Frontal



Vista Lateral



Vista Isometrica
Escala 1:40

15	Tuberia de Succion P1	-	-	1
14	Bomba P1	Seepex BN 100-6L	-	1
13	Tuberia Ingreso de CMC	-	-	1
12	Tuberia Ingreso de Agua	-	-	1
11	Tuberia Ingreso de Fibra	-	-	1
10	Valvula Inferior Electrica	-	-	1
9	Actuador Lineal Electrico	-	-	1
8	Motor Electrico 20HP	-	-	1

POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
7	Conjunto Reductor y Paletas	Rel 5.35:1	Ver 06	1
6	Deflectores Internos	-	Ver 01.03	4
5	Tanque de Mezcla - Tapa Superior	-		1
4	Tanque de Mezcla - Cuerpo Central	-		1
3	Tanque de Mezcla - Tapa Inferior	-		1
2	Portico Soporte Conjunto Motoreductor	-	Ver 01.02	1
1	Soporte Tanque de Mezcla	-	Ver 01.01	1

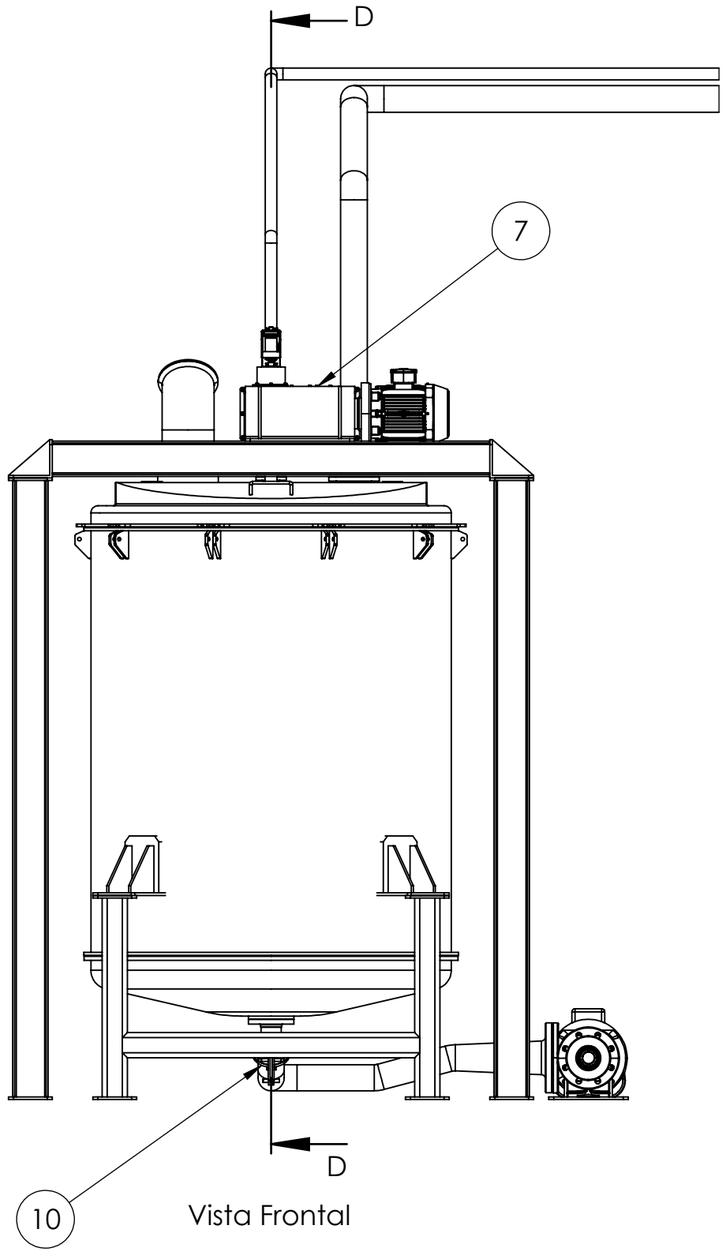
PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

TITULO
SUBCONJUNTO
TANQUE DE MEZCLA

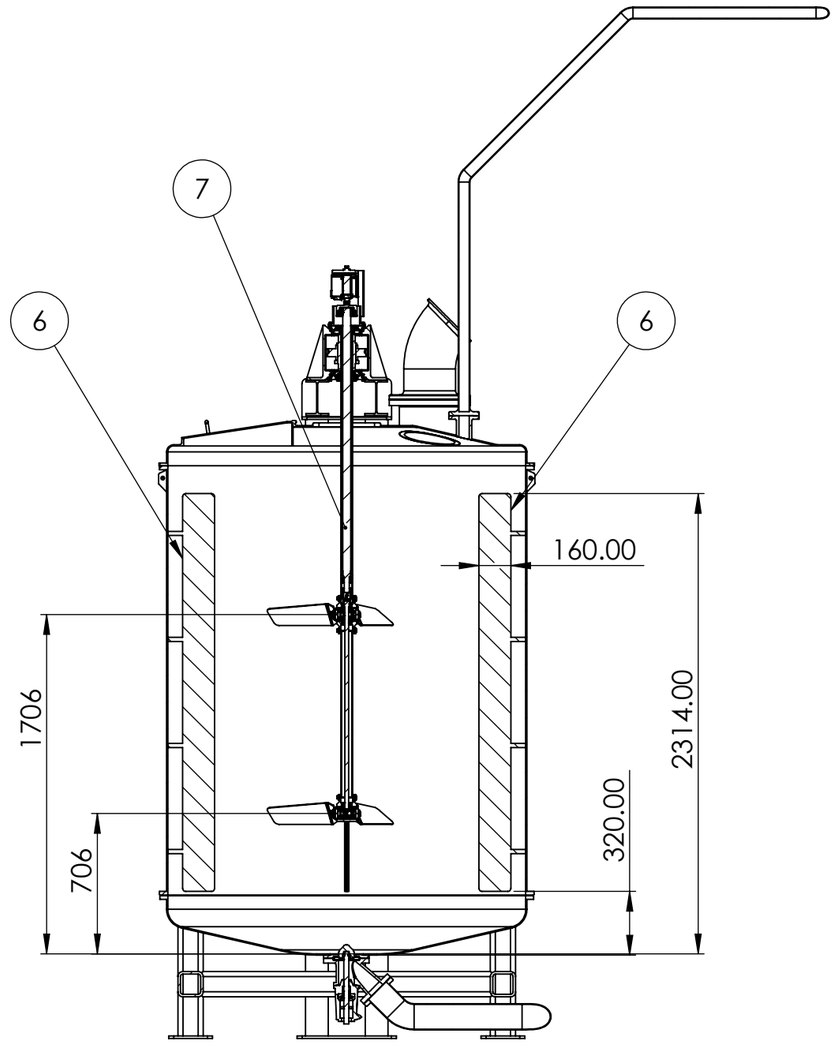
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL
1:50

PLANO 01
HOJA 01



Vista Frontal



SECTION D-D
SCALE 1 : 30

POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
10	Valvula Inferior Electrica	-	-	1
7	Conjunto Reductor y Paletas	Rel 5.35:1	-	1
6	Deflectores Internos	-	-	4

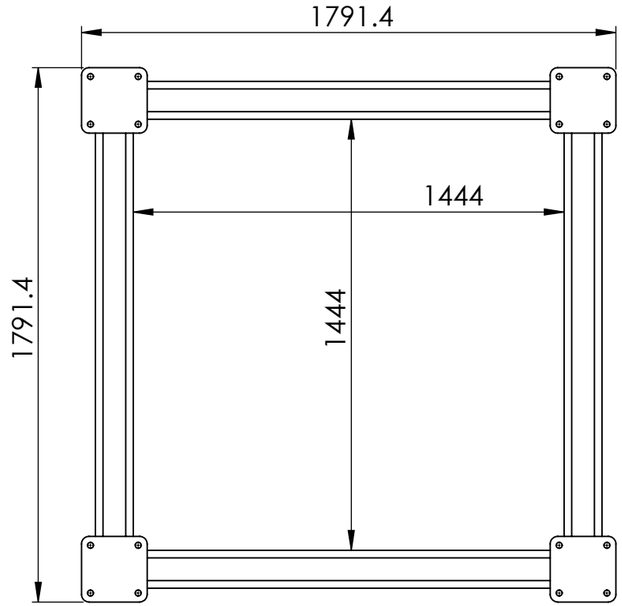
PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

TITULO
SUBCONJUNTO
TANQUE DE MEZCLA

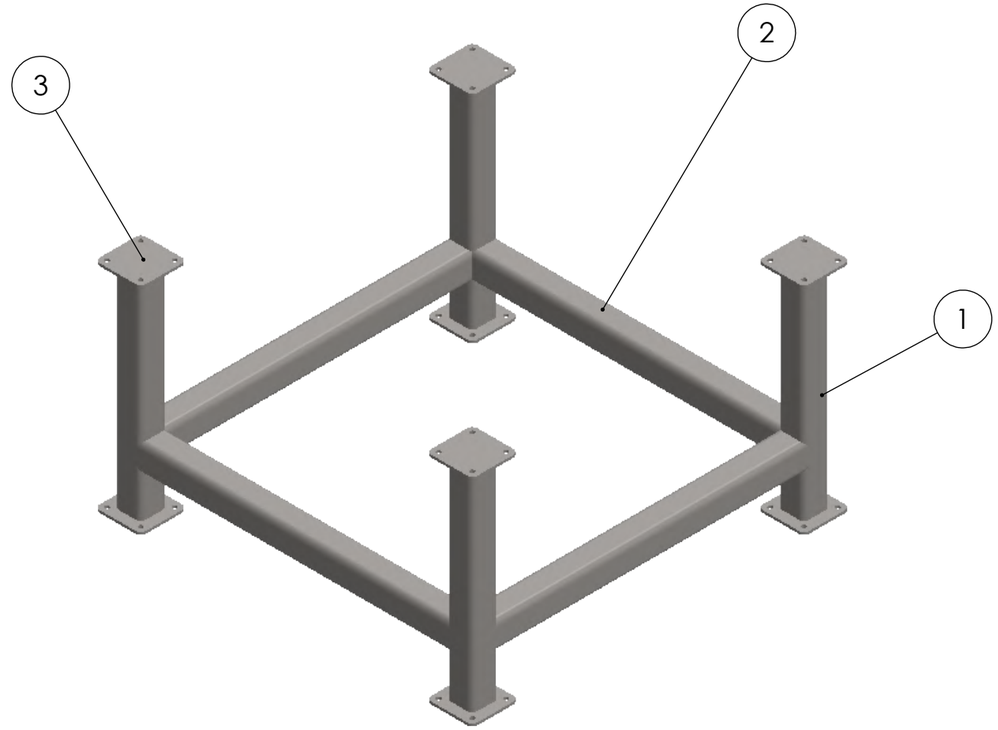
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL
1:30

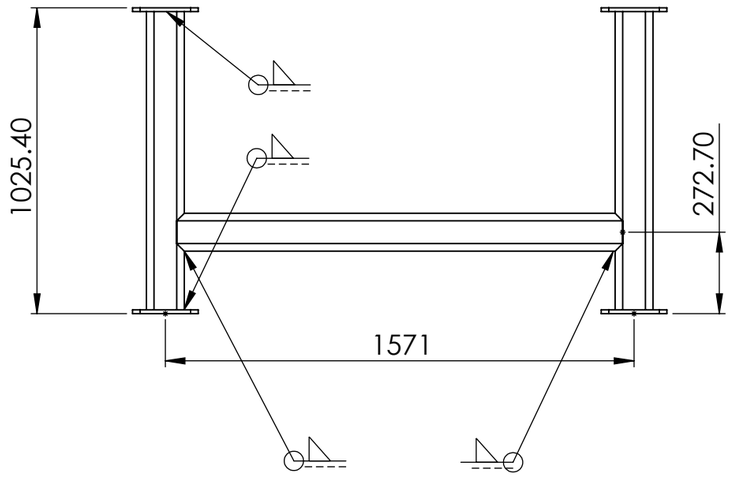
PLANO 01
HOJA 02



VISTA SUPERIOR



VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:20



VISTA FRONTAL

POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
3	Planchuela 220x220x12.7mm	-	-	8
2	Perfil Horizontal Cuadrado 5x5x05in L1444mm	STD	-	4
1	Perfil Vertical Cuadrado 5x5x05in L1000mm	STD	-	4

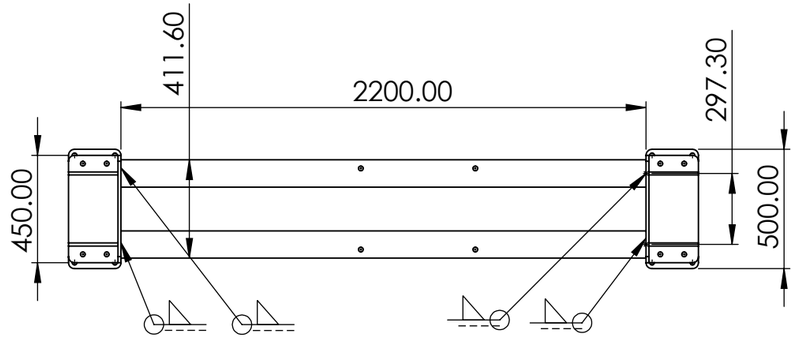
PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

TITULO
SOPORTE TANQUE DE MEZCLA

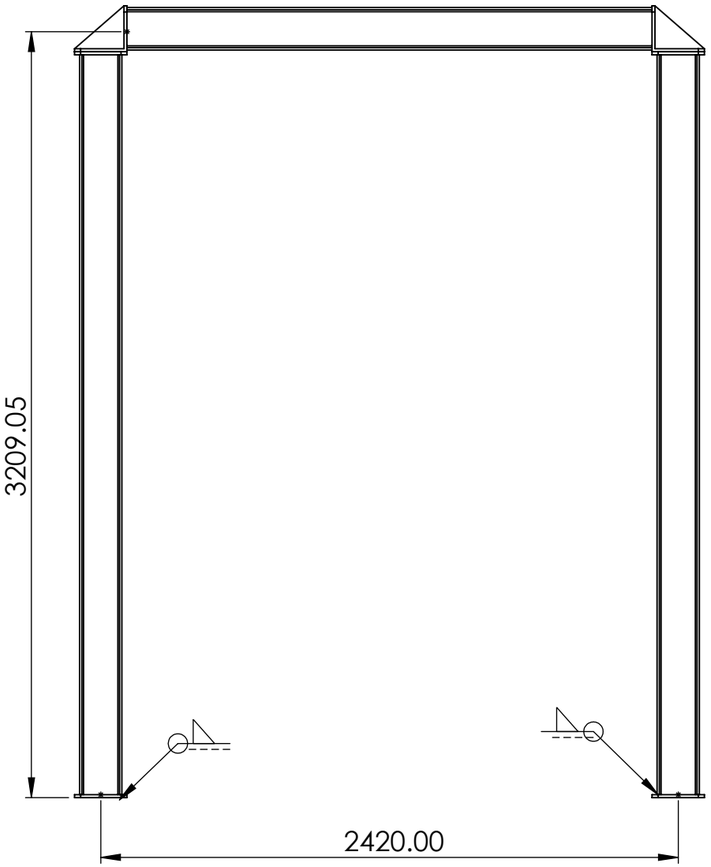
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL
1:20

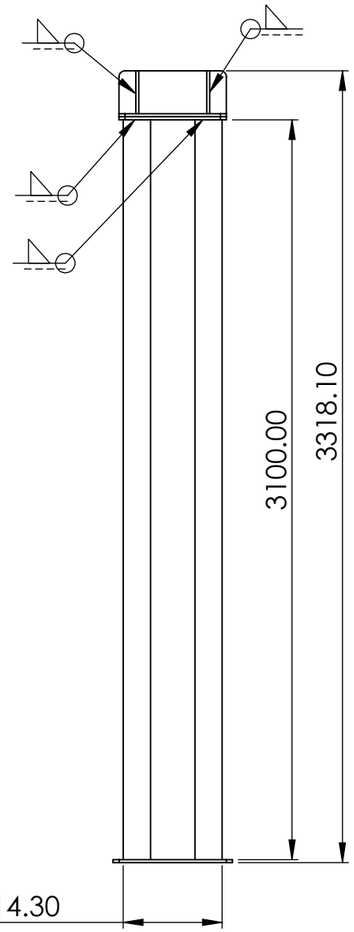
PLANO 01.01
HOJA 01



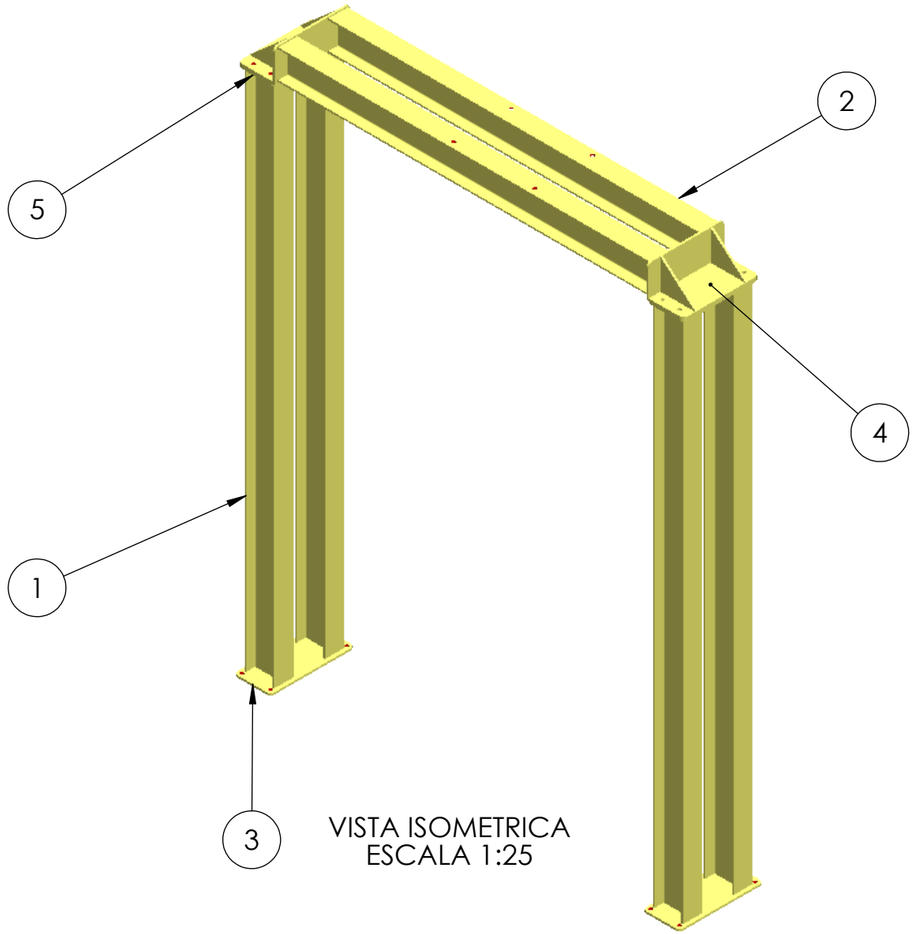
VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



VISTA ISOMETRICA
ESCALA 1:25

POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
5	Planchuela Superior 220x450x12.7mm	-	-	2
4	Soporte Perfil Horizontal	-	-	2
3	Planchuela base 220x500x12.7mm	-	-	8
2	Perfil Horizontal ANSI I 7x5.8 L2200mm	STD	-	2
1	Perfil Vertical ANSI I 7x5.8in L3100mm	STD	-	4

PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

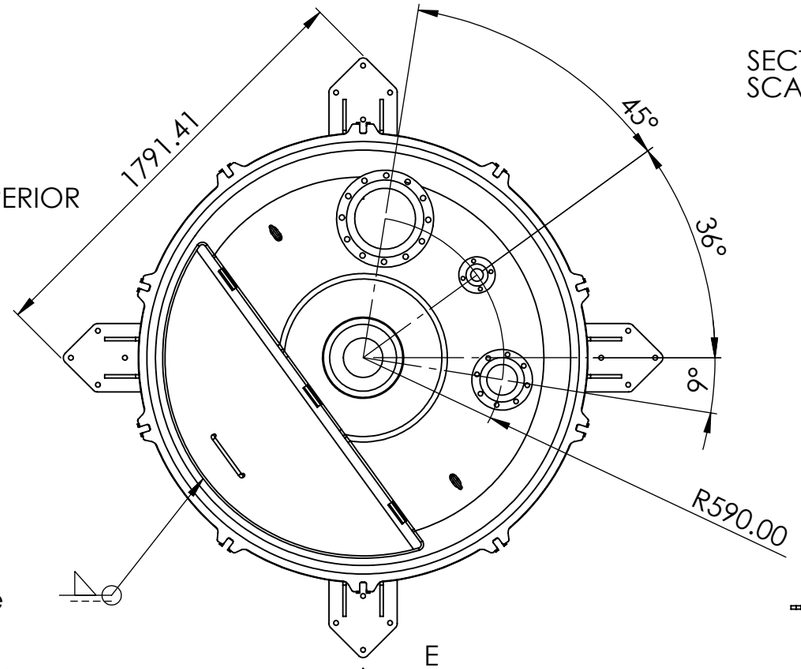
TITULO
PORTICO SOPORTE CONJUNTO MOTOREDUCTOR

	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

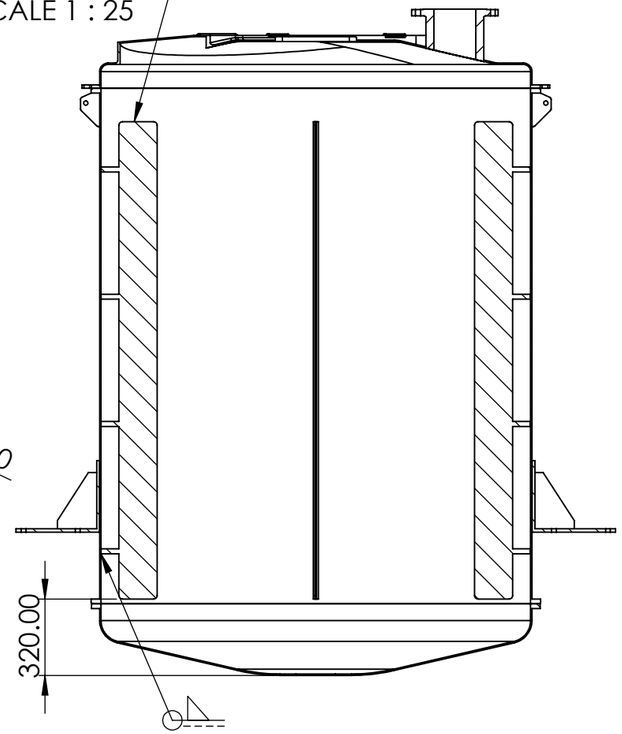
ESCALA GENERAL
1:25

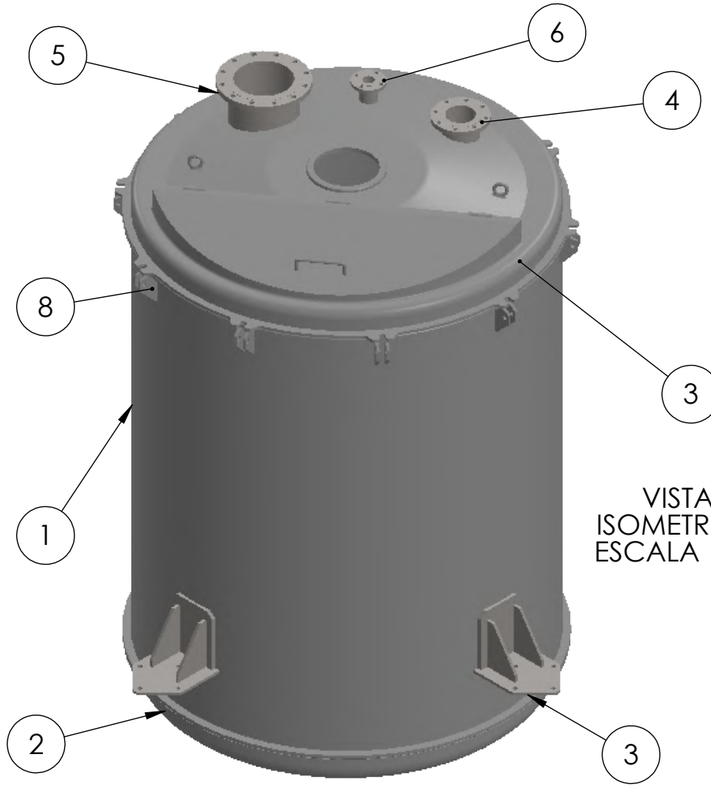
PLANO 01.02
HOJA 01

VISTA SUPERIOR

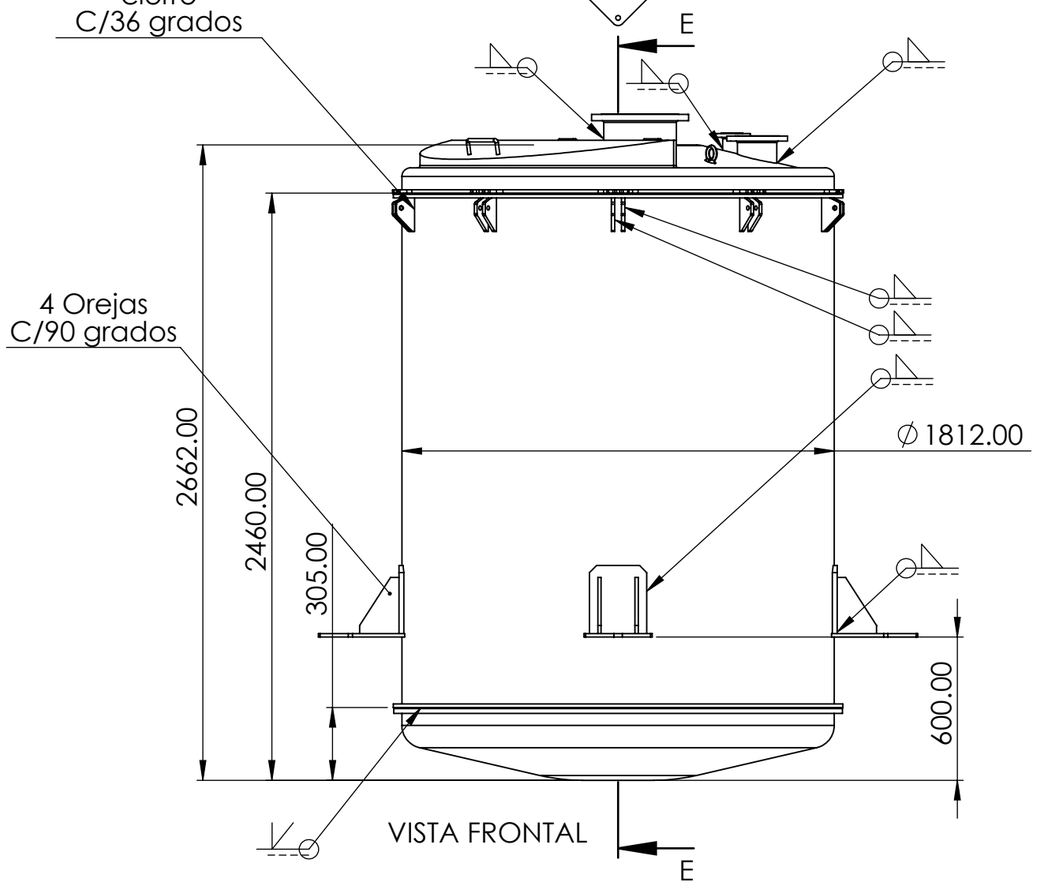


SECTION E-E
SCALE 1 : 25





VISTA
ISOMETRICA
ESCALA 1:25



POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
9	Deflectores Internos	-	-	4
8	Soporte de Cierre	-	-	10
7	Orejas de Soporte	-	-	4
6	Brida Ingreso de CMC	-	-	1
5	Brida Ingreso de Fibra	-	-	1
4	Brida Ingreso de Agua	-	-	1
3	Tanque de Mezcla - Tapa Superior	-	-	1
2	Tanque de Mezcla - Tapa Inferior	-	-	1
1	Tanque de Mezcla - Cuerpo Central	-	-	1

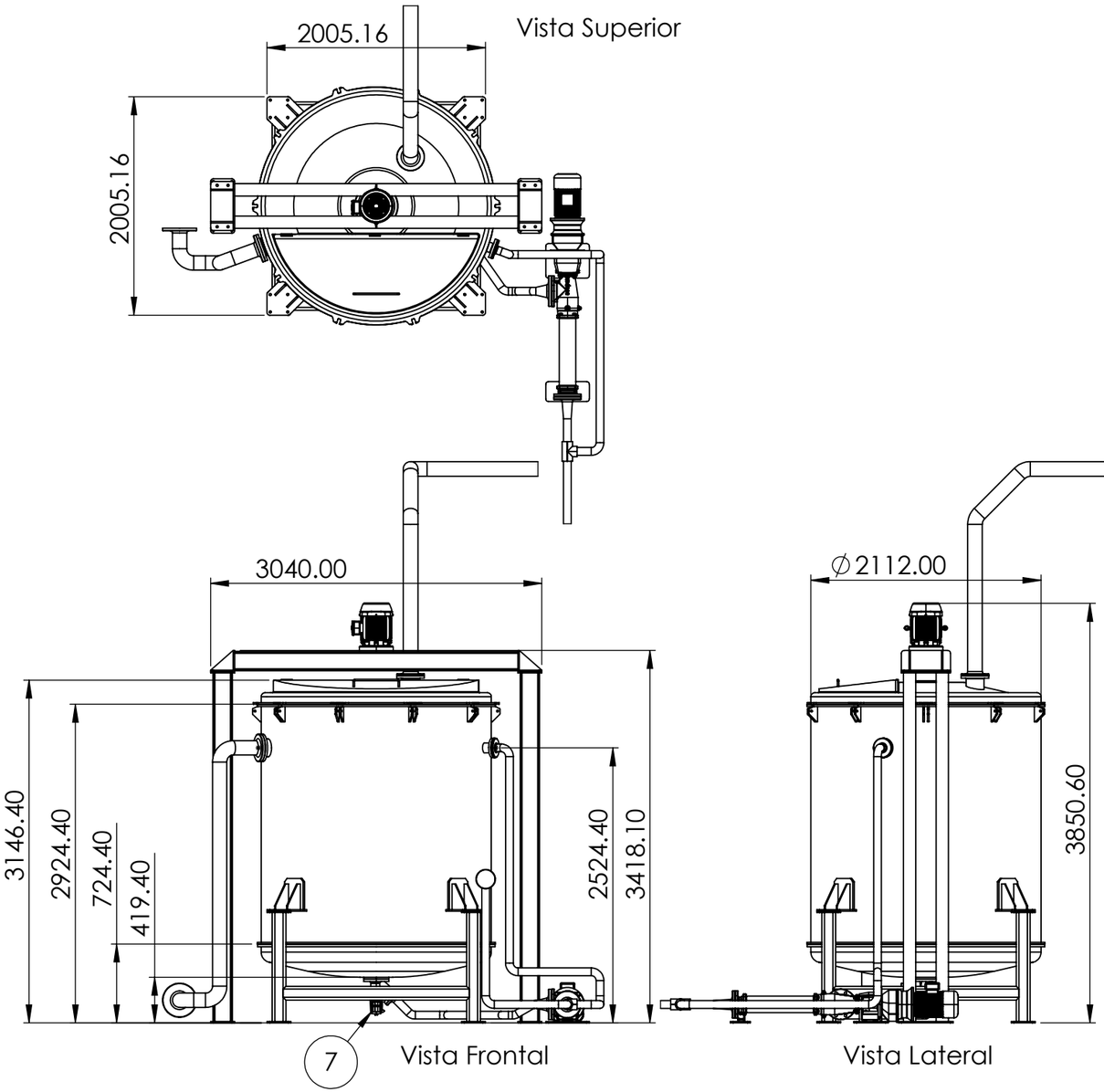
PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

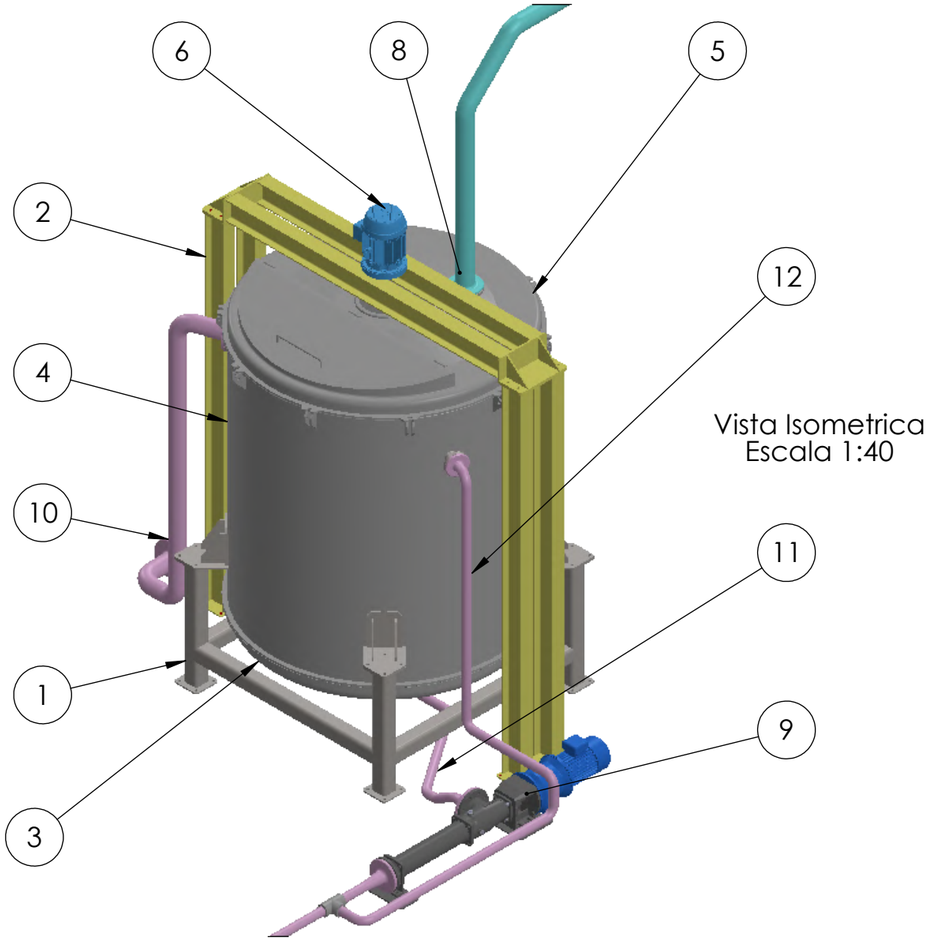
TITULO
ENSAMBLAJE TANQUE DE MEZCLA

	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL

PLANO 01.03
HOJA 01





Vista Isometrica
Escala 1:40

POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
12	Tuberia de Impulsion y Recirculacion	-	-	1
11	Tuberia de Succion P2	-	-	1
10	Tuberia de Impulsion P1	-	-	1
9	Bomba P2	Seepex BN 26-6L	-	1
8	Brida Ingreso de Agua Suplementaria	-	-	1
7	Valvula Inferior Electrica	-	-	1
6	Motor Electrico	-	-	1
5	Tanque de Reserva - Tapa Superior	-	-	1
4	Tanque de Reserva - Cuerpo Central	-	-	1
3	Tanque de Reserva - Tapa Inferior	-	-	1
2	Portico Soporte Motor	-	-	1
1	Soporte Tanque de Reserva	-	-	1

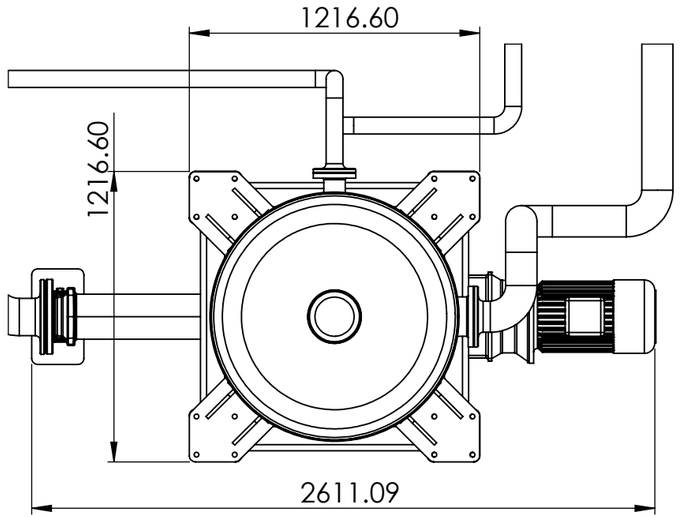
PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

TITULO
TANQUE DE RESERVA

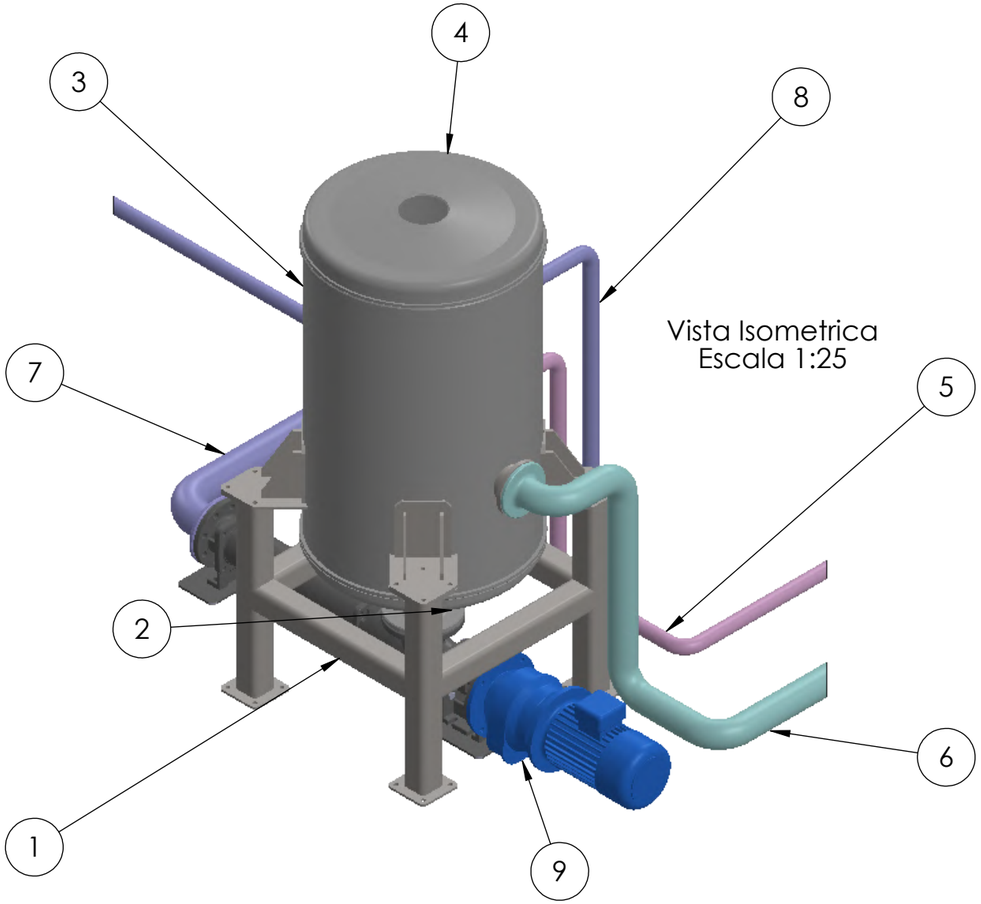
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL
1:50

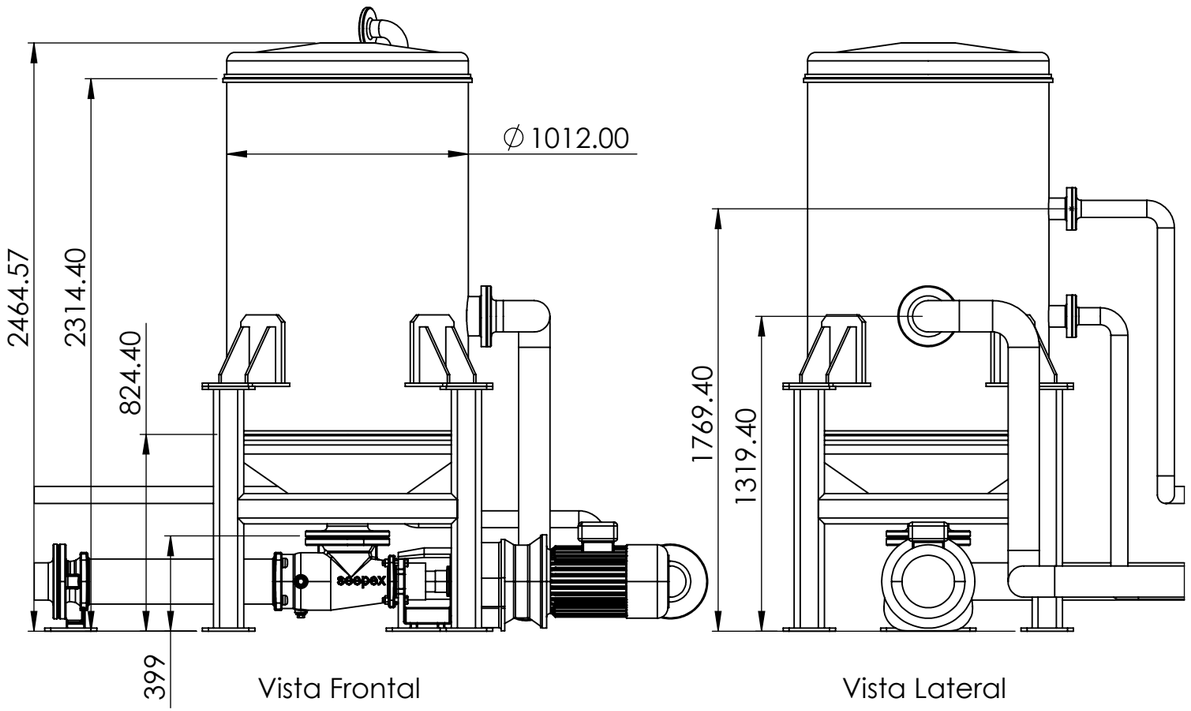
PLANO 02
HOJA 01



Vista Superior



Vista Isometrica
Escala 1:25



Vista Frontal

Vista Lateral

6	Tuberia de Impulsion P3	-	-	1
5	Tuberia de Impulsion P2	-	-	1
4	Tanque de Dilucion - Tapa Superior	-	-	1
3	Tanque de Dilucion - Cuerpo Central	-	-	1
2	Tanque de Dilucion - Tapa Inferior	-	-	1
1	Soporte Tanque de dilucion	-	-	1
POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD

9	Bomba P4	Seepex BN 130-6L	-	1
8	Tuberia de Recirculacion Distribuidor	-	-	1
7	Tuberia de Impulsion P4	-	-	1

PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

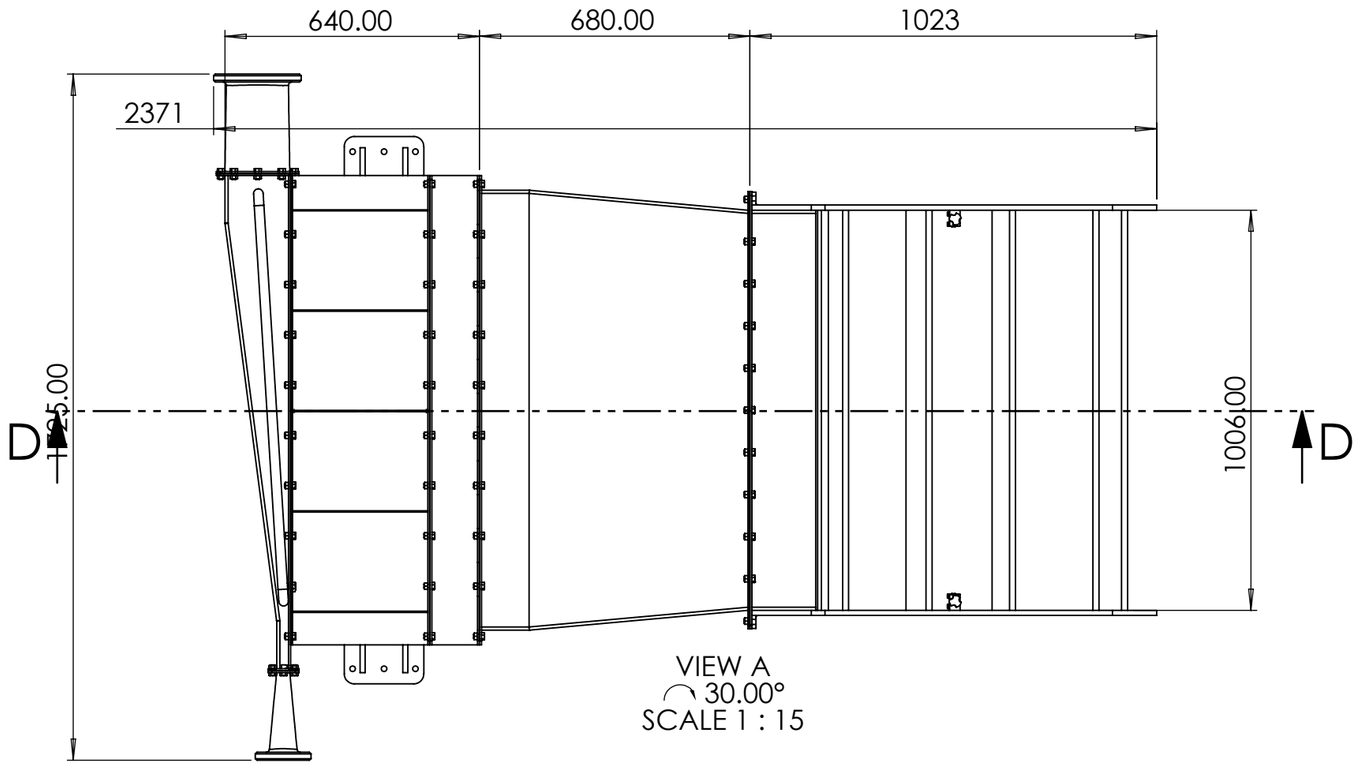
TITULO
TANQUE DE DILUCION

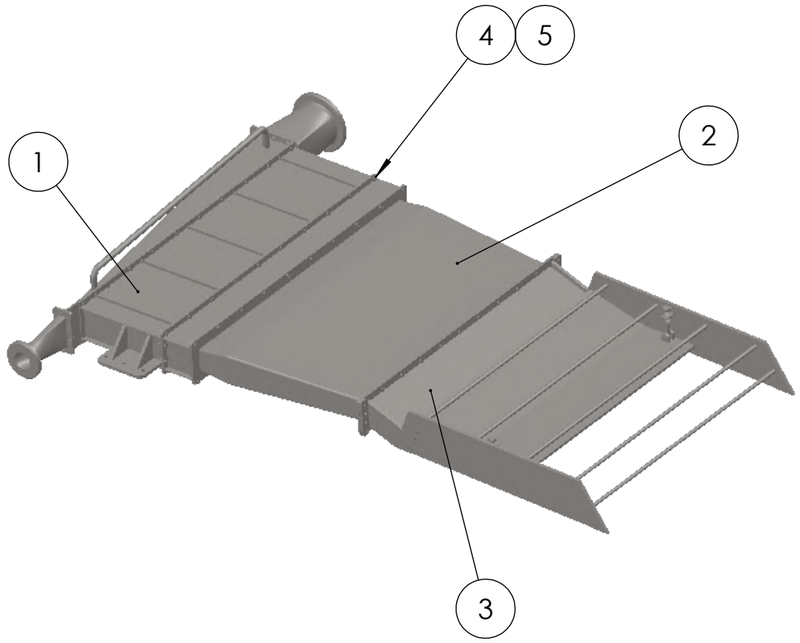
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL
1:25

PLANO 03
HOJA 01

Vista Superior

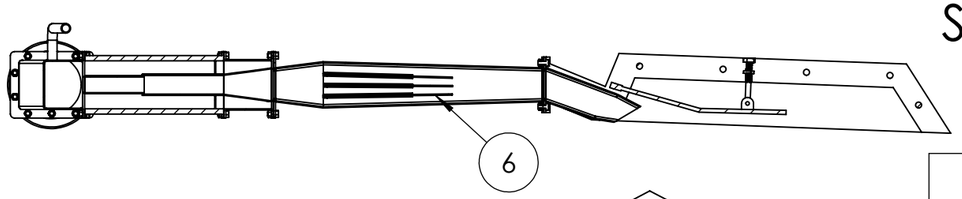


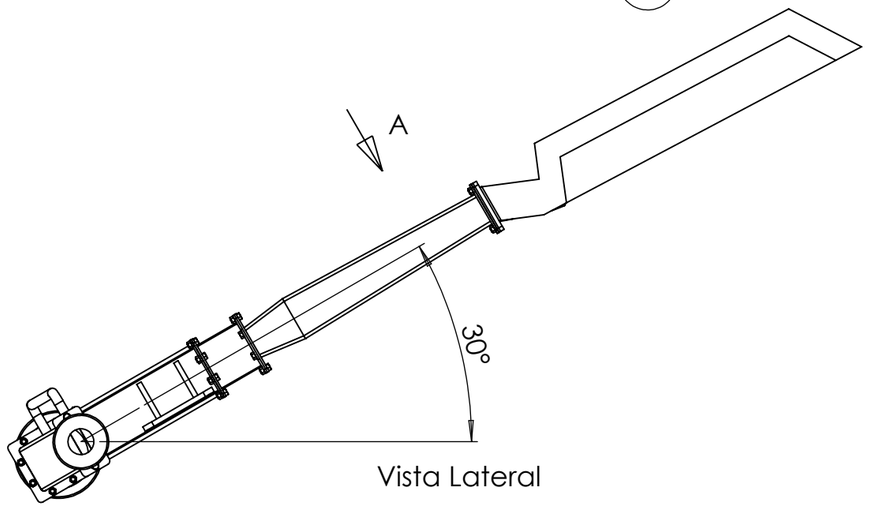


Vista Isometrica
Escala 1:20

SECTION D-D

SCALE 1 : 15





Vista Lateral

POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
6	Placas Separadoras	-	-	3
5	Tuercas Hex M10	-	-	105
4	Tornillos de Fijacion Allen M10x20	-	-	105
3	Slice	-	Ver 04.03	1
2	Rampa Unificadora de Flujo	-	Ver 04.02	1
1	Distribuidor de Flujo	-	Ver 04.01	1

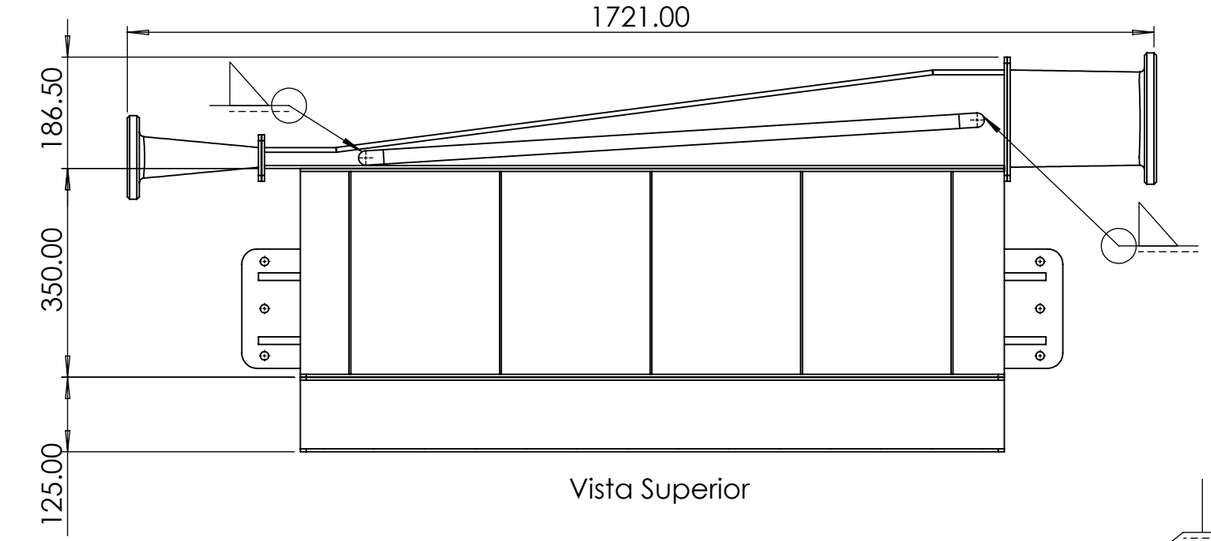
PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

TITULO
SUBCONJUNTO DE DISTRIBUCION

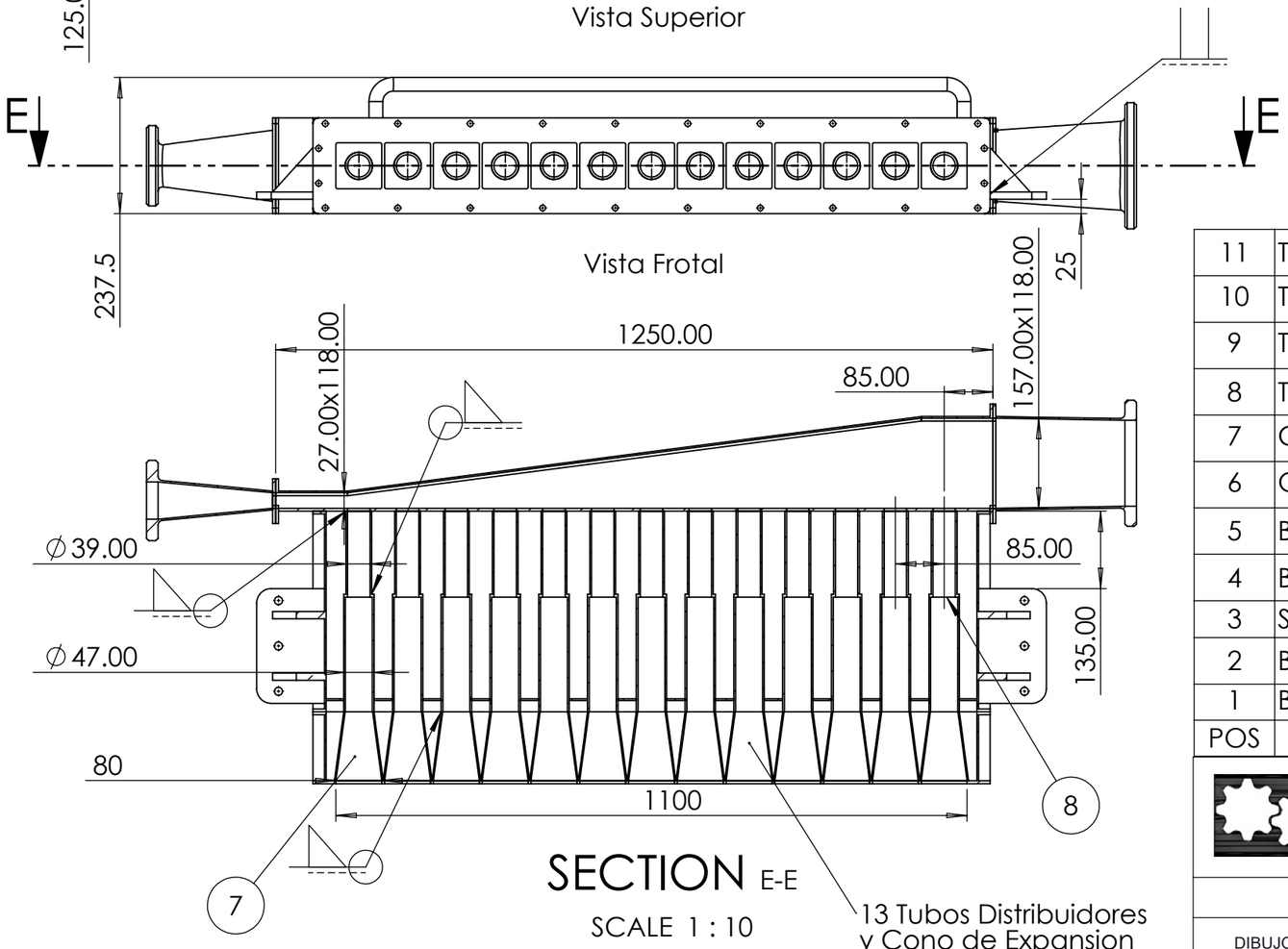
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL
1:15

PLANO 04
HOJA 01



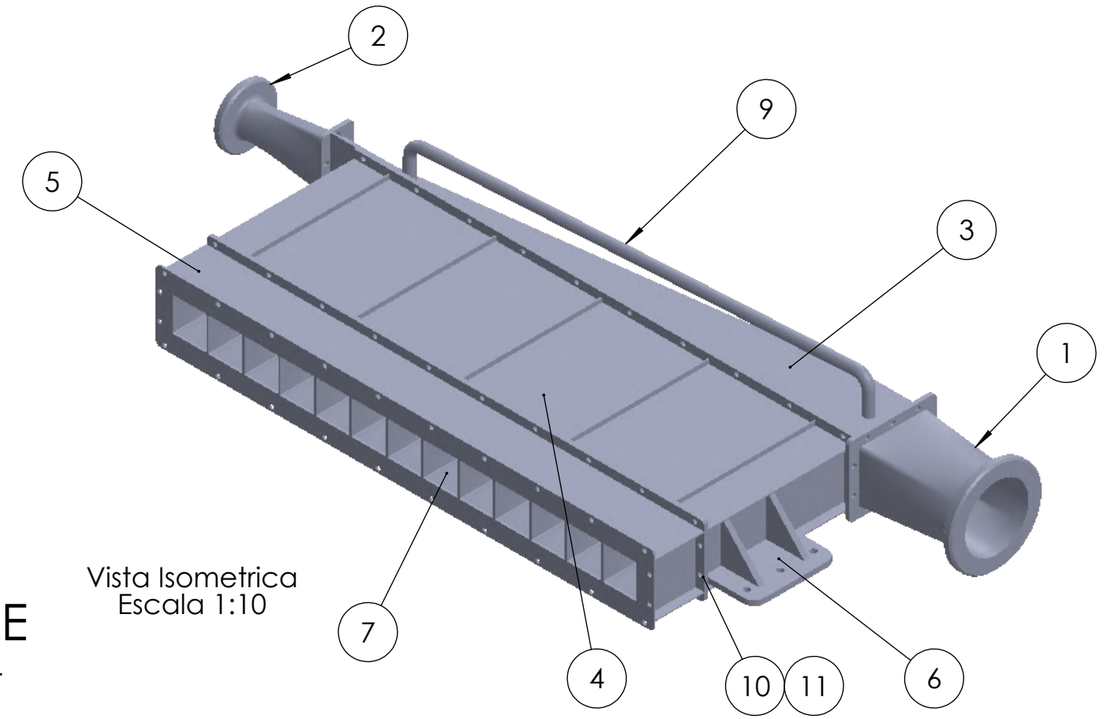
Vista Superior



Vista Frotal

SECTION E-E

SCALE 1 : 10



Vista Isometrica
Escala 1:10

POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
11	Tuercas Hex M10	-	-	60
10	Tornillos de Fijacion M10x20	-	-	60
9	Tubo Visualizacion de Flujo	-	-	1
8	Tubo Distribuidor	-	-	13
7	Cono de Expansion	-	-	13
6	Oreja de Soporte	-	-	2
5	Brida/Cobertor Seccion de Conos	Est Soldada	-	1
4	Brida/Cobertor Seccion de Tubos	Est Soldada	-	1
3	Seccion Decreciente	Est Soldada	-	1
2	Brida de Recirculacion	-	-	1
1	Brida de Ingreso	-	-	1

PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

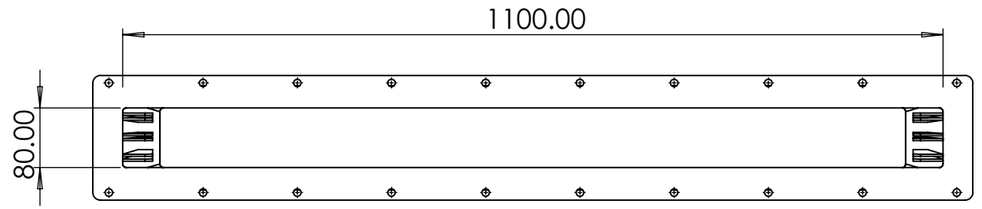
TITULO

DISTRIBUIDOR DE FLUJO

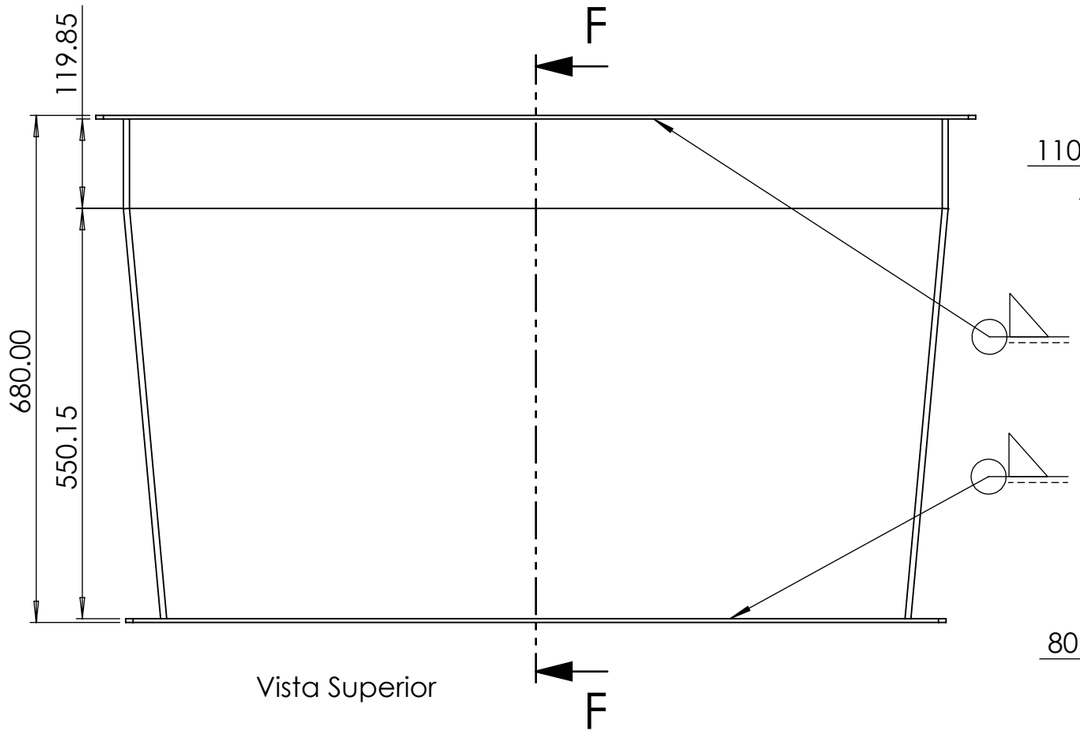
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL 1:10

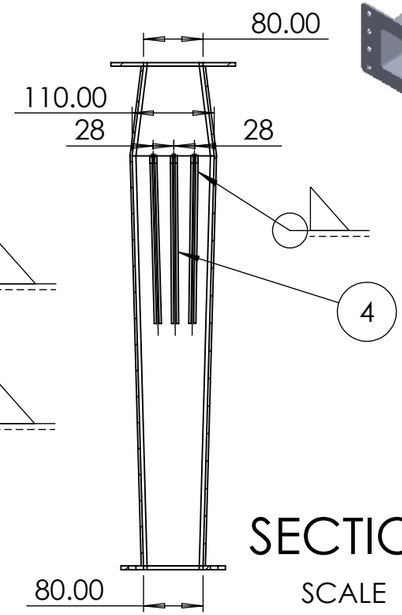
PLANO 04.01
HOJA 01



Vista Trasera

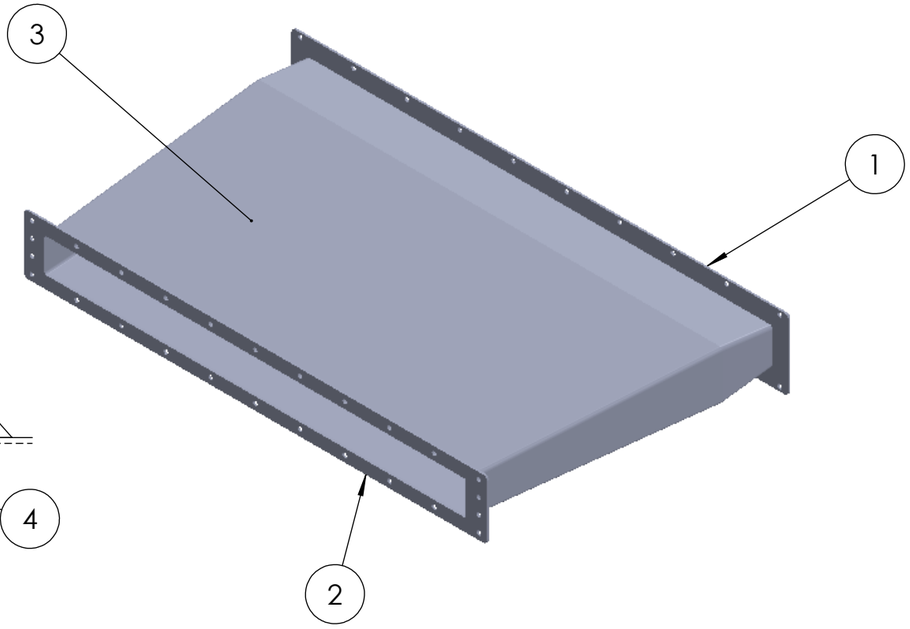


Vista Superior

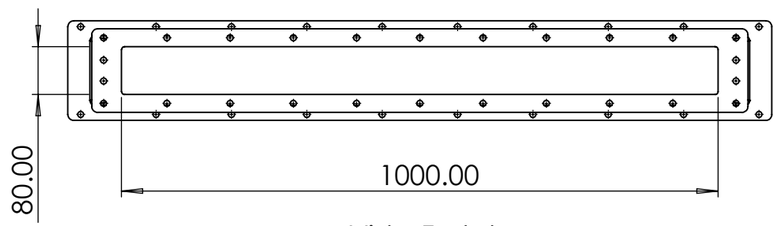


SECTION F-F

SCALE 1 : 8



Vista Isometrica
Escala 1:10



Vista Frotal

POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
4	Soprote de Placas	-	-	3
3	Seccion Unificadora	Est Soldada	-	1
2	Brida Segunda	-	-	1
1	Brida Primera	-	-	1

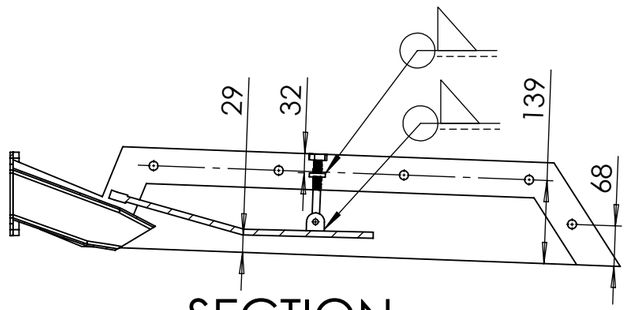
PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

TITULO
RAMPA UNIFICADIRA
DE FLUJO

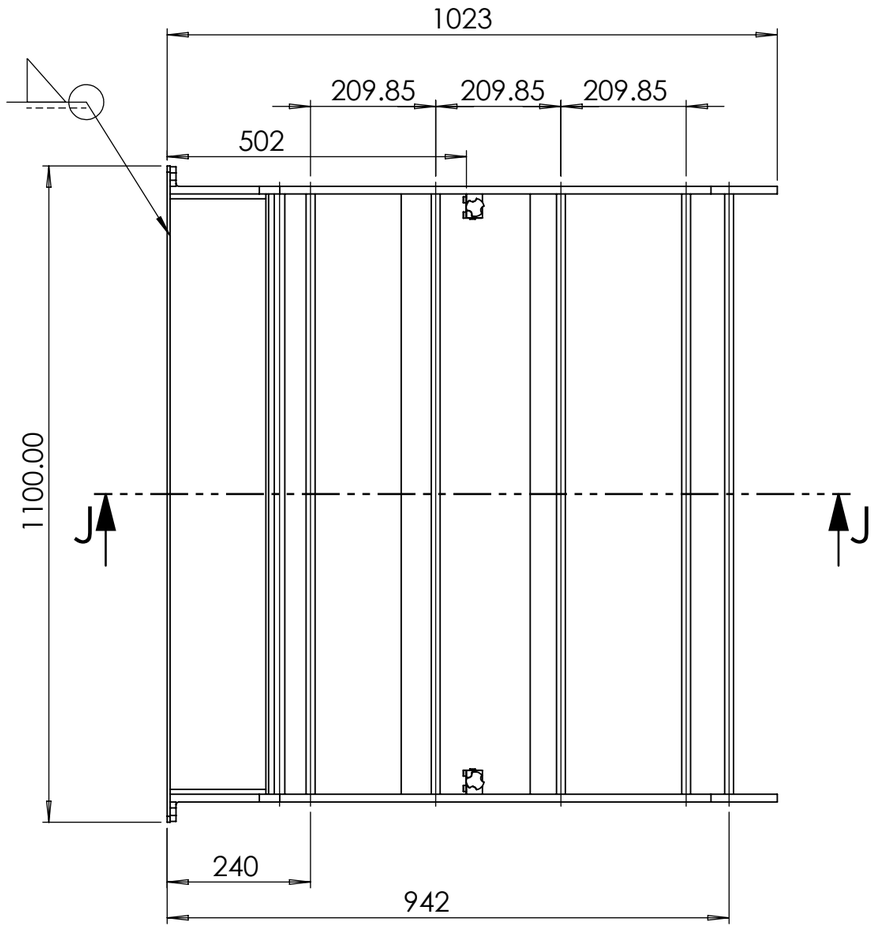
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL
1:8

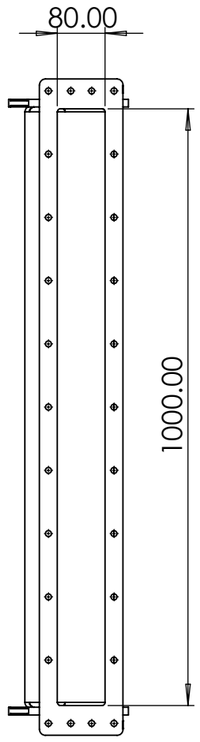
PLANO 04.02
HOJA 01



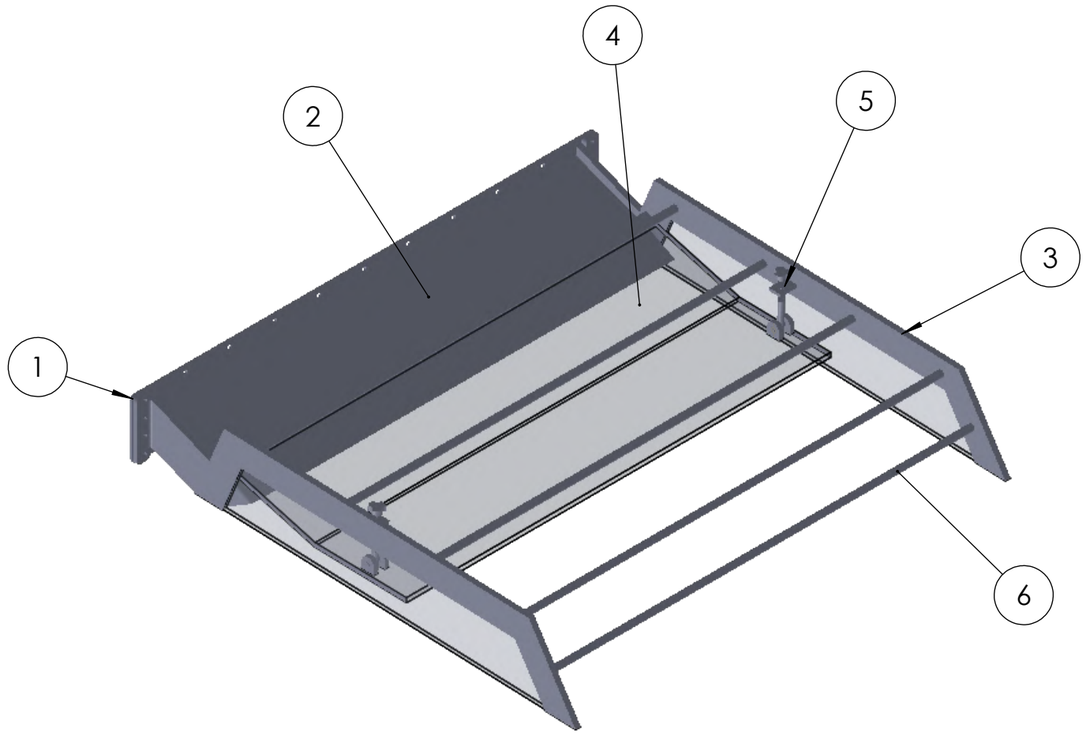
SECTION J-J



Vista Superior



Vista Lateral



Vista Isometrica
Escala 1:10

POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
6	Varillas de Refuerzo Roscadas	-	-	5
5	Sistema de Ajuste Reten Superior	-	-	2
4	Reten Superior	-	-	1
3	Retenes Laterales	-	-	2
2	Seccion Final de Flujo	Est Soldada	-	1
1	Brida Primera	-	-	1

PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

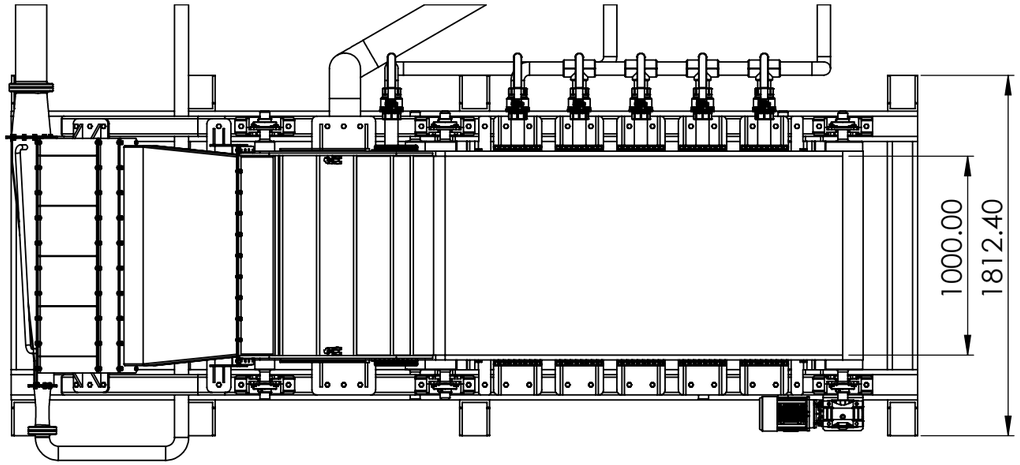
TITULO
SLICE

	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

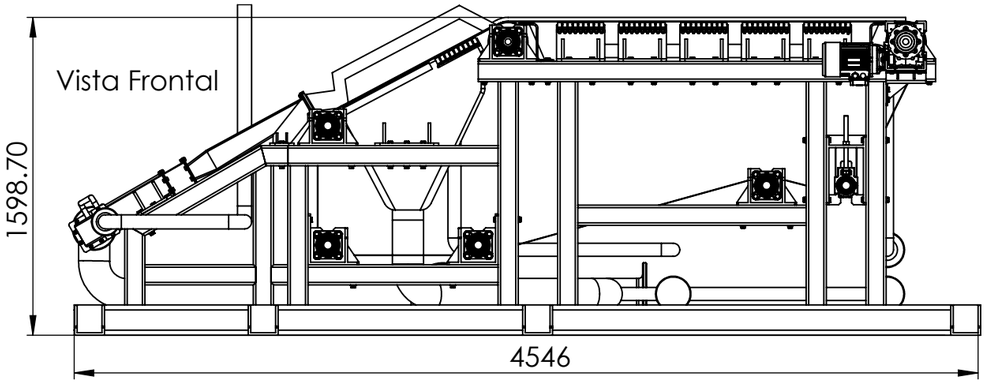
ESCALA GENERAL
1:8

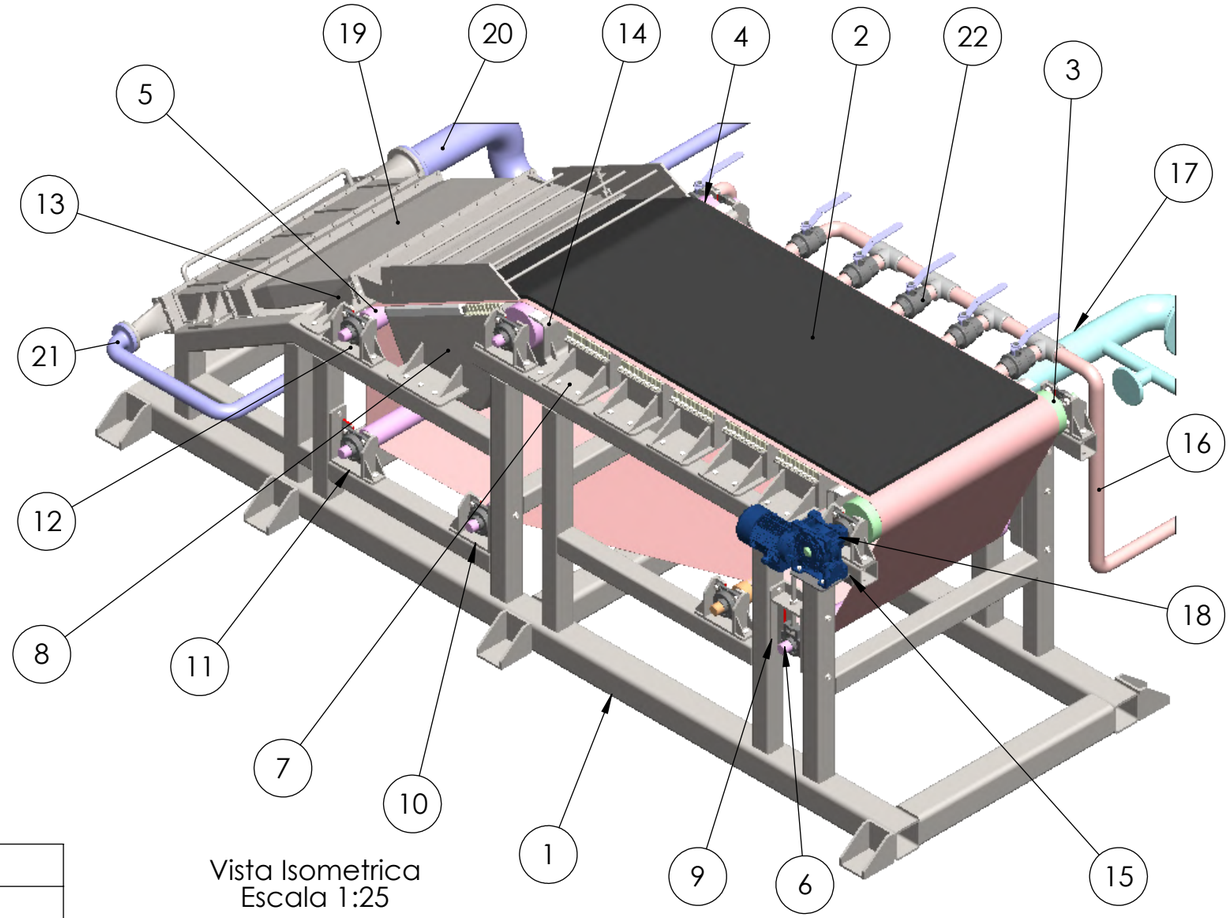
PLANO 04.03
HOJA 01

Vista Superior



Vista Frontal





Vista Isometrica
Escala 1:25

POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
22	Valvulas de Control de Vacio	-	-	6
21	Tuberia de Recirculacion	-	-	1
20	Tuberia de Impulsion P4	-	-	1
19	Subconjunto de Distribucion	-	Ver 04	1
18	Motoreductor	-	-	1
17	Tuberia de Desague por Gravedad	-	-	1
16	Tuberia de Succion	-	-	2
15	Soporte Motoreductor Cinta	-	Ver 05.01 01	1
14	Soporte Cinta	-		2
13	Soporte Unidad Distribuidora	-		1
12	Soporte Rodillo 3	-		8
11	Soporte Rodillo 2	-		2
10	Soporte Rodillo 1	-		2
9	Soporte Sistema Tensor	-		2
8	Conjunto Caja de Baja Succion	-	Ver 05.03	1
7	Conjunto Caja de Alta Succion	-	Ver 05.02	5
6	Rodillo Tensor	-	Ver 05.01	1
5	Rodillo Guia 100mm	-		4
4	Rodillo Guia 200mm	-		1
3	Rodillo Motriz	-		1
2	Cinta Formadora PFM-Wetlaid-09603	-	-	1
1	Soporte Cinta Formadora	-	Ver 05.01	1

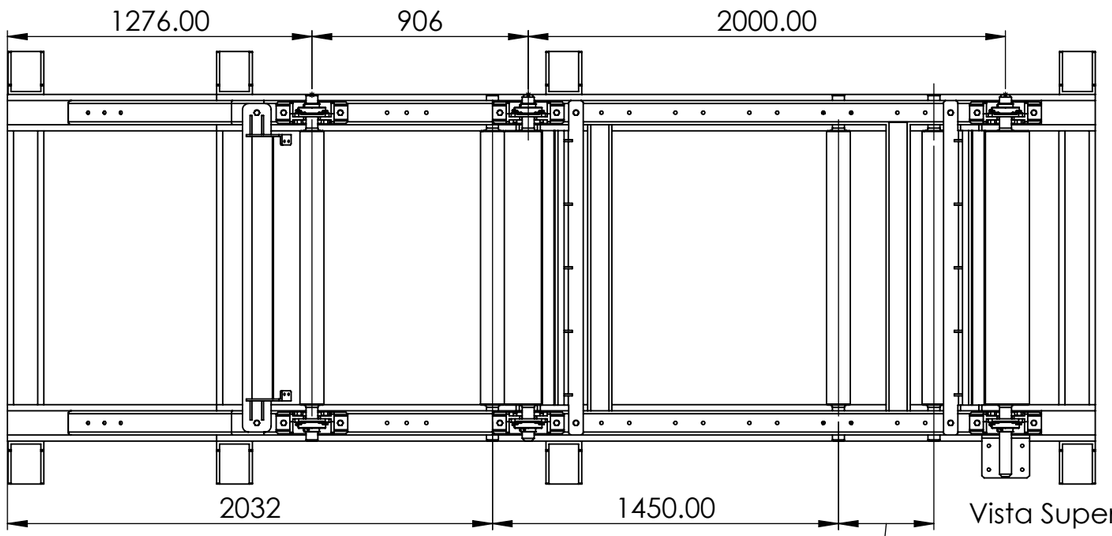
PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

TITULO
SUBCONJUNTO CINTA FORMADORA

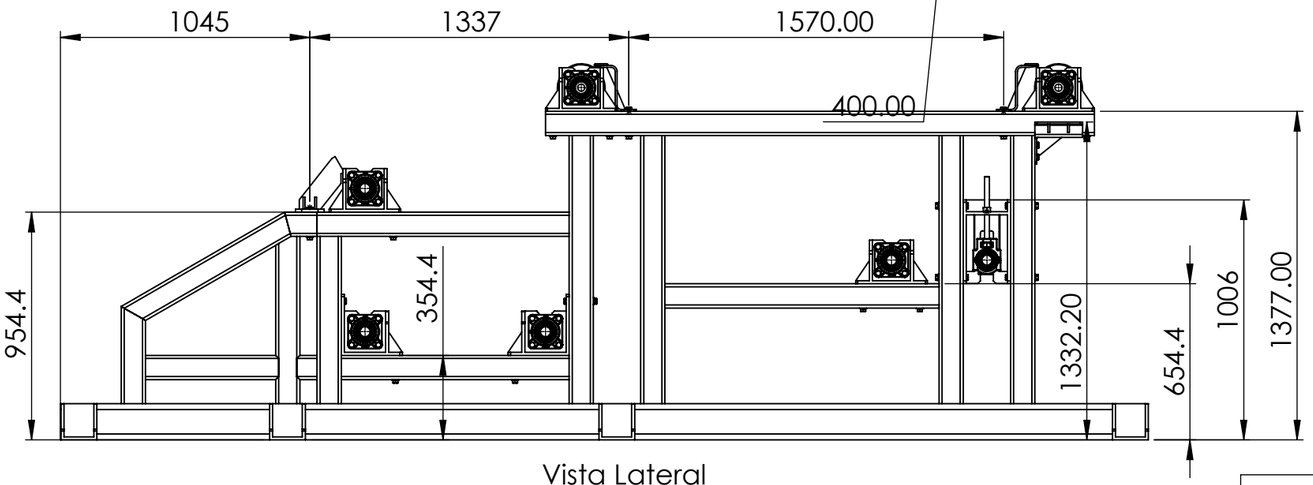
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL
1:30

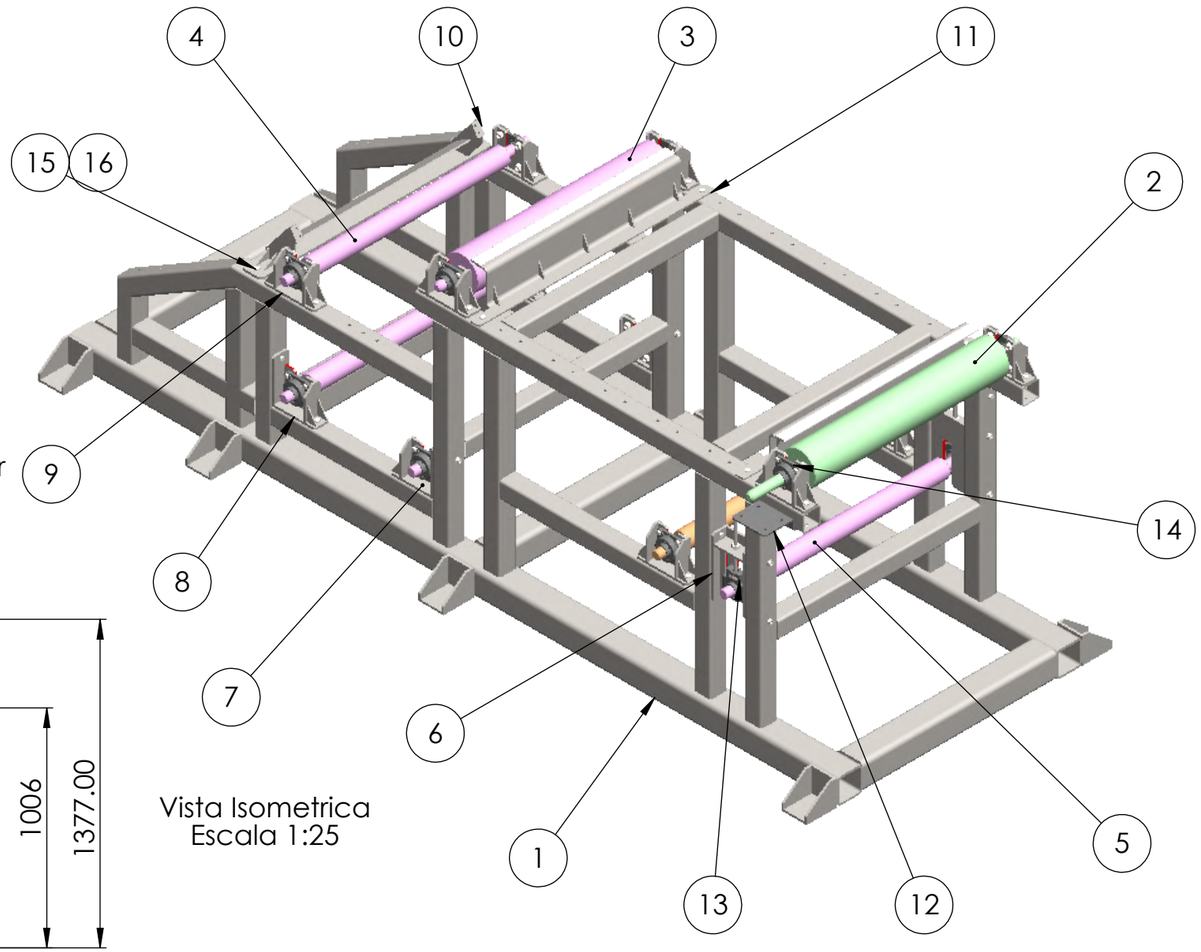
PLANO 05
HOJA 01



Vista Superior



Vista Lateral



Vista Isometrica
Escala 1:25

16	Tornillos Hex M14 Longitudes varias	-	-	66
15	Tuerca Hex M14	-	-	66
14	Rodamiento SKF UFC 210	-	-	12
13	Rodamiento Tensor SKF UCT 210	-	-	2
12	Soporte Motoreductor Cinta	-	-	1
11	Soporte Cinta	-	-	2
10	Soporte Unidad Distribuidora	-	-	1
9	Soporte Rodillo 3	-	-	8
8	Soporte Rodillo 2	-	-	2
7	Soporte Rodillo 1	-	-	2
6	Soporte Sistema Tensor	-	-	2

5	Rodillo Tensor	-	-	1
4	Rodillo Guia 100mm	-	-	4
3	Rodillo Guia 200mm	-	-	1
2	Rodillo Motriz	-	-	1
1	Soporte Cinta Formadora	-	Ver 05.01 02	1
POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD

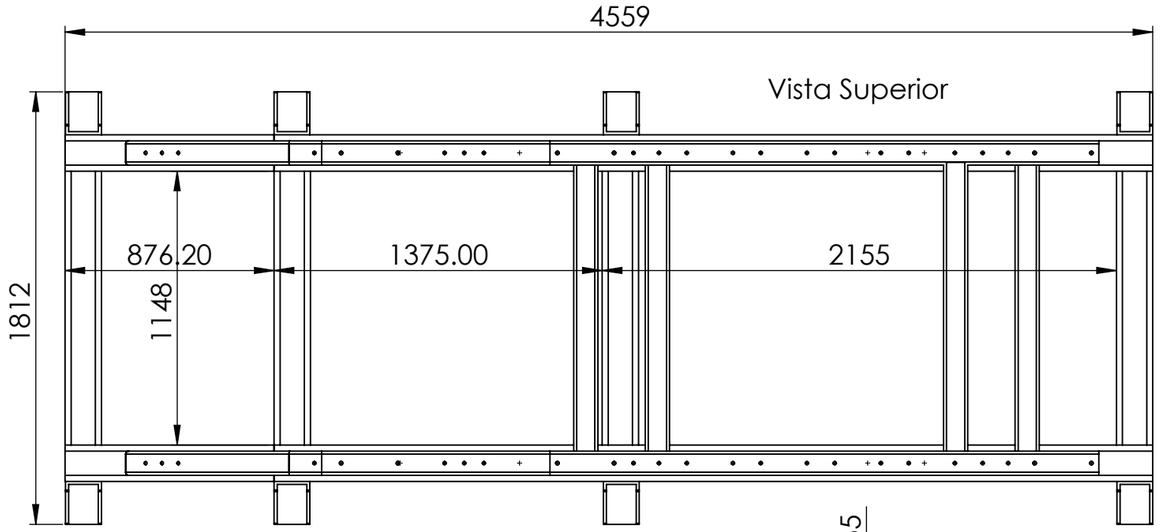
PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

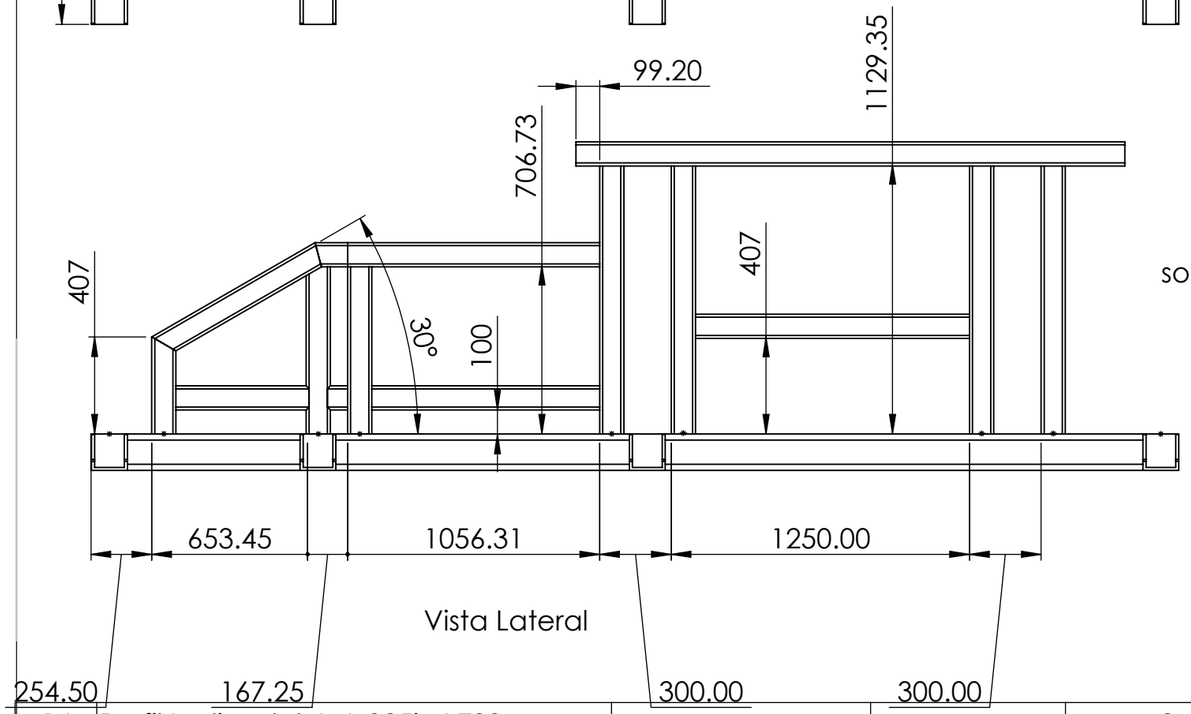
TITULO
SOPORTE CINTA FORMADORA

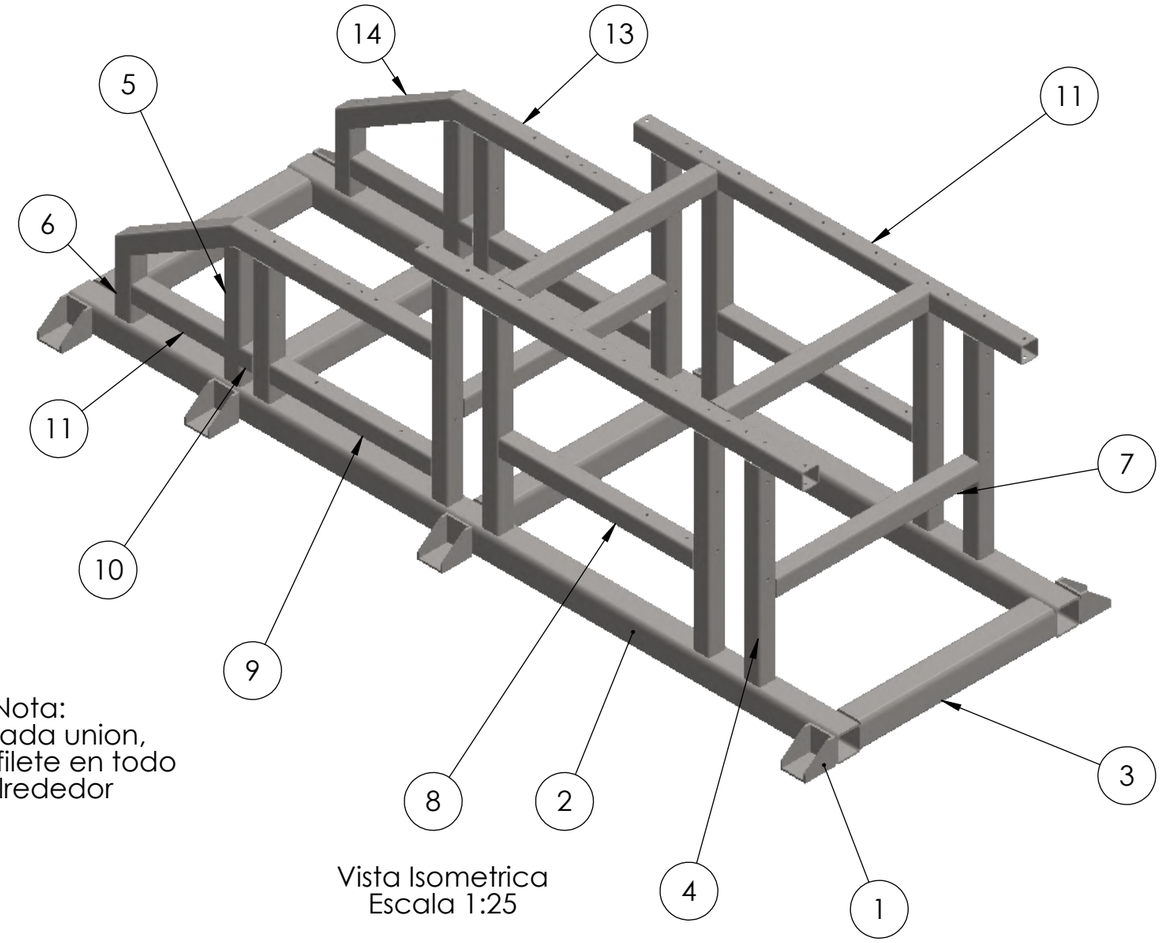
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL
1:25

PLANO 05.01
HOJA 01







Vista Isometrica
Escala 1:25

Nota:
Para cada union,
soldar a filete en todo
su alrededor

POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
14	Perfil Inclinadol 4x4x025in L790mm	-	-	2
13	Perfil Horizontal 4x4x025in L1192mm	-	-	1
12	Perfil Horizontal 4x4x025in L2300mm	-	-	2
11	Perfil Horizontal 4x4x025in L545mm	-	-	2
10	Perfil Horizontal 4x4x025in L72mm	-	-	2
9	Perfil Horizontal 4x4x025in L955mm	-	-	2
8	Perfil Horizontal 4x4x025in L1148mm	-	-	2
7	Perfil Horizontal 4x4x025in L1198mm	-	-	4
6	Perfil Vertical 4x4x025in L407mm	-	-	2
5	Perfil Vertical 4x4x025in L700mm	-	-	4
4	Perfil Vertical 4x4x025in L1123mm	-	-	8
3	Perfil Base 6x6x05in L1148mm	-	-	4
2	Perfil Base 6x6x05in L4459mm	-	-	2
1	Oreja Base	-	-	8

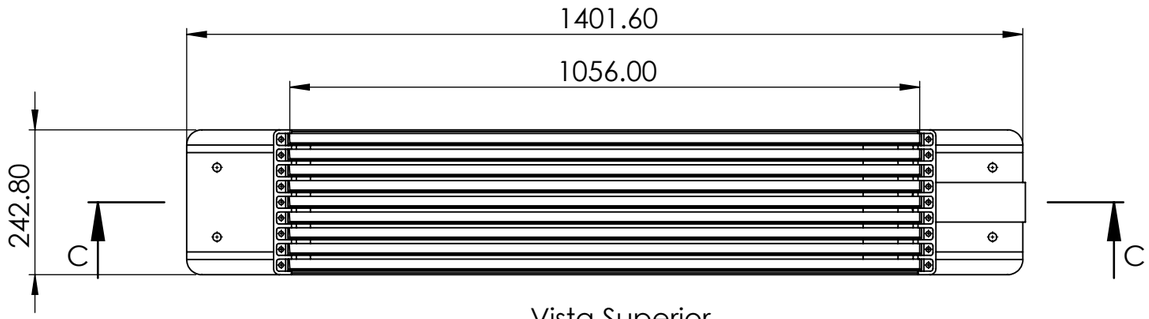
PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

TITULO
SOPORTE CINTA FORMADORA

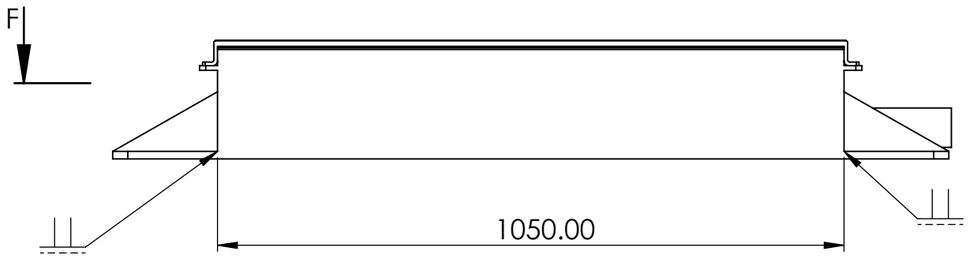
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL
1:25

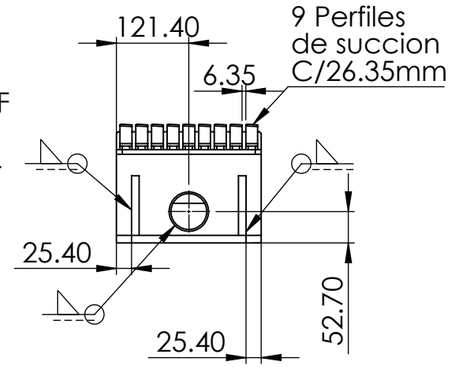
PLANO 05.01
HOJA 02

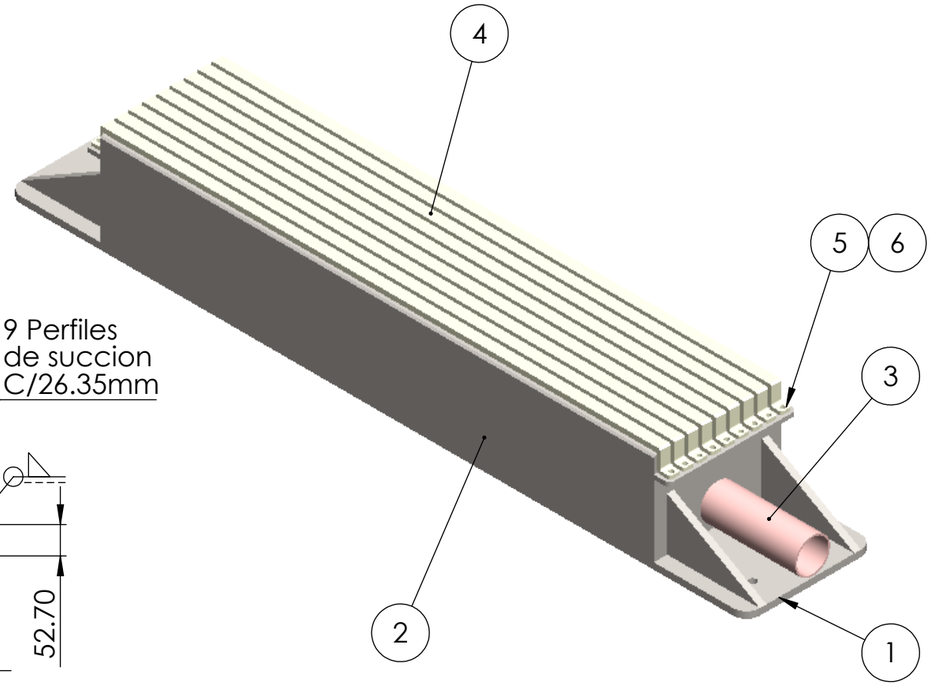


Vista Superior

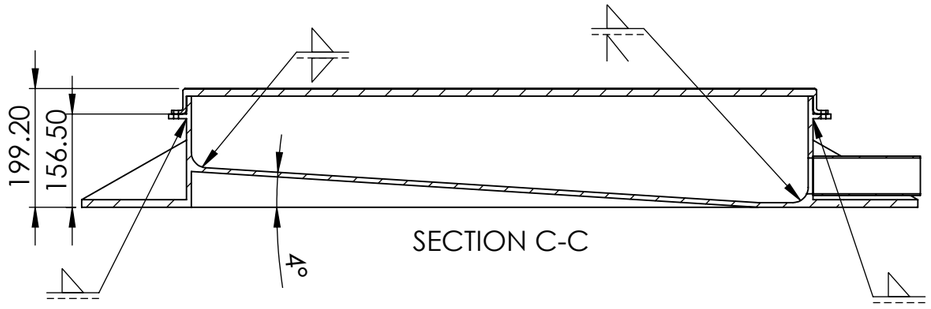


Vista Frontal

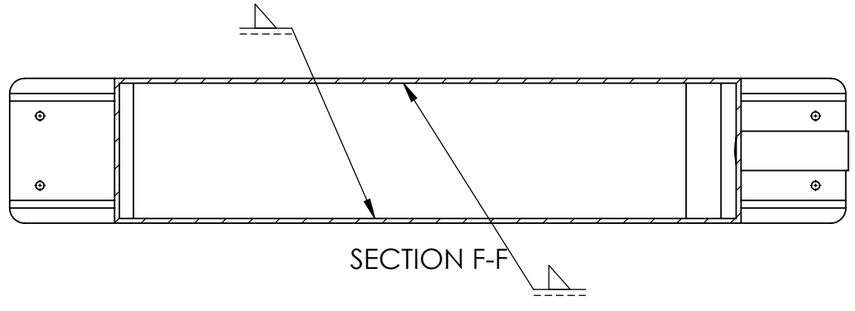




Vista Isometrica
Escala 1:8



SECTION C-C



SECTION F-F

POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
6	Tuercas Hex M10	-	-	18
5	Tornillos de Fijacion Allen M10x20	-	-	18
4	Perfiles de Succion	-	-	9
3	Tuberia de Succion	-	-	1
2	Caja de Vacio Soldada	-	-	1
1	Soportes Laterales	-	-	2

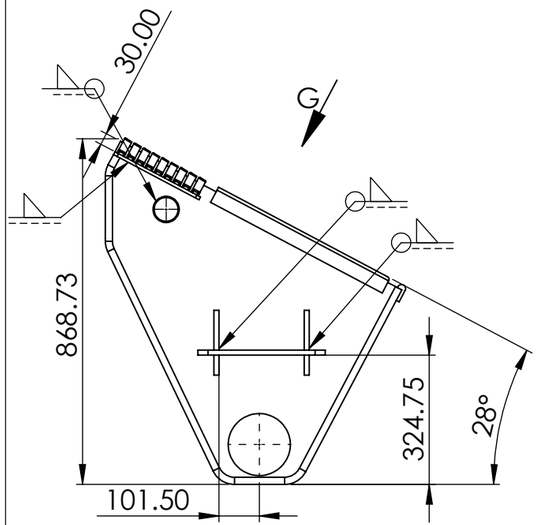
PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

TITULO
COJUNTO CAJA DE ALTA SUCCION

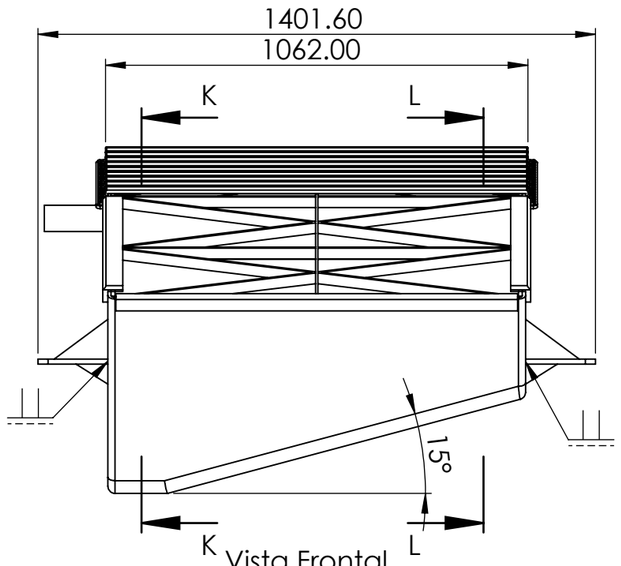
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL
1:10

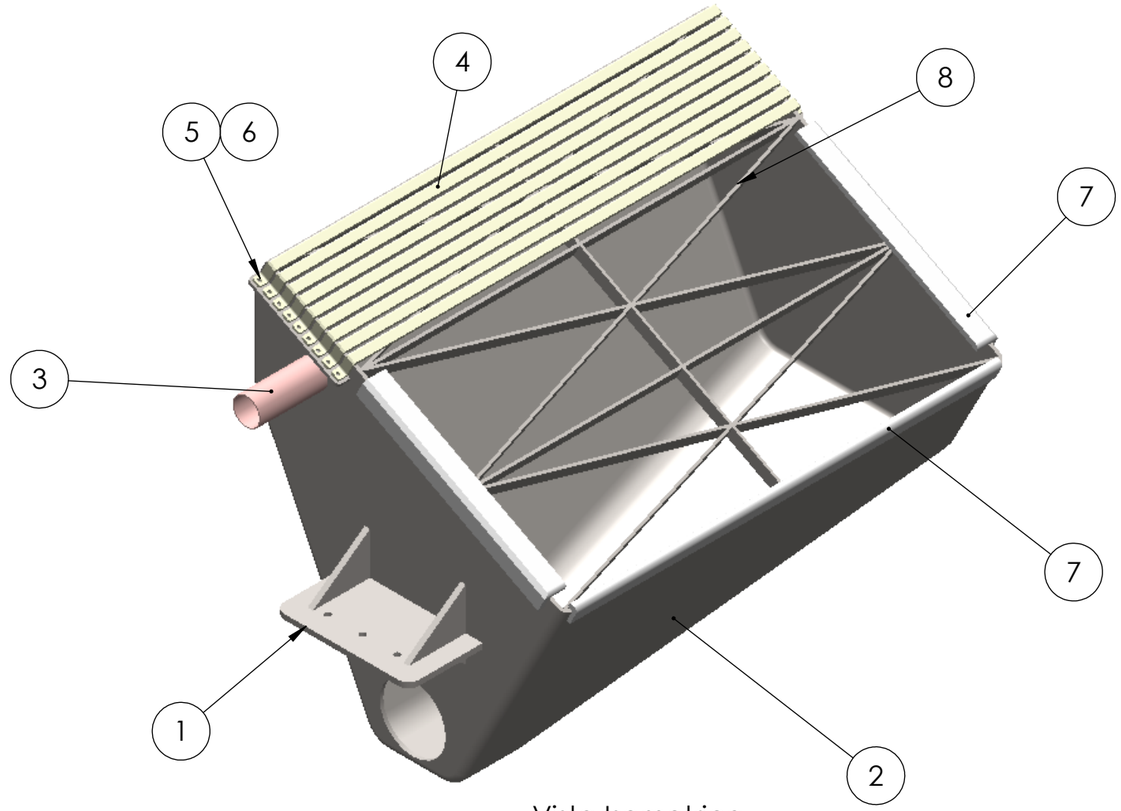
PLANO 05.02
HOJA 01



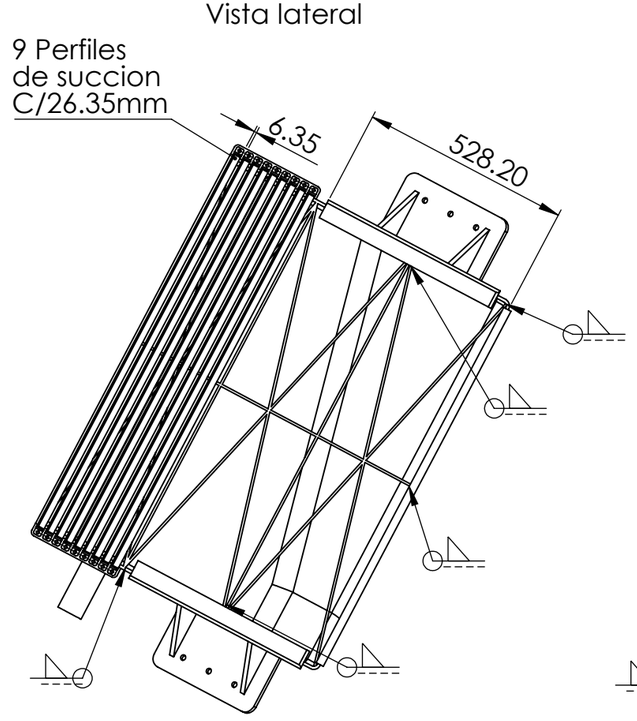
Vista lateral



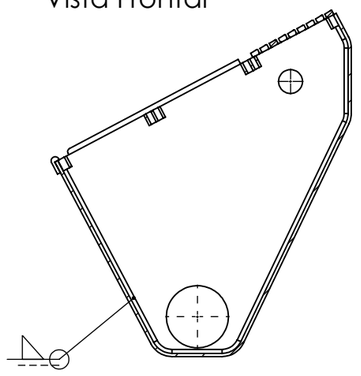
Vista Frontal



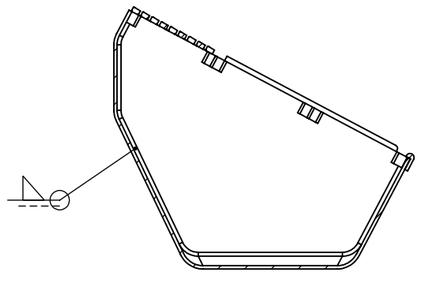
Vista Isometrica
Escala 1:10



VIEW G
SCALE 1 : 15



SECTION K-K
SCALE 1 : 15



SECTION L-L
SCALE 1 : 15

POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
8	Refuerzos Internos	-	-	17
7	Platea de Baja Friccion	-	-	3
6	Tuercas Hex M10	-	-	18
5	Tornillos de Fijacion Allen M10x20	-	-	18
4	Perfiles de Succion	-	-	9
3	Tuberia de Succion	-	-	1
2	Caja de Vacio Soldada	-	-	1
1	Soportes Laterales	-	-	2

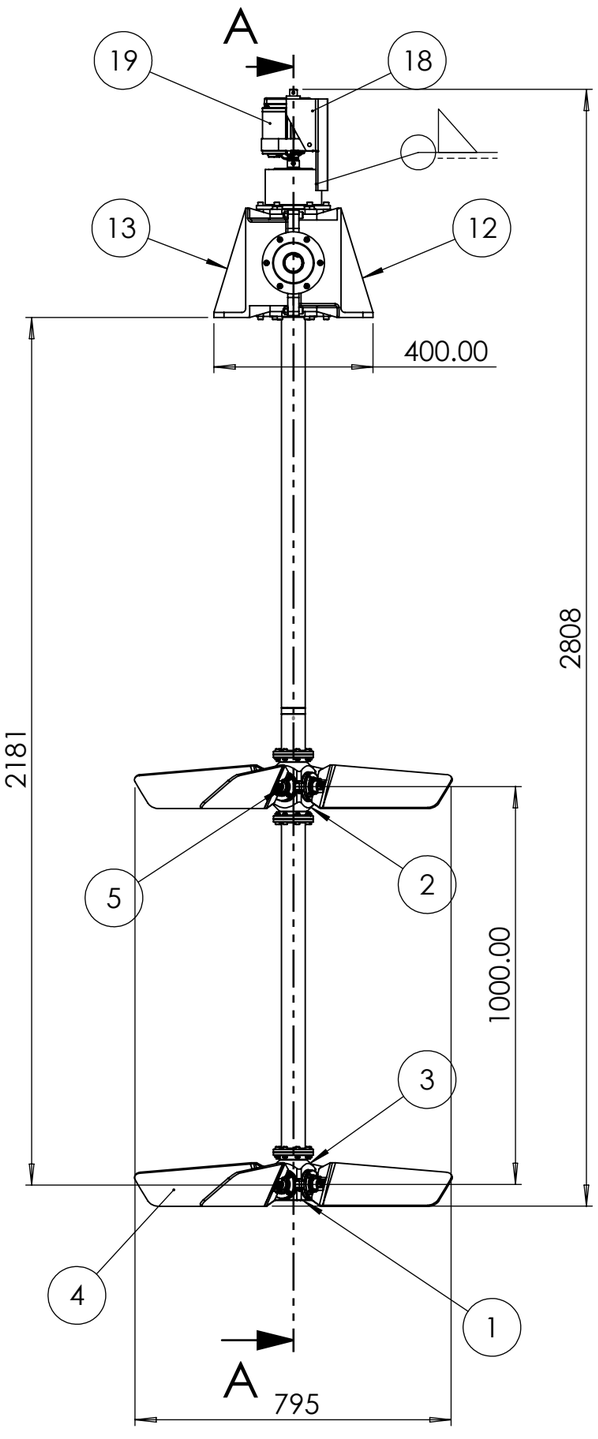
PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

TITULO
CONJUNTO CAJA DE BAJA SUCCION

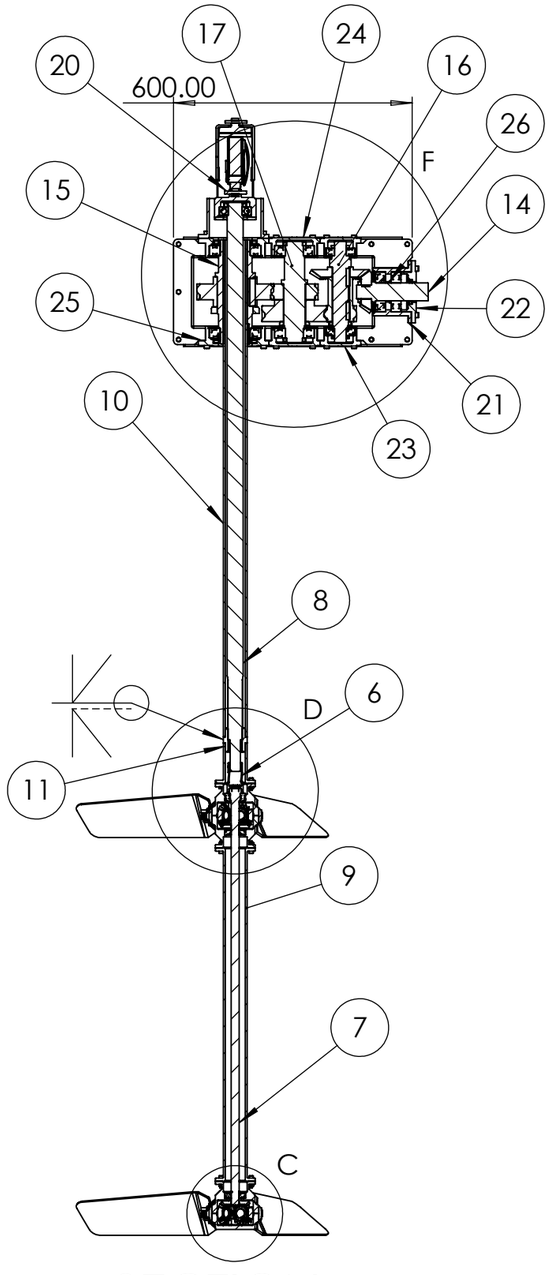
	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL
1:15

PLANO 05.03
HOJA 01



Vista Frontal



SECTION A-A

SCALE 1 : 15

POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD
26	Espaciador	-	-	1
25	Alojamiento Reductor 5	-	-	2
24	Alojamiento Reductor 4	-	-	2
23	Alojamiento Reductor 3	-	-	2
22	Alojamiento Reductor 2	-	-	1
21	Alojamiento Reductor 1	-	-	1
20	Pasador	-	-	2
19	Actuador Lineal Electrico	-	-	1
18	Soporte Actuador Lineal	-	-	1
17	Eje Intermedio 2	-	-	1
16	Eje Intermedio 1	-	-	1
15	Eje hueco de Salida	-	-	1
14	Eje de Entrada	-	-	1
13	Carcasa Reductor 2	-	-	1
12	Carcasa Reductor 1	-	-	1
11	Acople Estriado	-	-	1
10	Eje Hueco Superior	-	-	1
9	Eje Hueco Inferior	-	-	1
8	Eje Lineal Interior	-	-	1
7	Eje de Giro Interior	-	-	1
6	Pieza Convertidora de Movimiento	-	-	1
5	Soporte de Paleta	-	-	8
4	Paleta	-	-	8
3	Alojamiento Superior	-	-	2
2	Alojamiento Inferior 2	-	-	1
1	Alojamiento Inferior 1	-	-	1

PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

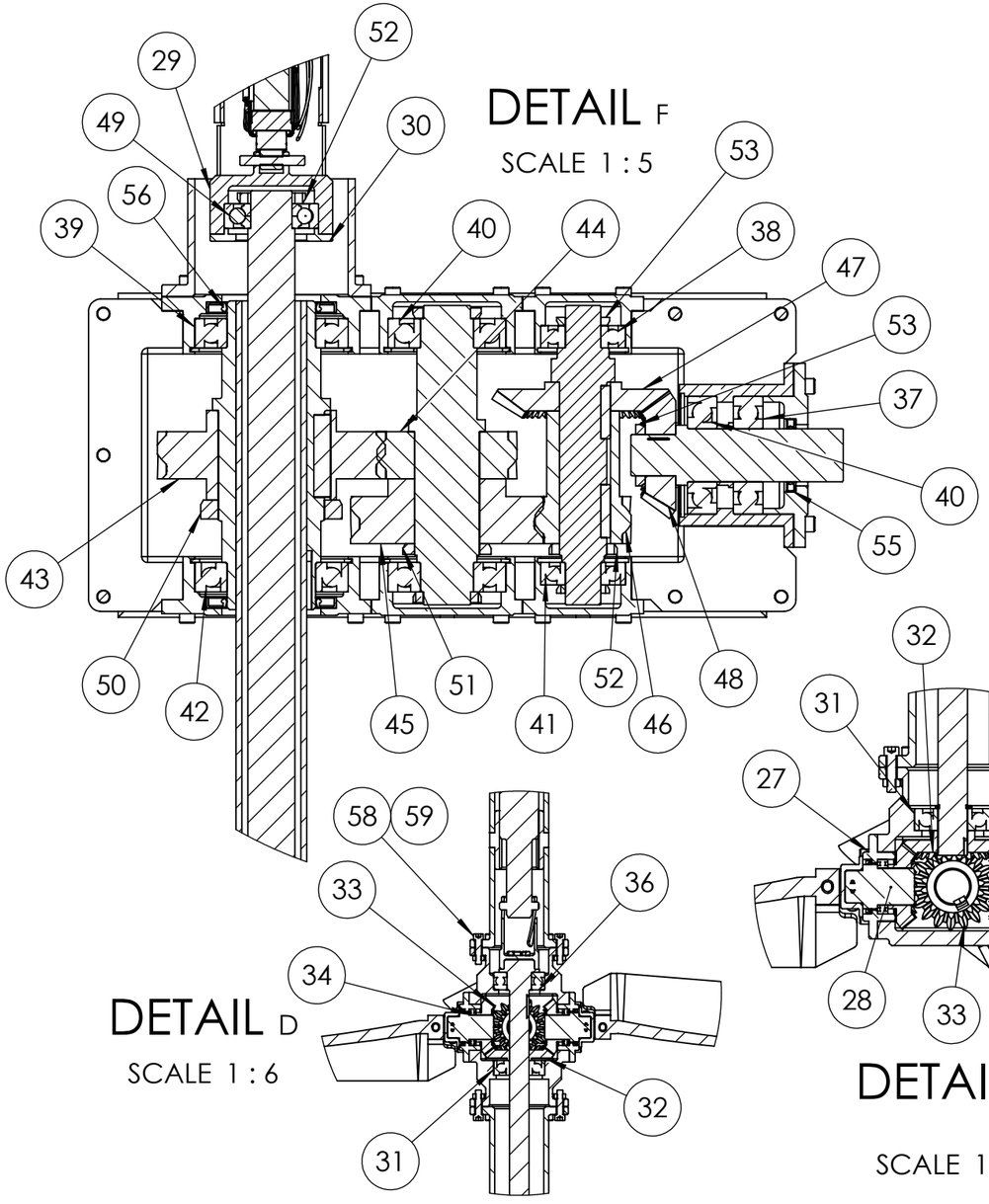
TITULO

CONJUNTO REDUCTOR Y PALETAS

	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL 1:15

PLANO 06
HOJA 01



59	Tuercas Hex M8	-	-	80
58	Tornillos de Fijacion Allen M8	-	-	102
57	Segger Varios	-	-	12
56	Reten SKF 75x110x10 CRW1	-	-	1
55	Reten SKF 45x62x8 CRWA1	-	-	1
54	Tuerca de Fijacion KN6	-	-	2
53	Tuerca de Fijacion KN7	-	-	1
52	Tuerca de Fijacion KN8	-	-	4
51	Tuerca de Fijacion KN11	-	-	1
50	Tuerca de Fijacion KN18	-	-	1
49	Rodamiento SKF QJ307 MA	-	-	1
48	Engranaje Conico 4M 25T	-	-	1
47	Engranaje Conico 4M 38T	-	-	1
46	Engranaje Helicoidal 2.5M 20T	-	-	1
45	Engranaje Helicoidal 2.5M 42T	-	-	1
44	Engranaje Helicoidal 2.5M 30T	-	-	1
43	Engranaje Helicoidal 2.5M 50T	-	-	1
42	Rodamiento SKF 7309BE Angular	-	-	2
41	Rodamiento SKF 7215BE Angular	-	-	1
40	Rodamiento SKF 7306BE Angular	-	-	1
39	Rodamiento SKF 6215 Radial	-	-	1
38	Rodamiento SKF 6306 Radial	-	-	1
37	Rodamiento SKF 6309 Radial	-	-	2
36	Rodamiento SKF 51305 Axial	-	-	1
35	Reten	-	-	8
34	Rodamiento SKF 61805 Radial	-	-	8
33	Engranaje Conico 3M 18T	-	-	8
32	Engranaje Conico 3M 24T	-	-	2
31	Rodamiento SKF 7304BE Angular	-	-	2
30	Acople Actuador Lineal 2	-	-	1
29	Acople Actuador Lineal 1	-	-	1
28	Eje de Paleta	-	-	8
27	Alojamiento de Paleta	-	-	8
POS	DENOMINACION	DESCRIPCION	PLANO	CANTIDAD

PROYECTO FINAL
ESCUELA INGENIERIA MECANICA
ROSARIO

TITULO
CONJUNTO REDUCTOR Y PALETAS

	FECHA	FIRMA	NOMBRE:
DIBUJO	20/08/2026		DE LA TORRE COSATTO
APROBO			

ESCALA GENERAL
1:15

PLANO 06
HOJA 02