

Diseño Integral de una Planta de Preparación de Granos de Soja para Extracción de Aceite

Bruno Sidoni

Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Escuela de Ingeniería Mecánica

Rosario, Argentina

2026

Diseño Integral de una Planta de Preparación de Granos de Soja para Extracción de Aceite

Bruno Sidoni

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

Ingeniero Mecánico

Director:

Ing. Guillermo Rodríguez

Universidad Nacional de Rosario

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Escuela de Ingeniería Mecánica

Rosario, Argentina

2026

A mis padres que me han apoyado durante todos estos años de estudio

Resumen

Este proyecto aborda el diseño mecánico integral de una planta de preparación de soja con capacidad de procesamiento de 10.000 tn/día de producto preparado. El diagnóstico identifica la necesidad de transformar mecánicamente el grano bruto (11.802 tn/día) en estructuras físicas óptimas llamadas collets que maximicen la transferencia de masa en la extracción por solvente. El objetivo es proyectar y validar una línea continua que integra prelimpieza, acondicionamiento térmico (Bean Heaters y Jet Dryers), quebrado multietapa, descascarado neumático, laminado y expansión. El diseño se fundamenta en un arreglo mecánico tridimensional que permite optimizar las áreas operativas, facilitar el mantenimiento y eliminar interferencias en redes de aspiración, aire comprimido, vapor, electicas entre otras. Los cálculos térmicos y mecánicos ratifican el dimensionamiento de transportadores de gran porte y sistemas de aspiración diseñados para mitigar el riesgo de atmósferas explosivas. Las conclusiones demuestran que, con el transcurso de las operaciones de proceso, se logra la concentración de la fase oleaginosa deseada, incrementándola del 16,1% al 19% mediante la eliminación selectiva de componentes no grasos, asegurando la máxima recuperación proteica y garantizando la sostenibilidad energética mediante la aislación térmica de equipos críticos.

Palabras clave: Preparación de soja, Extracción de aceite, Diseño mecánico, Balance térmico, Seguridad industrial, Modelado 3D, Flujo de masa.

Abstract

This project addresses the comprehensive mechanical design of a soybean preparation plant with a processing capacity of 10,000 tn/day of prepared product. The diagnosis identifies the necessity of mechanically transforming raw grain (11,802 t/day) into optimal physical structures called collets that maximize mass transfer during solvent extraction. The objective is to project and validate a continuous line that integrates pre-cleaning, thermal conditioning (Bean Heaters and Jet Dryers), multi-stage cracking, pneumatic dehulling, flaking, and expansion. The design is based on a three-dimensional mechanical arrangement that optimizes operational areas, facilitates maintenance, and eliminates interferences in aspiration, compressed air, steam, and electrical networks, among others. Thermal and mechanical calculations ratify the sizing of large-scale conveyors and aspiration systems designed to mitigate the risk of explosive atmospheres. The conclusions demonstrate that, through the sequence of process operations, the desired oil phase concentration is achieved, increasing it from 16.1% to 19% through the selective removal of non-fat components, ensuring maximum protein recovery and guaranteeing energy sustainability via thermal insulation of critical equipment.

Keywords: Soybean preparation, Oil extraction, Mechanical design, Thermal balance, Industrial safety, 3D modeling, Mass flow.

Resumen **4**

Abstract **5**

Introducción **7**

Capítulo 1: Descripción de los Equipos de Proceso **12**
Equipos de prelimpíeza 12
Cernidor rotativo 12
Multiaspirador prelimpieza 14
Zaranda Rotativa 16
Equipos de Preparación 18
Acondicionador Vertical de Granos (Bean heaters) 18
Secador de chorro de aire (Jet Dryer) 20
Quebrador Primera y Segunda Pasada 22
Multiaspirador 25
Laminador 28
Expansor (Expander) 31
Enfriador de Masa Expandida 34
Equipos de Transporte 37
Cintas transportadoras 37
Elevador de Cangilones 40
Transportes a Cadena 43

Capítulo 2: Diagramas y Cálculo de Flujos de Proceso **46**
Diagrama de Bloques Preparación (T03-DWP-00-103_A) 47
Diagramas de Flujo Preparación 50
Referencias (T03-DFP-00-100_A) 50
Prelimpieza (T03-DFP-PL-101_D) 50
Preparación AVS y JD (T03-DFP-PR-102_C) 52
Preparación QUE (T03-DFP-PR-103_A) 53
Preparación LAM y EXP (T03-DFP-PR-104_B) 54

Capítulo 3: Layout y Arreglo Dimensional Mecánico **55**
Layout General Preparación 55
Implantación de Equipos 55
Arreglo mecánico Tridimensional 57

Capítulo 4: Memoria de Cálculo **78**
Cintas trasportadoras 78
Cálculo de potencia motriz cinta transportadora CIN-318-ALS-5 79
Cálculo de potencia motriz cinta transportadora CIN-001-PLS-5 80
Elevadores de cangilones 81
Cálculo de potencia motriz noria NOR-001-PLS-3 82
Cálculo de potencia motriz noria NOR-005-PLS-3 82
Transportes a cadena 82
Cálculo de potencia motriz transporte a cadena TAC-006-PLS-3 84

Cálculo de potencia motriz transporte a cadena TAC-032-PR-3 84
Cálculo de potencia motriz transporte a cadena TAC-033-PR-3 85
Cálculo de potencia motriz transporte a cadena TAC-035-PR-3 86
Balance térmico en acondicionadores de granos (Bean Heaters) 86
Balance térmico en secadores de chorro de aire (Jet Dryers) 88
Cálculo de potencia motriz sistema de aire de Jet Dryers 89
Verificación del sistema de aspiración de laminadores 91
Verificación del sistema de aire multiaspiradores CC 94

Conclusiones y recomendaciones 96
Conclusiones 96
Optimización mediante el aumento de la concentración de la fase oleaginosa 96
Eficiencia en grandes flujos y recuperación proteica 96
Eficiencia térmica y aislamiento de equipos 97
El modelo digital 3D y la accesibilidad operativa 97
Seguridad operativa: Prevención de riesgos en sistemas de aspiración 98
Recomendaciones 98

Bibliografía 101

Anexo A: Diagramas de Flujos de Proceso 102

Anexo B: Layout e Implantación de Equipos 103

Introducción

Este proyecto aborda el diseño mecánico integral de una planta de preparación de granos de soja para la posterior extracción de su aceite.

La extracción de aceite de soja mediante solvente constituye un proceso industrial continuo destinado a separar la fracción lipídica contenida en el grano a través del contacto entre el material sólido y un solvente orgánico, en este casa hexano. En términos generales, el proceso consiste en poner en contacto hojuelas de soja, previamente acondicionadas y procesadas en la forma física llamada collets, con el solvente dentro de un extractor continuo, donde el aceite es disuelto y transferido hacia una fase líquida denominada miscela. Posteriormente, dicha miscela es sometida a etapas de evaporación y destilación para separar y recuperar el solvente, obteniéndose como producto aceite crudo de soja. Paralelamente, el sólido residual abandona el extractor con contenido remanente de solvente, por lo que debe atravesar una etapa de desolventizado y acondicionamiento térmico antes de ser utilizado como harina proteica.

La eficiencia global de este proceso depende principalmente de los fenómenos de transferencia de masa entre el sólido y el solvente (Shahidi) [1], los cuales se encuentran fuertemente condicionados por las características físicas y estructurales del material alimentado al extractor.

En este contexto, la preparación de soja representa una de las etapas más importantes dentro del proceso global de obtención de aceite, ya que tiene como objetivo transformar el grano proveniente de almacenamiento en un material con propiedades físicas adecuadas para favorecer la extracción. La soja en estado natural presenta características que resultan inadecuadas para su procesamiento directo, debido a que la geometría del grano, la presencia de impurezas, el contenido de cáscara y la estructura celular compacta dificultan la penetración uniforme del solvente y limitan los fenómenos de difusión necesarios para la remoción eficiente del aceite. Por esta razón, resulta necesario someter el material a una serie de operaciones mecánicas y térmicas orientadas a incrementar la superficie específica de contacto, mejorar la permeabilidad del lecho sólido y facilitar el acceso del solvente a las células oleaginosas.

La preparación de soja involucra una secuencia continua de operaciones mecánicas y térmicas destinadas a transformar el grano en un material con características físicas adecuadas para la extracción por solvente. El proceso comienza con una etapa de prelimpieza, cuya función es remover impurezas y materiales extraños que puedan afectar el funcionamiento de los equipos posteriores o generar inconvenientes operativos dentro de la planta. Posteriormente, el grano es sometido a un acondicionamiento térmico inicial mediante equipos de calentamiento por contraflujo de aire caliente, denominados en ingles bean heaters, donde se eleva gradualmente la temperatura del material con el objetivo de modificar sus propiedades físicas y prepararlo para las etapas subsiguientes de descascarado y reducción de tamaño.

A continuación, la soja atraviesa equipos conocidos como jet dryers, en los cuales el grano es sometido a un incremento térmico rápido que genera diferencias de contracción y dilatación entre la cáscara y el cotiledón. Este fenómeno debilita la adherencia entre ambas estructuras y favorece la posterior separación mecánica de la cáscara durante las etapas de quebrado y aspiración. Luego del acondicionamiento térmico, el material ingresa a los quebradores de primera pasada, cuya función principal es fracturar el grano

en partículas de menor tamaño, generalmente mitades, facilitando la liberación parcial de la cáscara y aumentando la eficiencia de separación posterior.

El material quebrado es conducido posteriormente hacia sistemas multiaspiradores, donde la separación de cáscara se realiza mediante corrientes de aire controladas aprovechando las diferencias de densidad y comportamiento aerodinámico entre las partículas de cotiledón y el material fibroso. La remoción progresiva de cáscara resulta fundamental debido a que la misma posee bajo contenido de aceite y afecta negativamente las condiciones de percolación dentro del extractor. Luego de esta primera separación, el material continúa hacia una segunda etapa de quebrado, donde las partículas son reducidas nuevamente de tamaño con el objetivo de aumentar la superficie específica y optimizar las condiciones de preparación previas al laminado. Posteriormente, una nueva etapa de aspiración permite continuar reduciendo el contenido residual de cáscara presente en el material.

Una vez acondicionado y descascarado, el producto ingresa a los laminadores, donde es sometido a compresión controlada mediante rodillos para obtener hojuelas de espesor reducido. Esta operación constituye una de las etapas más críticas de la preparación, dado que el espesor y la integridad estructural de las hojuelas condicionan directamente la eficiencia de extracción posterior. La reducción del espesor disminuye las distancias internas de difusión y facilita el acceso del solvente al aceite contenido en las células vegetales, aunque simultáneamente debe mantenerse una estructura mecánicamente estable que evite la generación excesiva de finos.

Finalmente, las hojuelas son alimentadas a equipos expansores (expanders), donde un tornillo helicoidal somete el material a compresión mecánica y calentamiento mediante inyección directa de vapor. En esta etapa se producen aumentos significativos de presión y temperatura que modifican la estructura física del material. Al abandonar el expander a través de una restricción de salida, la rápida caída de presión provoca la expansión instantánea del producto y la formación de estructuras porosas conocidas como collets. Esta transformación mejora considerablemente las condiciones de percolación del solvente durante la extracción, incrementando la permeabilidad del lecho, reduciendo la generación de finos y favoreciendo el drenaje de la miscela dentro del extractor.

Desde el punto de vista de la ingeniería mecánica, la preparación de soja involucra múltiples fenómenos asociados al transporte de materiales, reducción de tamaño, separación mecánica, transferencia de calor y deformación de sólidos granulares. El diseño y disposición de los equipos dentro de la planta deben contemplar aspectos operativos, energéticos y funcionales que permitan garantizar continuidad de proceso, uniformidad del producto preparado y estabilidad de operación. En este contexto, el análisis de layouts, arreglos mecánicos y secuencias operativas adquiere especial relevancia debido a su impacto directo sobre la capacidad de producción y la eficiencia global de la instalación industrial.

Los antecedentes teóricos y prácticos relacionados con la preparación de semillas oleaginosas muestran que una parte sustancial de la eficiencia extractiva depende de la calidad del acondicionamiento previo del material. Diversos desarrollos industriales han demostrado que mejoras en las etapas de calentamiento, descascarado, laminado y expansión permiten reducir el contenido residual de aceite en harina, disminuir el consumo específico de solvente y aumentar la capacidad efectiva de procesamiento de las plantas. De este modo, la etapa de preparación no constituye simplemente una operación auxiliar previa a la extracción, sino un componente central dentro del diseño y operación de plantas aceiteras modernas.

En función de lo expuesto, el presente trabajo se centra en el estudio de la etapa de preparación de soja previa a la extracción por solvente, analizando las operaciones involucradas, los equipos utilizados y las características técnicas requeridas por el material antes de ingresar al extractor. Se desarrollará una descripción general del proceso de preparación y de la función específica de cada etapa dentro de la planta, complementada mediante planos de disposición general y arreglos mecánicos correspondientes a los principales equipos utilizados industrialmente.

El alcance del trabajo comprende el análisis funcional y mecánico de las etapas de preparación de soja utilizadas en plantas industriales de extracción por solvente. No forman parte del presente estudio las etapas anteriores de almacenaje de grano entero, el diseño detallado del extractor, las etapas posteriores de refinación de aceite ni el análisis químico avanzado de productos y subproductos obtenidos durante el proceso.

Asimismo, si bien se consideran criterios generales de operación industrial, no se profundiza en aspectos normativos específicos relacionados con seguridad de procesos o clasificación de áreas explosivas que tendría que aplicarse según norma (NFPA) [9].

La importancia del presente estudio radica en que la preparación adecuada del grano constituye uno de los factores más determinantes para el correcto funcionamiento de una planta de extracción de aceite. La comprensión de las transformaciones físicas que experimenta la soja y de los principios de operación de los equipos involucrados permite optimizar el rendimiento extractivo, minimizar pérdidas operativas y mejorar las condiciones generales de funcionamiento del proceso industrial.

Capítulo 1: Descripción de los Equipos de Proceso

Equipos de prelimpíeza

Cernidor rotativo

La criba rotativa constituye la primera etapa del proceso de prelimpieza de soja previo al ingreso del grano a la línea de preparación térmico-mecánica. Su función principal consiste en realizar una separación inicial de impurezas gruesas y cuerpos extraños de dimensiones superiores al grano, protegiendo los equipos posteriores contra daños mecánicos, obstrucciones operativas y alteraciones en la uniformidad del proceso.

El equipo opera bajo el principio de clasificación mecánica por tamaño mediante un tambor cilíndrico rotativo provisto de superficies cribantes perforadas. El material ingresa al interior del cilindro a través de una boca de alimentación superior y es desplazado longitudinalmente por efecto combinado de la rotación controlada del conjunto y de la ligera inclinación estructural del equipo. Durante este recorrido, las partículas cuyo tamaño resulta inferior a las perforaciones del tamiz atraviesan la superficie cernidora y son recuperadas como producto útil, mientras que las impurezas sobredimensionadas continúan avanzando hasta la descarga final de rechazo.

El cuerpo principal incorpora un rotor central montado sobre eje tubular estructural, al cual se fijan radialmente los elementos de soporte de los paños cribantes intercambiables. El tamiz presenta un diámetro nominal de 1.310 mm, una longitud útil de cribado de 4.000 mm y está conformado por ocho paños desmontables construidos en chapa antidesgaste XAR 400 de 4 mm de espesor, provistos de perforaciones cuadradas de 20 x 20 mm, con paso de 26 mm y un área abierta aproximada del 59 %, configuración que asegura elevada capacidad de paso y adecuada eficiencia de separación para soja de uso industrial.

La rotación del conjunto se realiza mediante un motorreductor a engranajes de eje hueco, con potencia instalada de 15 kW y velocidad de salida de 17 rpm, condición que permite un desplazamiento suave del material, minimizando impactos y evitando daño mecánico

innecesario sobre el grano. Esta baja velocidad periférica favorece además una clasificación estable y reduce la generación de partículas finas por abrasión.

Desde el punto de vista funcional, la criba rotativa elimina principalmente cuerpos extraños gruesos tales como vainas residuales, restos vegetales, terrones, fragmentos de madera, materiales plásticos y otros contaminantes de dimensiones superiores al tamaño nominal del poroto. La remoción de estos elementos resulta esencial para evitar interferencias mecánicas en transportadores, acondicionadores térmicos, quebradores y laminadores, donde la presencia de partículas extrañas podría provocar atascamientos, desgaste prematuro o desajustes operativos.

El equipo incorpora una boca superior de aspiración destinada a su integración con sistemas neumáticos de limpieza complementaria, permitiendo la extracción simultánea de material liviano suspendido generado durante la alimentación. Asimismo, las zonas sometidas a mayor abrasión se encuentran protegidas mediante revestimientos cerámicos de alta alúmina y placas de sacrificio intercambiables, prolongando la vida útil del conjunto y facilitando tareas de mantenimiento preventivo.

El diseño contempla tapas superiores desmontables y múltiples puertas laterales de inspección con cierres rápidos, permitiendo acceso sencillo para limpieza interna, reemplazo de paños cribantes y verificación periódica del estado estructural del rotor y superficies de trabajo.

Desde una perspectiva operativa, la correcta eficiencia de separación depende principalmente del estado de conservación del tamiz, de la uniformidad de alimentación y de la velocidad de rotación del conjunto. Desgastes localizados, obturación parcial de perforaciones o sobrecarga de alimentación pueden reducir significativamente la capacidad de clasificación y comprometer la eficiencia global de la prelimpieza.

Dentro de la secuencia general de procesamiento, la criba rotativa representa una etapa de protección y acondicionamiento inicial indispensable. Su correcta operación garantiza que únicamente material adecuadamente dimensionado ingrese a las etapas posteriores de acondicionamiento térmico y preparación mecánica, contribuyendo a preservar la estabilidad operativa, prolongar la vida útil de los equipos aguas abajo y asegurar uniformidad en la calidad del producto procesado.

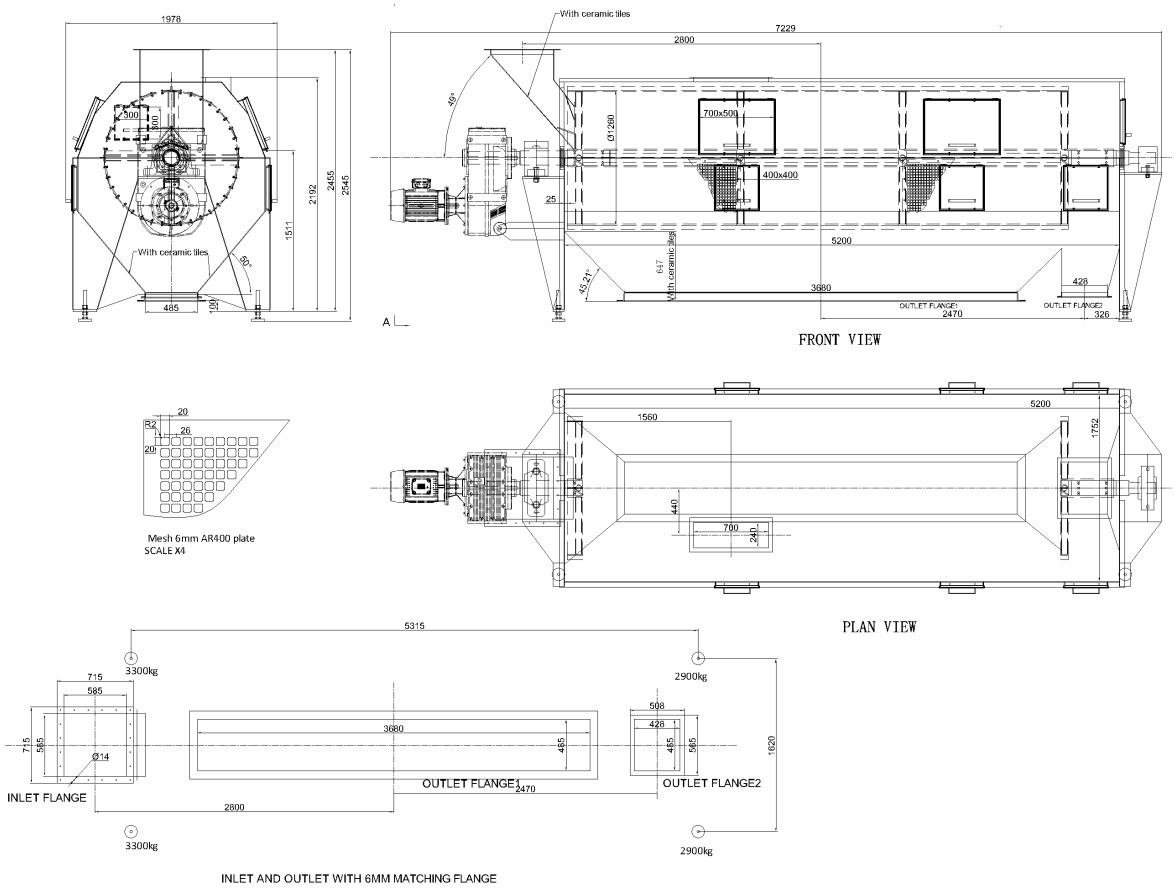


Figura 1-1: Cernidor rotativo

Multiaspirador prelimpieza

El multiaspirador constituye la segunda etapa del sistema de prelimpieza, ubicada inmediatamente después de los Cernidor rotativos. Su función principal consiste en remover impurezas livianas presentes en el flujo de soja, tales como polvo, partículas vegetales secas, fragmentos de cáscara suelta, material fibroso y otras fracciones de baja densidad aparente que no fueron retenidas durante la clasificación mecánica previa. El equipo opera mediante separación neumática por diferencia de velocidad terminal, aprovechando las distintas propiedades aerodinámicas existentes entre el grano útil y las impurezas livianas.

El principio de funcionamiento se basa en un sistema de múltiples etapas sucesivas de aspiración. El producto ingresa por gravedad en la parte superior del equipo y desciende internamente a través de una serie de planos inclinados alternados que generan un

movimiento en cascada controlado. Durante cada caída, una corriente ascendente de aire atraviesa el flujo de material, exponiendo repetidamente las partículas a un proceso de clasificación aerodinámica. En cada etapa, las fracciones de menor densidad efectiva son captadas por la corriente de aire y conducidas hacia la cámara de separación, mientras que los granos de soja, de mayor masa y velocidad terminal, continúan descendiendo gravitacionalmente hasta la descarga inferior.

La configuración de cuatro etapas de aspiración permite una limpieza progresiva de alta eficiencia, reduciendo pérdidas de producto útil y mejorando significativamente la selectividad de separación respecto de aspiradores convencionales de una sola pasada. El ajuste del caudal de aire puede realizarse durante operación mediante compuertas regulables, permitiendo adaptar la intensidad de clasificación a las características particulares del lote procesado.

Desde el punto de vista operativo, el multiaspirador cumple una función crítica dentro de la prelimpieza, ya que reduce la carga de polvo y material liviano que ingresaría a las etapas posteriores de acondicionamiento térmico. Esta remoción mejora la eficiencia global del proceso, disminuye riesgos de acumulación de finos en conductos y cámaras de calentamiento, reduce posibilidades de contaminación cruzada y contribuye a una mayor estabilidad operativa de los equipos de preparación.

Dentro de la secuencia general de procesamiento, el multiaspirador complementa la acción de la criba rotativa realizando una limpieza neumática fina del grano previamente clasificado de impurezas bastas.

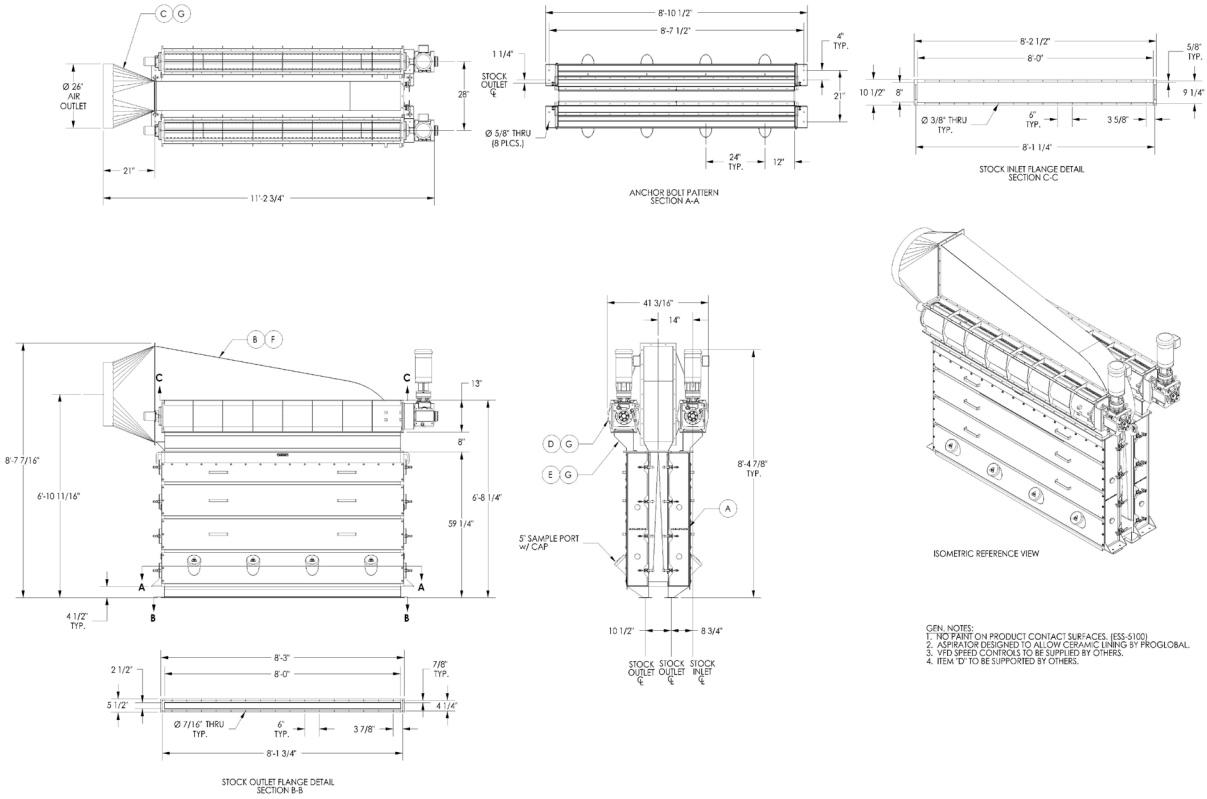


Figura 1-2: Multiaspirador prelimpieza

Zaranda Rotativa

La zaranda clasificadora constituye la etapa final del sistema de prelimpieza previo al ingreso del grano a la línea de preparación térmico-mecánica. En la configuración analizada, el equipo opera como una unidad de clasificación simple mediante una única superficie cribante, cuya función principal consiste en remover partículas sobredimensionadas, aglomerados de grano, cuerpos extraños gruesos e impurezas remanentes no eliminadas durante las etapas previas de cernido y aspiración neumática, garantizando así una alimentación homogénea y libre de material fuera de especificación hacia el sistema de acondicionamiento térmico posterior. El equipo ha sido diseñado para operar con una capacidad nominal de 3.000 toneladas por día base soja, compatible con líneas industriales continuas de alta producción.

El principio de funcionamiento se basa en el característico movimiento giratorio reciprocante horizontal, generado mediante un mecanismo excéntrico accionado por

motor eléctrico y transmisión por correas. Este movimiento evoluciona progresivamente a lo largo de la superficie mallada: en la zona inicial predomina una trayectoria circular que distribuye uniformemente el producto sobre toda la sección de trabajo; posteriormente se desarrolla un movimiento elíptico que favorece la estratificación natural del material; finalmente, en la zona terminal, la trayectoria adquiere carácter lineal, optimizando la separación entre partículas pasantes y retenidas. Este régimen cinemático permite elevada eficiencia de clasificación con baja agresión mecánica sobre el grano.

La máquina dispone de una superficie útil de cribado de 5,9 m², montada sobre un sistema suspendido mediante tensores flexibles que absorben solicitaciones dinámicas y garantizan uniformidad de movimiento. El producto alimentado avanza progresivamente sobre la malla mientras las partículas dimensionalmente aptas atraviesan la superficie y son descargadas como producto útil hacia la línea principal de preparación. Por su parte, las fracciones retenidas continúan hasta la descarga de rechazo, desde donde son derivadas hacia un sistema secundario de recuperación de material útil eventualmente adherido o apelmazado, operación que no forma parte del alcance del presente estudio.

El accionamiento principal se realiza mediante motor de 5 HP, calibrado para proporcionar un régimen estable de oscilación adecuado al procesamiento continuo de oleaginosas. La amplitud y frecuencia de operación han sido diseñadas para maximizar la eficiencia de separación, minimizando simultáneamente generación de finos y deterioro mecánico del grano durante su tránsito sobre la superficie activa.

Desde el punto de vista funcional, la operación de esta zaranda resulta esencial para eliminar aglomerados o partículas sobredimensionadas capaces de generar alimentación irregular en los acondicionadores térmicos posteriores. La presencia de estos materiales podría provocar heterogeneidades térmicas, diferencias en comportamiento mecánico durante quebrado y descascarado, así como inestabilidad operativa en las etapas subsiguientes de preparación.

Dentro de la secuencia general de prelimpieza, la zaranda complementa la acción de la criba rotativa inicial y del multiaspirador, actuando como una etapa final de verificación dimensional. Su correcta operación asegura que únicamente grano limpio, íntegro y dimensionalmente uniforme ingrese al sistema de acondicionamiento térmico, contribuyendo directamente a la estabilidad operativa.

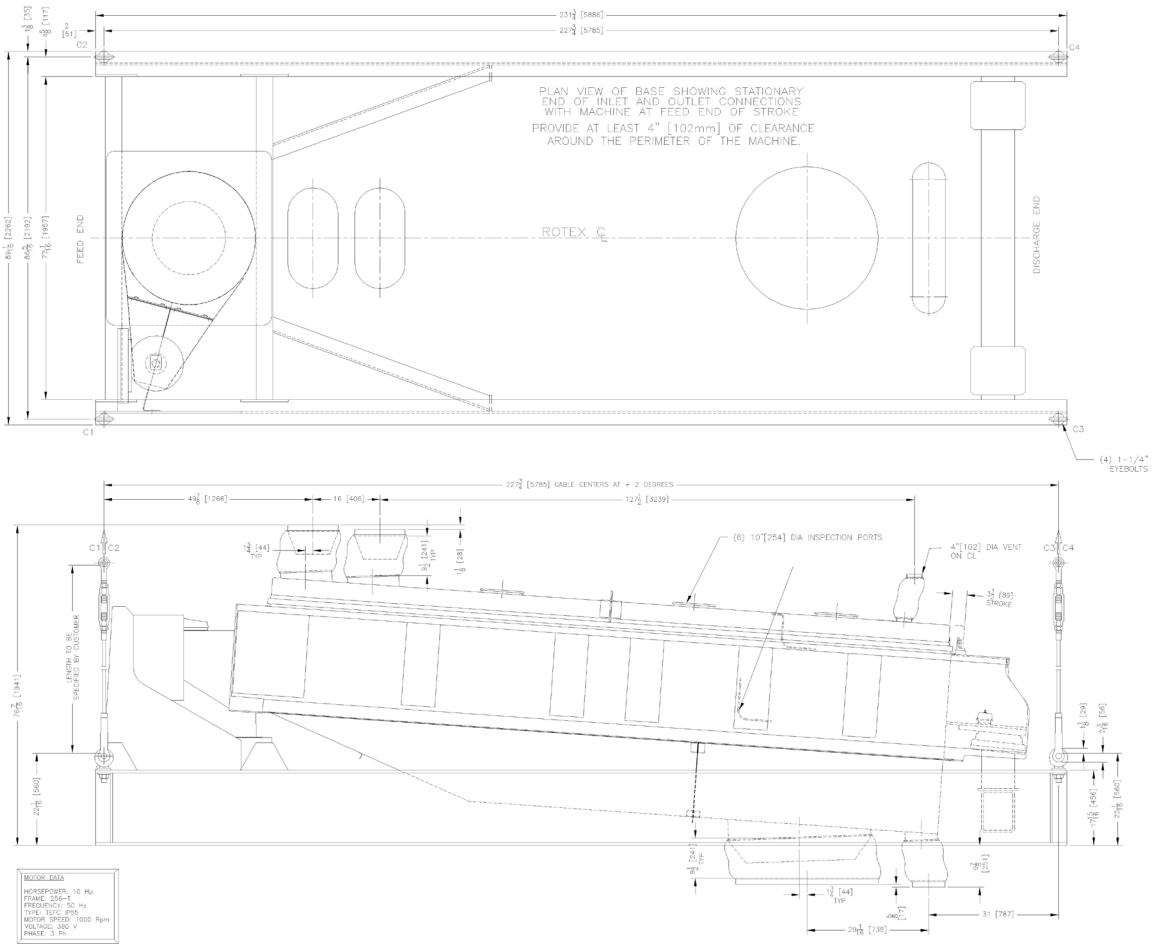


Figura 1-3: Zaranda rotativa

Equipos de Preparación

Acondicionador Vertical de Granos (Bean heaters)

El acondicionador vertical constituye la primera etapa de acondicionamiento térmico dentro del proceso de preparación de soja para extracción por solvente. Su función principal consiste en elevar de manera gradual y uniforme la temperatura del grano mediante transferencia indirecta de calor, modificando sus propiedades físicas y mecánicas para optimizar las etapas posteriores de descascarado, quebrado y laminado.

El equipo opera bajo un principio de calentamiento indirecto mediante vapor saturado de baja presión que circula por una serie de tubos elípticos de acero inoxidable dispuestos

en múltiples secciones superpuestas dentro de una carcasa vertical. El producto ingresa por gravedad en la parte superior del acondicionador y desciende lentamente a través de las distintas zonas de calentamiento, estableciendo un contacto prolongado con las superficies calefaccionadas. Esta configuración permite una transferencia térmica uniforme sobre toda la masa de grano, evitando gradientes abruptos de temperatura y reduciendo el riesgo de sobrecalentamiento localizado.

Una característica distintiva del diseño consiste en la disposición cruzada de los tubos calefactores entre secciones consecutivas. Esta geometría obliga al material a redistribuir continuamente su trayectoria de descenso, evitando zonas preferenciales de flujo y garantizando una exposición térmica homogénea para la totalidad del producto. De esta manera se eliminan puntos fríos y se logra un acondicionamiento volumétrico uniforme del grano.

Durante el calentamiento, el contenido lipídico interno experimenta una disminución progresiva de viscosidad, mientras que la estructura proteica y celular del cotiledón incrementa su plasticidad. Esta modificación estructural mejora la capacidad de deformación del grano durante las etapas mecánicas posteriores, especialmente en el quebrado y laminado. Simultáneamente, el aumento de temperatura favorece una redistribución interna de humedad que contribuye a uniformizar las propiedades mecánicas del material.

Desde el punto de vista físico, el principal efecto del acondicionamiento es la preparación termo-mecánica del grano. El calentamiento gradual reduce su fragilidad interna, aumenta la elasticidad del cotiledón y disminuye la resistencia a la deformación plástica. Como resultado, el grano responde de forma más controlada durante el pasaje por los quebradores, produciendo fracturas más limpias y uniformes. Esto resulta fundamental para mejorar la liberación posterior de cáscara y minimizar la generación de partículas finas que puedan afectar la eficiencia de separación aerodinámica.

Adicionalmente, el equipo incorpora un sistema de circulación forzada de aire templado a través del lecho de producto, cuya función es evitar fenómenos de condensación superficial y “bean sweating”, condición que podría generar aglomeraciones o adherencias no deseadas entre partículas. Este barrido de aire contribuye a mantener

condiciones térmicas estables y asegura que el acondicionamiento se produzca sin alteraciones superficiales perjudiciales para el proceso subsiguiente.

El tiempo de residencia dentro del acondicionador puede regularse mediante el control de velocidad del sistema de descarga oscilante ubicado en la base del equipo. Esta regulación permite ajustar con precisión la energía térmica transferida al producto en función de variables tales como humedad inicial, temperatura de ingreso, capacidad de procesamiento y requerimientos específicos de descascarado. De esta manera, el equipo actúa como un elemento de estabilización térmica del proceso global.

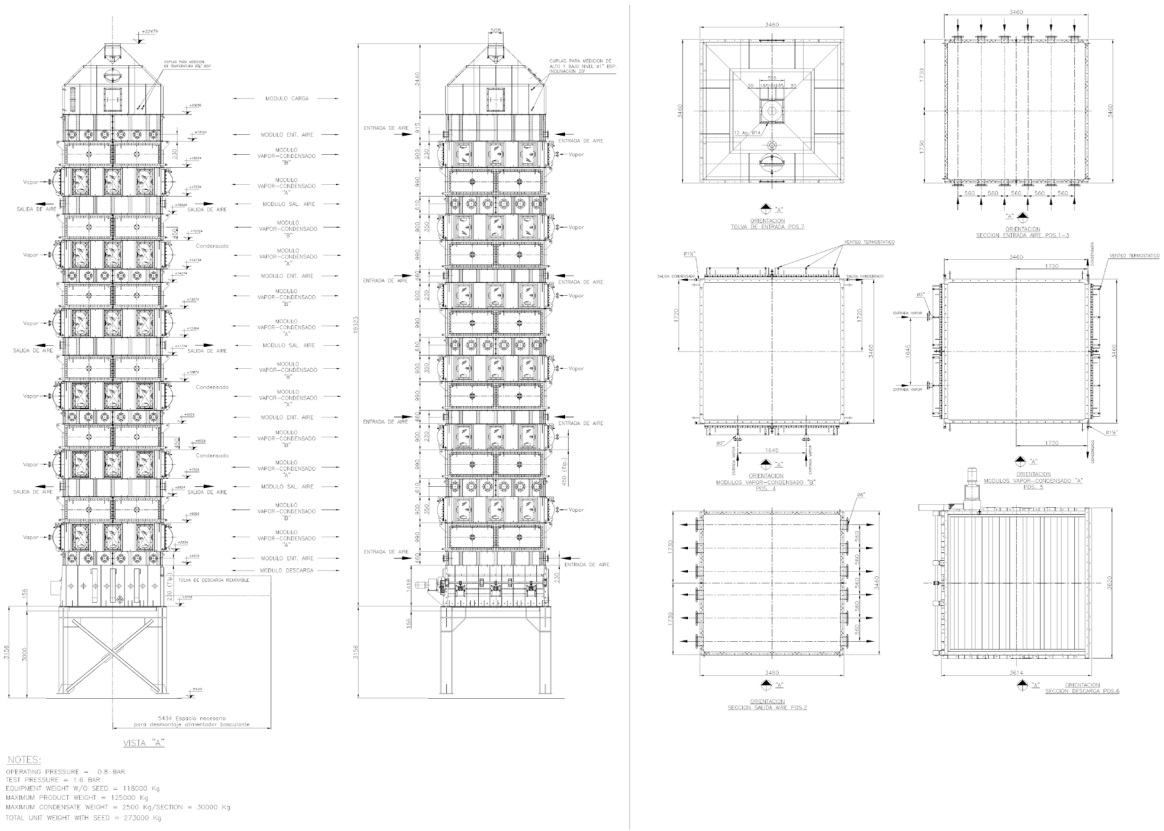


Figura 1-4: Acondicionador Vertical de Granos

Secador de chorro de aire (Jet Dryer)

El Jet Dryer opera como un sistema de acondicionamiento térmico rápido diseñado específicamente para el proceso de descascarado en caliente (hot dehulling). A diferencia de un secador convencional, su objetivo primordial no radica en la remoción masiva de

humedad, sino en la modificación diferencial de las propiedades físicas entre la cáscara y el cotiledón para optimizar la separación mecánica posterior.

Su principio de funcionamiento se basa en la transferencia de aire a alta temperatura a través de un lecho fluidizado de soja, el cual es transportado sobre una cinta metálica permeable. Para lograr un tratamiento efectivo, el sistema emplea una interacción de dos corrientes de aire complementarias: una de alta presión y bajo caudal, inyectada mediante boquillas inferiores, y otra de baja presión y alto caudal que circula a través de la totalidad de la cámara. Esta combinación técnica produce simultáneamente un calentamiento rápido de la superficie y un secado superficial controlado, generando un efecto de agitación o bubbling que resulta fundamental para garantizar una homogeneización térmica completa y el debilitamiento de la unión entre la cáscara y el cotiledón.

Desde una perspectiva mecánica, el fenómeno más relevante es la respuesta divergente de los componentes del grano ante el choque térmico y la pérdida de humedad superficial. Al ser sometida a estas condiciones, la cáscara se contrae y rigidiza con mayor rapidez que el interior del grano, originando tensiones diferenciales que provocan su desprendimiento parcial; en esencia, la cáscara se encoge y se suelta del grano. Cuando este acondicionamiento se ejecuta correctamente, la fibra se desprende posteriormente en fragmentos grandes de tipo egg shell pieces. Esta morfología es ideal para los sistemas de aspiración, ya que maximiza la eficiencia de la separación aerodinámica, minimiza la generación de finos y reduce drásticamente el arrastre de proteína junto con la fibra, elevando así el rendimiento general del descascarado.

Además de su función en la remoción de cáscara, el Jet Dryer acondiciona mecánicamente el cotiledón para las etapas críticas de quebrado y laminado. El grano abandona el equipo con una temperatura más elevada y una mayor maleabilidad, presentando una resistencia mecánica interna reducida y una humedad superficial controlada, aunque conservando su núcleo debidamente acondicionado. Estas condiciones optimizan la eficiencia del cracking, promueven la formación de partículas más uniformes y aseguran una liberación de cáscara superior que impacta directamente en la calidad final de la hojuela o flake.

Finalmente, el equipo integra un sistema de recirculación parcial de aire caliente asistido por ciclones y calentadores, lo cual permite un control riguroso de la humedad relativa y

una mejora sustancial en la eficiencia térmica y el consumo energético. En este esquema, el mantenimiento del estado de fluidización es clave para asegurar que la totalidad de los

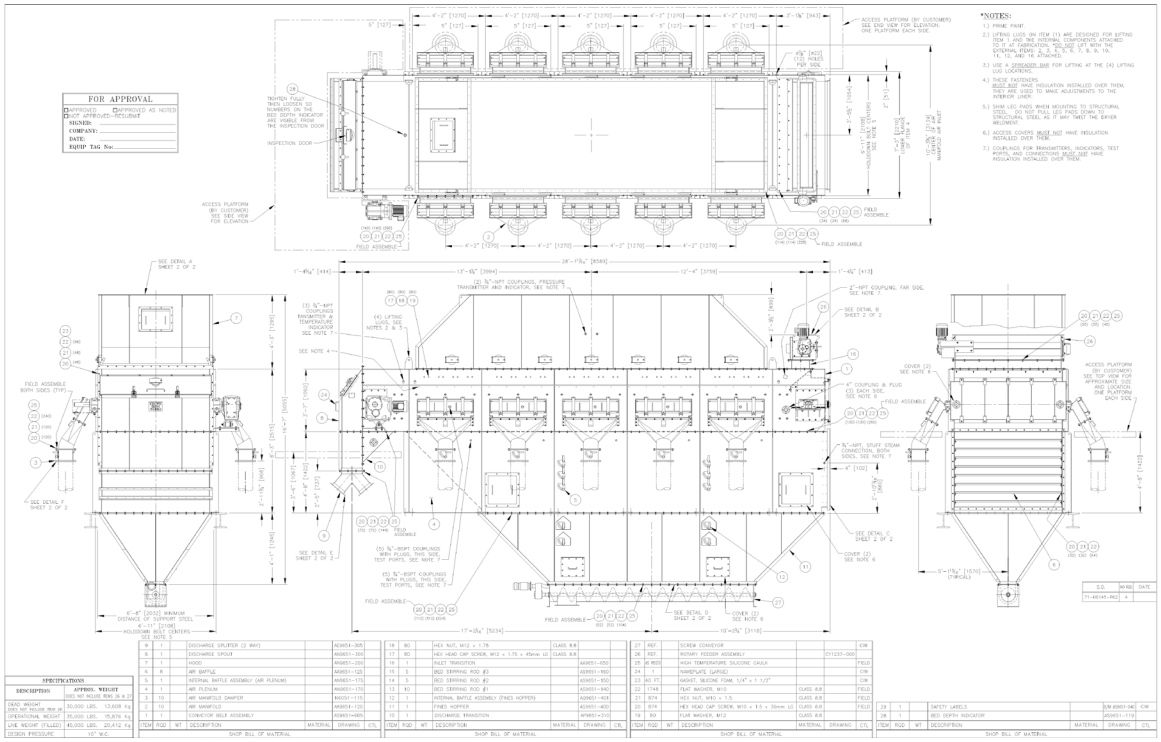


Figura 1-5: Secador de chorro de aire

Quebrador Primera y Segunda Pasada

El quebrador constituye una etapa fundamental dentro del proceso de preparación de soja, cuya función principal consiste en producir una fractura controlada del grano para adecuar su granulometría y favorecer la separación progresiva de la cáscara en etapas posteriores de aspiración. Su operación se basa en la acción mecánica ejercida por pares de rolos enfrentados que giran a velocidades diferenciales, generando esfuerzos combinados de compresión, corte y cizalladura sobre la semilla.

El equipo está conformado por dos etapas consecutivas de quebrado dispuestas verticalmente, a través de las cuales el producto circula por gravedad. En la primera etapa, el grano acondicionado térmicamente ingresa mediante un sistema alimentador

especialmente diseñado para distribuir el flujo de manera uniforme a lo largo del ancho de trabajo, formando una cortina continua de espesor constante. Esta uniformidad resulta esencial para asegurar un desgaste homogéneo de los rolos y garantizar una fractura consistente en toda la sección transversal del equipo. El sistema de alimentación incorpora además un conjunto magnético destinado a retener partículas ferromagnéticas que pudieran ingresar junto con la semilla, protegiendo de este modo las superficies activas de trabajo contra daños mecánicos severos.

La primera etapa de quebrado está constituida por un par de rolos estriados especialmente diseñados para fracturar la semilla en aproximadamente cuatro partes. Esta geometría de trabajo permite inducir la ruptura siguiendo los planos naturales de menor resistencia estructural del cotiledón, reduciendo la pulverización y favoreciendo la liberación inicial de fragmentos de cáscara. El objetivo no consiste en triturar el material, sino en producir una fractura limpia y controlada que preserve la integridad relativa de las partículas obtenidas.

Los rolos operan a velocidades periféricas diferentes, condición que genera una acción combinada de compresión y arrastre tangencial sobre el grano. Esta diferencia de velocidad induce esfuerzos cortantes adicionales que facilitan la ruptura progresiva sin necesidad de aplicar cargas excesivas de aplastamiento. La orientación opuesta de las estrías entre ambos rolos contribuye a mejorar el efecto de captura y fractura del producto durante el pasaje por la zona activa.

Cada rolo se encuentra montado sobre rodamientos oscilantes y alojado en cajas porta-cojinetes basculantes, permitiendo pequeños desplazamientos controlados que absorben irregularidades operativas y reducen solicitaciones dinámicas excesivas. La separación entre rolos es regulable mediante topes mecánicos ajustables, mientras que la presión de cierre es controlada mediante un sistema de resortes Belleville precargados. Este sistema permite mantener una luz operativa precisa y al mismo tiempo absorber desplazamientos instantáneos cuando ingresan cuerpos extraños o partículas sobredimensionadas, protegiendo la integridad mecánica del conjunto.

Luego de la primera fractura, el producto desciende gravitacionalmente hacia una segunda etapa de procesamiento. Esta etapa operar equipada con rolos recubiertos de goma, aplicando una acción de compresión más suave que favorece el desprendimiento

mecánico de la cáscara sin provocar trituración excesiva del cotiledón. Así, la máquina opera como quebrador-descascarador.

Desde el punto de vista físico, el efecto más importante producido por el quebrador consiste en exponer una mayor superficie interna del cotiledón y liberar parcialmente la cáscara adherida, facilitando la posterior separación neumática en los sistemas multiaspiradores. La combinación entre acondicionamiento térmico previo, fractura controlada y separación progresiva permite reducir significativamente el contenido de fibra presente en el material destinado a laminación.

Asimismo, la calidad del quebrado tiene una influencia directa sobre el desempeño de las etapas posteriores. Una fractura excesivamente agresiva genera finos que dificultan la separación aerodinámica y afectan negativamente la permeabilidad del material durante laminado y expansión. Por el contrario, una fractura insuficiente limita la liberación de cáscara y reduce la eficiencia de descascarado. Por esta razón, la regulación precisa de la luz entre rolos, la velocidad diferencial y la uniformidad de alimentación constituyen variables críticas de operación.

Desde una perspectiva funcional dentro de la línea de preparación, el quebrador AC1200 actúa como el vínculo mecánico entre el acondicionamiento térmico y la separación neumática. Su correcta operación permite transformar el grano calentado y estructuralmente preparado en una distribución granulométrica óptima para maximizar la eficiencia de remoción de cáscara y acondicionar adecuadamente el material para las etapas posteriores de laminado y expansión, contribuyendo directamente a la eficiencia global del proceso de extracción por solvente.

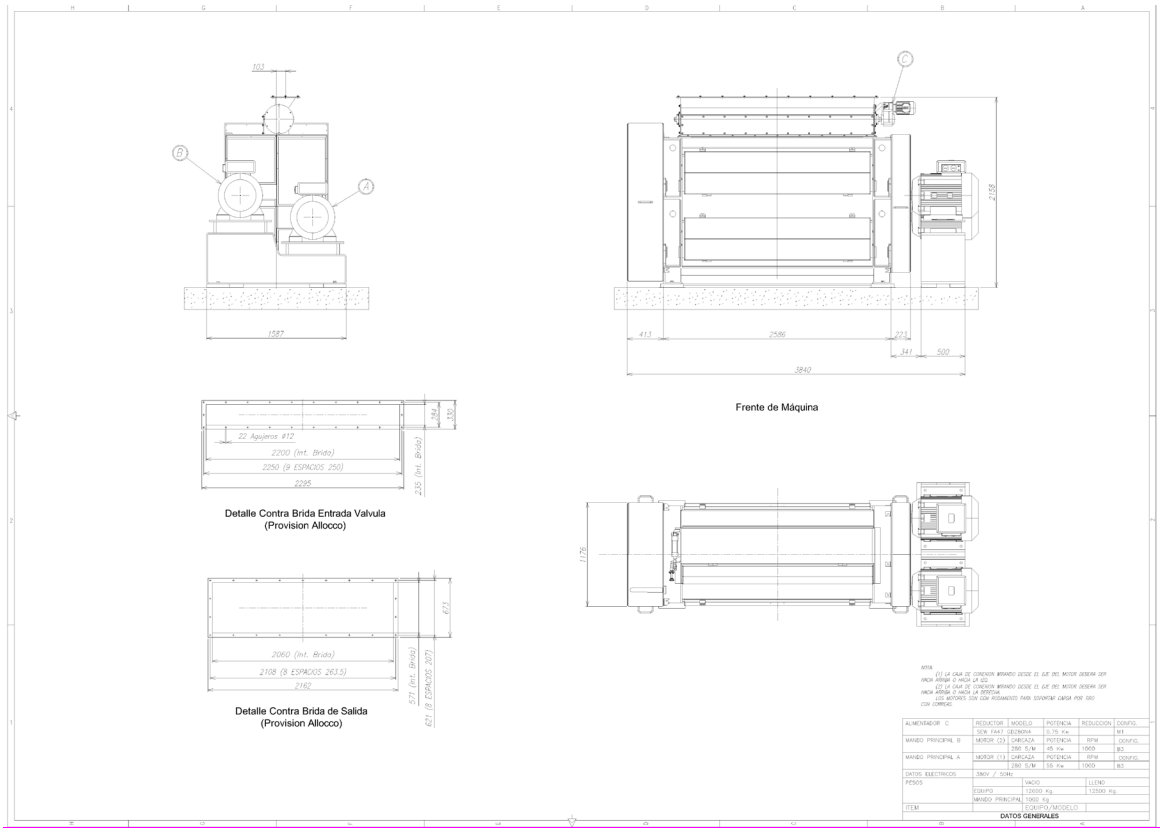


Figura 1-6: Quebrador primera y segunda pasada

Multiaspirador

Los sistemas multiaspiradores CD (Cascade Dryer) y CC (Cascade Cooler), constituyen etapas fundamentales dentro del proceso de descascarado y clasificación neumática de soja. Su función principal consiste en separar progresivamente la cáscara liberada del cotiledón mediante la acción combinada de flujo gravitacional en cascada y corrientes de aire en contracorriente, aprovechando las diferencias de densidad aparente, tamaño, forma y comportamiento aerodinámico entre ambas fracciones.

Estos equipos operan bajo un principio de separación dinámico en múltiples etapas, donde el material proveniente de los quebradores ingresa por la parte superior y desciende a través de una serie de bandejas o superficies escalonadas especialmente diseñadas para producir un flujo en cascada controlado. Durante este descenso, las partículas experimentan múltiples impactos y redistribuciones que favorecen la liberación

adicional de fragmentos de cáscara parcialmente adheridos al cotiledón. Simultáneamente, una corriente de aire ascendente circula en contracorriente a través del lecho dinámico, generando una clasificación neumática continua.

El fundamento físico de esta separación radica en las diferencias significativas entre las propiedades aerodinámicas de las partículas. Los fragmentos de cáscara presentan menor densidad aparente, mayor relación superficie-masa y menor velocidad terminal que las partículas de cotiledón, por lo que son arrastrados hacia las zonas superiores del equipo por la corriente ascendente de aire. En cambio, los fragmentos de cotiledón, de mayor densidad efectiva y comportamiento balístico predominante, continúan descendiendo gravitacionalmente hasta la descarga inferior.

El CC (Cascade Dryer) constituye la primera etapa de separación neumática posterior al quebrado inicial. En esta sección el producto conserva aún temperaturas relativamente elevadas provenientes de las etapas previas de acondicionamiento térmico y jet drying. El aire recirculado y calentado que circula en contracorriente no sólo permite la separación aerodinámica de la cáscara liberada, sino que además mantiene las condiciones térmicas necesarias para evitar condensación superficial y preservar la plasticidad estructural del cotiledón.

Durante el descenso en cascada dentro del CD, el impacto repetido entre partículas y superficies genera desprendimientos adicionales de cáscara debilitada térmicamente en etapas previas. Esta acción mecánica indirecta mejora significativamente la eficiencia global del descascarado sin necesidad de aplicar esfuerzos agresivos que pudieran producir pulverización excesiva o generación de finos.

Luego de esta primera clasificación, el material pesado (constituido principalmente por cotiledones parcialmente limpios) es conducido hacia la segunda etapa de quebrado, donde se realiza un refinamiento granulométrico adicional para exponer nuevas superficies y liberar restos de cáscara aún adheridos. Posteriormente, el producto ingresa al CC (Cascade Cooler).

El CC (Cascade Cooler) replica el mismo principio de separación por cascada y clasificación neumática, pero incorpora aire fresco o aire acondicionado térmicamente a menor temperatura. Esta reducción térmica tiene como objetivo acondicionar el producto

para las etapas posteriores de laminado, llevando el material a condiciones óptimas de temperatura y humedad para su deformación controlada en los rodillos laminadores.

Además del enfriamiento controlado, el CC completa la remoción de cáscara residual liberada durante el segundo quebrado. El flujo descendente en cascada genera nuevos eventos de impacto y redistribución de partículas, mientras la corriente ascendente remueve eficientemente las fracciones ligeras restantes. Como resultado, el producto descargado presenta una elevada pureza de cotiledón y condiciones físicas adecuadas para el proceso de laminado.

Desde el punto de vista mecánico, ambos equipos operan como sistemas de separación continua de alta eficiencia con mínima agresión estructural sobre el material. A diferencia de separadores basados exclusivamente en choque o fricción intensa, la acción gradual de cascada minimiza la generación de finos, preservando la integridad de las partículas útiles y reduciendo pérdidas de aceite asociadas al arrastre de cotiledón junto con la cáscara descartada.

El diseño de recirculación de aire en circuito cerrado empleado por los sistemas permite un elevado aprovechamiento energético, mejor control de temperatura y humedad relativa, y una reducción significativa de emisiones particuladas hacia el exterior. Esta característica resulta particularmente importante en plantas de gran capacidad, donde la estabilidad térmica del proceso influye directamente sobre la uniformidad de descascarado y la eficiencia operativa global.

Desde una perspectiva funcional dentro de la línea de preparación, los sistemas CD y CC constituyen el nexo entre la fractura mecánica controlada y la obtención final de un cotiledón limpio y homogéneo. Su correcta operación determina en gran medida la reducción efectiva del contenido de fibra del producto preparado, optimizando las condiciones posteriores de laminado, expansión y extracción por solvente.

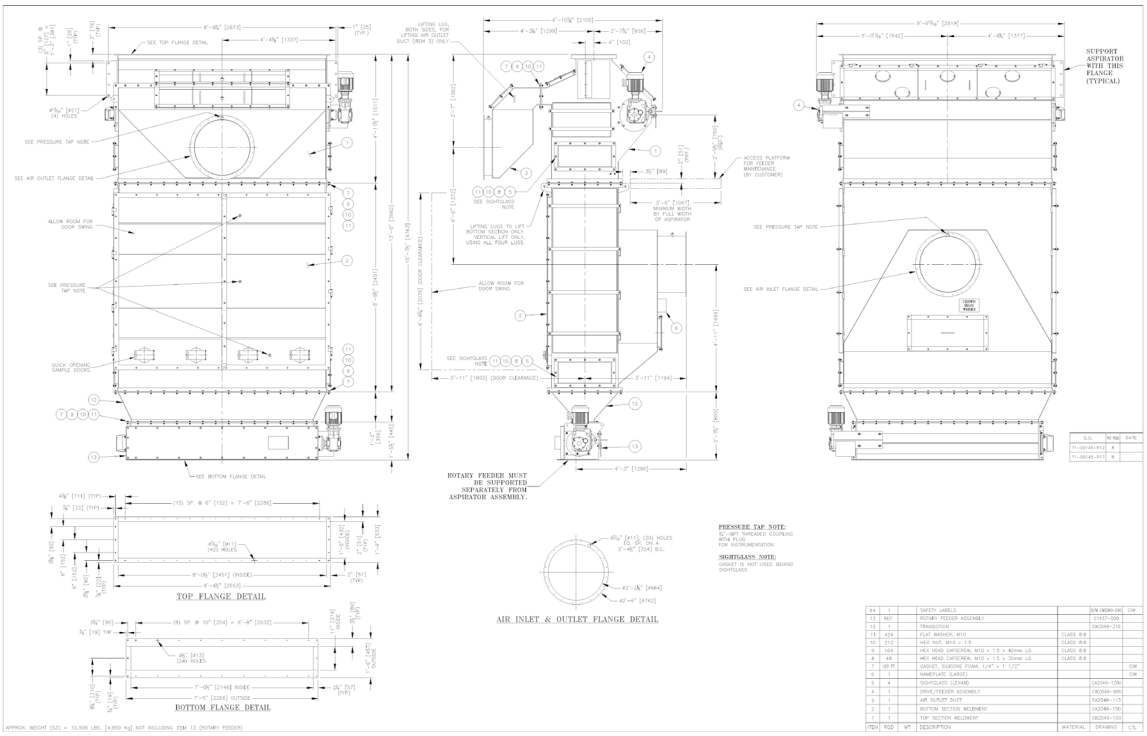


Figura 1-7: Multiaspirador

Laminador

El laminador constituye una de las etapas más críticas dentro del proceso de preparación de soja para extracción por solvente. Su función principal consiste en transformar las partículas de cotiledón previamente quebradas y descascaradas en hojuelas de pequeño espesor mediante deformación plástica controlada, generando una geometría óptima para maximizar la eficiencia de transferencia de masa durante la extracción posterior.

El equipo está constituido por dos rolos laminadores motrices montados sobre rodamientos oscilantes de alta capacidad. Uno de los rolos permanece fijo estructuralmente, mientras que el segundo se encuentra montado sobre cabezales móviles basculantes accionados mediante cilindros hidráulicos. Este sistema permite aplicar y mantener una presión precisa entre ambos cilindros, generando la fuerza necesaria para producir la deformación plástica del material durante su pasaje por la zona activa de laminación.

El accionamiento independiente de ambos rolos se realiza mediante motores eléctricos acoplados por transmisión de correas trapezoidales. La sincronización mecánica y el control preciso de velocidad garantizan una laminación uniforme y reducen fluctuaciones dinámicas que podrían afectar la calidad superficial de las hojuelas producidas. La rigidez estructural del bastidor y la precisión geométrica de montaje resultan esenciales para asegurar paralelismo entre superficies activas y estabilidad operativa durante funcionamiento continuo.

La alimentación del producto hacia la zona de trabajo se realiza mediante un sistema rotativo diseñado para producir una cortina continua y uniforme de partículas sobre toda la longitud útil de los rolos. Esta distribución homogénea resulta fundamental para asegurar desgaste parejo de las superficies laminadoras y obtener un espesor uniforme en la totalidad del ancho de procesamiento. El sistema incorpora regulación automática de caudal mediante sensores de nivel y, en configuraciones automatizadas, celdas de carga que permiten ajustar dinámicamente la velocidad de alimentación de acuerdo con las condiciones instantáneas de operación.

Durante el pasaje entre los rolos, las partículas experimentan elevadas tensiones compresivas que inducen una deformación plástica irreversible de la estructura celular del cotiledón. Este fenómeno produce una reducción significativa del espesor y un aumento considerable de la superficie específica expuesta. Simultáneamente, la ruptura parcial de paredes celulares facilita la posterior penetración del solvente y disminuye las resistencias internas a la difusión del aceite contenido en la matriz sólida.

Desde el punto de vista físico, la laminación constituye una etapa de acondicionamiento estructural orientada a reducir la distancia efectiva de transferencia de masa dentro del sólido. Cuanto menor sea el espesor final de la hojuela, menor será la longitud de difusión requerida para que el solvente alcance y disuelva la fracción lipídica intracelular. Sin embargo, una reducción excesiva puede comprometer la integridad mecánica del producto y favorecer la generación de finos, afectando negativamente la permeabilidad del lecho durante extracción.

Por esta razón, el parámetro operativo más crítico del equipo es la separación efectiva entre rolos. El sistema hidráulico permite ajustar con elevada precisión la presión aplicada, mientras que topes mecánicos calibrados definen la luz mínima admisible. Este

ajuste debe mantenerse dentro de tolerancias estrictas, dado que pequeñas variaciones pueden alterar significativamente el espesor final de laminado y, en consecuencia, la eficiencia extractiva global. El manual establece además controles periódicos de geometría superficial y rectificado programado para preservar tolerancias operativas del orden de centésimas de milímetro.

El equipo incorpora cuchillas rascadoras cargadas mediante resortes, cuya función consiste en mantener limpias las superficies activas de los rolos, evitando adherencias de material que puedan modificar localmente el espesor de laminación o deteriorar la calidad superficial del producto final. Este sistema asegura estabilidad dimensional durante operación continua y reduce irregularidades asociadas al ensuciamiento progresivo de las superficies metálicas.

La condición térmica del producto alimentado tiene una influencia decisiva sobre la calidad del laminado. El material proveniente de las etapas previas de acondicionamiento térmico y separación neumática presenta una plasticidad adecuada para deformarse sin fractura excesiva. Si la temperatura de ingreso resulta insuficiente, el material tiende a quebrarse de forma frágil, generando partículas finas y defectos estructurales. Por el contrario, temperaturas excesivas pueden provocar adherencias superficiales y alteraciones no deseadas en el comportamiento mecánico durante compresión.

Desde una perspectiva funcional dentro de la línea de preparación, el laminador constituye la transición entre las operaciones de reducción y clasificación mecánica, y las etapas finales de expansión y extracción. La calidad de laminado obtenida condiciona directamente la formación posterior de estructuras expandidas porosas en el expander y, en última instancia, la permeabilidad del lecho sólido dentro del extractor continuo.

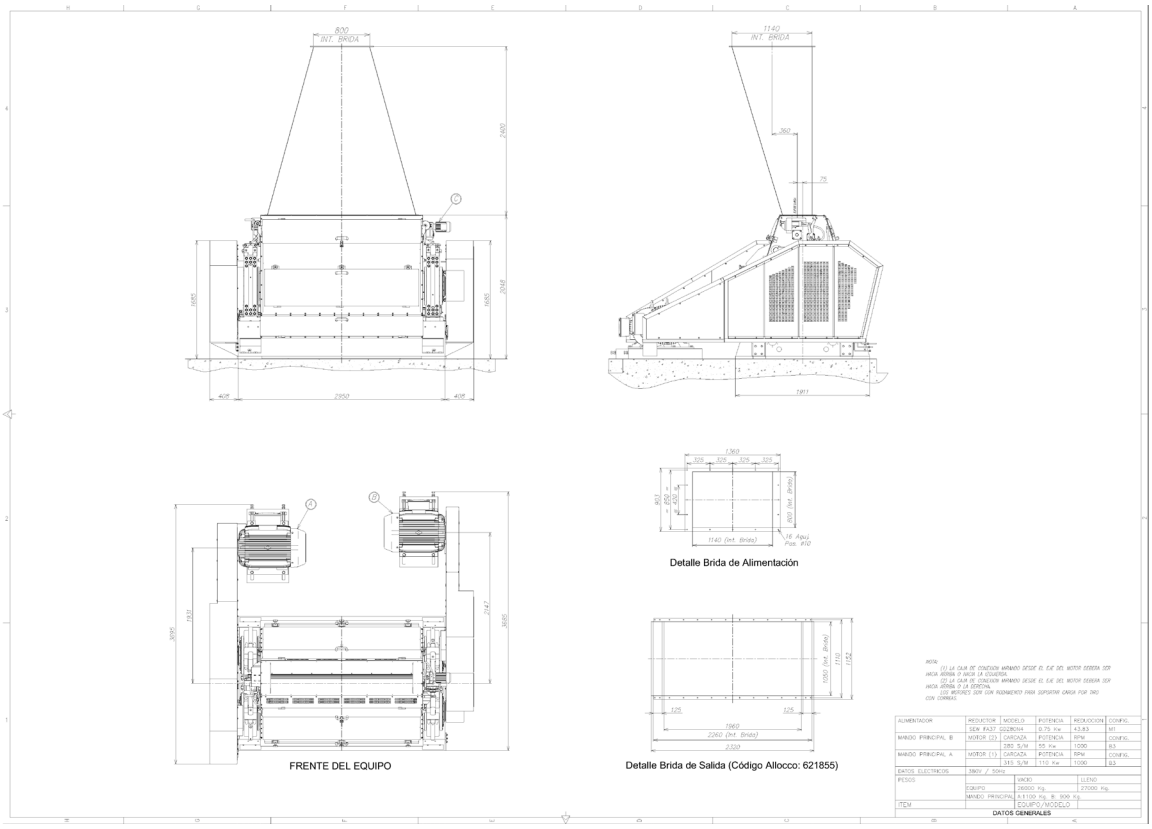


Figura 1-8: Laminador

Expansor (Expander)

El expansor constituye la etapa final de preparación mecánico-térmica previa al ingreso del material al extractor por solvente. Su función principal consiste en transformar las hojuelas laminadas en una estructura expandida de elevada porosidad, conocida industrialmente como collets, optimizando las condiciones físicas del lecho sólido para maximizar la eficiencia de percolación del solvente durante la extracción. El mismo tiene una capacidad nominal de 3.000 toneladas por día base soja, pertenece a la línea de alta capacidad desarrollada para operación continua en plantas industriales de gran escala.

El principio de funcionamiento del equipo se basa en un proceso de extrusión de alta presión y corto tiempo de residencia. El producto proveniente del laminador ingresa al cuerpo del expansor a través de un sistema de alimentación continua y es impulsado axialmente por un conjunto helicoidal montado sobre un eje central rotativo. A medida que

el material avanza longitudinalmente, la geometría progresiva de los elementos helicoidales reduce el volumen disponible, incrementando gradualmente la compactación mecánica y elevando la presión interna de la masa procesada. Simultáneamente, se inyecta vapor directo en zonas específicas del equipo, promoviendo un rápido incremento de temperatura y humedad controlada dentro de la matriz sólida.

El cuerpo principal del expansor está construido en secciones flangeadas provistas de camisas externas de calentamiento y revestimientos internos reemplazables de alta resistencia al desgaste. Esta configuración permite mantener estabilidad térmica durante arranque y operación continua, además de facilitar mantenimiento programado mediante sustitución localizada de componentes sometidos a abrasión severa. Los helicoides iniciales e intermedios cumplen función de transporte y compactación progresiva, mientras que los elementos finales, sometidos a tratamientos térmicos de endurecimiento superficial, generan el máximo esfuerzo de compresión inmediatamente antes de la descarga.

En la sección terminal del equipo se encuentra el sistema de expansión propiamente dicho, constituido por un cono dentado hidráulicamente regulado. Este mecanismo controla con elevada precisión la contrapresión interna ejercida sobre la masa procesada. La posición axial del cono es ajustada automáticamente mediante un circuito hidráulico que responde a variaciones instantáneas de carga, manteniendo condiciones estables de operación y estabilizando parámetros críticos como amperaje del motor principal, presión interna y consistencia estructural del producto expandido. Este sistema de autorregulación permite compensar variaciones de alimentación, humedad o características físicas del material sin necesidad de intervención continua del operador.

Desde el punto de vista físico, la expansión ocurre cuando el material comprimido abandona súbitamente la zona de alta presión al atravesar la restricción impuesta por el cono de descarga. La brusca caída de presión provoca la vaporización instantánea de parte de la humedad interna, generando una expansión volumétrica explosiva de la estructura. Como consecuencia, la masa compacta se transforma en una matriz tridimensional altamente porosa y de baja resistencia interna, descargándose en forma de cilindros continuos comúnmente denominados collets.

Este fenómeno produce modificaciones estructurales profundas sobre el material. La expansión provoca ruptura adicional de paredes celulares residuales, exposición de superficies lipídicas internas y generación de una red capilar interconectada que incrementa significativamente la permeabilidad del lecho durante extracción. La densidad aparente del producto expandido resulta superior a la de las hojuelas convencionales, permitiendo una mayor carga efectiva dentro del extractor continuo. Simultáneamente, la elevada porosidad interna favorece una penetración más uniforme del hexano y reduce sustancialmente la resistencia hidráulica al flujo de miscela.

La principal ventaja operativa derivada de esta transformación es el mejoramiento sustancial de las condiciones de percolación. Mientras que un lecho formado por hojuelas laminadas puede presentar compactación localizada y restricciones al drenaje de miscela, la estructura expandida mantiene canales internos estables que facilitan el flujo homogéneo del solvente a través de toda la sección transversal del extractor. Esto reduce fenómenos de canalización preferencial, mejora el lavado del sólido y disminuye el contenido residual de aceite en harina.

Adicionalmente, la expansión reduce significativamente la generación de finos durante manipulación y transporte posterior. La cohesión estructural adquirida por los collets mejora la integridad mecánica del producto, disminuyendo pérdidas por fragmentación y evitando obstrucciones asociadas a acumulación de partículas pulverulentas en zonas críticas del sistema extractivo.

Dentro de la secuencia global de preparación, el expansor constituye la culminación del acondicionamiento progresivo iniciado en el sistema térmico inicial, continuado mediante quebrado, descascarado y laminación. Mientras las etapas anteriores preparan geométrica y estructuralmente el cotiledón, el expansor realiza la transformación final que convierte una hojuela bidimensional relativamente compacta en una estructura volumétrica optimizada para extracción.

La correcta regulación de variables tales como presión hidráulica del cono, inyección de vapor, carga específica del tornillo y temperatura de operación resulta determinante para obtener un producto expandido homogéneo. Desviaciones operativas pueden generar estructuras subexpandidas, con baja permeabilidad, o sobreexpandidas, excesivamente

frágiles y susceptibles a fragmentación. Por esta razón, el expander representa uno de los equipos de mayor sensibilidad operativa dentro de la planta de preparación.

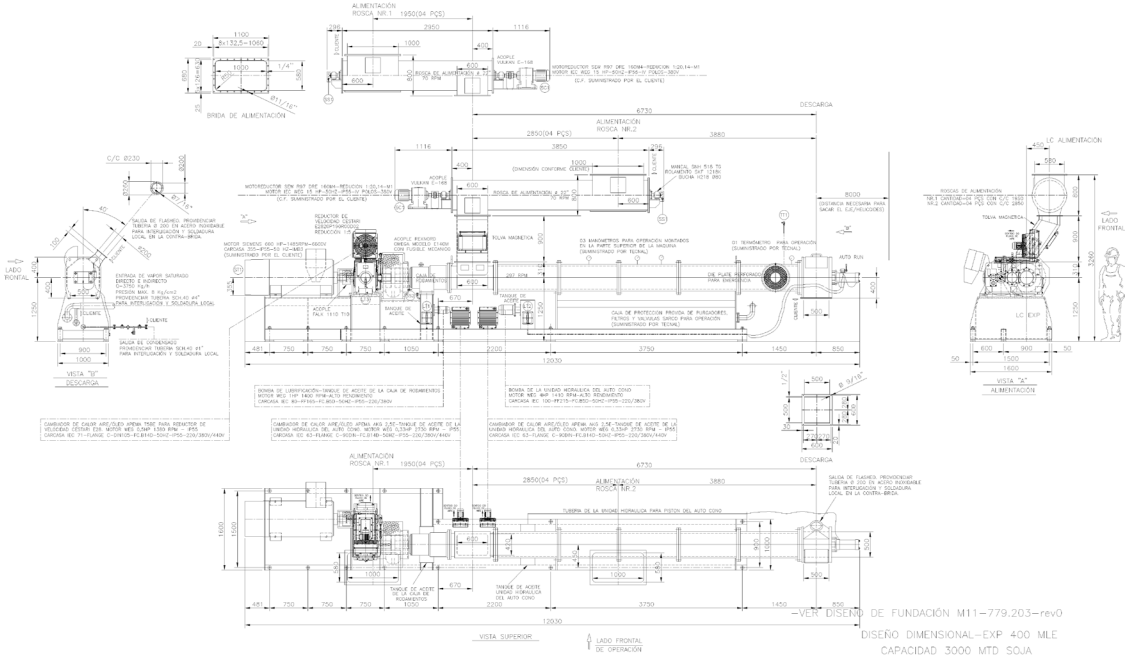


Figura 1-9: Expander

Enfriador de Masa Expandida

El secador-enfriador horizontal de masa expandida constituye la etapa final de acondicionamiento físico del material previo a su ingreso al extractor por solvente. El equipo está compuesto por once módulos de enfriamiento, ha sido diseñado para procesar masa expandida de soja proveniente directamente de los expansores, proporcionando las condiciones ideales de temperatura y humedad requeridas para garantizar estabilidad estructural, adecuada permeabilidad del lecho y máxima eficiencia durante la extracción posterior. Según especificaciones del fabricante, el sistema opera con una capacidad nominal de 208,3 t/h base soja, con un tiempo de residencia aproximado de 3,15 minutos, reduciendo la humedad del producto desde aproximadamente 15 % hasta valores cercanos al 10 %, y entregando una temperatura final comprendida entre 55 y 58 °C.

El principio de funcionamiento del equipo se basa en el desplazamiento horizontal continuo de una capa uniforme de masa expandida a través de módulos sucesivos de tratamiento térmico, mientras una corriente controlada de aire ambiente es insuflada y recirculada a través del lecho mediante ventiladores centrífugos y depresores distribuidos estratégicamente a lo largo del sistema. Esta circulación forzada establece un régimen intensivo de transferencia simultánea de calor y humedad entre el aire de proceso y el producto expandido, promoviendo enfriamiento progresivo y remoción controlada de humedad residual.

El transporte del material se realiza mediante corrientes transportadoras accionadas por un cabezal motriz equipado con reductor industrial y sistema de transmisión por engranajes y cadenas. El conjunto incorpora además un cabezal tensor con regulación mecánica independiente, cuya función consiste en mantener tensión uniforme en todos los circuitos de transporte y asegurar desplazamiento estable del producto a lo largo de la totalidad de los módulos. Esta configuración permite conservar una velocidad de avance perfectamente controlada y garantiza tiempos de residencia consistentes durante operación continua.

La altura de la capa de producto en proceso, del orden de 300 mm, es mantenida constante mediante un sistema electrónico automático sincronizado con sensores de carga instalados en la tolva de alimentación. Este sistema regula dinámicamente la velocidad de las corrientes transportadoras de acuerdo con la masa instantáneamente acumulada, preservando uniformidad de espesor en toda la sección transversal de procesamiento. La estabilidad geométrica del lecho resulta fundamental para garantizar distribución homogénea del flujo de aire y uniformidad de acondicionamiento térmico en la totalidad del producto procesado.

Desde el punto de vista físico, el primer fenómeno relevante producido dentro del equipo es la reabsorción interna del aceite libre superficial presente en la masa inmediatamente descargada por el expansor. El material debe ingresar mediante transporte lento, permitiendo que el aceite superficial liberado durante la expansión sea reincorporado progresivamente a la estructura porosa interna sin provocar rotura mecánica de los collets. Este fenómeno resulta crítico, ya que evita acumulaciones de aceite libre capaces de obstruir los pisos ranurados de los módulos y comprometer el flujo de aire de enfriamiento.

Simultáneamente, el enfriamiento progresivo produce estabilización mecánica de la estructura expandida. La masa descargada por el expander presenta elevada temperatura, plasticidad residual y presión interna parcialmente relajada. Durante su tránsito por el secador-enfriador, la disipación gradual de energía térmica consolida la red porosa generada durante la expansión, incrementando resistencia mecánica y reduciendo susceptibilidad a fractura durante transporte posterior.

La reducción controlada de humedad constituye un segundo efecto fundamental del proceso. El producto expandido abandona el expander con contenido hídrico elevado debido a la inyección directa de vapor utilizada durante la expansión. Si este exceso de humedad no fuese removido adecuadamente, el material presentaría plasticidad excesiva, tendencia a aglomeración y disminución de permeabilidad dentro del extractor. El secado parcial realizado en el enfriador reduce este contenido hasta niveles óptimos para extracción, preservando simultáneamente la integridad física de la estructura expandida.

Desde el punto de vista estructural, el diseño modular del equipo permite distribución escalonada y uniforme del tratamiento térmico. Cada módulo incorpora pisos ranurados de alta permeabilidad especialmente diseñados para facilitar paso homogéneo del aire a través del lecho, mientras raspadores de retorno aseguran limpieza continua de superficies y evitan acumulación de finos que pudieran restringir localmente el flujo aerodinámico. El mantenimiento periódico de estas superficies resulta esencial para preservar eficiencia térmica y estabilidad operativa del sistema.

El ajuste de compuertas (dampers) en los ventiladores permite adaptar el caudal de aire a las condiciones específicas de operación y a la distancia existente entre enfriador y extractor. Esta regulación permite entregar el material a temperaturas óptimas para cada instalación particular, evitando tanto sobre enfriamiento como ingreso excesivamente caliente al extractor, condiciones ambas capaces de afectar negativamente la eficiencia de extracción.

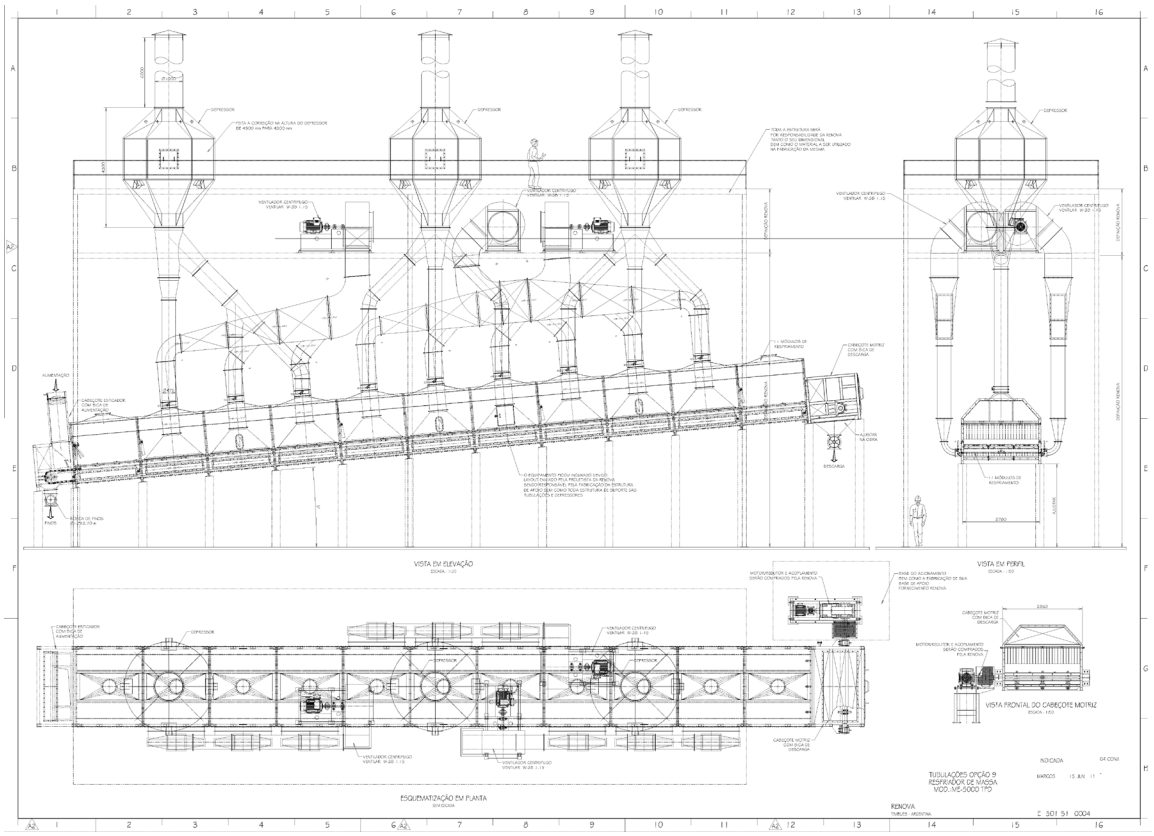


Figura 1-10: Enfriador de expandido

Equipos de Transporte

Cintas transportadoras

Las cintas transportadoras constituyen equipos de transporte fundamentales dentro del sistema general de manejo de soja, cumpliendo funciones de transferencia y vinculación logística entre las etapas de almacenamiento, regulación de alimentación y distribución hacia las líneas de proceso. Su función principal dentro del presente proyecto consiste en asegurar el transporte continuo, uniforme y controlado del material desde el sistema de almacenaje general hacia los silos diarios de operación, así como vincular estos últimos con los elevadores de cangilones que alimentan, respectivamente, las secciones de prelimpieza y preparación. A diferencia de lo que ocurre dentro de la línea interna de preparación, donde el movimiento del material se realiza mayoritariamente mediante

transportadores a cadena, las cintas cumplen aquí una función estratégica de alimentación y regulación de flujo entre sectores operativos de la planta.

Estructuralmente, cada transportador se compone de un bastidor construido en perfiles normalizados tipo UPN o IPN, dimensionados para soportar las cargas dinámicas y estáticas propias de operación continua sin deformaciones apreciables ni transmisión excesiva de vibraciones. Los largueros principales se encuentran modulados en tramos estructurales normalizados, rigidizados mediante arriostramientos que garantizan estabilidad geométrica y correcta alineación del conjunto durante servicio prolongado.

El transporte del producto se realiza mediante una banda multicapa tipo EP, fabricada con carcasa de poliéster y nylon de elevada resistencia mecánica, apta para soportar solicitaciones de tracción, fatiga cíclica y exposición prolongada al transporte de oleaginosas. El recubrimiento presenta propiedades antiestáticas, ignífugas, resistentes a ácidos grasos y antiadherentes, asegurando operación segura y elevada durabilidad bajo régimen industrial continuo.

El accionamiento principal está compuesto por motor eléctrico, reductor y acoplamientos montados sobre bastidor rigidizado, alineados mediante procedimiento láser para minimizar solicitaciones mecánicas parásitas y desgaste prematuro. La tensión operativa de la banda es mantenida mediante sistemas automáticos de contrapeso gravitacional, permitiendo compensar elongaciones naturales de servicio y garantizar adherencia constante sobre el tambor motriz. El sistema incorpora además dispositivos de seguridad para detección de máximo estiramiento y prevención de fallas asociadas a pérdida de tensión.

El soporte de la banda se realiza mediante estaciones portarodillos diseñadas según especificaciones (CEMA) [2] para servicio pesado. En el tramo superior se emplean estaciones de tres rodillos en artesa de 45°, optimizando la estabilidad del flujo transportado y favoreciendo el autocentrado del producto. Las zonas de carga incorporan separación reducida entre estaciones para amortiguar impactos, mientras que estaciones autocentrantes distribuidas periódicamente corrigen automáticamente posibles desalineaciones durante operación continua.

En los puntos de transferencia, las cintas disponen de guías cerradas de carga, diseñadas para centrar el flujo de material, minimizar derrames laterales y reducir dispersión de polvo. Estas estructuras incorporan revestimientos cerámicos de alta resistencia al desgaste en zonas críticas, puertas de inspección herméticas y previsiones para conexión a sistemas neumáticos de aspiración, garantizando condiciones adecuadas de limpieza y mantenimiento.

La limpieza permanente de la banda se asegura mediante rascadores primarios y secundarios de elastómero segmentado, complementados con sistemas de limpieza del ramal inferior destinados a evitar acumulación de material residual y reducir desgaste localizado.

Desde el punto de vista operativo, estas cintas cumplen una función crítica de regulación y continuidad de abastecimiento. La transferencia desde almacenamiento general hacia los silos diarios permite desacoplar variaciones del sistema logístico externo respecto del consumo instantáneo del proceso, mientras que la alimentación controlada desde dichos silos hacia los elevadores de cangilones asegura suministro estable y uniforme hacia las etapas de prelimpieza y preparación. Dentro del esquema general del proceso, estos equipos constituyen el nexo funcional entre almacenamiento y operación continua, garantizando disponibilidad permanente de materia prima y contribuyendo directamente a la estabilidad global del sistema.

Como estándar constructivo para toda la instalación, todos los cabezales de descarga, tolvas de recepción, pantalones de distribución y ductos de descarga de material, aunque estructuralmente son de acero al carbono, cuentan con un revestimiento interior de material antidesgaste (como placas de cerámica de alta alúmina o chapas de sacrificio XAR 400), asegurando la integridad de los equipos y aumentado su resistencia al desgaste.

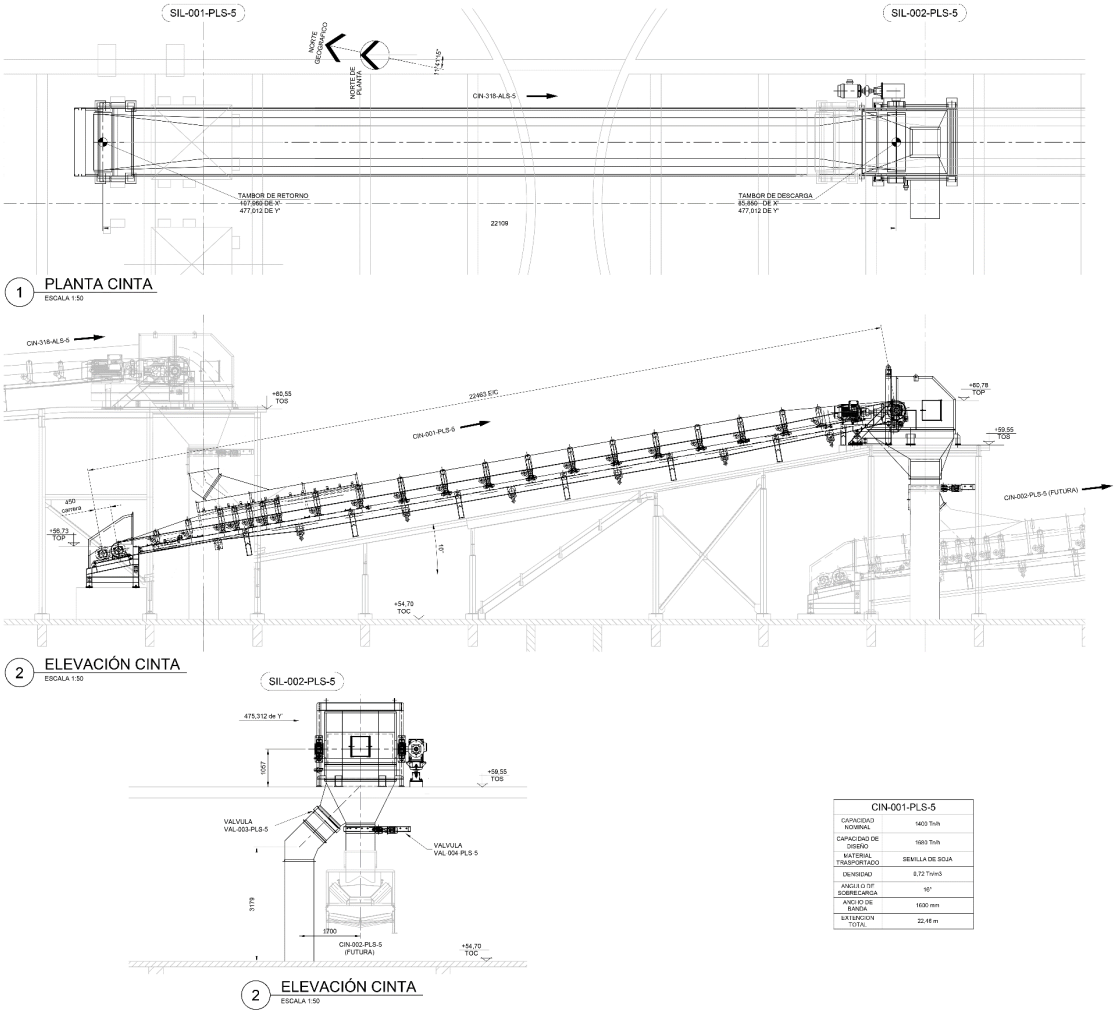


Figura 1-11: Cinta transportadora tipica

Elevador de Cangilones

Los elevadores a cangilones constituyen equipos fundamentales dentro del sistema de transporte vertical de material de la planta, cumpliendo la función de elevar el grano entre distintos niveles operativos de manera continua, segura y controlada. Dentro del presente proyecto se dispone de dos unidades principales: la primera vincula los silos diarios con la etapa de prelimpieza, mientras que la segunda transfiere el material limpio desde los silos intermedios hacia la línea de preparación térmico-mecánica. Ambos equipos cumplen una función crítica de alimentación vertical, asegurando continuidad operativa.

El principio de funcionamiento se basa en una banda continua cerrada sobre sí misma, equipada con cangilones plásticos inyectados de alta resistencia mecánica, fijados equidistantemente sobre su superficie. Durante la operación, la banda se desplaza sobre una polea motriz superior y una polea tensora inferior, transportando el producto verticalmente desde la tolva de carga ubicada en el cabezal tensor hasta la descarga gravitacional en el cabezal motriz superior. La descarga se produce por efecto centrífugo generado durante el cambio de trayectoria del material sobre la polea motriz, permitiendo una transferencia eficiente hacia los conductos de descarga posteriores.

La banda transportadora es del tipo EP (poliéster-nylon) de tres telas como mínimo, diseñada para servicio pesado y provista de propiedades antiestáticas, ignífugas, resistentes a ácidos grasos y con comportamiento antiadherente, características indispensables para el transporte seguro de oleaginosas en ambientes industriales de alta exigencia. El diseño contempla un único empalme, condición que reduce puntos potenciales de falla y mejora confiabilidad operativa a largo plazo.

El cabezal motriz está construido en chapa y perfiles de acero al carbono SAE 1010, con refuerzos estructurales y revestimientos internos cerámicos de alúmina en zonas sometidas a desgaste por impacto y fricción del material. Su diseño modular desmontable facilita inspección interna, mantenimiento y extracción de componentes sin desmontajes estructurales mayores. Asimismo, incorpora puertas laterales de inspección y conexiones previstas para sistemas de aspiración de polvo y sensores de alto nivel, permitiendo operación segura y supervisión permanente del proceso.

El cabezal tensor inferior presenta construcción reforzada similar, incorporando sistema de tensado mecánico por tornillo, diseñado para compensar elongaciones naturales de servicio y mantener tensión constante sobre la banda. Este sistema resulta esencial para garantizar correcto centrado, evitar patinamientos sobre la polea motriz y preservar estabilidad geométrica del conjunto durante operación continua. El cabezal incluye además bocas de inspección y acceso para limpieza y descompresión manual en caso de atoramiento accidental.

Las poleas motriz y tensora poseen diámetro mínimo de 600 mm, dimensionado para asegurar curvatura compatible con la banda y minimizar fatiga estructural. La polea motriz incorpora recubrimiento de goma ranurada tipo doble Chevron, mejorando adherencia y

reduciendo riesgo de deslizamiento bajo condiciones de carga elevada. Ambas poleas son balanceadas estática y dinámicamente, y montadas sobre ejes de acero SAE 4140 bonificado. Estos ejes de las poleas y la selección de rodamientos se dimensionan siguiendo criterios de fatiga y deflexión para garantizar una vida útil prolongada bajo servicio continuo (Shigley) [3].

Los tramos intermedios están conformados por módulos autoportantes de longitud máxima de 2 m, fabricados en chapa plegada rigidizada y ensamblados mediante bridas herméticas que impiden pérdidas de polvo y aseguran estanqueidad frente al ingreso de humedad. El diseño contempla puertas de inspección estratégicamente ubicadas para facilitar recambio de cangilones, inspección visual y mantenimiento preventivo del sistema.

El accionamiento principal está compuesto por motor eléctrico, reductor y acoplamientos elásticos montados sobre bastidor rigidizado con alineación láser, minimizando solicitaciones mecánicas parásitas y prolongando la vida útil de rodamientos y elementos de transmisión. Los rodamientos utilizados corresponden a la serie SKF 22000, montados sobre cajas bipartidas serie SNL, especialmente seleccionadas para soportar cargas radiales elevadas y facilitar mantenimiento.

Desde el punto de vista operativo, ambos elevadores cumplen una función esencial de transferencia vertical y regulación de continuidad entre etapas funcionalmente desacopladas del proceso. El primero asegura alimentación estable hacia prelimpieza a partir del almacenamiento diario, mientras que el segundo vincula el sistema de almacenamiento intermedio de grano limpio con la línea de preparación, garantizando suministro uniforme y evitando interrupciones en el acondicionamiento térmico y procesamiento mecánico posterior.

La confiabilidad de estos equipos resulta determinante para la estabilidad global de la planta, razón por la cual se prevé instrumentación para detección de cero velocidad, desalineación de banda y alto nivel en descarga, además de protecciones mecánicas y dispositivos de seguridad diseñados conforme recomendaciones NFPA [9] para mitigación de riesgos asociados al manejo industrial de polvos combustibles.

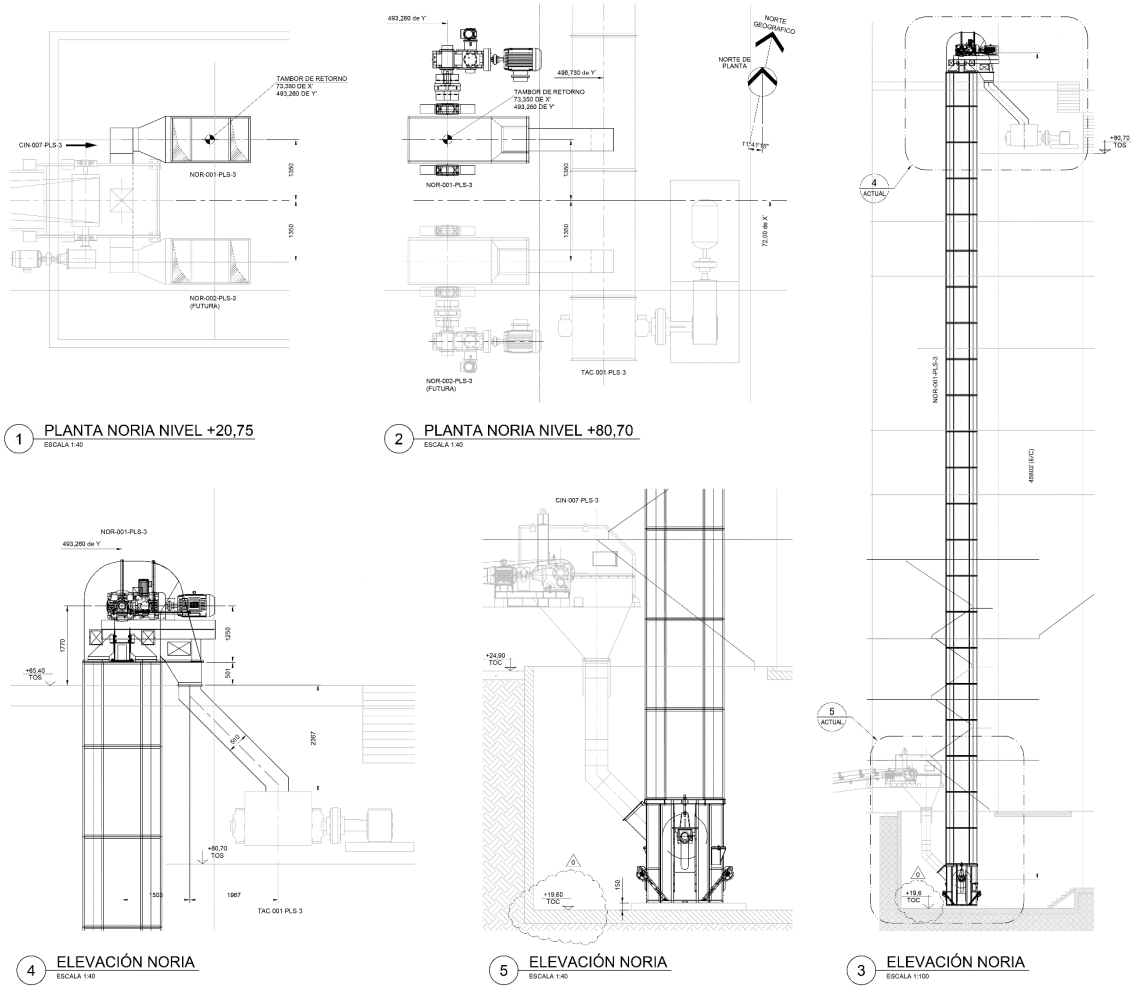


Figura 1-12: Elevador de cangilones típico

Transportes a Cadena

Los transportadores a cadena constituyen el principal sistema de transferencia horizontal e inclinada de material dentro de la línea de preparación de soja, siendo responsables del desplazamiento continuo del producto entre las distintas etapas de acondicionamiento térmico, quebrado, separación neumática, laminación, expansión y enfriamiento final previo al ingreso a extracción. Su utilización responde a la necesidad de transportar grandes volúmenes de material de manera controlada, con mínima degradación física del producto y elevada confiabilidad operativa bajo régimen industrial continuo.

El principio de funcionamiento se basa en el arrastre mecánico del material mediante una cadena de eslabones de acero de alta resistencia, provista de paletas transportadoras fijadas a intervalos regulares. Estas paletas desplazan el producto a lo largo de una carcasa cerrada, venciendo la fricción interna del material y permitiendo su traslado uniforme incluso en trayectorias inclinadas moderadas. Este sistema resulta particularmente adecuado para el procesamiento de oleaginosas, ya que combina elevada capacidad de transporte con baja velocidad lineal, minimizando fractura del grano, generación de finos y segregación indeseada del producto durante su recorrido.

La carcasa estructural está construida en chapa plegada reforzada y rigidizada mediante perfiles normalizados, formando módulos bridados que aseguran estanqueidad mecánica y facilidad de montaje. Su diseño cerrado evita pérdidas de material, reduce dispersión de polvo y protege el producto frente a contaminación externa, condición indispensable en instalaciones de procesamiento continuo de alta capacidad. Las uniones atornilladas permiten desmontaje parcial para tareas de inspección, limpieza y mantenimiento correctivo.

El sistema transportador incorpora una cadena de arrastre forjada de paso industrial, especialmente dimensionada para servicio pesado y elevada resistencia a fatiga cíclica. Los elementos de arrastre presentan geometría diseñada para optimizar el desplazamiento del producto y minimizar turbulencias internas, reduciendo esfuerzos innecesarios sobre la cadena y mejorando la eficiencia energética del conjunto. El retorno de la cadena se realiza sobre guías de desgaste reemplazables construidas en materiales antifricción de elevada durabilidad, lo que reduce pérdidas mecánicas y simplifica tareas de mantenimiento periódico.

El accionamiento principal está compuesto por motor eléctrico, reductor industrial y transmisión por acoplamiento directo o cadena secundaria según configuración particular del equipo. El conjunto se encuentra montado sobre bastidor rigidizado con alineación precisa, garantizando correcta transmisión de potencia y minimizando solicitaciones parásitas sobre rodamientos y ejes. El cabezal motriz incorpora piñones de acero mecanizado y tratamiento superficial endurecido para resistir desgaste prolongado bajo condiciones de operación continua.

El sistema tensor, ubicado generalmente en el extremo opuesto al accionamiento, permite compensar elongaciones naturales de servicio mediante regulación mecánica controlada. Este dispositivo resulta esencial para preservar correcto engrane entre cadena y piñones, evitar saltos de paso y mantener estabilidad geométrica durante operación prolongada.

Los transportadores incorporan bocas de inspección estratégicamente distribuidas, sensores de seguridad para detección de cero velocidad y dispositivos de monitoreo de sobrecarga, permitiendo supervisión continua del estado operativo y detección temprana de condiciones anormales. Asimismo, las tapas superiores desmontables facilitan acceso para limpieza y mantenimiento preventivo del sistema interno de arrastre.

Una característica particularmente relevante de estos equipos, cuando operan en configuración horizontal, es la posibilidad de incorporar múltiples puntos de descarga intermedia regulados mediante válvulas guillotina de accionamiento manual o motorizado. Esta disposición permite derivar selectivamente el flujo de material hacia distintos destinos operativos sin necesidad de equipos de transferencia adicionales, otorgando elevada flexibilidad al esquema general de distribución dentro de planta. La apertura o cierre controlado de estas válvulas permite direccionar el producto hacia silos, equipos de proceso o circuitos alternativos según requerimientos operativos instantáneos, optimizando la versatilidad del sistema y simplificando significativamente la arquitectura de transporte respecto de otras tecnologías, como cintas transportadoras o elevadores de cangilones, donde la implementación de múltiples descargas intermedias resulta mecánicamente más compleja y menos eficiente.

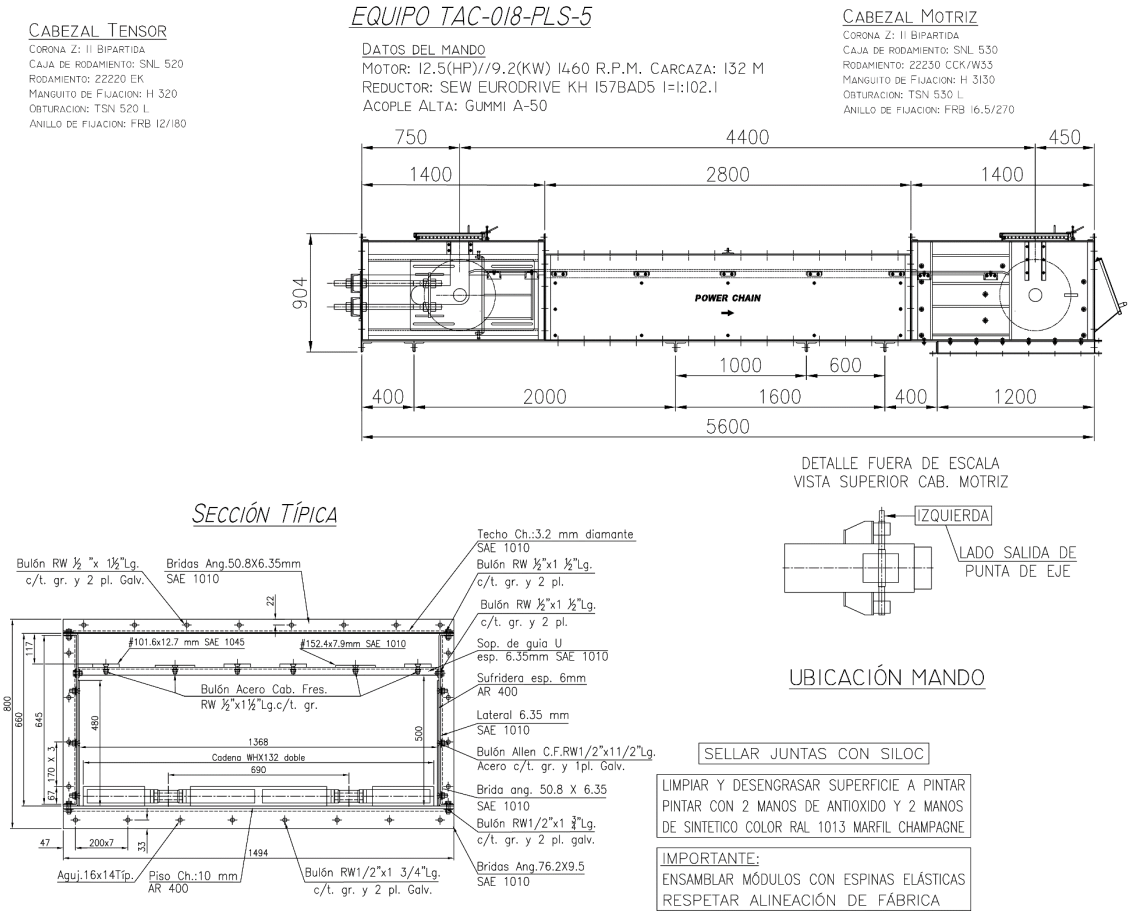


Figura 1-13: Transporte a cadena tipico

Capítulo 2: Diagramas y Cálculo de Flujos de Proceso

En este capítulo se establece el diagrama de flujo masico general de toda la preparación, así como los diagramas de flujo particulares de proceso. La planta se divide en tres grandes áreas la primera de prelimpieza, la segunda de preparación propiamente dicha y la tercera de repaso de cascara y pellet, esta última área no está incluida en el alcance de este trabajo.

Los diagramas generales de flujo del proceso de prelimpieza y preparación de soja se presenta en el **Anexo A**, donde se detallan las interconexiones funcionales entre equipos y la secuencia operativa completa.

Diagrama de Bloques Preparación (T03-DWP-00-103_A)

El balance másico del sistema comienza con el flujo F1, correspondiente a la alimentación de grano de soja bruta procedente de almacenaje hacia la etapa de prelimpieza, con un caudal de 11.802 tn/día (491,75 tn/h), humedad de 12,32 %, contenido graso de 16,1 % y una fracción de cáscara equivalente al 8 % del total procesado.

Luego de la operación de limpieza inicial, la corriente principal continúa como F2, que transfiere 11.183,17 tn/día (465,965 tn/h) desde prelimpieza hacia los bean heaters. En esta etapa se separan dos flujos secundarios: F3, correspondiente al material recuperable derivado hacia planta de Pellet, en su mayoría cascara y finos con contenido proteico retirado por los aspiradores, con 264,81 tn/día (11,035 tn/h), y F4, correspondiente al descarte definitivo del sistema, con 354,02 tn/día (14,75 tn/h).

Como resultado, la corriente útil presenta una reducción de material no procesable y un incremento relativo del contenido graso hasta 16,99 %, mientras la fracción de cáscara disminuye a 6,07 %.

Durante el acondicionamiento térmico en los calentadores de grano (bean heaters) se elimina humedad mediante la corriente F5, con 251,295 tn/día (10,47 tn/h), reduciendo el contenido de agua del grano hasta 11 %. El producto acondicionado abandona esta sección como F6, con un caudal de 10.931,875 tn/día (455,495 tn/h) y una concentración grasa relativa de 17,38 %, siendo transferido hacia los jets dryers.

En los jet dryers se produce una segunda eliminación de humedad, representada por la corriente F7, equivalente a 62,285 tn/día (2,595 tn/h). El material resultante constituye la corriente F8, que alimenta a los quebradores de primera pasada con 10.869,59 tn/día (452,9 tn/h), una humedad de 10,49 % y concentración grasa de 17,48 %.

Luego del primer quebrado, el producto ingresa a los CD, donde se generan dos corrientes de salida. La corriente F9 corresponde a humedad removida durante esta etapa, con 21,74 tn/día (0,905 tn/h), mientras que la corriente F10 representa la primera gran extracción de cáscara enviada a planta de pellet, con 339,675 tn/día (14,155 tn/h). El producto útil abandona esta sección como F11, con 10.508,175 tn/día (437,84 tn/h),

mostrando una reducción del contenido de cáscara a 3,23 % y un incremento de materia grasa relativa hasta 18,08 %.

Cabe aclarar que el pellet de soja es un subproducto sólido obtenido mediante compactación mecánica de fracciones fibrosas y particulado residual generados durante las etapas de prelimpieza y preparación del grano. En el presente proceso, su composición proviene principalmente de la mezcla de cáscara separada durante las etapas de descascarado neumático y de los finos recuperados por aspiración, los cuales son acondicionados y posteriormente densificados mediante compresión para formar unidades cilíndricas compactas de geometría uniforme.

El proceso de pelletizado consiste en someter esta mezcla fibrosa a elevada presión mecánica mediante matrices perforadas, provocando deformación plástica parcial, fricción interna y aumento localizado de temperatura. Estas condiciones favorecen la activación de compuestos naturales aglomerantes presentes en el material, permitiendo la cohesión estructural del pellet sin necesidad de aditivos externos.

Desde el punto de vista físico, el pellet presenta mayor densidad aparente, mejor fluidez, menor generación de polvo y mayor estabilidad durante almacenamiento y transporte en comparación con el material suelto original. Estas características permiten optimizar significativamente su manipulación industrial, reduciendo pérdidas operativas y riesgos asociados a dispersión de partículas finas.

Químicamente, el pellet conserva una proporción elevada de fibra estructural y un contenido residual de aceite, además de pequeñas cantidades de proteína y humedad remanente. Su valor comercial está asociado principalmente a su utilización como insumo para alimentación animal, particularmente como fuente fibrosa complementaria en formulaciones para rumiantes, o como materia prima energética para combustión industrial controlada en determinados sistemas de aprovechamiento térmico.

Dentro del esquema general de procesamiento de soja, la producción de pellet constituye una estrategia de valorización industrial de corrientes secundarias que, de otro modo, representarían material residual de bajo aprovechamiento directo. Su incorporación al sistema permite maximizar el rendimiento económico global del proceso mediante la recuperación y transformación de subproductos generados durante la preparación del grano.

La corriente F11 alimenta los quebradores de segunda pasada y posteriormente los CC, donde se completa el descascarado. En esta etapa se separa la corriente F13, compuesta íntegramente por cáscara destinada a planta de pellet, con 339,675 tn/día (14,155 tn/h). Como resultado, la corriente útil F14, dirigida hacia laminadores, presenta un caudal de 10.168,5 tn/día (423,69 tn/h), libre de cáscara residual y con una concentración grasa de 18,69 %.

La laminación no modifica el balance de masa, por lo que la corriente F15 conserva exactamente el mismo caudal y composición que F14, constituyendo la alimentación directa al expander.

Durante la expansión se incorpora vapor de proceso mediante la corriente F17, con 264,38 tn/día (11,015 tn/h), mientras se libera instantáneamente humedad como F16, con 148,79 tn/día (6,2 tn/h), asociada al flash generado a la descarga atmosférica del collet expandido. El producto abandona esta etapa como F19, con un caudal de 10.284,09 tn/día (428,505 tn/h) y humedad de 12 %.

Finalmente, el enfriador elimina humedad residual mediante la corriente F20, equivalente a 284,09 tn/día (11,835 tn/h). El producto estabilizado abandona la línea como corriente F21, dirigida al sistema de extracción por solvente, con un caudal final de 10.000 tn/día (416,665 tn/h), humedad controlada de 9,5 %, sin contenido residual de cáscara y con una concentración grasa final de 19 %.

El balance global evidencia una reducción neta de masa desde 11.802 tn/día hasta 10.000 tn/día, explicada por eliminación de impurezas, remoción progresiva de cáscara y reducción controlada de humedad. Simultáneamente, la masa total de aceite permanece constante en 1.900 tn/día, confirmando que la línea de preparación opera como un sistema de concentración física de la fracción oleaginosa, optimizando progresivamente las características del producto para maximizar la eficiencia extractiva en la etapa posterior de extracción por solvente.

Los parámetros de humedad (12,3% a 9,5%) y concentraciones grasas utilizados para el balance de masa responden a los estándares internacionales de calidad para el procesamiento industrial de soja (AOCS) [4]

Diagramas de Flujo Preparación

Referencias (T03-DFP-00-100_A)

En este diagrama se establece la codificación con la que serán nombrados los equipos y sus correspondientes gráficos representativos. También se establece una base de diseño mecánica con las características de los diferentes productos.

Prelimpieza (T03-DFP-PL-101_D)

El grano de soja de almacenaje es conducido hacia la planta por la cinta CIN-318-ALS-5 la cual tiene la posibilidad de descargar directamente en el silo diario sucio SIL-001-PLS-5 o en la cinta CIN-001-PLS-5 para cargar el otro silo de sucio SIL-001-PLS-5. Cada silo de sucio tiene una capacidad de 2500 tn de grano, lo que da una suma de 500 tn totales, teniendo un ingreso de material a planta de 491,75 tn/h esto no da una autonomía de aproximamiento 10 horas.

El silo diario número uno descarga directamente sobre el transporte a cadena TAC-018-PLS-5, este transporte mediante un motor de velocidad variable cumple a la función de dosificador de carga, dado que la regulación de flujo de descarga de los silos es muy imprecisa y variable mediante válvulas guillotina. Los silos diarios descargan sobre la cinta CIN-003-PLS-3 que a su vez descarga sobre la cinta CIN-007-PLS-3. Esta cinta posee una sección de rollos pesadores y con esta información se regula el funcionamiento de tac dosificador y las válvulas guillotina de descarga de los silos diarios. Cualquier diferencia es corregida por el PLC de comando.

La cinta trasportadora CIN-007-PLS-3 a su vez tiene un separador magnético en su tolva de descarga que elimina cualquier partícula o elemento metálica que pueda haber ingresado al sistema, evitando así desgaste y atascamientos. Luego el material ya dentro del edificio de prelimpieza es elevado hacia el piso superior por el elevador de cangilones (noria) NOR-001-PLS-3. El mismo, descarga sobre el transporte a cadena doble fondo TAC-001-PLS-3, que es el encargado de alimentar las roscas de carga de los cernidores.

Cabe destacar que al tratarse de un sistema calibrado donde atravez de las roscas de alimentación de los cernidores por cada equipo pasa un flujo establecido el transporte a cadena de distribución en el final de recorrido tiene lo que se llama una descarga de sobre flujo (over flow) que lo que hace es encargarse de llevar aguas arriba (en este caso devolver a los silos diarios) el material que por diversas razones no fue distribuido. Esto se puede deber a la falla repentina de uno de las roscas de alimentación o uno de los cernidores, o también a una sobrealimentación.

El grano útil luego de pasar por los 4 cernidores CER-001-PLS-3, CER-002-PLS-3, CER-003-PLS-3, CER-004-PLS-3 es descargado sobre el transporte a cadena doble fondo TAC-006-PLS-3. Cabe destacar que el mismo recolecta las descargas en su parte superior y lleva el material en un sentido, luego cerca de su extremo el material cae al cajón inferior y es transportado en el otro sentido donde es distribuido por medio de válvulas guillotina en las diferentes caídas. También posee un overflow por las mismas razones ya mencionadas.

El descarte de los cernidores es trasportado por el TAC-004-PLS-5 hacia un capacho fuera de la plata para su posterior disposición.

El overflow del TAC-006-PLS-3 es llevado a una tolva pesadora que indica si hay algún aumento de flojo detectando fallos en el sistema. Este overflow es trasportado por los transportes TAC-003-PLS-5 y TAC-005-PLS-5 nuevamente a los silos diarios.

Luego el grano sigue su recorrido hacia las 8 válvulas rotativas VRO-009-PLS-3 a VRO-016-PLS-3, que alimentan los 8 multiaspiradores MUL-001-PLS-3 a MUL-008-PLS-3 respectivamente. Una vez procesado por lo multiaspiradores el material cae a las 4 zarandas rotativas ZAR-001-PLS-3, ZAR-0012-PLS-3, ZAR-003-PLS-3, ZAR-004-PLS-3. Luego el grano ya tamizado a especificación es trasportado por el TAC-010-PLS-3 al silo diario de limpios SIL-004-PLS-3 de 400 Tn.

El material de rechazo tamizado por las zarandas es llevado a otra sección de la plata que se llama, repaso de prelimpieza. Esta tiene la función de relizar un nuevo proceso sobre el material de descarte para recuperar la máxima cantidad grano y material proteico posible, cabe destacar que si bien el porcentaje de material rechazado es del orden menor a 3% al tratase de una de las plantas de aceite de soja más grandes del mundo, ese 3%

representa un flujo de desperdicio muy grande. Por los que este subproceso (que no hace parte de este estudio) cobra un mayor nivel de importancia.

Luego el grano es trasportado por la cinta CIN-009-PLS-3 a la noria NOR-005-PLS-3 para su elevación y entrada al área de Preparación. Esta cinta también posee un separador magnético y rolos pesadores para poder regular la carga.

Por último, el diagrama también muestras las aspiraciones de polvo que se colocan en las cargas y descargas tanto de las cintas trasportadoras como de las norias. Cada aspiración tiene un número que la vincula con su Filtro de Mangas correspondiente. Los FIL-001-PLS-5, FIL-002-PLS-5, FIL-003-PLS-5 recolectan finos tanto sea polvo como material orgánico, los mismo son enviado mediante un transporte a cadena TAC-017-PLS-5 y luego mediante un transporte neumático a la planta de pellet de soja.

Los Filtros FIL-004-PLS-3 y FIL-005-PLS-3 correspondientes al filtrado de cascara de los multiaspiradores descargan sobre una serie de transportes a cadena que llevan el material a la plata de cascara, esta planta no hace parte del estudio correspondiente pero su función es recupera la mayor parte del material útil para extracción.

Preparación AVS y JD (T03-DFP-PR-102_C)

Los granos ya limpios de prelimpieza son distribuidos mediante le TAC-001-PR-3 en los 4 acondicionadores de semilla AVS-001-PR-3, AVS-002-PR-3, AVS-003-PR-3, AVS-004-PR-3, las semillas ya acondicionadas son trasportadas por los equipos TAC-003-PR-3, TAC-004-PR-3 y TAC-005-PR-3 hacia el transporte TAC-010-PR-3 que será el encargado de alimentar los Jet Dryers.

Los cuatro Jet Dryers JED-001-PR-3, JED-002-PR-3, JED-003-PR-3, JED-004-PR-3 poseen cada uno, una tolva y una válvula rotativa de carga. Luego de pasar por este proceso el grano cae a los 8 quebradores de primera pasada, HUL-001-PR-3 … HUL-008-PR-3. Los cuales a su vez descargan sobre 2 transportes a cadena tipo Bulk Flow que llevan el material hacia el área de multiaspiradores.

El grafico también muestra los flujos de aire de entrada y salida de los Bean heaters, encargados de extraer la humedad que el grano expulsa al calentarse. Este flujo de aire

húmedo antes de salir al ambiente es filtrado por medio de los ciclones centrífugos, CYC-001-PR-3, CYC-002-PR-3, CYC-003-PR-3, CYC-004-PR-3. Que se encargan de devolver el material fino al sistema.

También establece el flujo del sistema de aire caliente que circula en los secadores de chorro (jet dryers). El aire ambiente es captado y pasa por el calentador auxiliar CDR-015-PR-3 que acondiciona su temperatura, este corresponde al JED-001-PR-3, JED-002-PR-3. Luego un ventilador de alta presión y caudal pequeño VRO-023-PR-3 impulsa una mezcla del aire de ingreso auxiliar con aire proveniente del calentador primario hacia los granos que circulan generando el lecho fluidizado. A su vez el aire de baja presión y alto caudal circula a través del VEN-007-PR-3 pasando por el calentador primario CDR-007-PR-3 y se incorpora a la cámara principal del jet dryer generando un calentamiento homogéneo del grano, luego sigue su camino saliendo del equipo por la campana principal y se dirige al filtro de mangas FIL-001-PR-3 que se encarga de recolectar material particulado (cascara y finos) que es enviado a la planta de repaso de cascara por medio del transporte TAC-007-PR-3. Cabe destacar que el sistema en su mayoría recircula el aire caliente, si bien existe entrada y salidas de airea, estos caudales son muy pequeños en comparación a los caudales de recirculación y sirven para estabilizar los parámetros de trabajo.

Preparación QUE (T03-DFP-PR-103_A)

El grano proveniente de los quebradores de primera pasada es distribuido a los 8 multiaspiradores MUL-001-PR-3 … MUL-008-PR-3 por medio de los transportes a cadena doble fondo TAC-018-PR-3 y TAC-019-PR-3. El grano, luego de la aspiración de la cascara, cae sobre los transportes TAC-021-PR-3 y TAC-021-PR para ser distribuido en los 8 quebradores de segunda pasada QUE-001-PR-3 … QUE-001-PR-3. Luego el material ya procesado cae sobre los transportes a cadena TAC-023-PR-3 y TAC-023-PR-3 tipo Bulk Flow que lo elevan nuevamente.

Las aspiraciones de cascara son recolectadas por los ciclones CYC-007-PR-3, CYC-007-PR-3 y son enviades mediante el transporte TAC-017-PR-5 a la planta de cascara. Las

descargas de los quebradores son aspiradas para evitar la acumulación de polvos y son re insertadas por los ciclones CYC-011-PR-3 y CYC-012-PR-3.

Preparación LAM y EXP (T03-DFP-PR-104_B)

El grano es distribuido por los transportes a cadena doble fondo TAC-033-PR-3 y TAC-033-PR-3 en los 8 multiaspiradores de segunda pasada MUL-025-PR-3 … MUL-025-PR-3 donde se separa el ultimo remanente de cascara. Luego el grano ya apto para la laminación es colectado y distribuido por los transportes TAC-035-PR-3 y TAC-039-PR-3 a las tolvas de alimentación de los 28 laminadores LAM-001-PR-3 … LAM-028-PR-3 establecidos físicamente en dos líneas de 14 equipos cada una. Una vez ya procesado el material estos equipos descargan sobre dos transportes TAC-038-PR-3, TAC-038-PR-3 encargados de llevar las láminas de soja a los expansores.

Los flujos de cascara removidos por los multiaspiradores CC son colectados por los ciclones CYC-017-PR-3 y CYC-018-PR-3 y el transporte TAC-032-PR-5 se encarga de llevarlos a la planta de cascara.

Todas las descargas de los laminadores son aspiradas y el particulado es recogido por los 6 ciclones (CYC-019-PR-3 a CYC-024-PR-3) dispuestos en grupos de tres por cada línea de 14 equipos, los cuales reintegran el material captado al proceso aguas abajo.

El transporte TAC-051-PR-3 es el encardo de cargar las roscas de alimentación de los 5 expanders EXP-001-PR-3 … EXP-005-PR-3. El material antes de ingresar a los expander pasa por unos separadores magnéticos de doble cascada, MAG-001-PR-3 … MAG-005-PR-3 que remueven cualquier elemento extraño, evitando así roturas y atascamientos.

Luego el material expandido es enfriador por los equipos ENF-001-PR-3, ENF-002-PR-3, que descargan sobre los transportes TAC-053-PR-A-3, TAC-053-PR-B-3, TAC-055-PR-3 encargados de llevar el material a la planta de Extracción.

Capítulo 3: Layout y Arreglo Dimensional Mecánico

En siguiente capitulo se establece el Lay out general de la planta, luego se muestra el arreglo mecánico en 3D de todas las áreas y por último se adjuntan todos los planos de implantación de cada uno de los conjuntos mecánicos de las diferentes áreas de la planta.

La materialización del arreglo mecánico y la elaboración de la documentación técnica se rigieron por estándares internacionales de dibujo técnico y representación de conjuntos industriales según norma ISO 128 / IRAM 4501 [5]. Todos los documentos de este capitulo se adjunta en el **Anexo B.**

Layout General Preparación

T02-LYA-00-003 – Lay out General Preparación

En el mismo se muestra la ubicación de la planta, así como las dimensiones generales de la misma, y las diferentes áreas con la indicación de que equipos alberga.

Implantación de Equipos

Todos los planos se muestran en el ANEXO B, páginas 110 a 154.

A continuación se desarrolla una tablo con todo los números de planos, su respectiva descripción y pagina en la que se encuentra dentro del Anexo para hacer mas fácil su navegación

Tabla 3-1: Listado de planos de implantación

NUMERO DE PLANO	DESCRIPCIÓN	PAG.
T02-LYA-00-003	LAYOUT GENERAL PREPARACION	110
T03-DWM-PL-009	IMP. CINTA CIN-318-ALS-5	111
T03-DWM-PL-010	IMP. CINTA CIN-001-PLS-5	112
T03-DWM-PL-031	IMP. TAC-018-PLS-3	113
T03-DWM-PL-011	IMP. CINTA CIN-003-PLS-3	114
T03-DWM-PL-012	IMP, CINTA CIN-007-PLS-3	115
T03-DWM-PL-014	IMP. NORIA NOR-001-PLS-3	116
T03-DWM-PL-005	IMP. EQUIPOS PRELIMPIEZA ELEVACION	117
T03-DWM-PL-006	IMP. EQUIPOS PRELIMPIEZA PLANTA	118
T03-DWM-PL-007	IMP. EQUIPOS PRELIMPIEZA PLANTA	119
T03-LYM-PR-482	LAYOUT EQUIPO TAC-006-PLS-3	120
T03-DWM-PL-018	IMP. SISTEMAS DE ASPIRACION PRELIMPIEZA	121
T03-DWM-PL-019	IMP. SISTEMAS DE ASPIRACION PRELIMPIEZA	122
T03-DWM-PL-030-H1	IMP. TRANSPORTE NEUMATICO DE FINOS PLS.	123
T03-DWM-PL-030-H2	IMP. TRANSPORTE NEUMATICO DE FINOS PLS.	124
T03-DWM-PL-013	IMP. CINTA CIN-009-PLS-3	125
T03-DWM-PL-015	IMP. NORIA NOR-005-PLS-3	126
T03-DWM-PR-001	IMP. BEAN HEATERS, CALENTADOR Y CICLON ELE.	127
T03-DWM-PR-002	IMP. BEAN HEATERS, CALENTADOR Y CICLON PLA.	128
T03-DWM-PR-003	IMP. JET DRYERS, EQ Y TACS	129
AS9651	JET DRYERS	130
E4538	HEATER HOUSING	131
A4438	SUPLEMENT HEATER HOUSING	132
DM125555	BAG FILTER	133
T-2059	VENTILADORES PINCIPALES JD	134
T-2060	VENTILADORES SECUNDARIOS JD	135
T03-DWM-PR-004	IMP. JET DRYERS, EQ Y TACS CORTES	136
T03-DWM-PR-006	SISTEMA DE ASPIRACIÓN QUEBRADORES 1° PAS.	137
T03-DWM-PR-030	IMP. CONDUTOS CD	138
T03-DWM-PR-039	IMP. EXHAU CD	139
T03-DWM-PR-035	IMP. TAC´S Y CD ELEVACIONES	140
T03-DWM-PR-025	IMP. QUEBRADORES 2° PAS	141
T03-DWM-PR-036	IMP. TAC´S Y CD PLANTAS	142
T03-DWM-PR-033	SISTEMA DE ASPIRACIÓN QUEBRADORES 2° PAS.	143
T03-DWM-PR-037	IMP. TAC´S Y CC ELEVACIONES	144
T03-DWM-PR-031	IMP. CONDUTOS CC	145
T03-DWM-PR-040	IMP. EXHAUST CC	146
T03-DWM-PR-038	IMP. TAC´S Y CC PLANTAS	147
T03-DWM-PR-026	IMP. LAMINADORES	148
T03-LYM-PR-496	LAYOUT EQUIPO TAC-032-PR-5	149
T03-LYM-PR-497	LAYOUT EQUIPO TAC-033-PR-3	150
T03-LYM-PR-499	LAYOUT EQUIPO TAC-035-PR-3	151
T03-DWM-PR-034	SISTEMA DE ASPIRACIÓN LAMINADORES	152
T03-DWM-PR-011	IMPL. EXPANDER ELEVACION	153
T03-DWM-PR-012	IMPL. EXPANDER PLANTA	154

Arreglo mecánico Tridimensional

Con el objetivo de complementar la documentación técnica desarrollada mediante planos de conjunto, diagramas de flujo y arreglos mecánicos, se elaboró una serie de representaciones tridimensionales renderizadas del sistema completo de preparación de soja. Estas visualizaciones fueron desarrolladas a partir del modelo digital integral de la planta y permiten una interpretación espacial precisa de la disposición general de equipos, estructuras portantes, sistemas de transporte y relaciones funcionales entre las distintas áreas operativas.

En una primera instancia se presentan vistas isométricas generales del conjunto completo, incluyendo cerramientos laterales, cubiertas y estructura principal. Estas representaciones permiten apreciar la implantación volumétrica total de la instalación, su integración arquitectónica y la distribución espacial global de los distintos sectores. Ver Figuras 3-1 a 3-8

Posteriormente se incluyen vistas isométricas estructuralmente simplificadas, en las cuales se omiten cerramientos y elementos de cubierta con el propósito de exponer con mayor claridad la disposición interna de equipos de proceso, transportadores, elevadores y conexiones mecánicas entre etapas. Este nivel de representación facilita la comprensión del layout operativo y permite visualizar la lógica constructiva general del sistema de preparación. Ver Figuras 3-9 a 3-14

Finalmente, se presentan vistas parciales específicas correspondientes a las distintas áreas funcionales de prelimpieza y preparación, desarrolladas con un mayor nivel de detalle. Estas imágenes permiten analizar localmente la implantación mecánica de cada sector, destacando la ubicación relativa de los equipos, sus interconexiones y la secuencia física del flujo de material a lo largo del proceso.

En conjunto, estas representaciones constituyen una herramienta complementaria de análisis e interpretación técnica, permitiendo vincular de manera directa la información desarrollada en planos, diagramas de proceso y especificaciones mecánicas con su materialización espacial dentro del diseño integral de planta.

Figura 3-1 a 3-4: Vistas isométricas del conjunto completo donde se aprecia la implantación industrial de 180 m de largo por 38 m de ancho. Se destacan los sectores diferenciados de prelimpieza, acondicionamiento y el área de proceso principal, integrados arquitectónicamente a la termina.

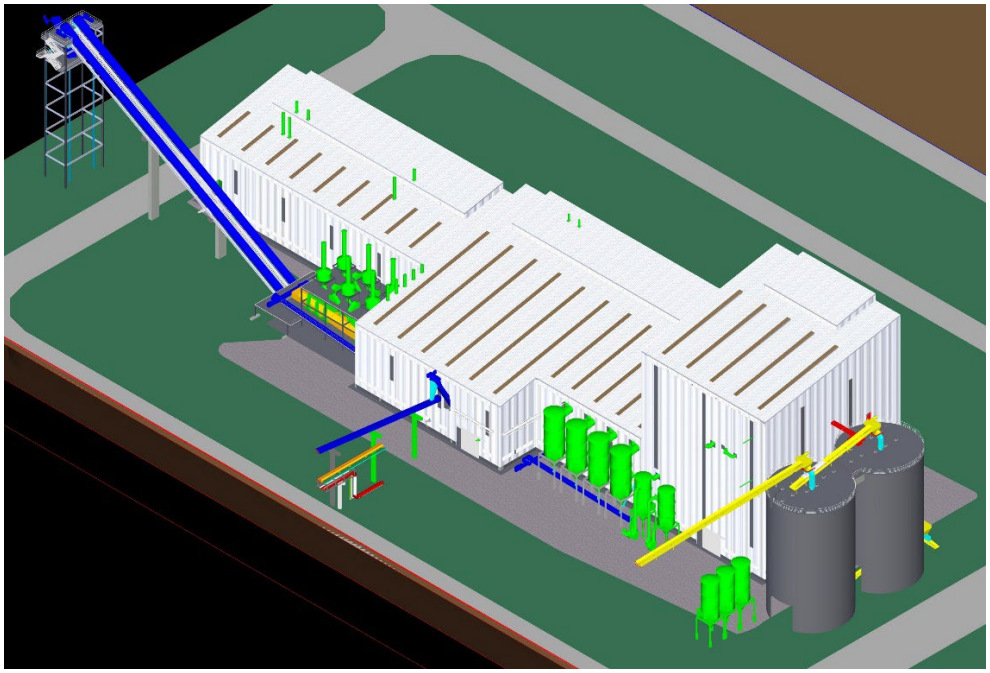


Figura 3-1: Vista isométrica general noroeste

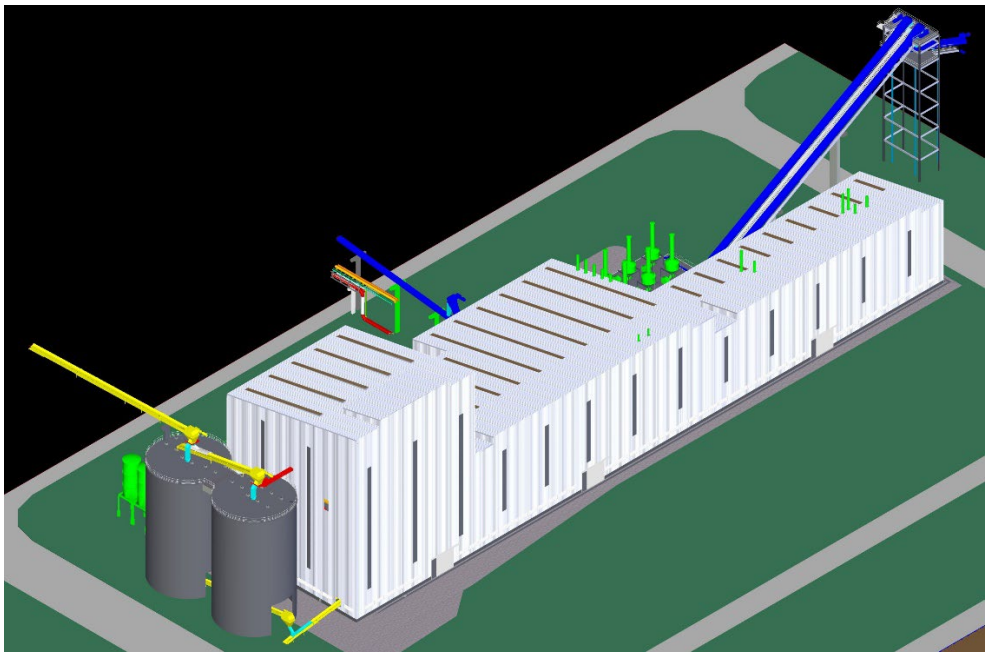


Figura 3-2: Vista isométrica general suroeste

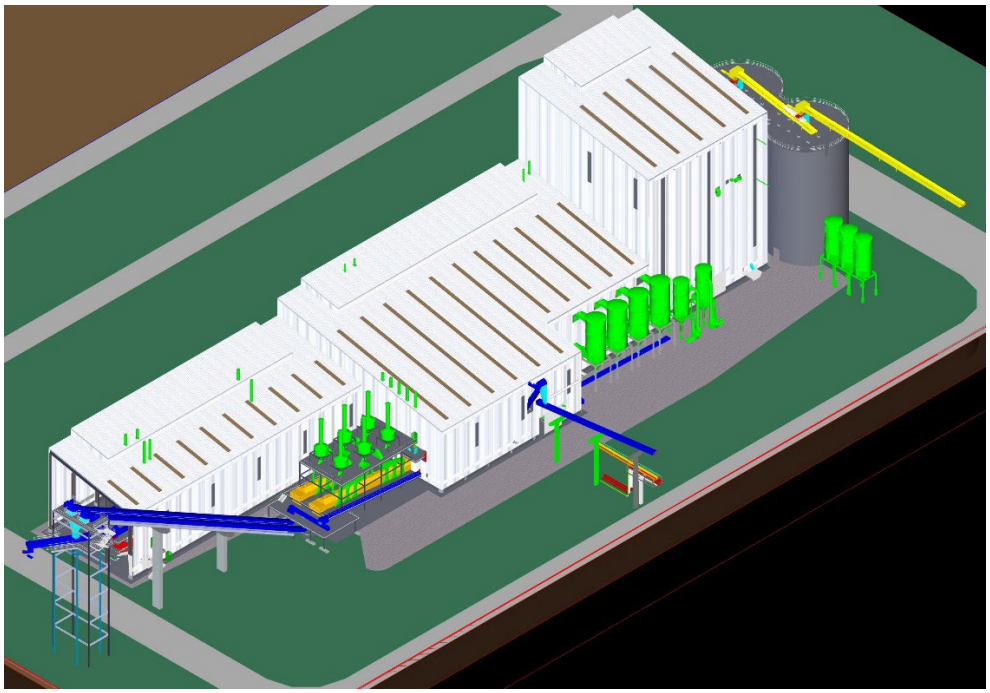


Figura 3-3: Vista isométrica general noreste

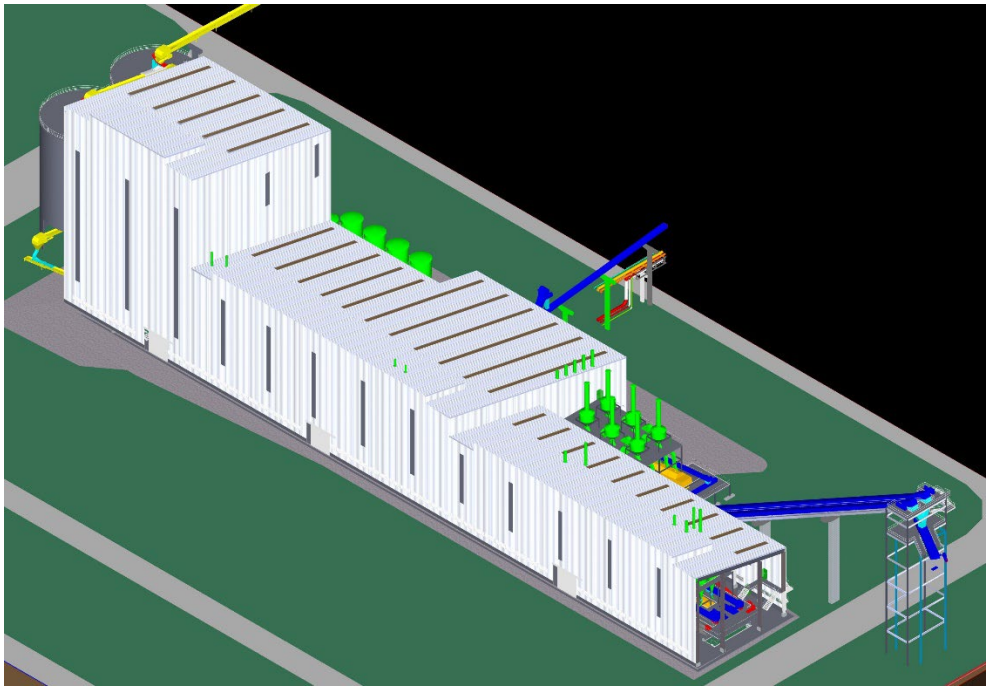


Figura 3-4: Vista isométrica general sureste

Figura 3-5 a 3-8: Vistas ortogonales del edificio de preparación, mostrando la complejidad de los 11 niveles operativos que alcanzan una altura máxima de +61,45 m en el nivel de techos

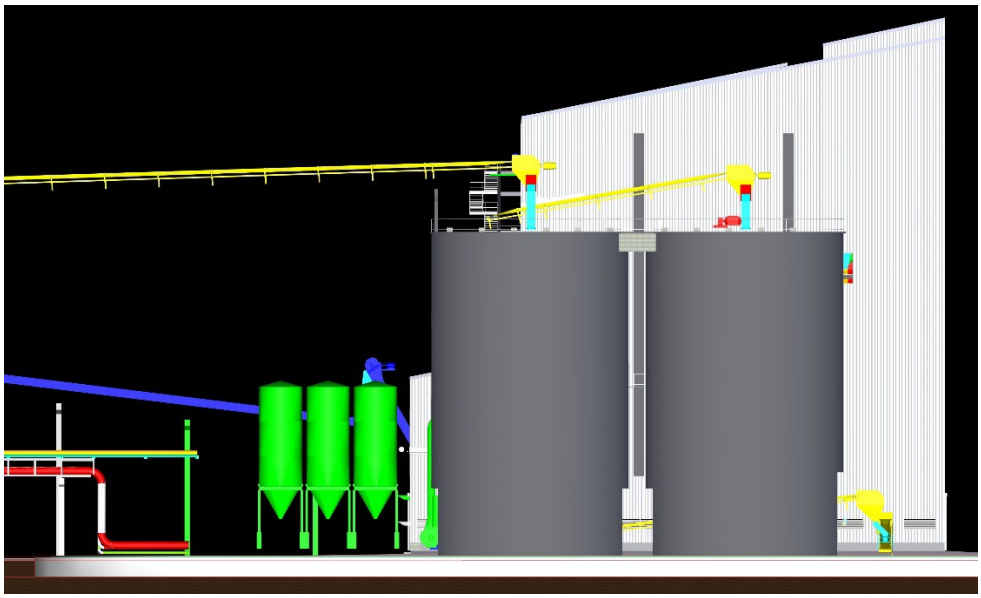


Figura 3-5: Vista oeste

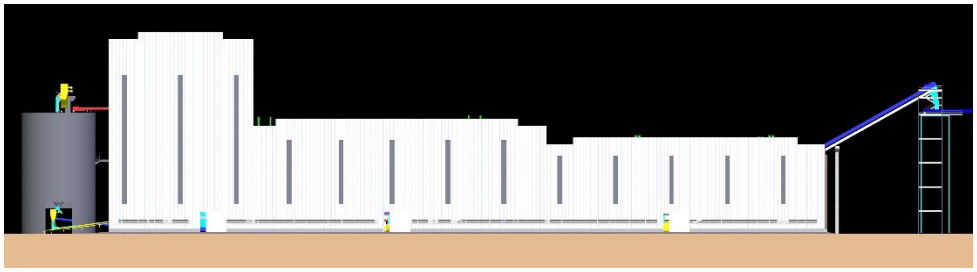


Figura 3-6: Vista sur

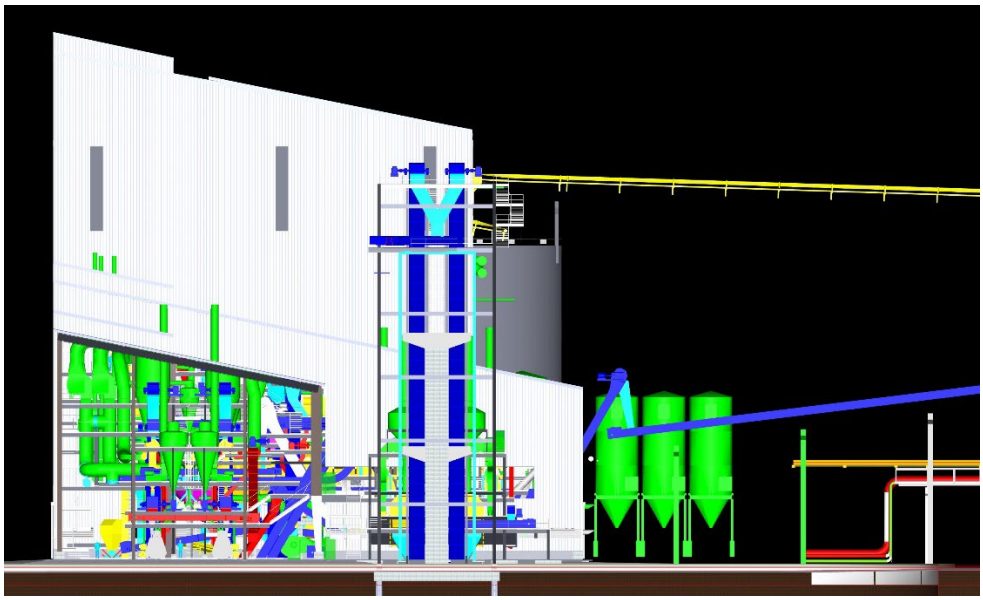


Figura 3-7: Vista este

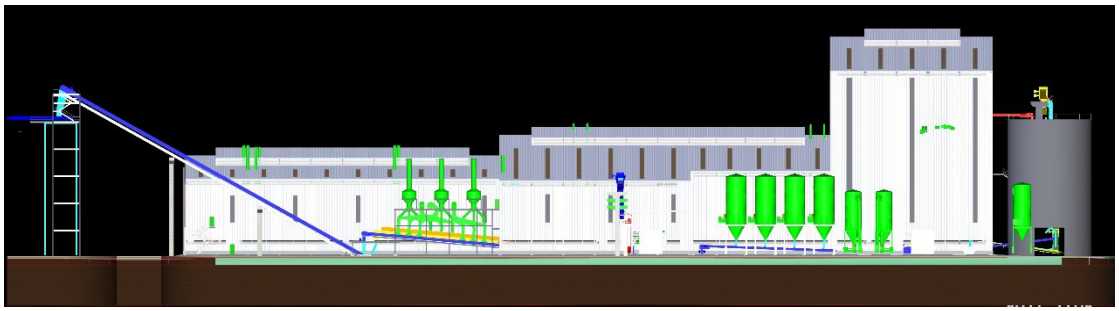


Figura 3-8: Vista norte

Figura 3-9 a 3-12: Renders de la disposición interna de equipos tras la omisión de cerramientos. Se visualiza la línea continua de proceso, destacando la simetría de las líneas de producción

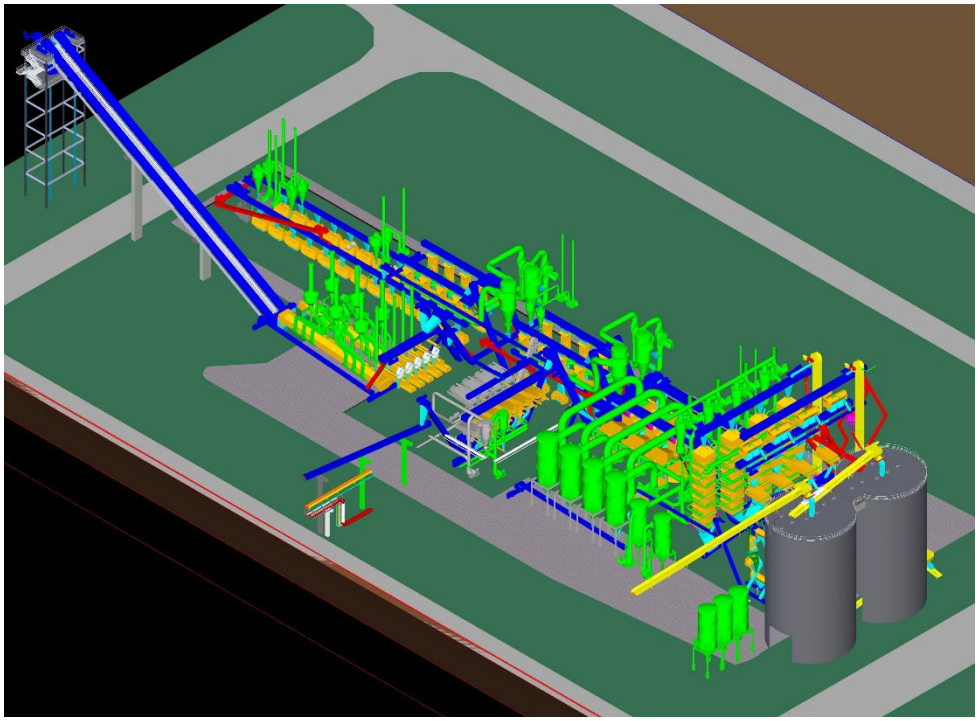


Figura 3-9: Vista isométrica equipos noroeste

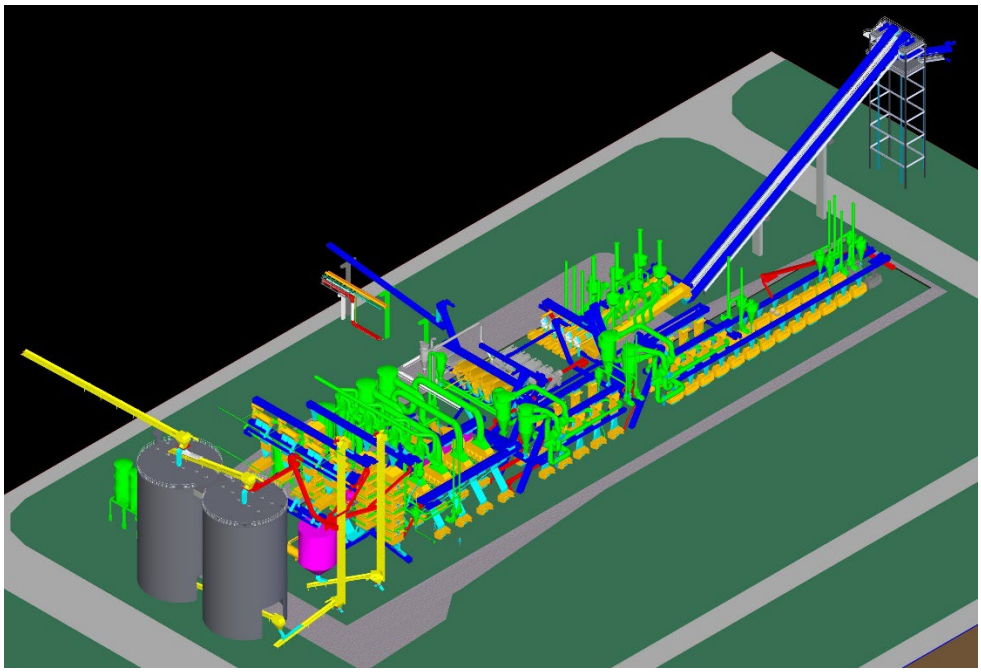


Figura 3-10: Vista isométrica equipos suroeste

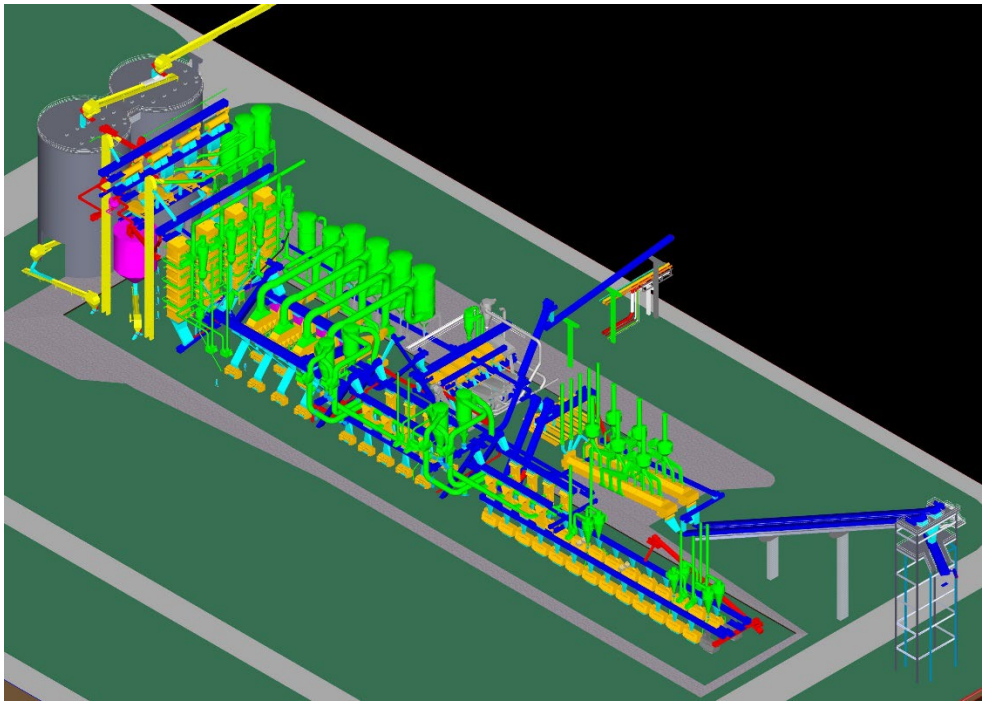


Figura 3-11: Vista isométrica equipos sureste

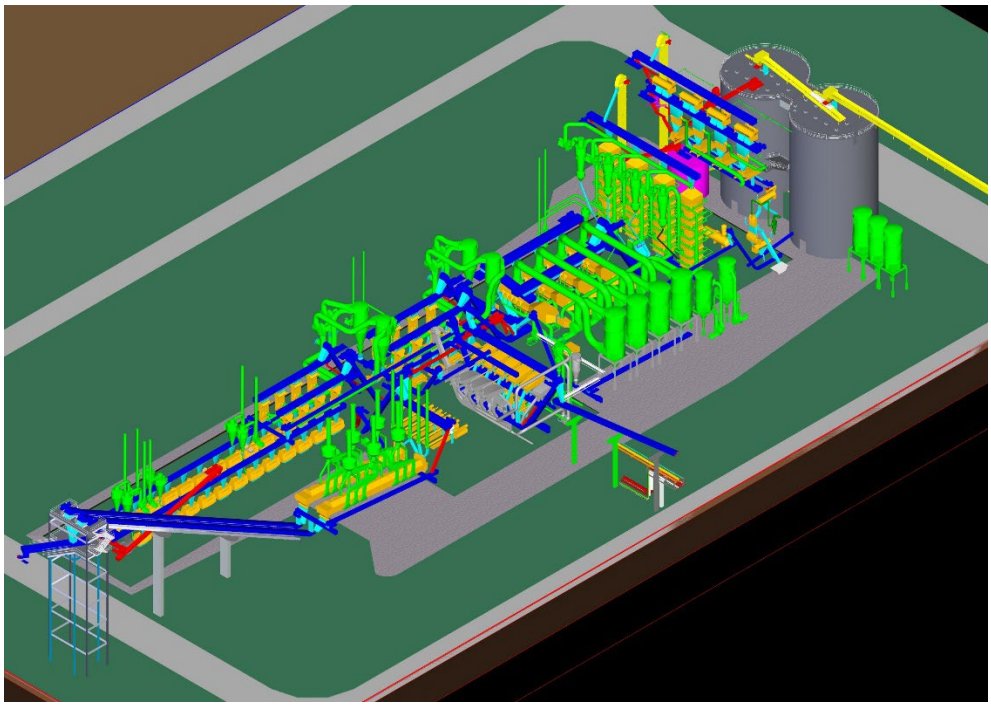


Figura 3-12: Vista isométrica equipos noreste

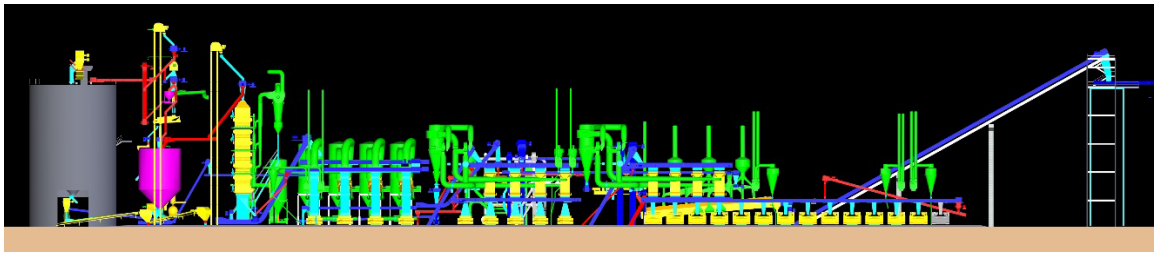


Figura 3-13: Vista sur equipos

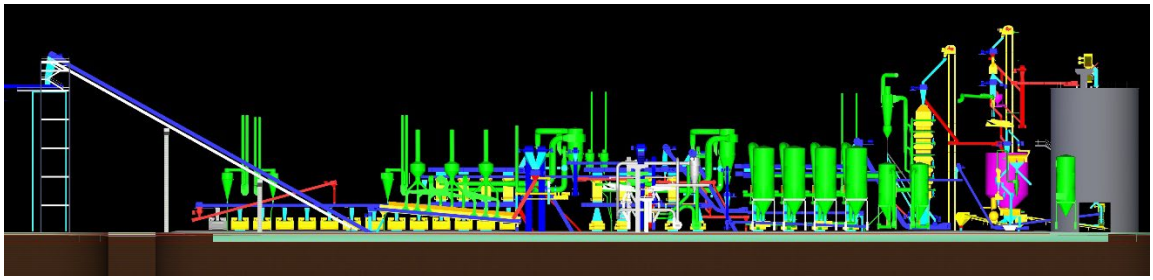


Figura 3-14: Vista norte equipos

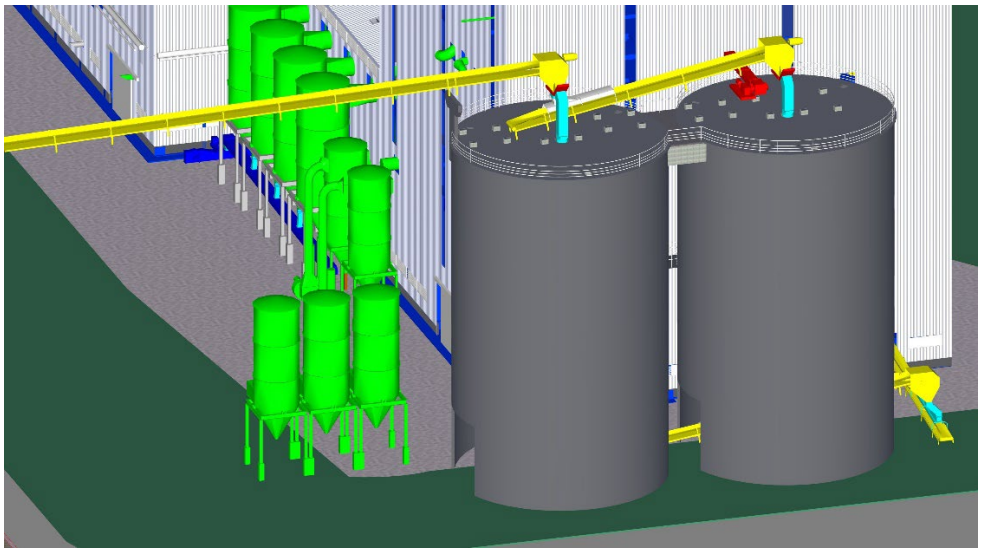


Figura 3-15: Vista cintas ingreso a silos diarios

Esta vista muestra las cintas de carga a los silos diarios de poroto sucio (SIL-001/002-PLS-5), cada uno con una capacidad de 2.500 t para asegurar la autonomía de la planta.

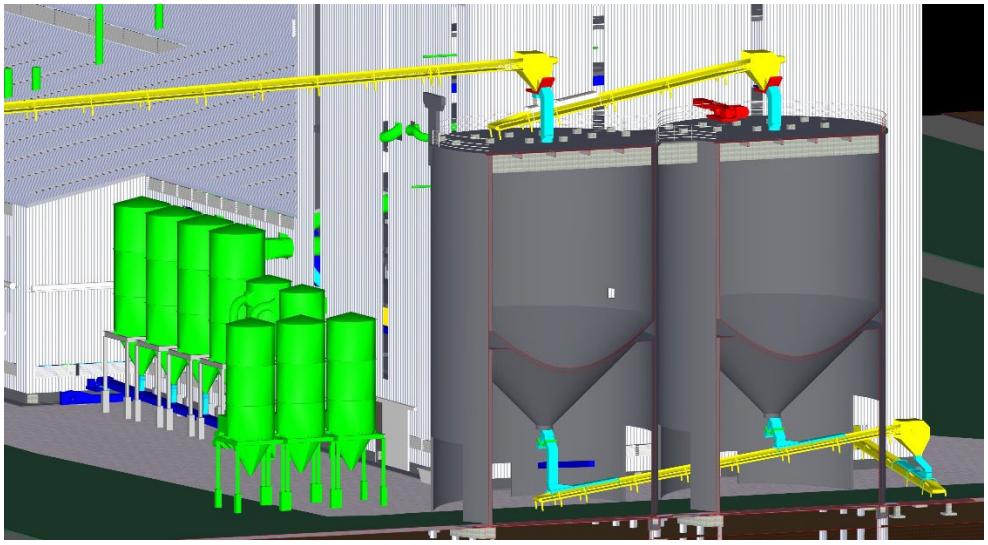


Figura 3-16: Vista cinta de descarga de silos diarios

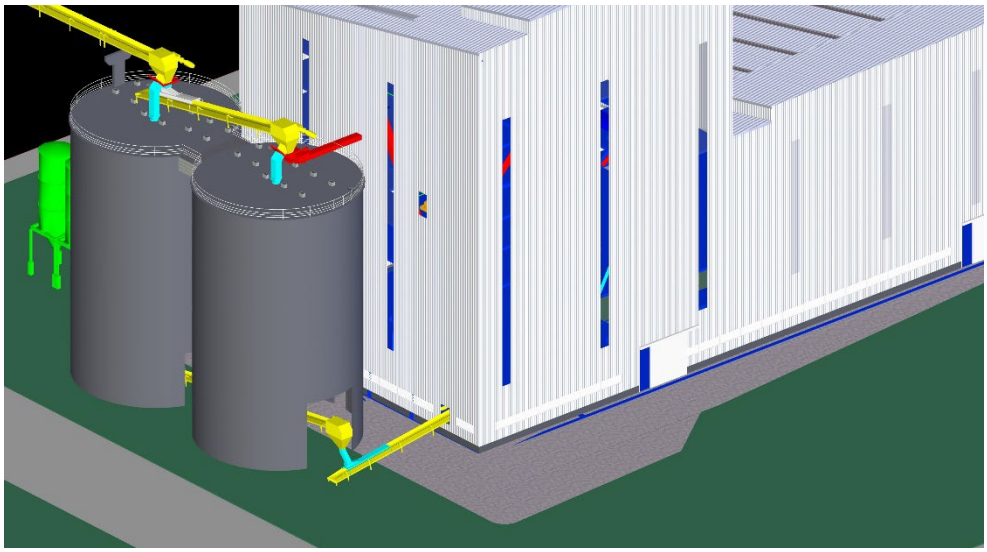


Figura 3-17: Vista cintas ingreso a prelimpieza

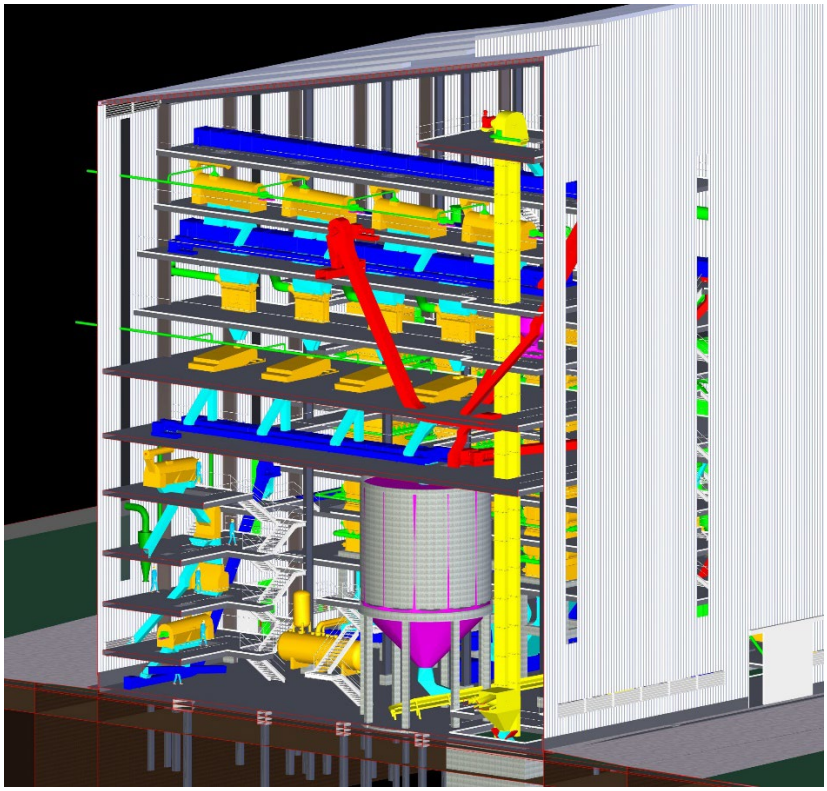


Figura 3-18: Vista general equipos de prelimpieza

Se observa la noria NOR-001-PLS-3 en amarillo de 45,80 m de altura encargada de la elevación del grano limpio hacia la zona de preparación

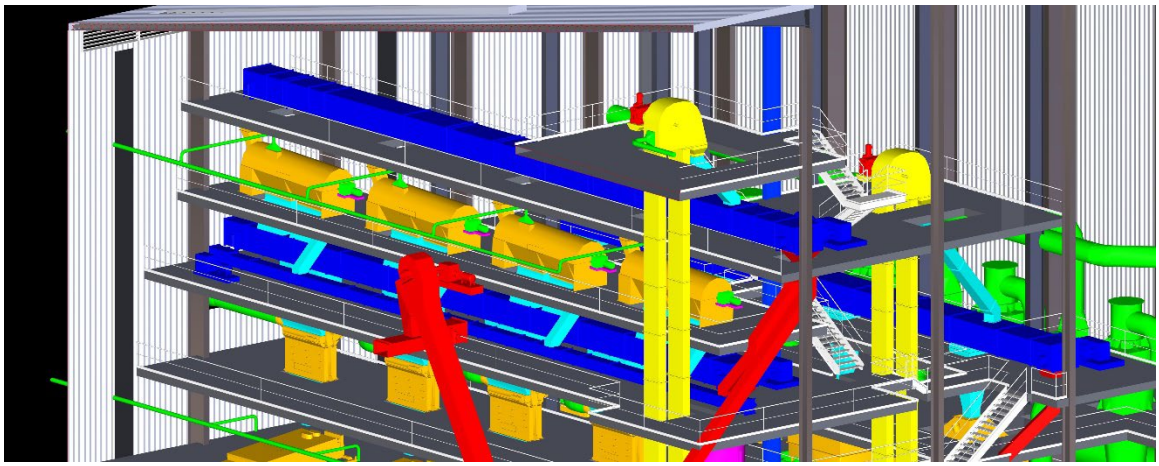


Figura 3-19: Vista transportes de carga cernidores

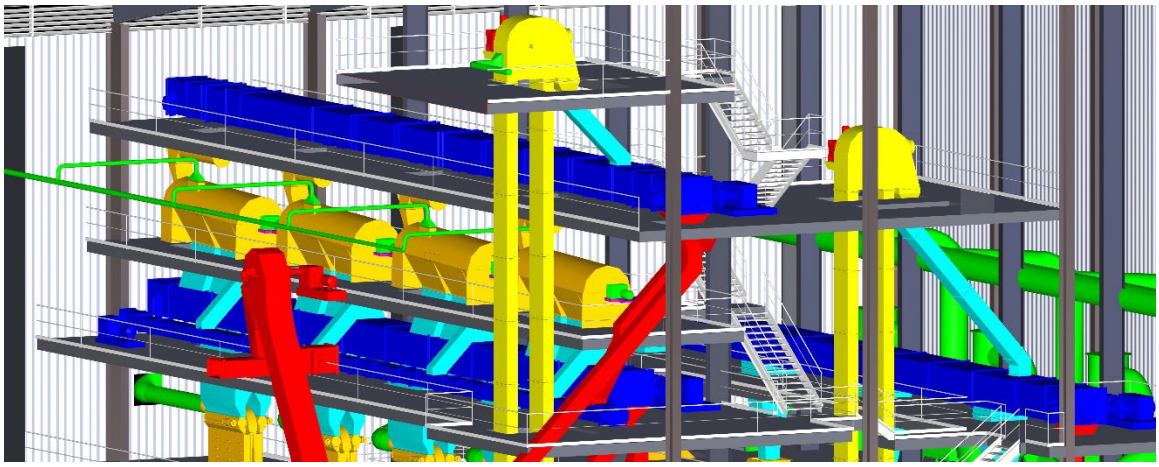


Figura 3-20: Vista cernidores

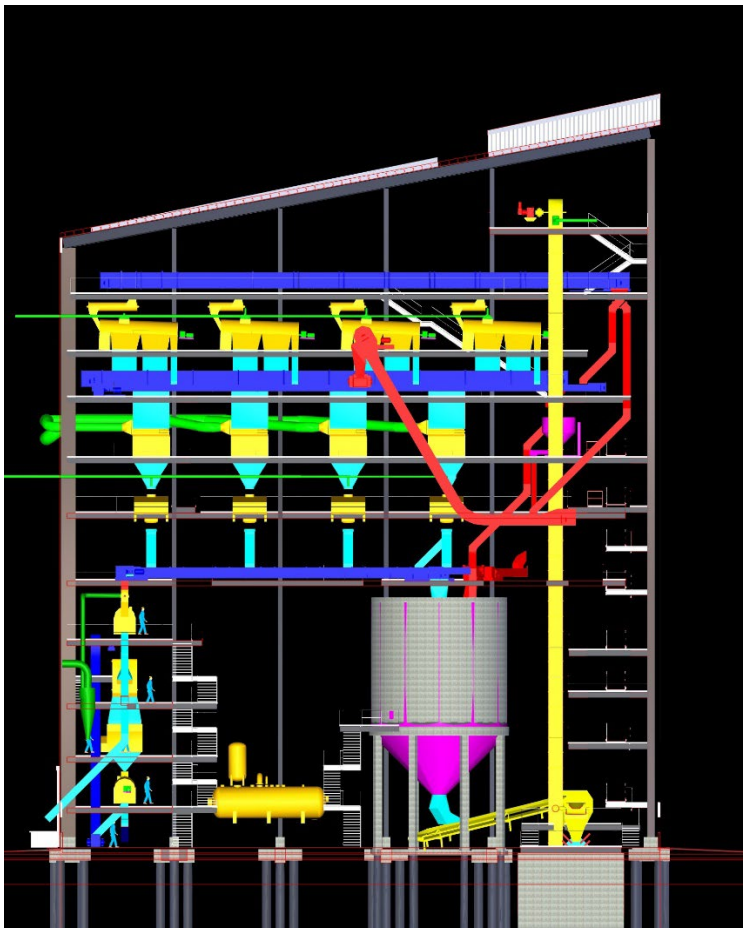


Figura 3-21: Vista multiaspiradores y zarandas

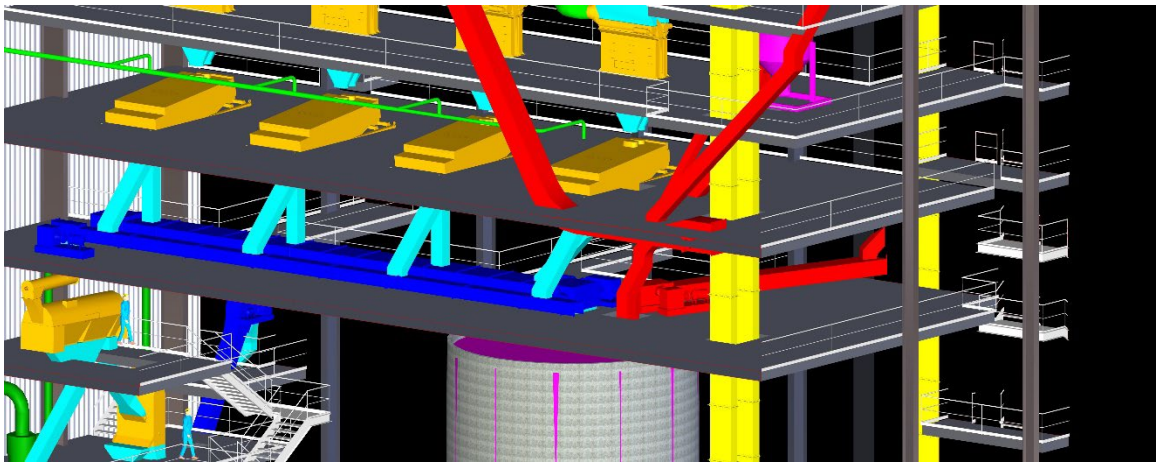


Figura 3-22: Vista zarandas y carga de silo de limpios

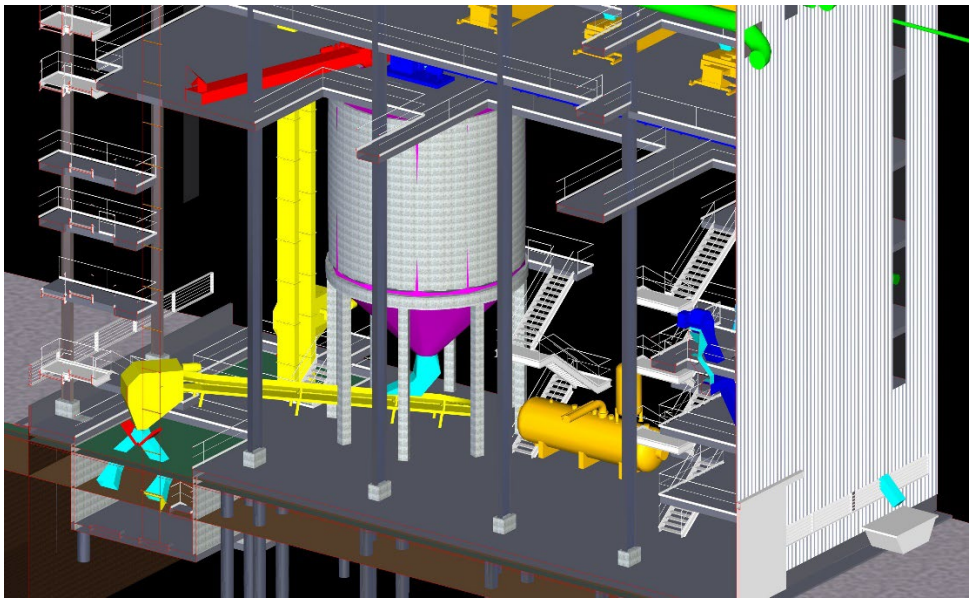


Figura 3-23: Vista descarga de silos de limpio

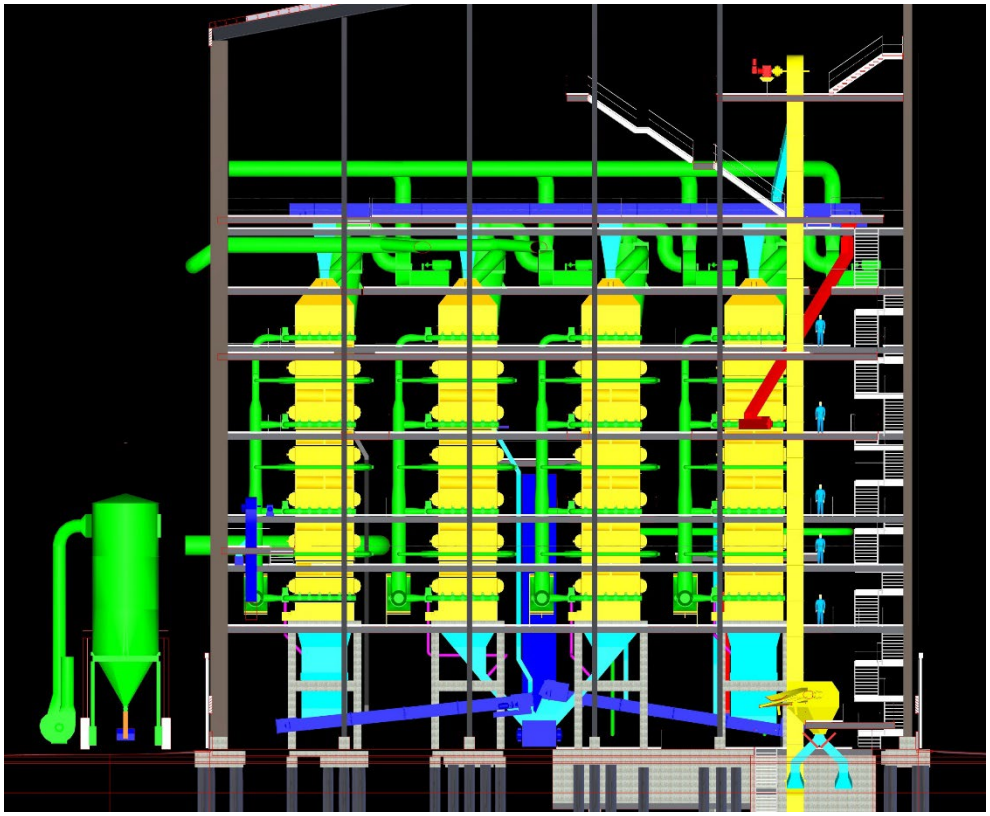


Figura 3-24: Vista general bean heaters

Disposición de los 4 acondicionadores verticales (Bean Heaters), donde se inyectan 28,33 t/h de vapor para el precalentamiento del grano. En el grafico también se puede observar su sistema de aspiración de aire húmedo en verde.

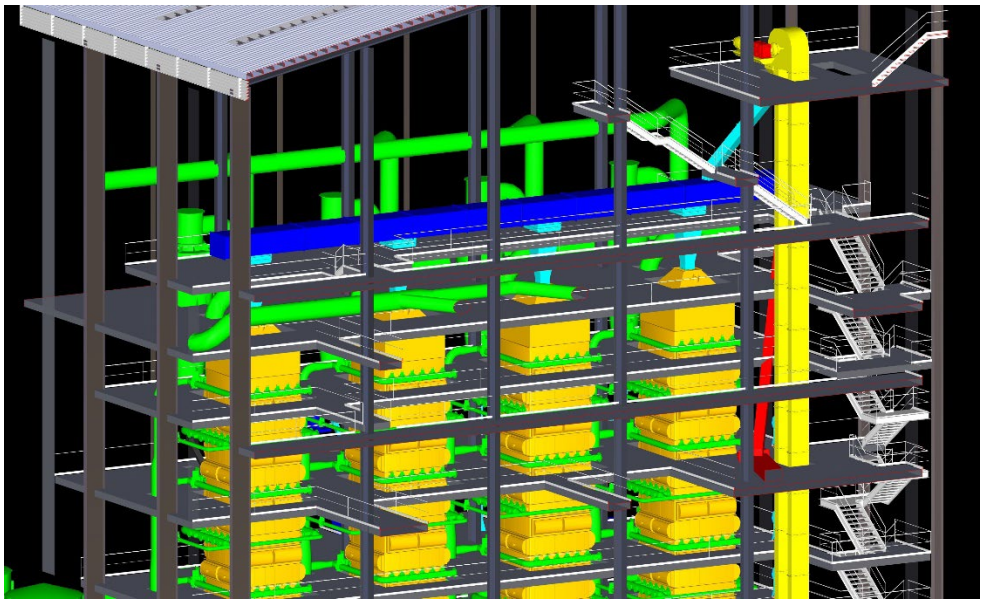


Figura 3-25: Vista carga de bean heaters

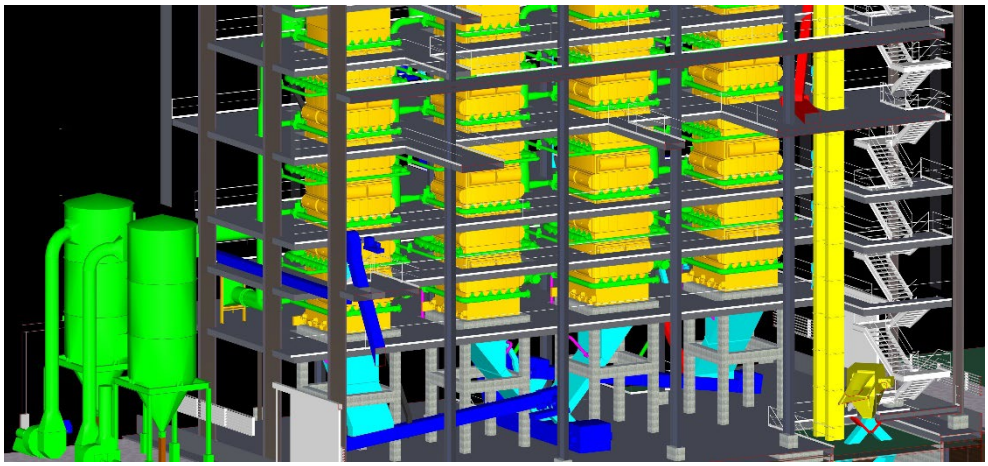


Figura 3-26: Vista módulos intermedios de bean heaters

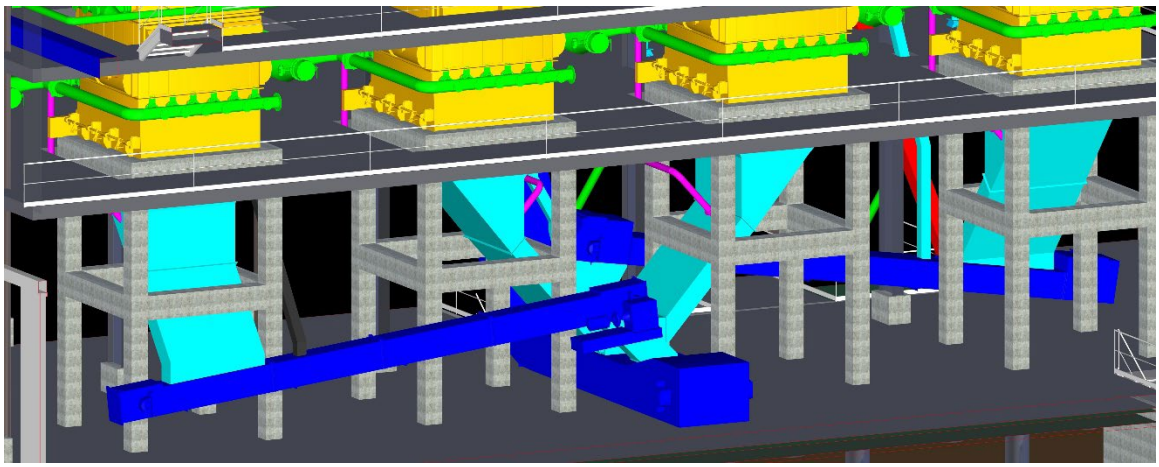


Figura 3-27: Vista descargas de bean heaters

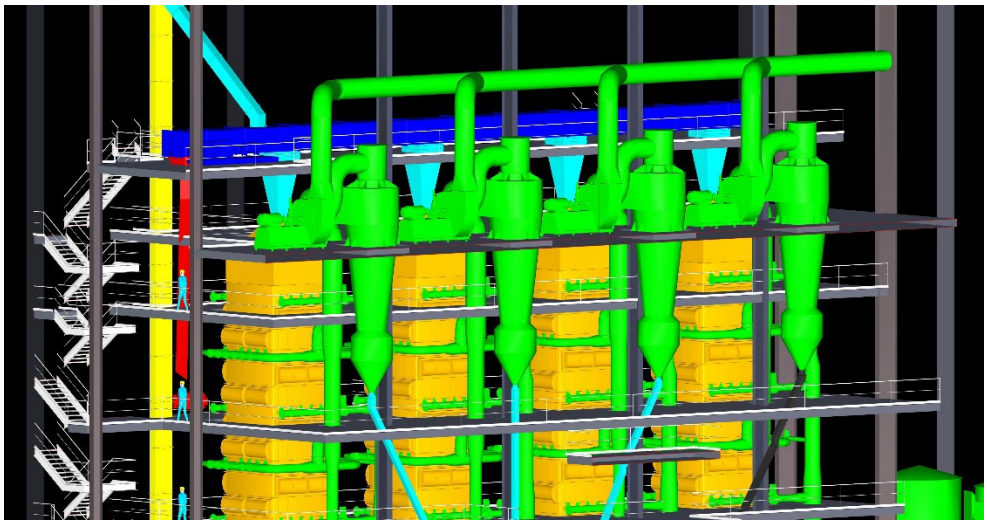


Figura 3-28: Vista ciclones bean heaters

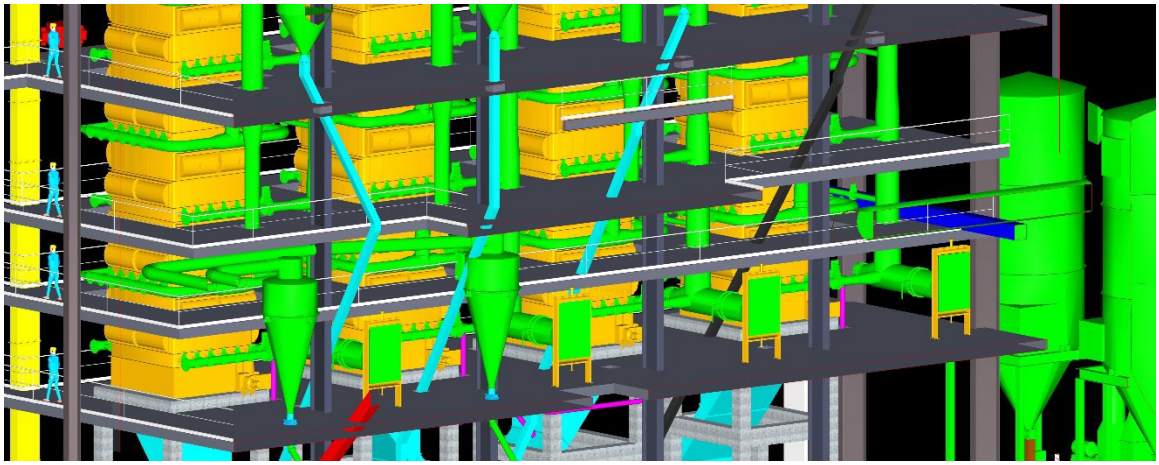


Figura 3-29: Vista tomas de aire bean heaters

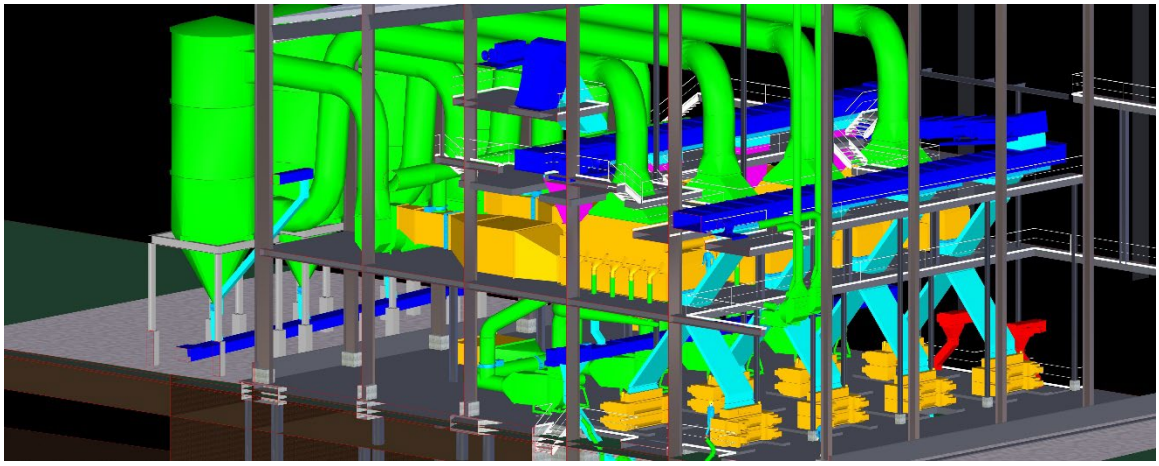


Figura 3-30: Vista jet dryers

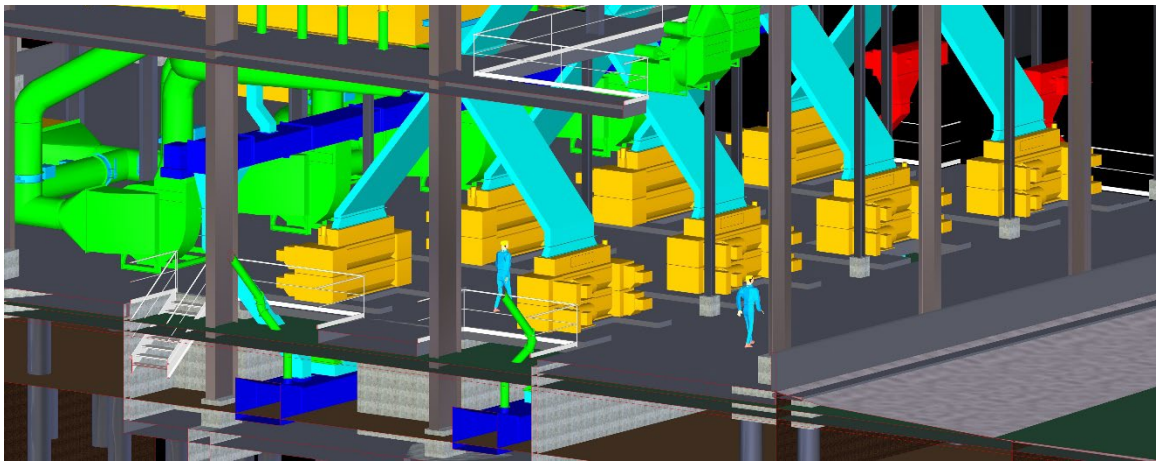


Figura 3-31: Vista quebradores de primera pasada

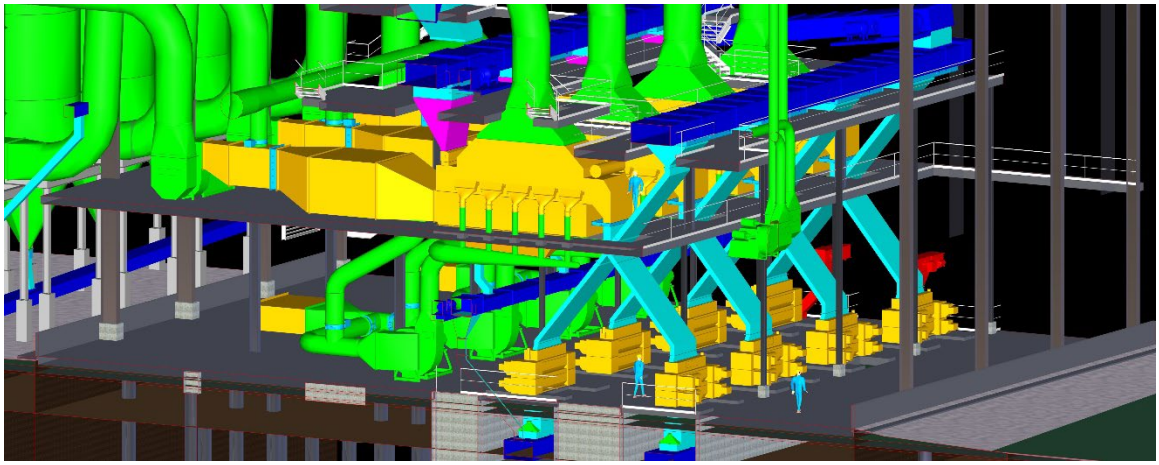


Figura 3-32: Vista jet dryers y quebradores

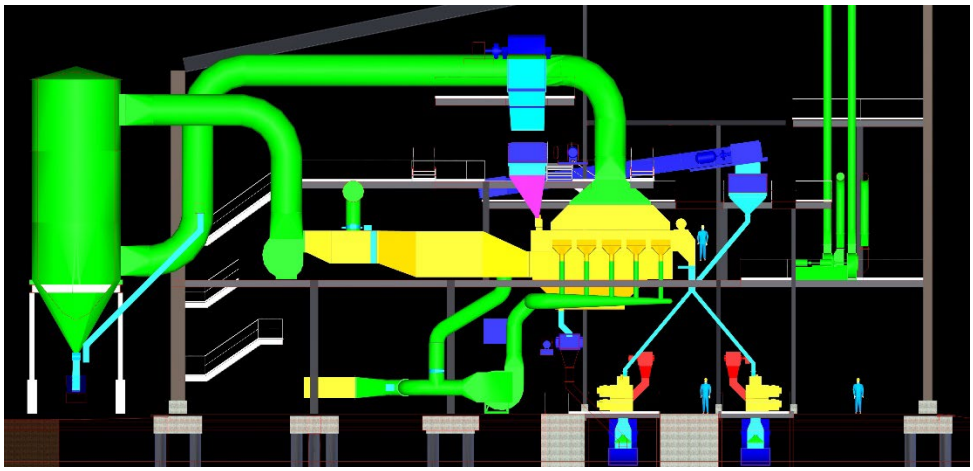


Figura 3-33: Vista lateral circuito de aire jet dryers

Detalle de los 4 Jet Dryers y sus conductos de recirculación de aire caliente, diseñados para provocar el choque térmico y el desprendimiento de la cáscara

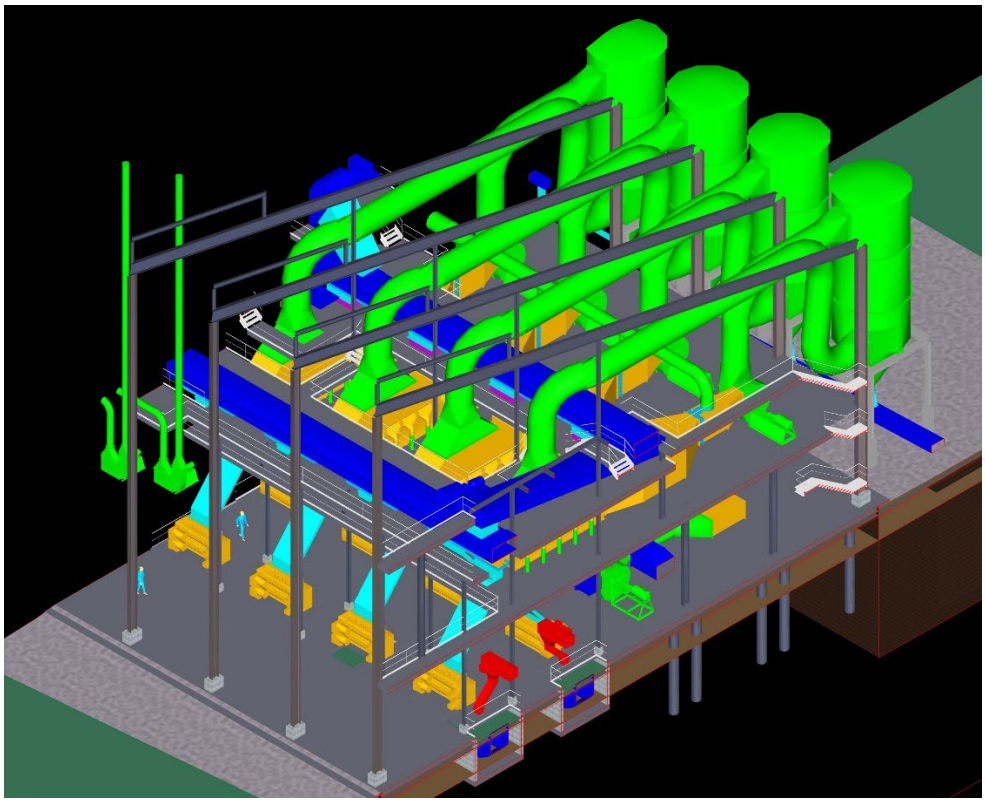


Figura 3-34: Vista superior circuito de aire jet dryers

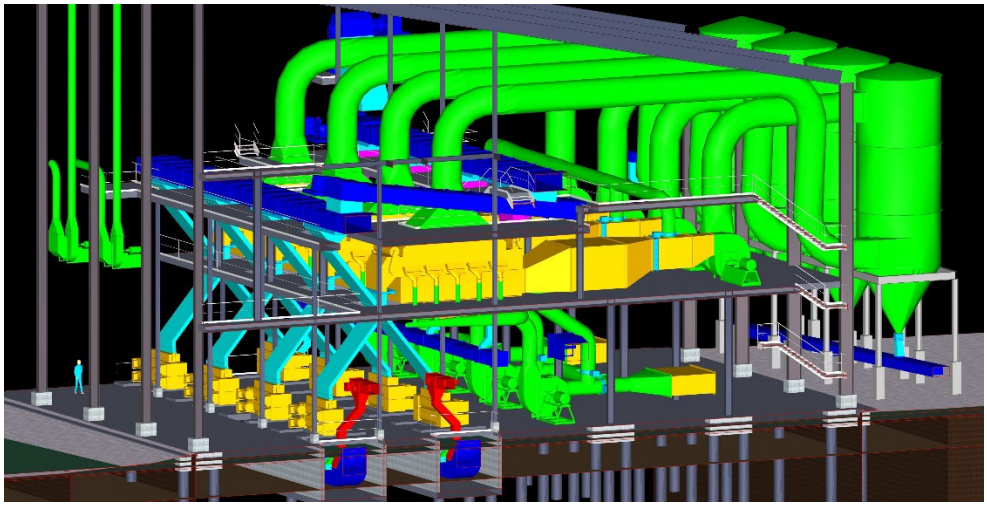


Figura 3-35: Vista arreglo mecánico jet dryers

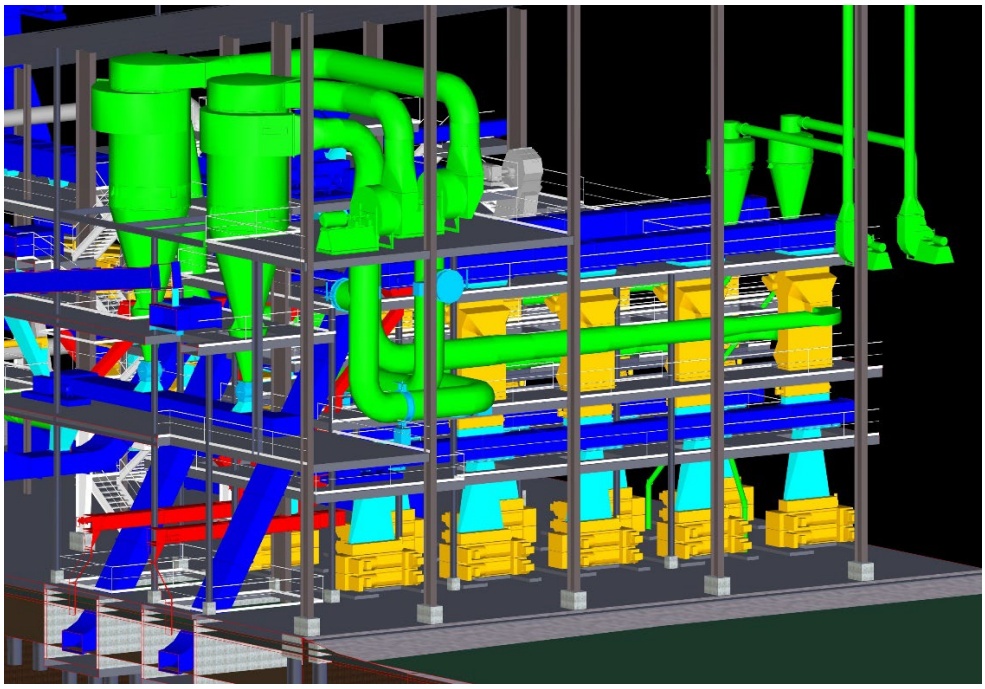


Figura 3-36: Vista multiaspiradores cd y quebradores de segunda pasada.

El sistema de aspiración de aire de los CD se destaca en verde y es donde se produce la primera separación importante de cascara, puede observarse como los dos ciclones descargan sobre un transporte que lleva el material a la planta de cascara.

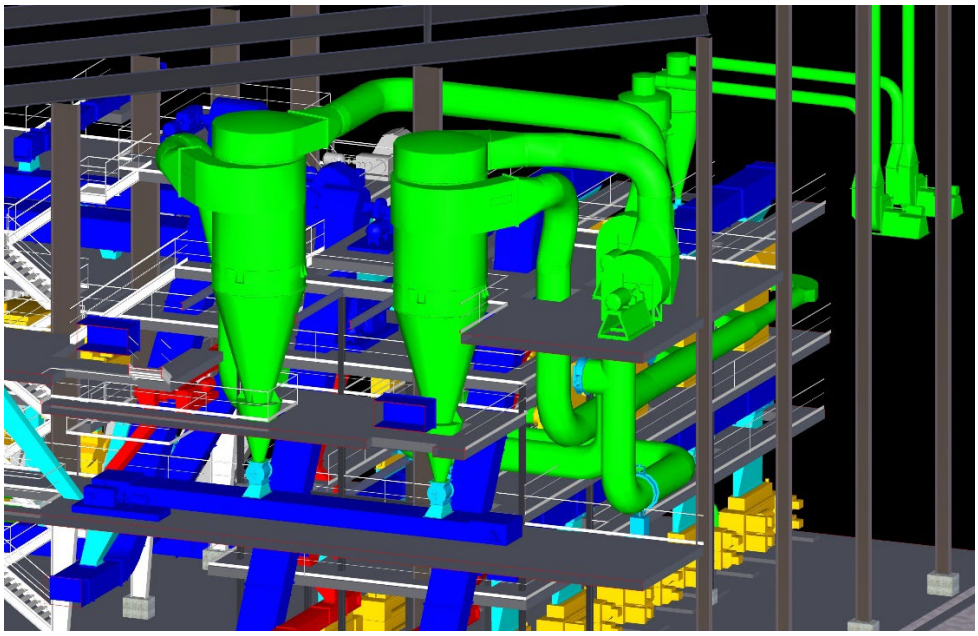


Figura 3-37: Vista ciclones de multiaspiradores cd

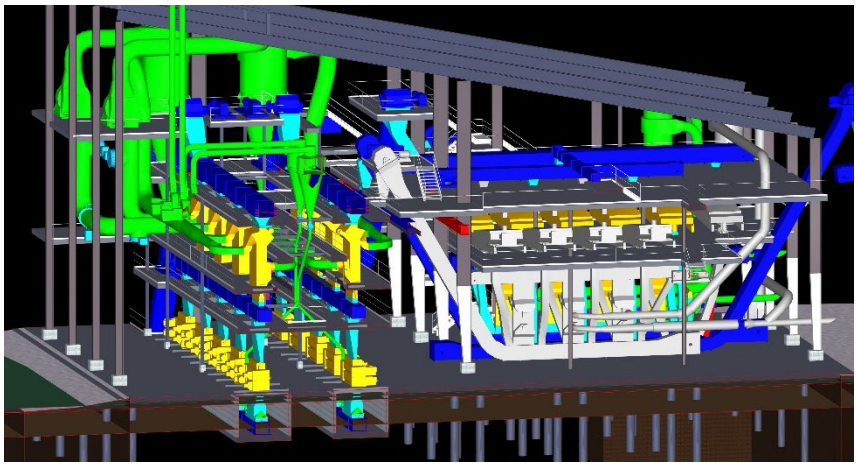


Figura 3-38: Vista general multiaspiradores y quebradores.

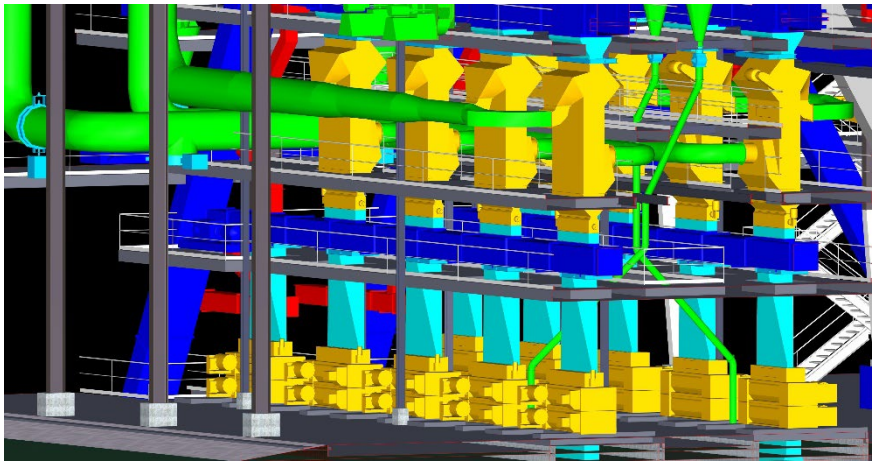


Figura 3-39: Vista quebradores de segunda pasada.

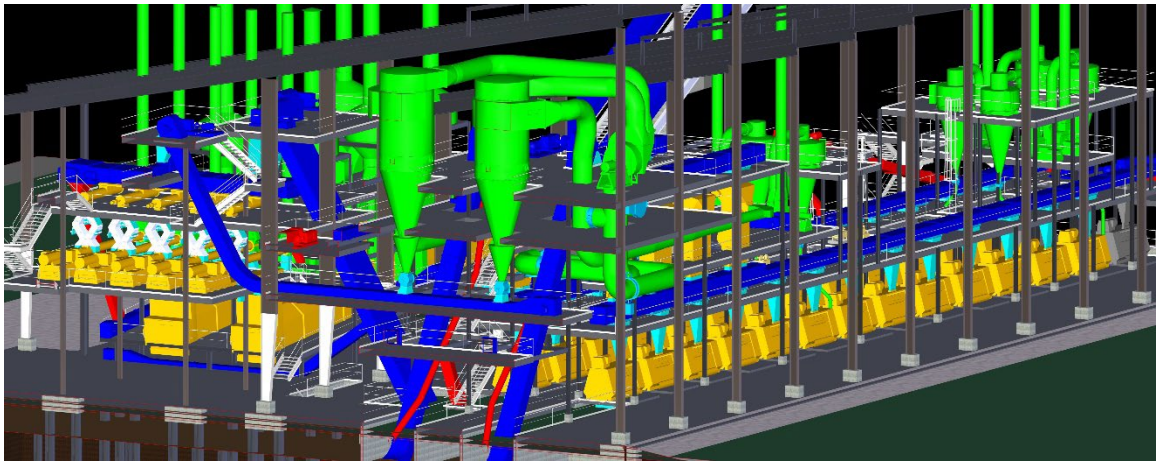


Figura 3-40: Vista general multiaspiradores cc, laminadores y expanders

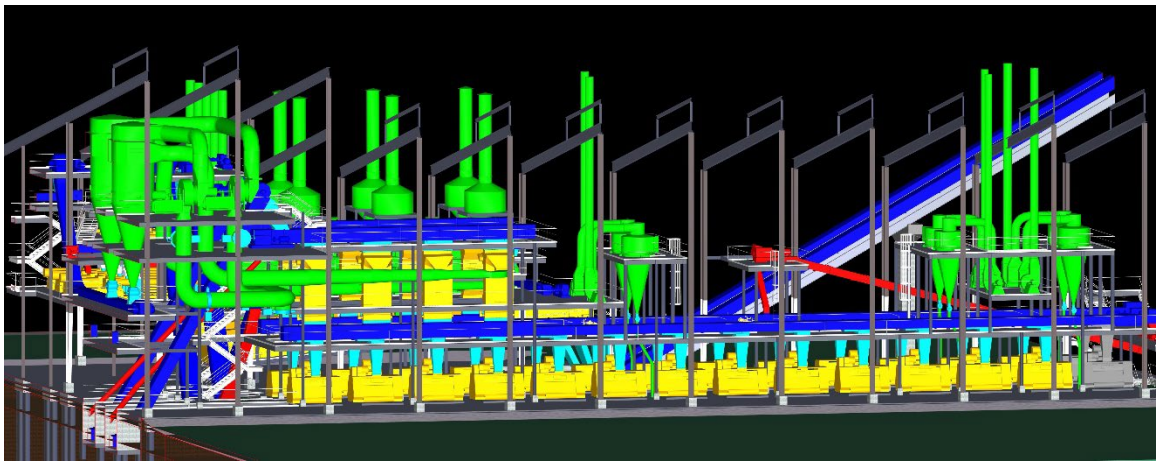


Figura 3-41: Vista multiaspiradores cc y laminadores

Se puede ver la disposición de los 28 laminadores (LAM-001 al 028) organizados en dos líneas operativas, con sus correspondientes tolvas de alimentación y sistemas de aspiración de finos.

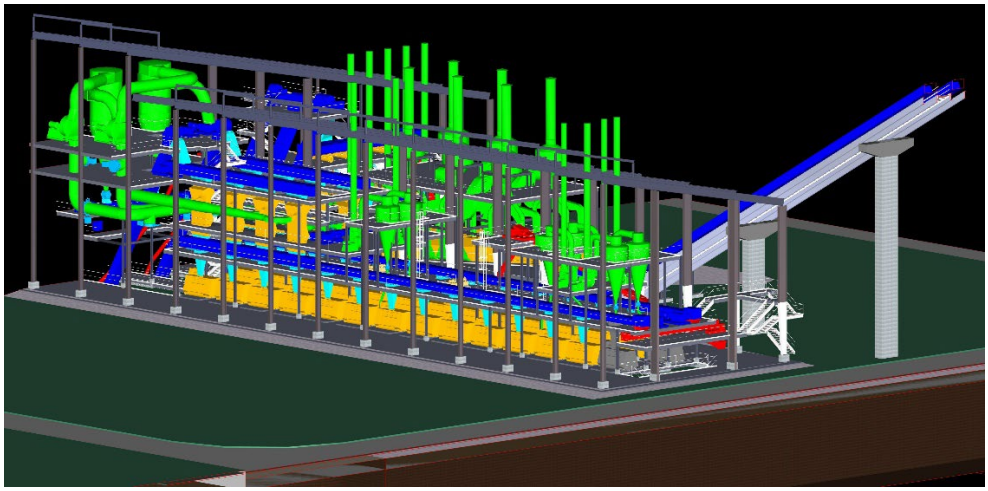


Figura 3-42: Vista laminadores

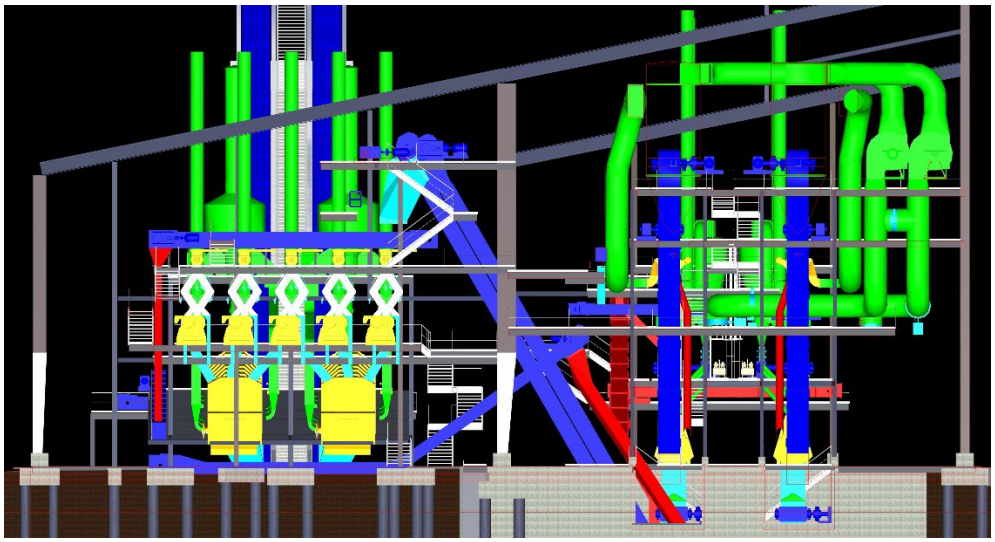


Figura 3-43: Vista vinculación laminadores expanders

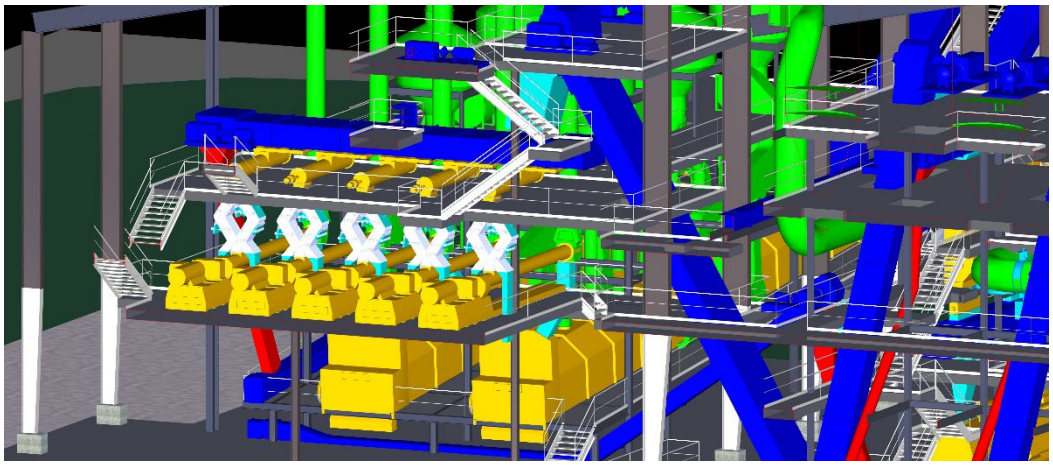


Figura 3-44: Vista alimentación expanders y enfriadores de expandido

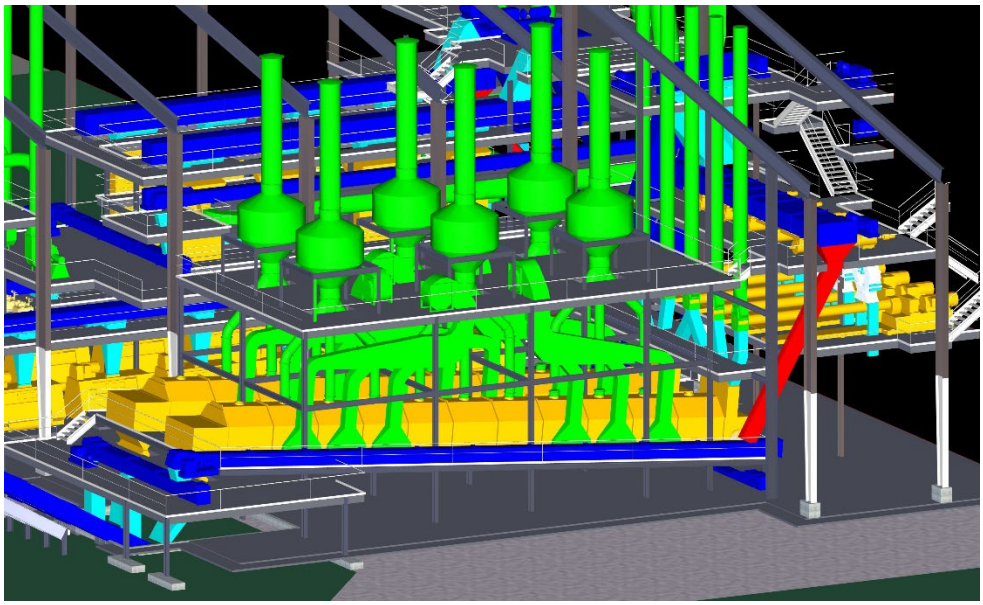


Figura 3-45: Vista expanders y enfriadores de expandido

Se puede ver el sector de expansión, a la derecha, mostrando los 5 expanders (EXP-001 al 005) que transforman la hojuela en collets porosos, en los cabezales de los expansores se encuentran las 5 chimeneas de vahos, en verd,e que expulsan la humedad al ambiente. A la izquierda se ve la disposición del transporte de enfriado de expandido y su sistema de extracción de humedad.

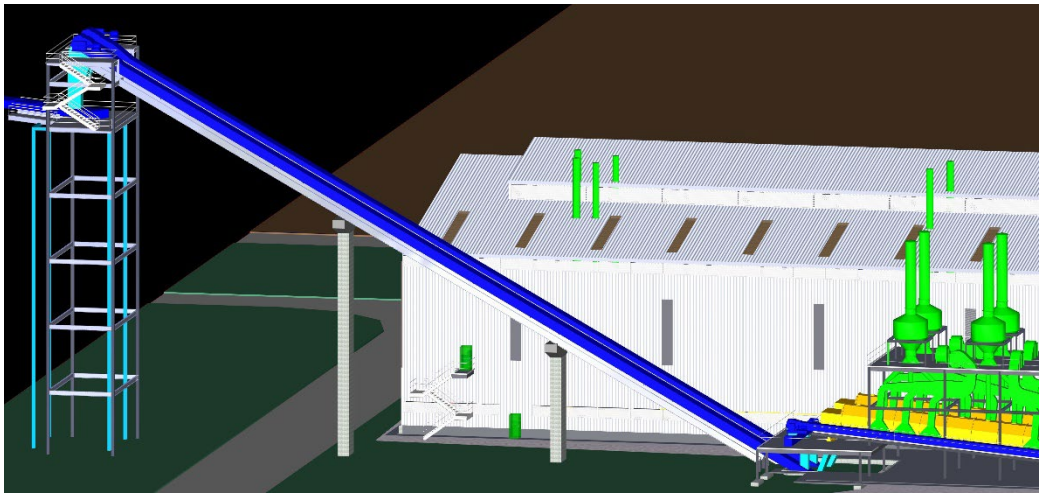


Figura 3-46: Vista transporte de entrada a extracción

Capítulo 4: Memoria de Cálculo

En este capítulo se desarrolla la verificación técnica y el dimensionamiento mecánico de los principales equipos y sistemas que componen la planta de preparación de soja. El objetivo de estas memorias de cálculo es validar, mediante el cálculo y estándares de ingeniería, las decisiones de diseño adoptadas, asegurando que las potencias motrices, capacidades de transporte y parámetros operativos respondan a las exigencias del balance de masa y los requerimientos funcionales del proceso detallados en los capítulos anteriores.

Cintas trasportadoras

El sistema de carga está diseñado para procesar un flujo nominal de 1.400 t/h, con una capacidad de diseño de 1.680 t/h para absorber picos de carga. El cálculo de la potencia motriz requerida para la cinta transportadora se realizó mediante una metodología simplificada basada en el procedimiento general recomendado por CEMA en el manual Belt Conveyors for Bulk Materials [2], considerando las resistencias principales al avance del sistema, la elevación del material y pérdidas accesorias asociadas al funcionamiento del equipo.

La potencia transmitida por la banda se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P = Te\,.V/1000 \quad (4.1)$$

Donde P es la potencia transmitida [kW], Te la tensión efectiva [N] y v la velocidad de banda [m/s].

La tensión efectiva total resulta de la siguiente ecuación:

$$Te = Tf + Th + Tx \quad (4.2)$$

Siendo Tf la resistencia horizontal, Th la resistencia vertical y Tx las resistencias accesorias.

La resistencia horizontal se calcula como:

$$Tf = L \cdot f \cdot g \cdot mt \quad (4.3)$$

La resistencia vertical:

$$Th = H \cdot g \cdot mm \quad (4.4)$$

La masa lineal transportada:

$$mm = Q/(3.6 \cdot v) \quad (4.5)$$

Cálculo de potencia motriz cinta transportadora CIN-318-ALS-5

Ver plano de implantación T03-DWM-PL-009, Anexo B, página 111

Datos de diseño:

Capacidad nominal: 1400 t/h

Sobredimensionamiento: 20%

Caudal de diseño Q: 1680 t/h

Densidad aparente: 0,72 t/m³

Longitud entre centros L: 130,81 m

Elevación H: 5,44 m

Velocidad v: 2,75 m/s

Ancho de banda: 1600 mm

Coeficiente global de fricción f: 0,03

Masa banda + rodillos: 95 kg/m

Eficiencia mecánica η: 0,92

Factor de servicio: 1,25

Desarrollo del cálculo:

$$mm = 1680/(3.6 \cdot 2.75) = 169.7\ kg/m$$

$$mt = 169.7 + 95 = 264.7\ kg/m$$

$$Tf = 130{,}81 \cdot 0{,}03 \cdot 9{,}81 \cdot 264{,}7 = 10200\ N$$

$$Th = 5{,}44 \cdot 9{,}81 \cdot 169{,}7 = 9050\ N$$

$$Te = 10\,200 + 9\,050 + 2\,500 = 21750\ N$$

$$Tx = 2500\ N$$

$$P = (21\,750 \cdot 2{,}75)/1000 = 59.8\ kW$$

$$Pm = 59{,}8/0{,}92 = 65.0\ kW$$

$$Pi = 65{,}0 \cdot 1{,}25 = 81.3\ kW$$

$$Psel = 90\ kW$$

Se selecciona una potencia comercial normalizada de 90 kW (120 HP), suficiente para garantizar operación continua, capacidad de arranque y margen frente a variaciones operativas.

Cálculo de potencia motriz cinta transportadora CIN-001-PLS-5

Ver plano de implantación T03-DWM-PL-010, Anexo B, página 112

Datos de diseño:

Capacidad nominal: 1400 t/h

Sobredimensionamiento: 20%

Caudal de diseño: 1680 t/h

Producto: soja

Densidad: 0,72 t/m³

Ancho banda: 1600 mm

Velocidad: 2,75 m/s

Longitud: 22,46 m

Elevación: 4,05 m

Masa banda + rodillos: 95 kg/m

f = 0,03

η = 0,92

fs = 1,25

$$P = (10\,210 \cdot 2{,}75)/1000 = 28.1\ kW$$

$$Pm = 28{,}1 \,/\, 0{,}92 = 30.5\ kW$$

$$Pi = 30{,}5 \cdot 1{,}25 = 38.1\ kW$$

$$P_sel = 45\ kW$$

Se selecciona una potencia comercial normalizada de 45 kW (60 HP)

Elevadores de cangilones

El cálculo de elevadores de cangilones se rige por la validación de la capacidad de los cangilones y el trabajo de elevación vertical pura.

La potencia en el eje se calcula según la Ecuación (4.6) establecida en el manual Belt Conveyors for Bulk Materials de CEMA [2], considerando un factor de pérdidas mecánicas por rozamiento y pick-up (fp) de 1,25:

$$Pe[kW] = (Q \cdot \frac{H}{367}) \cdot fp \quad (4.6)$$

Cálculo de potencia motriz noria NOR-001-PLS-3

Según el plano T03-DWM-PL-014, Anexo B, página 116 la altura entre centros (H) es de 45,80 m con la capacidad para elevar 600 t/h.

$$Pe = (600 \cdot 45{,}80/367) \cdot 1{,}25 = 93{,}59\ kW$$

Aplicando la eficiencia de transmisión (η=0,82):

$$Pm = \frac{93{,}59}{0.82} = 114.3\ kW$$

Se selecciona una potencia comercial normalizada de 112 kW (150 HP)

Cálculo de potencia motriz noria NOR-005-PLS-3

Según el plano de implantación T03-DWM-PL-015, anexo B, página 126, la altura entre centros es 40,62 m

$Pe = (600 \cdot 40{,}62\ /\ 367) \cdot 1{,}25 = 83{,}01\ kW$

Aplicando la eficiencia de transmisión (η = 0,82):

$$Pm = \frac{83{,}01}{0.82} = 101.23\ kW$$

Se selecciona una potencia comercial normalizada de 112 kW (150 HP)

Transportes a cadena

El dimensionamiento de estas unidades se basa en el principio de arrastre mecánico, donde es necesario vencer tanto la resistencia por fricción de los componentes móviles como la fricción interna del material contra la carcasa del equipo.

Para la determinación de la potencia necesaria en el eje del tambor motriz (*Pe*), se utiliza la metodología propuesta por el estándar Link-Belt (Material Handling Equipment Catalog 1000) [6]. La expresión general de la formula (4.7) considera el trabajo necesario para mover la cadena en vacío, el arrastre del material y, en los casos que corresponda, la elevación del flujo:

$$Pe[kW] = \frac{\left((2 \cdot Wc \cdot L \cdot fc) + (Q \cdot L \cdot fm) + (Q \cdot H)\right)}{367} \cdot fp \quad (4.7)$$

Donde los términos de la Ecuación (4.7) se definen de la siguiente manera:

Wc : Peso de la cadena y paletas transportadoras por unidad de longitud [*kg*/*m*].

L : Longitud entre centros de piñones del transportador [*m*].

fc : Coeficiente de fricción de la cadena deslizándose sobre sus guías de desgaste (típicamente 0,33 para acero sobre polímeros de ingeniería o materiales antifricción) [6].

Q : Capacidad másica de transporte [*t*/*h*].

fm : Coeficiente de fricción del material transportado (soja) contra el fondo y laterales de la carcasa (estimado en 0,45 para granos oleaginosos) [6].

H : Altura de elevación en tramos inclinados [*m*].

fp : Factor de pérdidas por componentes adicionales (rodamientos, piñones y fricción en sellos), adoptado entre 1,25 por base de diseño.

Finalmente, para la selección del motor comercial, se calcula la potencia motriz instalada (Pm) considerando la eficiencia de la transmisión (η):

$$Pm = \frac{\eta}{Pe} \quad (4.8)$$

De acuerdo con las bases de diseño de este proyecto, se adopta una eficiencia η=0,82

Factores de diseño: $fc = 0{,}33$; $fm = 0{,}45$; $fp = 1{,}15$; $\eta = 0{,}82$ [6].

Cálculo de potencia motriz transporte a cadena TAC-006-PLS-3

Este equipo opera como un transportador de recirculación de fondo doble, recolectando el grano de los cuatro cernidores rotativos en su parte superior para luego transferirlo al nivel inferior y distribuirlo hacia los multiaspiradores. Ver plano T03-LYM-PR-482, anexo B, pagina 120. Esta configuración implica que el trabajo de arrastre del material se realiza sobre una extensión equivalente al doble de la longitud física del equipo.

Capacidad nominal (Q): 500 t/h

Longitud entre centros de piñones (L): 32,20 m

Longitud efectiva de arrastre (Lm): 64,40 m (2×L).

Cadena: WHX 159 Doble (Wc = 45 kg/m)

$$Pe = \frac{(2 \cdot 45 \cdot 32{,}2 \cdot 0{,}33) + (500 \cdot 64{,}40 \cdot 0{,}45)}{367} \cdot 1{,}15 = \ 48{,}41\ kW$$

Potencia del motor requerida (Pm): Considerando una eficiencia de transmisión η = 0,82.

$$Pm = \frac{48{,}41}{0{,}82} = 59{,}04\ kW$$

Se selecciona un motor comercial normalizado de 90 kW (125 HP).

Cálculo de potencia motriz transporte a cadena TAC-032-PR-3

Este equipo recolecta la cáscara separada por los multiaspiradores CC y la eleva hacia el sector de repaso de cáscara y peletería. Al ser un equipo de flujo másico con cambio de dirección vertical, el cálculo debe considerar tanto el arrastre horizontal como el trabajo de elevación y el rozamiento en la curva de 60°. Ver Plano T03-LYM-PR-496, Anexo B, pagina 140.

Datos de Diseño:

Material: Cáscara de soja (ρ = 0,20 t/m^3).

Capacidad de operación (Q): 45 t/h

Proyección horizontal total (L): 26,81 m

Proyección vertical total (H): 9,55 m

Cadena: WHX 132 Simple (Wc ≈ 15 kg/m)

$$Pe = \frac{(2 \cdot 15 \cdot 26{,}81 \cdot 0{,}33) + (45 \cdot 26{,}81 \cdot 0{,}45) + (45 \cdot 9{,}55)}{367} \cdot 1{,}15 = \ 3{,}87\ kW$$

Potencia del motor requerida (Pm): Considerando una eficiencia de transmisión η = 0,82.

$$Pm = \frac{3{,}87}{0{,}82} = 4{,}72kW$$

Se selecciona un motor comercial normalizado de 5,5 kW (7,5 HP).

Cálculo de potencia motriz transporte a cadena TAC-033-PR-3

Este equipo se encarga de la distribución del grano acondicionado hacia los multiaspiradores de segunda pasada. Presenta una configuración de cajón doble con fondo doble total, lo que implica que la trayectoria de arrastre del material (Lm) es equivalente a dos veces la longitud entre centros de piñones. Basado en el plano T03-LYM-PR-497, Anexo B, página 150 y los parámetros de operación definidos, se procede al cálculo de potencia.

Capacidad de operación (Q): 290 t/h.

Longitud entre centros de piñones (L): 21,80 m

Longitud efectiva de arrastre de material (Lm): 43,60 m (2×L).

Cadena: WHX 157 Simple (Wc ≈ 15 kg/m)

$$Pe = \frac{(2 \cdot 15 \cdot 21{,}8 \cdot 0{,}33) + (290 \cdot 43{,}60 \cdot 0{,}45)}{367} \cdot 1{,}15 = \ 18{,}51\ kW$$

Potencia del motor requerida (Pm): Considerando una eficiencia de trnsmisión η = 0,82.

$$Pm = \frac{18{,}51}{0{,}82} = 22{,}58\ kW$$

Se selecciona un motor comercial normalizado de 30 kW (40 HP).

Cálculo de potencia motriz transporte a cadena TAC-035-PR-3

Este equipo es responsable de la distribución del grano quebrado hacia las tolvas de alimentación de los 28 laminadores. Según el plano T03-LYM-PR-499, Anexo B, página 151, presenta una configuración mixta de cajón doble para manejar la descarga de los multiaspiradores llevar el material hasta un extremo y luego distribuir, por el cajón inferior, el flujo en los laminadores convirtiéndose posteriormente en simple cajón.

Capacidad (Q): 290 t/h (Nominal para la línea de laminación)

Longitud efectiva de transporte (L): 66,52 m + 18,00 m = 84,52 m

Elevación (H): 0 m (Transporte horizontal).

Cadena: WHX 157 Doble (Wc = 30 kg/m).

$$Pe = \frac{(2 \cdot 30 \cdot 67{,}60 \cdot 0{,}33) + (290 \cdot 84{,}52 \cdot 0{,}45)}{367} \cdot 1{,}15 = \ 38{,}75\ kW$$

Potencia del motor requerida (Pm): Considerando una eficiencia de transmisión η = 0,82.

$$Pm = \frac{38{,}75}{0{,}82} = 47{,}26\ kW$$

Se selecciona un motor comercial normalizado de 55 kW (75 HP).

Balance térmico en acondicionadores de granos (Bean Heaters)

Esta sección verifica la demanda de energía térmica y el consumo de vapor para las cuatro unidades AVS-001/002/003/004-PR-3 operando en paralelo.

El intercambio de calor se produce de manera indirecta entre el vapor saturado y el flujo gravitacional de granos. Para el cálculo, se considera el flujo másico total proveniente de la prelimpieza (corriente F2) y la energía necesaria tanto para el calentamiento sensible del grano como para la evaporación de la humedad extraída (corriente F5). Ver diagrama T03-DWP-00-103, Anexo A, página 103.

Flujo másico de soja ($mF2$): 465,97 t/h (129,44 kg/s).

Humedad removida ($mF5$): 10,47 t/h (2,91 kg/s).

Calor específico de la soja (Cp): 1,91 kJ/kg◦C (valor para soja al 13% de humedad).

Salto térmico (ΔT): Se asume un calentamiento desde 20 ◦C (ambiente) hasta 60 ◦C (proceso).

Eficiencia térmica del equipo (ηth): 0,95 (considerando un 5% de pérdidas al ambiente).

Cálculo de la potencia térmica requerida ($qtot$):

La demanda total de calor es la suma del calor sensible para elevar la temperatura del grano (qs) y el calor latente necesario para evaporar el agua retirada (ql). Principio general de termodinámica, formulas obtenidas de Kern, D. Q. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor* [7]

Calor sensible (qs):

$$qs = mF2 \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (4.9)$$

$$qs = 129{,}44\ kg/s \cdot 1{,}91\ kJ/kg \cdot ℃ \cdot (60 - 20)\ ℃ = 9.889{,}2\ kW$$

Calor latente de evaporación (ql): Considerando un calor latente de vaporización del agua (λw) de aproximadamente 2.257 kJ/kg

$$ql = mF5 \cdot \lambda w \quad (4.10)$$

$$ql = 2{,}91\ kg/s \cdot 2.257\ kJ/kg = 6.567{,}9\ kW$$

Potencia total del sistema ($qtot$):

$$qtot = \frac{(qs + ql)}{\eta th} = \frac{9.889{,}2 + 6.567{,}9}{0{,}95} = 17.323{,}3\ kW$$

Consumo de vapor saturado:

Para cubrir esta demanda, se utiliza vapor saturado de baja presión a 2 *bar* manométricos. A esta presión, el calor latente de condensación del vapor (*λs*) es de aproximadamente 2.201 *kJ*/*kg*. El flujo de vapor necesario (*mv*) se determina mediante:

$$mv = \frac{qtot}{\lambda s}\ (4.11)$$

$$mv = 17.323{,}3\ kW / 2.201\ kJ/kg = 7{,}87\ kg/s \approx 28{,}33\ t/h$$

Dado que el sistema cuenta con 4 acondicionadores, cada unidad AVS-PR-3 debe ser capaz de intercambiar aproximadamente 4.330 kW con un consumo individual de vapor de 7,08 t/h.

Balance térmico en secadores de chorro de aire (Jet Dryers)

Esta sección verifica la demanda de potencia térmica y el consumo de vapor de los aerotermos (CDR-007 al 010-PR-3) asociados a las cuatro unidades JED-001/002/003/004-PR-3. El cálculo se basa en el flujo de material proveniente de los Bean Heaters (corriente F6) y la remoción de humedad superficial residual (corriente F7) necesaria para la contracción de la cáscara. Ver diagrama T03-DWP-00-103, Anexo A, página 103.

Datos extraídos del Balance de Masa y Bases de Diseño:

- Flujo másico de soja ($mF6$): 455,495 t/h (126,53 kg/s).
- Humedad removida ($mF7$): 2,595 t/h (0,72 kg/s).
- Calor específico de la soja (Cp): 1,91 kJ/kg◦C (para soja al 11% de humedad).

- Incremento térmico (ΔT): Se considera un salto de 20 ◦C (desde los 60 ◦C de salida del BH hasta los 80 ◦C requeridos para el choque térmico).
- Eficiencia térmica del sistema (ηth): 0,90 (considerando recirculación de aire y pérdidas en conductos)

La energía térmica entregada por los aerotermos debe cubrir el calor sensible de la masa de grano (qs) y el calor latente de evaporación del agua superficial (ql) [7].

Calor sensible (qs):

$$qs = 126{,}53\ kg/s \cdot 1{,}91\ kJ/kg \cdot ℃ \cdot (80 - 60)\ ℃ = 4.833{,}4\ kW$$

Calor latente de evaporación (ql): Considerando el calor latente de vaporización del agua (λw) de 2.257 kJ/kg:

$$ql = 0{,}72\ kg/s \cdot 2.257\ kJ/kg = 1625{,}0\ kW$$

Potencia total del sistema ($qtot$):

$$qtot = \frac{(qs + ql)}{\eta th} = \frac{4.833{,}4 + 1625{,}0}{0{,}90} = 7.176{,}0\ kW$$

Consumo de vapor de proceso

Los aerotermos utilizan vapor saturado para calentar las corrientes de aire. Para vapor a 2 *bar* manométricos ($\lambda s \approx 2.201$ *kJ/kg*), el flujo másico de vapor total (*mv*) es:

$$mv = 7.176{,}0\ kW / 2.201\ kJ/kg = 3{,}26\ kg/s \approx 11{,}76\ t/h$$

Al disponer de 4 líneas en paralelo, cada conjunto de secado (Jet Dryer + Aerotermo) demanda aproximadamente 1.794 kW con un consumo individual de vapor de 2,93 t/h.

Cálculo de potencia motriz sistema de aire de Jet Dryers

El aire es el vehículo encargado de transferir la potencia térmica calculada y mantener el lecho fluidizado. Esta sección valida la potencia instalada de los ventiladores

principales. según el plano del calentador E4538, Anexo B, página 131, cada unidad opera con los siguientes parámetros del flujo de aire:

Caudal nominal: 61.500 SCFM (1.750 SCMM o 29,17 m^3/s).

Caída de presión en el calentador ($\Delta Phtr$): 1,87 in WG (47,5 mmca).

Pérdida de carga total del sistema ($\Delta Ptot$):

Se estima la resistencia total del circuito cerrado, considerando los conductos de recirculación mostrados en el plano T03-DWM-PR-003. Anexo B, página 129:

Calentador (CDR): 1,87 *inWG*

Filtro de Mangas (FIL-001): 5,13 *inWG* (pérdida operativa estimada)

Ductos y Lecho de Soja: 3,00 *inWG* (fricción y contrapresión de fluidización)

Total: $\Delta Ptot$ = 10 inWG (= 2.490Pa)

Verificación de la potencia de los ventiladores:

Utilizando la ecuación fundamental de potencia aerodinámica para ventiladores centrífugos industriales (Buffalo Forge, 1999) [8]:

$$Pabs[kW] = \frac{\left(Qvol\ \left[\frac{m^3}{s}\right] \cdot \Delta Ptot\ [Pa]\right)}{(1000 \cdot \eta fan)} \quad (4.12)$$

Considerando una eficiencia del ventilador (ηfan) de 0,75:

$$Pabs = (29{,}17\ m^3/s \cdot 2.491\ Pa)\ /\ (1000 \cdot 0{,}75)\ = \mathbf{96,88}\ kW\ \approx \mathbf{130}\boldsymbol{HP}$$

Se selecciona un motor comercial normalizado de 200 HP. Aunque la potencia de operación calculada en régimen es de 96,88 kW (aprox. 130 HP), la selección de 200 HP se justifica por tres criterios:

Arranque en frío: En el arranque, el aire está a temperatura ambiente (≈20 ◦C), siendo un 20% más denso que a temperatura de proceso (80 ◦C), lo que incrementa proporcionalmente la potencia absorbida inicial.

Inercia del Rotor (WK 2): El gran porte del rodete requiere un torque de aceleración elevado para alcanzar la velocidad de régimen en un tiempo que no sature las protecciones térmicas del motor.

Ensuciamiento de Filtros: El motor de 200 HP garantiza que el caudal de aire no decaiga cuando las mangas del filtro (FIL-001-PR-3) presentan una mayor resistencia al paso del aire antes de su ciclo de limpieza.

Verificación del sistema de aspiración de laminadores

El proceso de laminación genera una cantidad significativa de partículas finas y polvo en suspensión en los puntos de descarga de los rolos hacia los transportadores colectores (TAC-038-PR-3 y TAC-038-PR-3). Esta sección verifica el dimensionamiento de la red de conductos y la potencia de los ventiladores (VEN-073/074-PR-3) para asegurar el transporte neumático de los finos hacia los ciclones de separación.

Para evitar la sedimentación de polvo de soja (material orgánico con contenido graso) dentro de los conductos, se debe garantizar una velocidad de transporte mínima de 20 m/s [7].

Datos extraídos del plano T03-DWM-PR-034, Anexo B, página 152:

- Cantidad de puntos de aspiración (Sector Norte): 14 laminadores (LAM-001 al 014).
- Diámetro de toma individual por equipo: Ø175 mm.
- Diámetro del conducto colector principal: Ø660 mm.
- Equipos de separación: 3 ciclones por línea (CYC-019/020-PR-3).
- Eficiencia del ventilador (ηfan): 0,70.

Cálculo del caudal de aire necesario ($Qtot$):

Primero determinamos el caudal requerido en cada boca de laminador para mantener la velocidad de transporte de 22 m/s en el tramo inicial de Ø175 mm (0,175 m):

Área del conducto individual ($Aind$):

$$Aind = \pi \cdot d^2 \,/\, 4 = \pi \cdot (0{,}175m)^2 \,/\, 4 = 0{,}024\, m^2 \quad (4.13)$$

Caudal de aire por laminador ($Qind$):

$$Qind = Aind \cdot Vtransp = 0{,}024\, m^2 \cdot 22\, m/s = 0{,}528\, m^3/s$$

Esto equivale a aproximadamente 1.900 m³/h por cada equipo.

Caudal total del sistema (Sector Norte - 14 equipos):

$$Qtot = 14 \cdot Qind = 14 \cdot 0{,}528\, m^3/s = \mathbf{7{,}39\ m^3/s}\ (\approx 26.600\, m^3/h)$$

Verificación de velocidad en el colector principal:

Validamos que el diámetro de Ø660 mm (0,66 m) indicado en el plano mantenga la velocidad de transporte para el caudal total:

$$Vmain = \frac{Qtot}{Amain} = \frac{7{,}39\,\frac{m^3}{s}}{\frac{\pi\,(0{,}66)^2}{4}} = \frac{7{,}39}{0{,}342} = \mathbf{21{,}6\ m/s}$$

Resultado: La velocidad obtenida (**21,6 m/s**) se encuentra dentro del rango de diseño recomendado (>20 *m*/*s*), validando los diámetros propuestos.

Cálculo de la potencia del ventilador de aspiración:

Lo primero será hacer un cálculo detallado de pérdida de carga en conductos de laminación. Para garantizar que el ventilador VEN-073-PR-3 venza la resistencia del sistema, se analiza el camino más desfavorable de la red ramificada. En esta configuración, los 14 laminadores de la línea Norte se dividen en sub-grupos, cuyas descargas son procesadas por tres ciclones de alta eficiencia (CYC-019, CYC-021 y CYC-023) operando en paralelo.

Parámetros de aire y flujo

- Caudal total de la línea (14 máquinas): 7,39 m^3/s (26.600 m^3/h).

- Caudal por ciclón (promedio): $Qcyc$ = 37,39 = 2,46 m^3/s por unidad.
- Velocidad de transporte (*V*): 22 *m*/*s* (para evitar sedimentación de finos en conductos [8]).
- Presión dinámica (*Pd*): $Pd = \rho \cdot V^2 / 2$ = 290,4 Pa (≈ 29,6 *mmca*)

Pérdidas por fricción y accesorios ($Hred$):

Se calcula la caída de presión en el tramo más alejado hasta el colector común que ingresa a los ciclones:

Fricción en tramos rectos: Utilizando el ábaco de fricción para conductos de acero liso (Buffalo Forge, 1999) [8]:

Colector Principal (Ø660mm): Longitud L= 45m. Pérdida unitaria j ≈ 0,75 mmca/m

$$Hf(colector) = 45\ m \cdot 0{,}75\ mmca/m = 33{,}75\ mmca$$

Ramales individuales (Ø175mm): Longitud L = 5m. Pérdida unitaria j ≈1,5 mmca/m.

$$Hf(ramal) = 5m \cdot 1{,}5\ mmca/m = 7{,}5\ \ mmca$$

Total fricción Hf = 41,25 mmca. (extensión de los ramales según plano T03-DWM-PR-034, Anexo B, página 152).

Pérdidas en accesorios y singularidades (Hs): Calculadas mediante coeficientes *K* aplicados a la presión dinámica (*Pd*):

- Entrada en campana (1 ud): *K* = 0,50 → 0,50·29,6 = 14,8 mmca.
- Codos 90° gran radio (3 ud): *K* = 0,25→3·(0,25·29,6) = 22,2 mmca.
- Entradas laterales (13 ud): *K* = 0,15→13·(0,15·29,6) = 57,7mmca.

  Total accesorios Hs = 94,7 mmca.

Pérdida en equipos de separación ($Hcyc$)

Al distribuir el flujo en tres ciclones, se logra mantener una caída de presión controlada y una alta eficiencia de captación:

Caída de presión por ciclón: 150 mmca (1.471 *Pa*) (Kern, 1999) [7].

Sumatoria de pérdida de carga total ($\Delta Ptot$)

$$\Delta Ptot = Hf + Hs + Hcyc$$

$$\Delta Ptot = 41{,}25 + 94{,}7 + 150 = \mathbf{285{,}95\ mmca} \approx \mathbf{2.805\ Pa}$$

Verificación de la potencia motriz del ventilador

Utilizando la ecuación de potencia aerodinámica (4.12) para el caudal total de la línea (7,39 *m*3/*s*) y una eficiencia de ventilador del 70%:

$$Pabs = \frac{7{,}39 \cdot 2805}{1000 \cdot 0{,}70} = \mathbf{29{,}61\ kW} (\approx 39{,}7HP)$$

Selección del motor: Se ratifica la selección de un motor comercial de 33 kW (45 HP) para los ventiladores VEN-073/074-PR-3. Esta potencia instalada cubre la demanda de operación y ofrece un margen de seguridad frente al ensuciamiento progresivo de los ciclones y las variaciones de carga en los laminadores.

Verificación del sistema de aire multiaspiradores CC

Parámetros de aire y caudal total

El cálculo se realiza para el ramal norte, el cual alimenta a 4 multiaspiradores operando en paralelo según la red ramificada del plano T01-DWM-PR-031, Anexo B, página145.

- Caudal por equipo ($Qind$): 4,9 m^3/s (Requerimiento de proceso).
- Caudal total por sector (4 equipos): $Qsector$ =19,6 m^3/s (70.560 m^3/h).

- Velocidad de transporte (V): 25 m/s (Para asegurar la sustentación de la cáscara residual F13).
- Presión Dinámica (Pd): $Pd = 1 \cdot \rho \cdot V^2 / 2$ = 375Pa (≈ 38,2 mmca)

Cálculo detallado de la pérdida de carga total ($\Delta Ptot$)

Sumamos las resistencias del circuito desde la aspiración en las bandejas del CC hasta la descarga externa del ventilador:

- Fricción en conductos (∅1000 mm): 39,0 mmca (Basado en longitud equivalente y ábaco de fricción [8]).
- Pérdidas en accesorios (Hs): $Ktot \cdot Pd$ = 2,5·38,2 = 95,5 mmca (Incluye codos de gran radio y derivaciones tipo pantalón).
- Resistencia del Multiaspirador ($Hmul$): 150,0 mmca (Valor de diseño para equipos en operación con lecho de soja)
- Pérdida en ciclón de separación ($Hcyc$): 150,0mmca (Valor estándar para ciclones de alta eficiencia destinados a captación de fibra y polvillo).

Caída de presión estática total del sistema:

$$\Delta Ptot = 39{,}0 + 95{,}5 + 150 + 150 = 434{,}5\ mmca \approx 4.261\ Pa$$

Verificación de la potencia motriz del ventilador:

Utilizando la ecuación fundamental de potencia aerodinámica para ventiladores industriales y una eficiencia de ventilador del 70%:

$$Pabs = \frac{19{,}6 \cdot 4261}{1000 \cdot 0{,}70} = \mathbf{119{,}31\ kW}$$

Conversión a HP: $Pabs$ ≈ 160,0 HP

Dada la elevada potencia absorbida calculada (160HP) y considerando que el arranque se realiza con aire a temperatura ambiente (más denso que el aire de proceso), se debe seleccionar el escalón de potencia normalizada que garantice confiabilidad operativa:

Potencia comercial seleccionada: 132 kW (175 / 200HP).

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Tras el desarrollo del diseño integral de la planta de preparación de soja con una capacidad de procesamiento de 10.000 t/día, se presentan las siguientes conclusiones técnicas:

Optimización mediante el aumento de la concentración de la fase oleaginosa

El análisis del balance de masa global y de todos los procesos involucrados ratifica que la línea de preparación opera eficientemente como un sistema de concentración de material graso. Mientras que la masa total de aceite ingresada permanece constante en 1.900 t/día, el proceso logra una reducción del volumen total de material mediante la eliminación selectiva de impurezas, humedad y cáscara. Como resultado, la concentración grasa relativa se incrementa del 16,1% en el ingreso bruto al 19% en el producto final preparado, optimizando las condiciones de transferencia de masa para la etapa posterior de extracción por solvente.

Eficiencia en grandes flujos y recuperación proteica

Dada la magnitud de procesamiento de la planta (11.802 t/día de ingreso bruto), la eficiencia del sistema se mide en la capacidad de minimizar la pérdida de material útil en las corrientes de descarte y minimizar todo lo posible el material destinado para pelleteado. Al tratarse de flujos grandes, incluso un porcentaje mínimo de contenido proteico arrastrado en el descarte representa muchas toneladas de pérdida económica diaria. Por ello, el diseño se ha centrado en:

Selección de cáscara de alta pureza: El uso de sistemas de separación neumática multietapa (CD y CC) permite que la cáscara retirada lleve el mínimo contenido posible de partículas de grano, asegurando que la proteína permanezca en la línea principal de proceso.

Recuperación de finos: Los sistemas de aspiración y filtrado reinsertan el particulado orgánico recolectado, en el flujo principal del sistema y en el caso de ser material que por diversas características no es apto para continuar hacia la extracción se lo deriva hacia la planta de pellet, valorizando subproductos que, de otro modo, representarían una pérdida neta de masa útil.

Eficiencia térmica y aislamiento de equipos

Para garantizar la sostenibilidad energética y evitar el desperdicio de calor, el diseño contempla que los equipos críticos sean sometidos a un proceso de aislación térmica con lana de roca y encamisado de chapa. Este tratamiento asegura que la energía se mantenga dentro del proceso, mejorando el rendimiento de componentes clave como:

Acondicionadores de grano (Bean Heaters) y Jet Dryers: Para maximizar la transferencia de calor y mantener la temperatura del aire necesaria para el choque térmico.

Transportes a cadena (TACs) y cañerías de vapor: Evitando el enfriamiento prematuro del material acondicionado y el recubrimiento de cañerías asegura la eficiencia en el transporte de energía térmica desde su generación.

El modelo digital 3D y la accesibilidad operativa

La materialización de un arreglo mecánico tridimensional fue fundamental para establecer las áreas operativas y validar la factibilidad del diseño. A diferencia de otras plantas donde el área puede parecer optimizada o reducida, pero resulta excesivamente ajustada, este proyecto se rige por una ideología de diseño espaciosa.

El uso del modelo digital permitió garantizar los espacios necesarios para un correcto mantenimiento y facilidad de acceso, otorgando ventajas ergonómicas críticas para el operario. Esta amplitud de diseño evita que las tareas de intervención técnica se vean complicadas por falta de espacio, asegurando que la escala masiva de la planta sea compatible con una operación segura y eficiente, minimizando los tiempos de parada por mantenimiento.

Otro de los puntos importantes del desarrollo tridimensional es el poder evitar todo tipo de interferencia entre la compleja red de conductos de aspiración, las estructuras

portantes y los equipos de gran porte. Mejorando también la interrogación interdisciplinaria.

Seguridad operativa: Prevención de riesgos en sistemas de aspiración

El dimensionamiento detallado de los sistemas de aspiración de polvos y cáscara (equipos de transporte, prelimpieza , laminadores, quebradores , CD y CC) constituye un pilar fundamental para la seguridad de procesos de la instalación. La verificación y el cálculo de velocidades de transporte constantes de entre 20 y 22 m/s garantizan la captación efectiva de las partículas en suspensión, eliminando la decantación de material orgánico en el interior de los conductos. Esta condición técnica es crítica para mitigar el riesgo de formación de atmósferas explosivas (ATEX), cumpliendo con los estándares de seguridad necesarios para una operación de gran escala.

Durabilidad y protección contra el desgaste abrasivo

Un pilar fundamental para garantizar la continuidad operativa de la planta es la protección de las superficies de contacto. Debido a la naturaleza abrasiva de la soja y sus subproductos en flujos de gran magnitud, el diseño especifica que todas las tolvas, pantalones de transferencia y ductos de descarga cuenten con revestimientos internos antidesgaste. El uso de cerámicas de alta alúmina y placas de sacrificio intercambiables en las zonas de impacto permite que el desgaste se concentre en elementos consumibles de fácil reemplazo, protegiendo la estructura principal de acero y extendiendo significativamente la vida útil del equipamiento, lo cual es vital en una operación de 24 horas.

Recomendaciones

Se proponen los siguientes aspectos técnicos como base para futuros trabajos de ingeniería o mejoras operativas en la planta de preparación:

Control de proceso: Una profundización lógica de este trabajo seria desarrollar todo el sistema de control de la planta, así como su instrumentación, también surge como propuesta la Optimización mediante Control Avanzado de Procesos (APC). Por ejemplo, se sugiere para trabajos posteriores la implementación de sensores de monitoreo NIR

(Infrarrojo Cercano) en línea, instalados en las descargas de los acondicionadores verticales y los Jet Dryers. Esto permitiría automatizar el lazo de control de temperatura y humedad, ajustando dinámicamente el flujo de vapor y la velocidad de los transportadores dosificadores (como el TAC-018-PLS-5) para mantener la calidad de la hojuela ante variaciones en el poroto de ingreso.

Sistema de mantenimiento predictivo y monitoreo de condición: Dada la criticidad de los 28 laminadores, 18 quebradores y 5 expansores para la continuidad de la planta, se propone integrar un sistema de monitoreo de vibraciones y temperatura en tiempo real en sus cajas de rodamientos. Esto permitiría detectar desalineaciones o fallas incipientes antes de que ocurra una parada no programada, optimizando los ciclos de rectificado de los rolos o cambio prematuro de rodamientos.

Aprovechamiento energético de la cáscara in situ: Considerando que la planta tiene por diseño tiene un flujo total de cáscara y finos superior a las 28 t/h que van a la planta de pelletes, se recomienda realizar un estudio de factibilidad para la instalación de una caldera de biomasa. El uso de este subproducto para generar el vapor requerido por los Bean Heaters y Expander cerraría el ciclo energético del proceso, reduciendo significativamente la huella de carbono y los costos operativos de la instalación.

Implementación de Sistemas de Alivio y Supresión de Explosiones establecido por NFPA [9]: Aunque el diseño actual contempla redes de aspiración para evitar la decantación de polvo, por temas de alcance no se ha incluido en el desarrollo la instalación de paneles de venteo de explosión y válvulas de aislamiento químico/mecánico en equipos críticos como los filtros de mangas y elevadores de cangilones. Esto garantizaría que, ante una eventual deflagración, la presión se libere hacia áreas seguras sin comprometer la integridad estructural de los edificios.

Sistema de Recuperación y Retorno de Condensados de Alta Eficiencia: Dado el elevado consumo de vapor para los Bean Heaters (28,33t/h) y los Aerotermos de los Jet Dryers (11,76t/h), se recomienda proyectar una red de retorno de condensado presurizada diseñada bajo normativas de tuberías de proceso para asegurar la integridad térmica y mecánica (ASME B31.3) [10]. Recuperar esta agua tratada a alta temperatura para alimentar las calderas no solo reduce el consumo de químicos de tratamiento, sino que mejoraría drásticamente la eficiencia térmica global de la instalación.

Instalación de Sensores de Desgaste en Revestimientos Cerámicos: Complementando la ideología de diseño sobre protección abrasiva, se sugiere la colocación de sensores de desgaste de tipo resistivo en las placas de cerámica de las tolvas de descarga de mayor flujo. Estos sensores enviarían una señal de alerta al mantenimiento preventivo antes de que el revestimiento se agote totalmente, evitando que el grano comience a erosionar la estructura de acero principal.

Bibliografía

[1] Shahidi, F. (Ed.). (2005). Bailey's Industrial Oil and Fat Products (6th ed.). John Wiley & Sons.

[2] CEMA. Belt Conveyors for Bulk Materials. 7th Edition. Conveyor Equipment Manufacturers Association, Florida, USA.

[3] Shigley, j. e.; Budynas, r. g. y Nisbett, k. j. (2020). Diseño en ingeniería mecánica (11ma ed.). México D.F.: McGraw-Hill.

[4] AOCS (American Oil Chemists' Society). (2022). Official Methods and Recommended Practices of the AOCS. Urbana, IL.

[5] ISO 128-1:2020. *Technical product documentation (TPD) — General principles of representation*. Ginebra, Suiza: International Organization for Standardization.

[6] Link-Belt. (1982). Material Handling Equipment Catalog 1000. FMC Corporation.

[7] Kern, D. Q. (1999). Procesos de Transferencia de Calor. México D.F.: McGraw-Hill.

[8] Buffalo Forge Company. (1999). Fan Engineering: An Engineer's Handbook on Fans and Their Applications. (9na ed.) [Buffalo Forge, 1999].

[9] NFPA (National Fire Protection Association). (2020). NFPA 61: Standard for the Prevention of Fires and Dust Explosions in Agricultural and Food Processing Facilities. Quincy, MA.

[10] ASME (American Society of Mechanical Engineers). (2022). ASME B31.3: Process Piping. New York, NY.