



Departamento de
Ingeniería Mecánica
Universidad de Concepción

Auditoría de proceso para la mejora del sistema de recolección de recorte y polvo en la sala de conversión de CMPC Maule

Pablo Vicente Rodríguez Chacón

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Dr. Oscar Farías Fuentes

Ingeniero Patrocinante:
Javier Bravo Zaror

Julio, 2026
Concepción, Chile

Índice general

Índice de figuras	IV
Índice de tablas	VII
1 Introducción	3
1.1 Contexto	3
1.2 Planteamiento del problema	5
1.3 Alcance del estudio	6
1.4 Objetivos	7
1.5 Propuesta metodológica	8
2 Caracterización del sistema y levantamiento de información	10
2.1 Descripción general del sistema de manejo de recorte y polvo	10
2.2 Equipos principales del sistema	12
2.2.1 Cortadoras de cartulina	12
2.2.2 Ventiladores trituradores	14
2.2.3 Separadores de orillo	16
2.2.4 Filtros de manga	17
2.2.5 Ventiladores centrífugos	19
2.3 Condición operacional observada	20
2.3.1 Configuración general de operación	20
2.3.2 Línea 1	20
2.3.3 Línea 2	21
2.4 Mediciones y caracterización del material	22
2.4.1 Caudal de entrada a separadores	22
2.4.2 Condiciones para la generación de carga electrostática	23
2.4.3 Caracterización cualitativa del polvo	25
2.4.4 Granulometría del polvo	26
3 Diagnóstico técnico, brechas e impactos del sistema	27
3.1 Análisis causa-efecto y priorización de causas	27
3.2 Causas principales identificadas	30
3.2.1 Separadores subdimensionados	30
3.2.2 Sistema de control no integrado	32
3.3 Hallazgos que afectan el desempeño del sistema	34
3.3.1 Presencia de polvo en zona limpia de FM2	35
3.3.2 Efecto del deflector en la operación del separador	36
3.3.3 Descarga ineficiente en filtros de mangas	37
3.3.4 Ventilador centrífugo operando en rango crítico	38
3.3.5 Velocidades altas en ductos	39

3.3.6	Costos asociados al bajo rendimiento del proceso	40
3.3.7	Gestión del polvo extraído	43
4	Propuestas de mejora y evaluación técnico-económica	44
4.1	Descripción de propuestas	44
4.1.1	Implementación de control integrado	44
4.1.2	Aumento de capacidad de separación y filtración	45
4.1.3	Balance de caudal y automatización de dampers	45
4.1.4	Mejora de seguridad y descarga de material	45
4.1.5	Adecuación del transporte neumático en ductos críticos	46
4.2	Evaluación de propuestas	46
4.2.1	Priorización de propuestas	47
4.2.2	Propuesta integrada	47
4.2.3	Evaluación económica preliminar	48
5	Conclusión	50
A	Anexos	52
A.1	Cortadoras	52
A.1.1	Jagenberg	52
A.1.2	Cortadora 3 (PASABAN 1)	55
A.1.3	Cortadora 4 - PASABAN 2 - Sheeter 24.	58
A.1.4	Cortadora 5 - PASABAN 3 - Sheeter 25.	60
A.1.5	Cortadora 6 - PASABAN 4 - Sheeter 26.	62
A.1.6	Cortadora 8 - PASABAN 5 - Sheeter 28.	64
A.1.7	Cortadora 9 - PASABAN 6 - Sheeter 29.	66
A.1.8	Cortadora 10 - PASABAN 7 - Sheeter 31.	70
A.1.9	Rebobinadora - Sheeter 13.	74
A.2	Cálculo de flujo específico y déficit de área en separadores	79
A.2.1	Características de los separadores instalados	79
A.2.2	Instrumento utilizado	79
A.2.3	Procedimiento de medición con tubo de Pitot	80
A.2.4	Cálculo del caudal volumétrico	80
A.2.5	Cálculo del flujo específico sobre la malla	80
A.2.6	Criterio de referencia adoptado	81
A.2.7	Cálculo del área requerida	81
A.2.8	Resultados del cálculo	81
A.3	Estudio de tendencia	83
A.4	Memoria de cálculo para la Propuesta 2	84
A.4.1	Área adicional de separación requerida	84
A.4.2	Área mínima de filtración	84
A.4.3	Resumen de requerimientos mínimos	85
A.5	Resumen de cotización Puhl	86

Índice de figuras

Figura 1.1.1	Áreas principales de la planta CMPC Maule.	3
Figura 1.1.2	Proceso de Fabricación de Cartulina	4
Figura 1.2.1	Diagrama P&ID proceso manejo de recorte.	5
Figura 1.2.2	Vista general de los equipos evaluados en terreno: filtro de mangas 1, separadores y filtro de mangas 2.	5
Figura 1.5.1	Metodología del estudio y su relación con los objetivos específicos.	8
Figura 2.1.1	Esquema del sistema de manejo de recortes.	11
Figura 2.2.1	Cortadora Jagenberg. [e.p.]	12
Figura 2.2.2	Ventiladores triturador y succión de orillo[e.p.]	14
Figura 2.2.3	Principio de funcionamiento de separadores por gravedad en sistemas de transporte neumático de sólidos [1].	16
Figura 2.2.4	Funcionamiento Filtro de Mangas JetPulse	17
Figura 2.2.5	Ventiladores Centrífugos[e.p.]	19
Figura 2.3.1	Ductos de entrada a separadores y descarga hacia enfardadora [e.p.].	20
Figura 2.3.2	Condiciones operacionales observadas en la Línea 1.	21
Figura 2.3.3	Separador 213C operando con la descarga de sólidos abierta.	21
Figura 2.4.1	Medición de velocidad en ductos del sistema de transporte neumático [e.p.].	22
Figura 2.4.2	Condiciones asociadas a la generación y disipación de carga electrostática.	24
Figura 2.4.3	Caracterización cualitativa del polvo mediante reactivos químicos y observación microscópica [e.p.].	25
Figura 2.4.4	Columna de tamices utilizada para el análisis granulométrico.	26
Figura 3.1.1	Diagrama de Ishikawa para el análisis causa-efecto del sistema de transporte neumático.	28
Figura 3.1.2	Priorización de las causas según su probabilidad de ocurrencia e impacto financiero-operacional.	29
Figura 3.2.1	Condiciones observadas en el separador de orillo, incluyendo fugas, acumulación de material y puntos de estancamiento [e.p.].	31

Figura 3.2.2	Descarga común de los separadores 213A y 213B en la Línea 1, con desbalance de tiraje entre ramas.	32
Figura 3.2.3	Esquema de control actual del sistema de manejo de recortes, con lazos locales de presión y sin integración del control global.	33
Figura 3.3.1	Evidencia observada durante la inspección del filtro de mangas de la Línea 2.	35
Figura 3.3.2	Relación entre configuraciones del deflector [2] y efectos observados en la operación del separador [e.p.]	36
Figura 3.3.3	Comparación entre una condición de descarga libre esperada y la retención de polvo observada en la tolva de FM2, consistente con un fenómeno de <i>bridging</i>	37
Figura 3.3.4	Pantalla VDF ventilador centrífugo 1 durante la inspección en terreno.	38
Figura 3.3.5	Evidencia de daño y pérdida de material asociada al ducto de la Pasaban 2.	39
Figura 3.3.6	Actividades de limpieza consideradas en la estimación de costos operacionales.	40
Figura 3.3.7	Estado de mangas del filtro 196	41
Figura 3.3.8	Válvulas Jetpulse no conectadas	41
Figura 3.3.9	Extracciones de residuos de polvo realizadas en dos fechas diferentes.	43
Figura A.1.1	Cortadora Jagenberg en la actualidad e.p.	53
Figura A.1.2	Zoom P&ID Jagenberg e.p.	53
Figura A.1.3	Condición operativa de la rebobinadora Jagenberg y evidencias de acumulación de polvo.	54
Figura A.1.4	Cortadora PASABAN 1 en la actualidad e.p.	55
Figura A.1.5	Zoom P&ID PASABAN 1 e.p.	56
Figura A.1.6	PASABAN 1 ejecutando 4 cortes sin aspiración de polvo e.p.	57
Figura A.1.7	Cortadora PASABAN 2 en la actualidad e.p.	58
Figura A.1.8	Zoom P&ID PASABAN 1 e.p.	58
Figura A.1.9	Condiciones operativas de la PASABAN 2.	59
Figura A.1.10	Cortadora PASABAN 3 en la actualidad e.p.	60
Figura A.1.11	Zoom P&ID PASABAN 3 e.p.	60
Figura A.1.12	Condición operativa de la PASABAN 3 y evidencias de ineficiencia en la extracción de polvo.	61
Figura A.1.13	Cortadora PASABAN 4 en la actualidad e.p.	62
Figura A.1.14	Zoom P&ID PASABAN 4 e.p.	62

Figura A.1.15	Condición operativa de la PASABAN 4 y efectos de la ausencia de extracción de polvo.	63
Figura A.1.16	Cortadora PASABAN 5 en la actualidad e.p.	64
Figura A.1.17	Zoom P&ID PASABAN 5 e.p.	64
Figura A.1.18	Condición operativa de la PASABAN 5 y evidencias de acumulación de polvo.	65
Figura A.1.19	Cortadora PASABAN 6 en la actualidad e.p.	66
Figura A.1.20	Zoom P&ID PASABAN 6 e.p.	67
Figura A.1.21	Filtro de mangas exclusivo de PASABAN 6 e.p.	68
Figura A.1.22	PASABAN 6 ejecutando 2 cortes sin extracción de polvo e.p. .	69
Figura A.1.23	Manejo de orillo semi-manual PASABAN 6 e.p.	69
Figura A.1.24	Cortadora PASABAN 7 en la actualidad e.p.	71
Figura A.1.25	Zoom P&ID PASABAN 7 e.p.	71
Figura A.1.26	PASABAN 7 ejecutando 2 cortes sin extracción de polvo e.p. .	72
Figura A.1.27	Polvo en cuchilla cortadora PASABAN 7 e.p.	73
Figura A.1.28	Polvo en rodillos de la PASABAN7 e.p.	74
Figura A.1.29	Rebobinadora en la actualidad e.p.	75
Figura A.1.30	Zoom P&ID Rebobinadora e.p.	75
Figura A.1.31	Corte longitudinal en Rebobinadora e.p.	76
Figura A.1.32	Mantenimiento a filtro de mangas rebobinadora e.p.	77
Figura A.1.33	Extracción de polvo en cuchilla Rebobinadora e.p.	78
Figura A.3.1	Tendencia del ancho de orillo durante el año 2025 [e.p.].	83
Figura A.5.1	Referencia de la oferta	86

Índice de tablas

Tabla 2.2.1	Características operativas máximas para cada cortadora.[e.p.]	13
Tabla 2.2.2	Características geométricas de las tomas de aire [e.p.]	15
Tabla 2.2.3	Potencia nominal y diámetro de salida de los ventiladores trituradores [e.p.]	15
Tabla 2.2.4	Características principales de los separadores instalados [e.p.] .	16
Tabla 2.2.5	Comparación técnica entre equipos FM1 y FM2	18
Tabla 2.2.6	Características principales de los ventiladores centrífugos. . . .	19
Tabla 2.4.1	Caudal de aire en la llegada a separadores [e.p.]	23
Tabla 2.4.2	Especificaciones del termo-anemómetro digital utilizado para medición de humedad relativa [e.p.]	23
Tabla 2.4.3	Resultados del ensayo de tamices para polvo de cartulina . . .	26
Tabla 3.1.1	Matriz de evaluación de causas basada en probabilidad de ocurrencia e impacto financiero/operacional.	28
Tabla 3.2.1	Evaluación resumida del subdimensionamiento de separadores respecto del flujo específico de referencia.	30
Tabla 3.3.1	Especificaciones técnicas del ventilador centrífugo de la Línea 1 [3].	38
Tabla 3.3.2	Velocidades medidas a la entrada de los separadores [e.p.] . .	39
Tabla 3.3.3	Estimación de costos anuales de limpieza asociados al sistema de manejo de recortes 2026.	40
Tabla 4.2.1	Priorización de acciones de mejora.	47
Tabla 4.2.2	Inversión estimada de la propuesta integrada de mejora. . . .	48
Tabla 4.2.3	Evaluación económica preliminar de la propuesta integrada de mejora.	49
Tabla A.1.1	Características técnicas del modelo Jagenberg Synchro 350–2800	53
Tabla A.1.2	Características técnicas del modelo KDD 2500 de PASABAN .	56
Tabla A.1.3	Características técnicas del modelo KDD 2500 de PASABAN .	58
Tabla A.1.4	Características técnicas del modelo KDD 2500 de PASABAN .	61
Tabla A.1.5	Características técnicas del modelo KB 1900 de PASABAN . .	63

Tabla A.1.6	Características técnicas del modelo KB 1900 de PASABAN . .	65
Tabla A.1.7	Características técnicas del modelo KB 2100 de PASABAN . .	67
Tabla A.1.8	Características técnicas del modelo KB 2100 de PASABAN . .	72
Tabla A.2.1	Características principales de los separadores instalados consideradas para el cálculo [e.p].	79
Tabla A.2.2	Especificaciones del anemómetro con tubo de Pitot utilizado en las mediciones [e.p].	79
Tabla A.2.3	Flujo específico de aire sobre área efectiva de malla en separadores instalados [e.p].	81
Tabla A.2.4	Déficit de área efectiva de malla en separadores respecto al flujo específico de referencia [e.p].	82
Tabla A.4.1	Déficit de área efectiva considerado para el dimensionamiento de la Propuesta 2.	84
Tabla A.4.2	Requerimientos mínimos considerados para la Propuesta 2. . .	85
Tabla A.5.1	Resumen de equipamiento incluido en la oferta.	86
Tabla A.5.2	Requisitos de instalación del sistema.	86
Tabla A.5.3	Estimación presupuestaria.	87

Agradecimiento

Quisiera tomarme este momento para agradecer a cada persona que me acompañó y apoyó durante este camino universitario.

En primer lugar, quiero agradecer especialmente a mis abuelos, Víctor y María, quienes fueron parte fundamental de mi formación. Crecí entre su casa y su taller de madera, junto a mis primos y mi hermano, donde siempre surgía alguna travesura, idea o trabajo por hacer. Sin duda, esa etapa fue uno de los pilares que me acercó al mundo de la ingeniería.

También quiero agradecer profundamente a mi mamá, quien me apoyó desde el primer momento. Apenas le conté que había quedado en la universidad, no dudó en decirme que sí y en acompañarme durante todos estos años, tanto en los momentos buenos como en los difíciles. Siempre me recordó que podía terminar la carrera, y así fue.

A mi hermano Álvaro, gracias por su apoyo incondicional y por celebrar conmigo cada paso de este proceso. A mis amigos y hermanos que conocí en la universidad, Ignacio, Felipe y Emilio, gracias por acompañarme en estudios, informes, laboratorios, peñas y salidas para distraernos después de los certámenes. No puedo dejar de mencionar al Café Neruda, lugar donde celebramos logros, compartimos y almorzamos legumbres.

A Tomás, mi primer amigo de la universidad en plan común, gracias por los días de gimnasio, peñas y estudio. A Marcelo, Yoselyn, Javier, Felipe y Gonzalo, con quienes me apoyé para aprobar ASD, gracias por los momentos de estudio, descanso y risas en el Completex.

También agradezco a mis amigos del colegio, quienes siempre me apoyaron y mantuvieron el contacto pese a la distancia. A mi prima hermana Victoria, por estar siempre presente y atenta, compartiendo conmigo tanto en Concepción como en Santiago. A Martín, Bruno, Pedro, Manuel, Paul, Aarón, Diego, Valentina, Vicente, Álvaro, José y, especialmente, a Simón, con quien me sentí en Linares cada vez que compartimos y nos apoyamos para que cada uno pudiera lograr su meta.

A Constanza, mi novia, quien apareció en esta etapa final y me ayudó a no perder el foco. Gracias por apoyarme, motivarme y acompañarme durante este año, impulsándome siempre a dar lo mejor de mí.

A mis roomies durante mi estadía en Concepción, Sebastián y Gustavo, gracias por compartir conmigo distintos momentos de este camino, donde nunca faltó una once en Donde Marito o El Italiano.

Quiero agradecer también a las personas de CMPC, quienes me hicieron sentir como uno más desde el primer día. A mi jefe, Javier Bravo, por enseñarme, confiar en mí y darme la oportunidad de desarrollarme tanto en mi práctica como en mi memoria. A don Luis Méndez, por compartir conmigo su conocimiento del Área de Conversión e invitarme a participar en cada reunión.

Finalmente, agradezco a mi profesor patrocinante, don Óscar Farías, quien me apoyó incluso cuando el tema de memoria cambió, y siempre tuvo la disposición y el tiempo para orientarme y ayudarme a cerrar este proceso de la mejor manera posible.

Resumen

El sistema de manejo de recortes y polvo de la sala de conversión de CMPC Maule cumple una función crítica en la captación, transporte, separación y disposición del material generado durante el corte y rebobinado de cartulina. Sin embargo, el aumento de las exigencias operacionales y la falta de adecuación de algunos componentes han provocado acumulación y dispersión de polvo, atascamientos, pérdidas de material e inestabilidad en el transporte neumático. En este contexto, el objetivo del estudio fue realizar una auditoría de proceso para identificar las principales brechas y causas asociadas al desempeño del sistema, y formular propuestas de mejora orientadas a reducir las emisiones fugitivas y las pérdidas de material.

El diagnóstico consideró la caracterización de los equipos y condiciones de operación, inspecciones en terreno, mediciones de velocidad y caudal en ductos, revisión de antecedentes técnicos y aplicación de herramientas de análisis causal. Las hipótesis identificadas mediante un diagrama de Ishikawa fueron priorizadas utilizando una matriz de criticidad basada en su probabilidad de ocurrencia e impacto financiero-operacional.

Los resultados indican que las principales causas del bajo desempeño corresponden a la capacidad insuficiente de separación y a la ausencia de una estrategia de control integrada. Al comparar las condiciones operacionales con un flujo específico referencial de $2,0 \text{ CFM/in}^2$, se determinó que los tres separadores operan por sobre dicho valor. La condición más exigente se presenta en el separador 213C, con $3,71 \text{ CFM/in}^2$, equivalente a un exceso de 85,5 %. Asimismo, se estimó un déficit de área efectiva de malla de $1,41 \text{ m}^2$ para la Línea 1 y de $1,79 \text{ m}^2$ para la Línea 2. También se identificaron deficiencias en la descarga de los filtros de mangas, pérdida de integridad de elementos filtrantes, velocidades elevadas en ductos y condiciones operacionales que aumentan la dependencia de intervenciones manuales.

Como resultado, se formuló una propuesta integrada compuesta por el aumento de la capacidad de separación y filtración, la implementación de una estrategia de control global, la automatización de dampers y la mejora de la descarga mediante válvulas rotatorias. La inversión preliminar se estimó en USD 295.000, con un ahorro operacional anual potencial de USD 106.782. Bajo un horizonte de evaluación de 10 años y una tasa de descuento de 10 %, se obtuvo un periodo de recuperación de 2,76 años, un valor actual neto de USD 361.129 y una tasa interna de retorno de 34,3 %. Estos resultados indican que la alternativa presenta una evaluación técnico-económica preliminar favorable, sujeta al desarrollo posterior de ingeniería de detalle y validación en terreno.

Palabras clave: auditoría de proceso, transporte neumático, recortes de cartulina, separadores de orillo, filtros de mangas, control integrado.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

CMPC es una empresa chilena del sector forestal, con presencia en la producción de celulosa, papeles, cartulinas y soluciones de empaque. Dentro de sus instalaciones industriales, CMPC Maule se ubica en la comuna de Yerbias Buenas, provincia de Linares, Región del Maule. Esta planta produce del orden de 400 000 t/año de cartulina para caja (*boxboard*) en cuatro capas, empleando una mezcla de pulpa mecánica, celulosa y recortes internos reincorporados al proceso. La Figura 1.1.1 presenta una vista general de las principales áreas productivas.

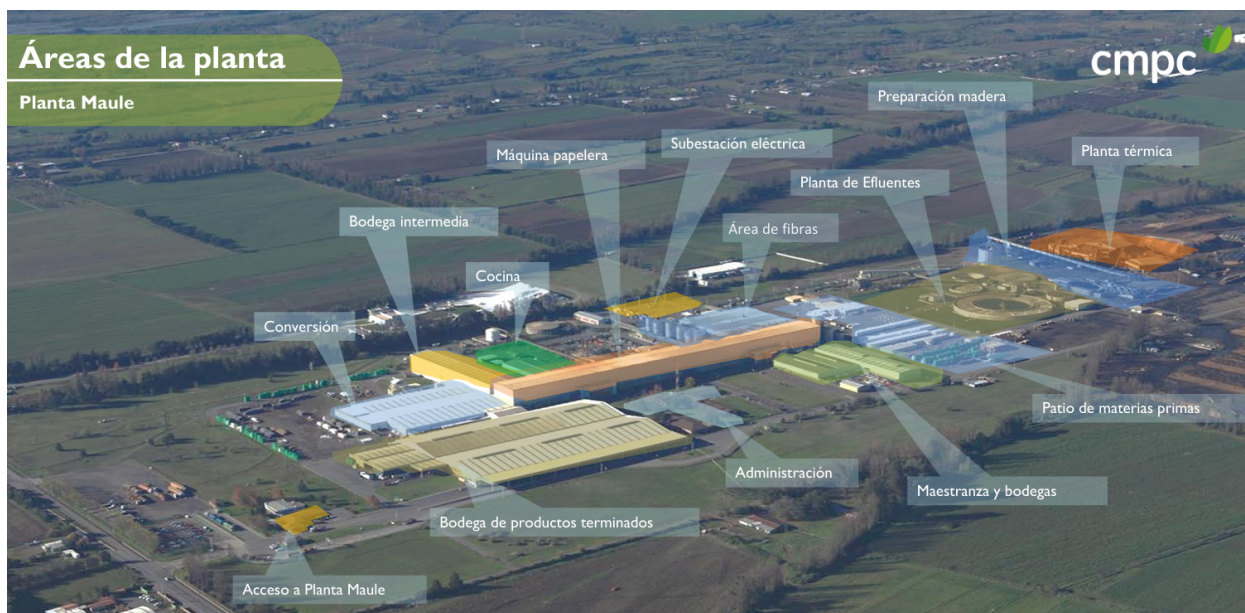


Figura 1.1.1 Áreas principales de la planta CMPC Maule.

El flujo productivo se organiza en cuatro etapas encadenadas:

1. **Preparación de pulpa.** Acopio de madera, descortezado y astillado; clasificación y almacenamiento de astillas en silos; lavado, refinación y, cuando corresponde, blanqueo, para generar la pulpa mecánica base del producto.
2. **Preparación de celulosa y recortes.** Disgregación, depuración y control de consistencia de la celulosa virgen y de los recortes internos reincorporados para optimizar el uso de fibra.
3. **Máquina papelera.** Formación de las cuatro capas de cartulina, seguida de prensado, secado, estucado (si aplica) y bobinado.
4. **Conversión.** Desbobinado y corte longitudinal/transversal para conformar pilas o rollos terminados, con control de calidad, empaque y despacho.

La Figura 1.1.2 resume estas etapas en un esquema general del proceso de fabricación.

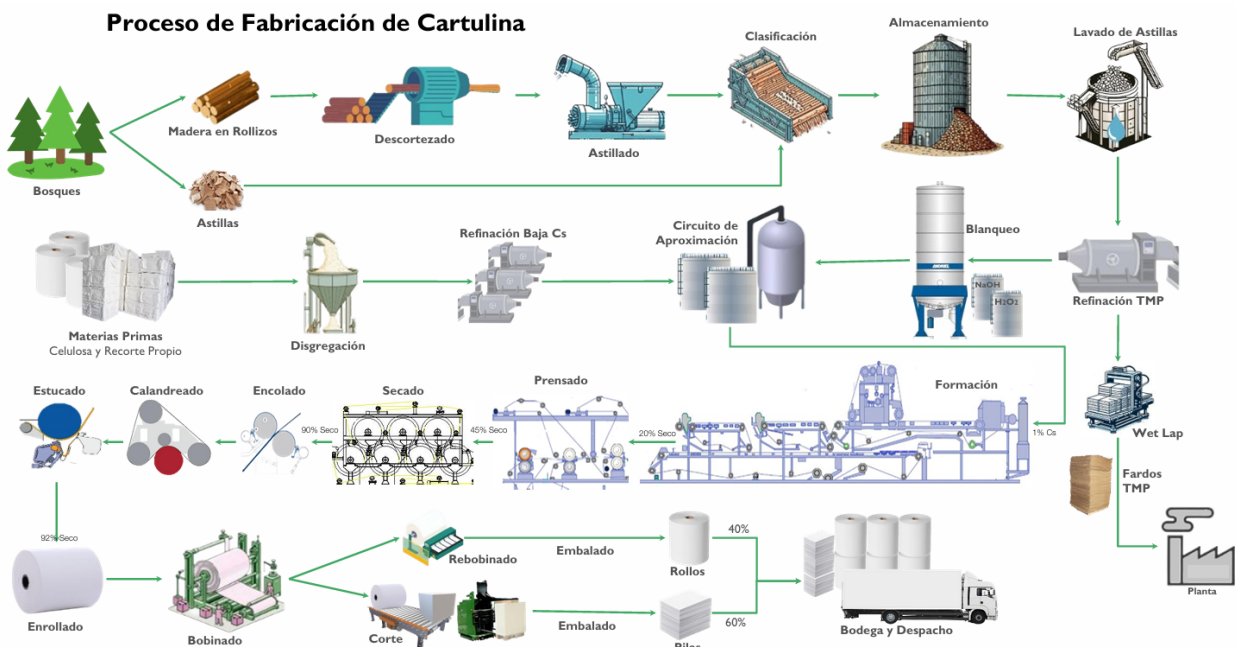


Figura 1.1.2 Proceso de Fabricación de Cartulina

Este estudio se centra en la etapa de conversión, donde se generan dos subproductos principales: orillo y polvo de cartulina. Ambos son captados en ocho cortadoras y una rebobinadora, trasladados mediante transporte neumático y cintas transportadoras hacia el sistema de manejo de recortes, compuesto por tres separadores de orillo, dos filtros de mangas y una enfardadora. El orillo separado se compacta y retorna como materia prima; el aire tratado se descarga a la atmósfera mediante los ventiladores centrífugos al final del proceso.

1.2. Planteamiento del problema

El sistema de manejo de recortes y polvo de cartulina en la sala de conversión de CMPC Maule (Figura 1.2.1) es crítico para la continuidad operativa, el control de emisiones y la seguridad del proceso. Los incrementos de producción registrados en la instalación no han sido acompañados por una adecuación equivalente en la capacidad del sistema, generando una condición de subdimensionamiento. Como consecuencia, se observan emisiones visibles y acumulación de polvo en puntos críticos, particularmente en los filtros de mangas y separadores de mayor carga (Figuras 1.2.2a y 1.2.2b), lo que evidencia deficiencias en la captación y aumenta el riesgo asociado a polvo combustible. Este escenario requiere contrastar el desempeño real con los criterios de diseño y especificaciones técnicas, a fin de identificar brechas y definir acciones correctivas orientadas a restituir condiciones de operación seguras y eficientes.

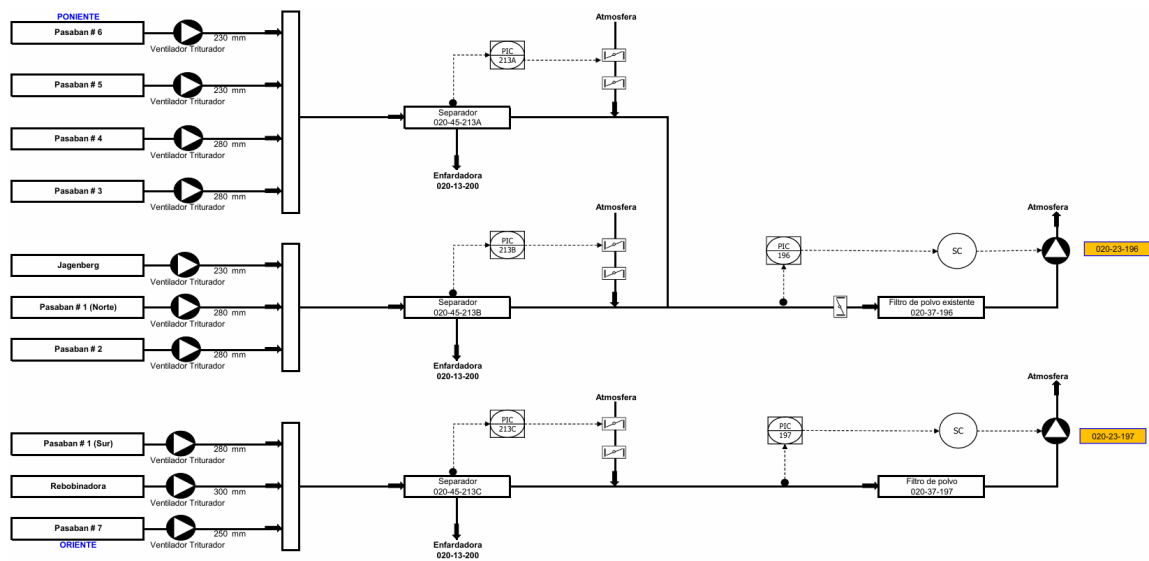


Figura 1.2.1 Diagrama P&ID proceso manejo de recorte.



(a) Filtro de mangas 1



(b) Separadores y filtro de mangas 2

Figura 1.2.2 Vista general de los equipos evaluados en terreno: filtro de mangas 1, separadores y filtro de mangas 2.

1.3. Alcance del estudio

El alcance de este estudio se circunscribe a la sala de conversión de CMPC Maule y al sistema de manejo de recortes y polvo asociado a las operaciones de corte y rebobinado. El análisis comprende los puntos de captación en las ocho cortadoras y en la rebobinadora; los ductos de transporte neumático, sus derivaciones, accesorios y dampers; los ventiladores trituradores; los separadores de orillo; la alimentación a la enfardadora; los filtros de mangas; los ventiladores centrífugos y los sistemas de descarga de material.

El estudio considera la caracterización técnica del sistema en su condición actual, la identificación de problemas operacionales, la evaluación de brechas de diseño, operación, control y mantención, y la formulación de propuestas de mejora orientadas a reducir la generación de polvo, las emisiones fugitivas y las pérdidas de material.

El alcance no contempla la implementación física de modificaciones en planta, la ejecución de inversiones, pruebas industriales de soluciones ni el desarrollo de ingeniería de detalle. Por lo tanto, las propuestas derivadas del estudio tienen carácter de recomendación técnica y evaluación preliminar, destinadas a apoyar la toma de decisiones de ingeniería para etapas posteriores.

1.4. Objetivos

Objetivo General

Realizar una auditoría de proceso del sistema de recolección de recorte y polvo de la sala de conversión de CMPC Maule, con el fin de identificar las principales brechas y causas asociadas a su desempeño, y formular propuestas de mejora orientadas a reducir la dispersión de polvo, las emisiones y las pérdidas de material.

Objetivos Específicos

1. **Caracterizar el estado actual del sistema de recolección de recorte y polvo**, considerando su configuración, equipos principales, condiciones de operación, prácticas de mantención y antecedentes disponibles de funcionamiento.
2. **Analizar las principales hipótesis de causa asociadas a los problemas del sistema**, a partir de observaciones en terreno, mediciones operacionales, antecedentes de producción y herramientas de análisis causal.
3. **Evaluar las brechas de diseño, operación, control y mantención del sistema**, mediante la comparación entre las condiciones reales observadas y los criterios técnicos de referencia obtenidos desde literatura especializada, fabricantes y experiencia operacional.
4. **Proponer acciones de mejora para el sistema de recolección de recorte y polvo**, priorizándolas en función de su factibilidad y del impacto esperado sobre la reducción de la dispersión de polvo, las emisiones y las pérdidas de material.

1.5. Propuesta metodológica

La metodología se estructura en tres fases alineadas con los objetivos específicos del estudio y sustentadas en enfoques de auditoría de procesos, diagnóstico técnico y análisis de brechas aplicados en sistemas industriales. En particular, auditorías de proceso como las reportadas por Boharb et al. [4] destacan la importancia del levantamiento sistemático de información, la revisión de condiciones reales de operación y la identificación de desviaciones respecto del desempeño esperado. Asimismo, guías de diagnóstico e inspección industrial, como las propuestas por la FAO [5], respaldan el uso de inspecciones en terreno, revisión documental y análisis comparativo como base para la evaluación del desempeño de sistemas productivos. Complementariamente, metodologías de auditoría de manejo y transporte de materiales, como la desarrollada por Marx [6], junto con referencias de diseño y operación de sistemas de transporte neumático [1, 7], refuerzan el análisis de condiciones operacionales, puntos críticos y oportunidades de mejora mediante observación directa y contraste técnico con criterios de referencia.

La Figura 1.5.1 resume las fases de la metodología y su relación con los objetivos específicos del estudio.

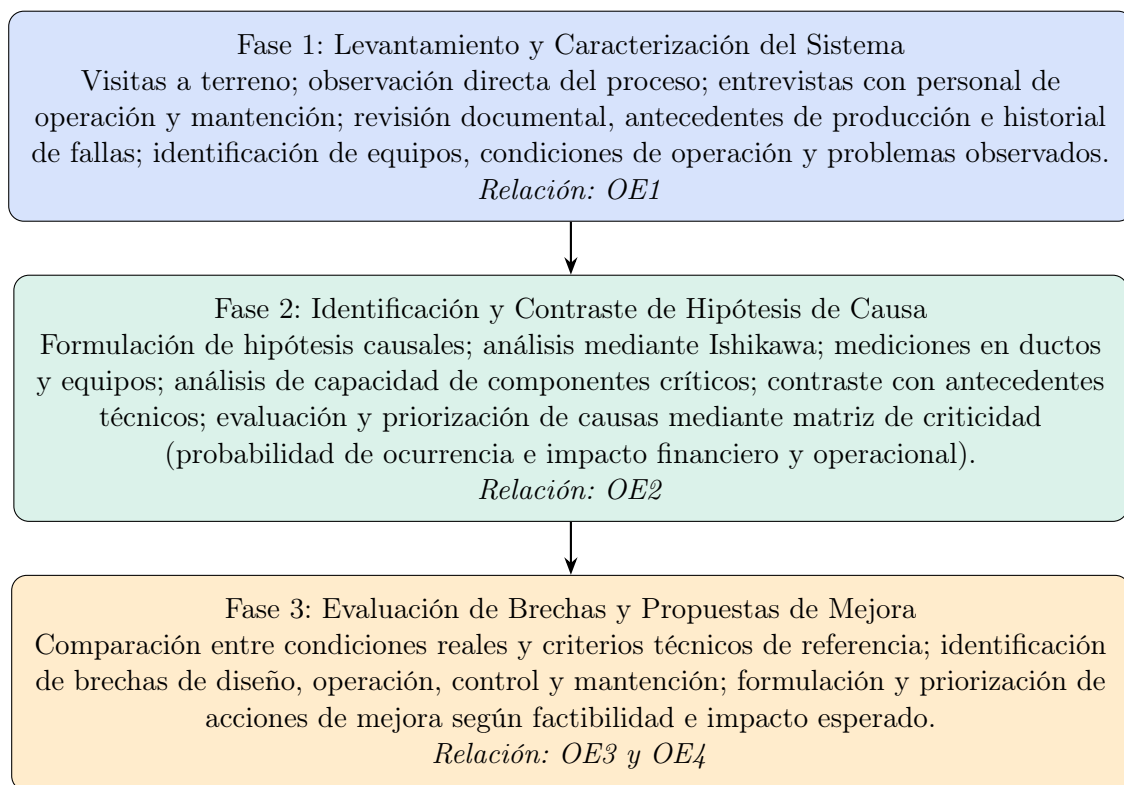


Figura 1.5.1 Metodología del estudio y su relación con los objetivos específicos.

La Fase 1 corresponde al levantamiento y caracterización del sistema de recolección de recorte y polvo (OE1). En esta etapa se recopila y sistematiza información técnica y operacional del sistema mediante visitas a terreno, observación directa del proceso, revisión de documentación disponible, antecedentes de producción, historial de fallas y entrevistas con personal de operación y mantención. Esta fase permite establecer la configuración general del sistema, identificar sus equipos principales, describir sus condiciones de operación y mantención, y

reconocer los principales problemas observados en planta, tales como atascamientos, emisiones de polvo, pérdidas de material e inestabilidad operacional. Para esta caracterización se consideran, además, antecedentes técnicos específicos sobre sistemas de manejo de recorte, separación aire-material y transporte neumático en la industria papelera y convertidora [8, 9, 10, 11].

La Fase 2 corresponde a la identificación y contraste de hipótesis de causa del problema (OE2). A partir de la información levantada en la fase anterior, se formulan hipótesis causales asociadas al desempeño del sistema, considerando aspectos de diseño, operación, control, mantención, material y entorno. Como herramienta de análisis se emplea el método de Ishikawa, que permite estructurar y clasificar de manera sistemática las posibles causas del problema principal. Posteriormente, dichas hipótesis son depuradas y contrastadas mediante observaciones en terreno, mediciones operacionales en ductos y equipos, análisis de capacidad de componentes críticos, como separadores y filtros de mangas, y revisión de antecedentes técnicos de fabricantes y literatura especializada. En esta etapa, el contraste técnico se apoya en criterios de diseño y operación de transporte neumático [1], documentación técnica de separadores estáticos y sistemas de trim handling [2, 8, 10], así como en guías de ventilación y balanceo de ductos [12, 13, 14, 15]. Para el análisis de filtros de mangas y fallas asociadas a emisiones, bypass de polvo, fugas o bloqueos, se consideran además referencias específicas de diseño y troubleshooting [16, 17, 18, 19, 20].

Con el fin de priorizar las causas identificadas, se aplica una matriz de evaluación de criticidad, en la cual cada hipótesis es valorada según su probabilidad de ocurrencia y su impacto financiero y operacional sobre el desempeño del sistema. Esta herramienta permite jerarquizar las causas en función de su relevancia relativa y focalizar el análisis en aquellas condiciones que, por su mayor criticidad, representan una contribución más significativa al problema estudiado.

La Fase 3 corresponde a la evaluación de brechas y formulación de propuestas de mejora (OE3 y OE4). En esta etapa se comparan las condiciones reales observadas en planta con criterios técnicos de referencia obtenidos desde documentación de fabricantes, literatura especializada y experiencia operacional, con el fin de identificar brechas de diseño, operación, control y mantención. Sobre esta base, se formulan acciones de mejora orientadas a intervenir las causas más relevantes identificadas en la fase anterior. Finalmente, las propuestas se priorizan según su factibilidad e impacto esperado sobre la reducción de polvo, la disminución de emisiones, la minimización de pérdidas de material y la mejora de la estabilidad operacional del sistema. Para sustentar esta etapa se emplean criterios técnicos asociados al control de caudal, balanceo de ventilación, operación de ventiladores y filtros, y prevención de problemas de descarga o acumulación de material [12, 13, 14, 15, 21, 22, 23].

El desarrollo del estudio estuvo condicionado por la disponibilidad de personal de operación y mantención para el levantamiento de información, así como por el acceso a planos, fichas técnicas, curvas de ventiladores, parámetros de diseño, registros operacionales y antecedentes históricos del sistema. Asimismo, las actividades de inspección y medición en terreno se realizaron bajo las restricciones propias de la operación de planta, considerando condiciones de seguridad, disponibilidad de ventanas de detención, accesibilidad física a los puntos de medición y coordinación con las áreas involucradas. Estas condiciones fueron consideradas durante la planificación y ejecución de las fases metodológicas, con el fin de asegurar que el diagnóstico se desarrollara a partir de información representativa y técnicamente trazable.

Capítulo 2

Caracterización del sistema y levantamiento de información

2.1. Descripción general del sistema de manejo de recorte y polvo

El sistema de manejo de recortes está conformado por un conjunto de equipos dispuestos en secuencia, cuya función es asegurar la captación, transporte, separación y disposición final del material generado por las cortadoras. Este sistema integra cortadoras, ventiladores trituradores, separadores de orillo, filtros de mangas, ventiladores centrífugos y una enfardadora, todos interconectados mediante una red de ductos que permite el transporte neumático de orillo y polvo desde su punto de origen hasta las etapas de tratamiento. Además, el proceso incorpora transporte del material de rechazo hacia la enfardadora para su compactación.

Desde el punto de vista operacional, el sistema se encuentra estructurado en dos líneas principales, cada una con su propio conjunto de equipos de captación, separación y filtración, tal como se muestra en el esquema general previamente presentado. Cada línea dispone de sus respectivas cortadoras, separadores de orillo y filtro de mangas asociado, lo que configura dos subsistemas funcionalmente independientes como se observa en la Figura 2.1.1.

Para simplificar el diagnóstico y descartar posibles interacciones o interferencias entre componentes de distinta línea, el análisis se abordó de manera separada para cada una de ellas. Esta metodología permite evaluar con mayor precisión las condiciones operativas, identificar fallas locales y determinar el desempeño individual de cada subsistema, estableciendo así una base clara para el análisis técnico posterior.

A continuación, se describe en detalle el funcionamiento de cada equipo y los parámetros operativos asociados, con el objetivo de sustentar el diagnóstico del desempeño del sistema de transporte y separación de recortes.

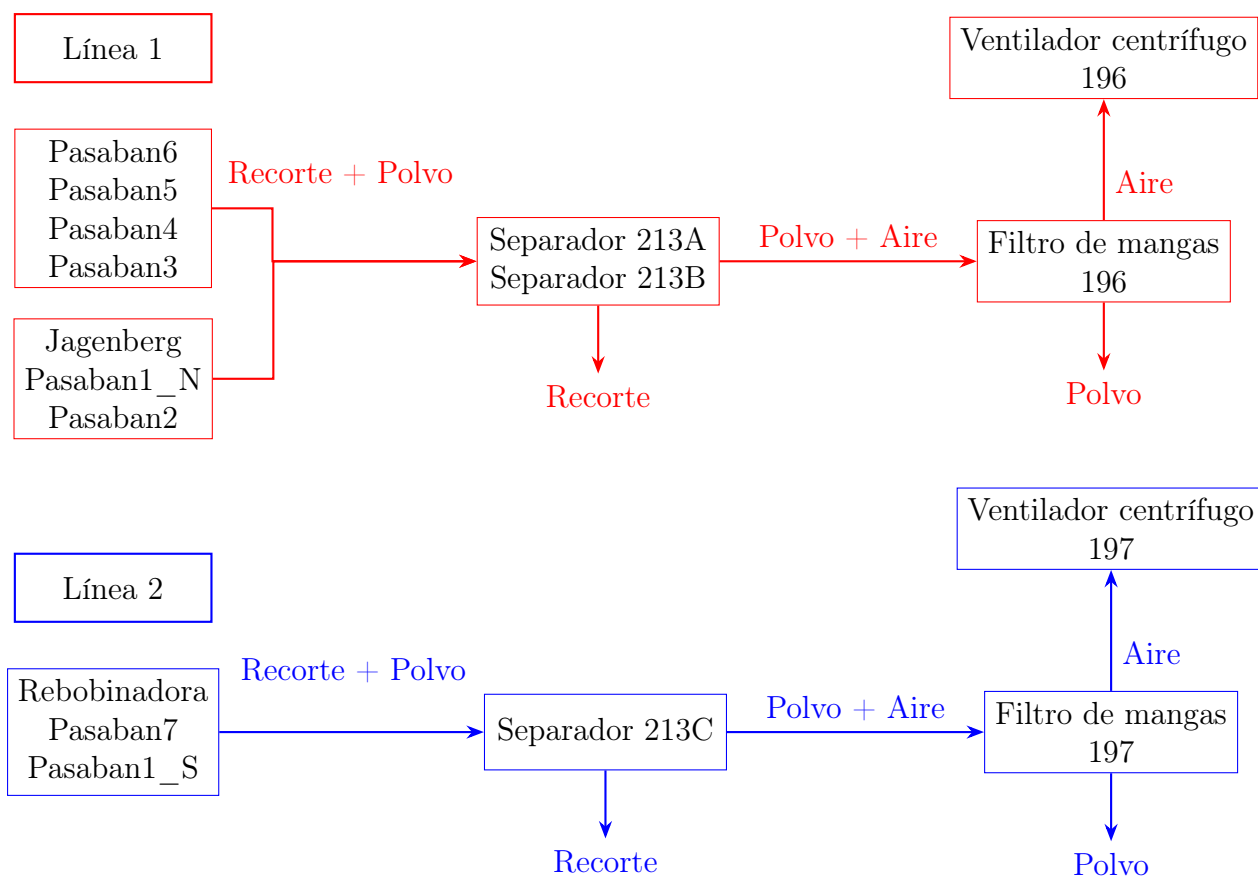


Figura 2.1.1 Esquema del sistema de manejo de recortes.

2.2. Equipos principales del sistema

2.2.1. Cortadoras de cartulina

La sala de conversión cuenta con ocho cortadoras de cartulina y una rebobinadora, equipos capaces de producir pilas o rollos según los requerimientos de cada línea. Corresponden a distintos modelos del fabricante PASABAN y a un modelo JAGENBERG, los cuales presentan diferencias en ancho útil, velocidad de operación y gramaje procesado. Estas variaciones inciden directamente en la cantidad de orillo y polvo generados durante el corte, así como en la demanda del sistema de transporte neumático asociado.

Las cortadoras realizan tanto el corte longitudinal de la cartulina como el transversal, generando como subproductos orillo y polvo. Cada equipo dispone de al menos dos puntos de captación, desde los cuales el material es succionado por el ventilador triturador correspondiente para su reducción y transporte hacia las etapas posteriores del sistema de manejo de recortes. En consecuencia, el régimen operativo de cada cortadora, determinado por su velocidad, ancho de orillo y gramaje, condiciona la carga de sólidos que deben procesar los separadores y los filtros de mangas.

Con el objetivo de ilustrar el principio general de funcionamiento, la Figura 2.2.1 muestra una de las cortadoras presentes en la sala de conversión. No obstante, debido a que el foco de este estudio radica en el transporte y tratamiento de recortes más que en el proceso mecánico de corte, las características técnicas relevantes de cada máquina se presentan de manera sintética en la Tabla 2.2.1. Esta información permite contextualizar las diferencias operativas entre cortadoras y sirve como referencia para interpretar las cargas de orillo y polvo que ingresan al sistema neumático.



Figura 2.2.1 Cortadora Jagenberg. [e.p.]

Tabla 2.2.1 Características operativas máximas para cada cortadora.[e.p.]

Cortadora	Producción [m/min]	Gramaje [g/m ²]	Ancho orillo [cm]
Rebobinadora	1400	370	20
Pasaban 6	300	370	12
Pasaban 5	300	370	7
Pasaban 7	300	370	6
Pasaban 1	300	340	30
Jagenberg	350	330	18
Pasaban 2	300	370	24
Pasaban 4	300	370	12
Pasaban 3	350	370	30

Las características operativas máximas presentadas en la Tabla 2.2.1 constituyen la base para estimar el flujo másico de orillo que ingresa a los separadores de sólidos. Se observa que los parámetros de producción, gramaje y ancho de orillo varían entre equipos, lo que implica diferencias en la generación potencial de recortes. Asimismo, estas condiciones dependen del tipo de pedido procesado y del régimen de operación definido por cada operador, particularmente en lo relativo a la velocidad de línea.

2.2.2. Ventiladores trituradores

El ventilador triturador, mostrado en las Figuras 2.2.2a y 2.2.2b, es el equipo encargado de recibir el orillo en forma de tira continua, triturarlo y transportarlo desde la cortadora hasta el separador de sólidos. Cada unidad se encuentra alojada dentro de una cabina acústica.

La cantidad de material transportado depende de la velocidad de operación de la cortadora y de las características geométricas del sistema de ductos. El ducto de succión condiciona el tamaño del orillo admisible y el caudal de aire de ingreso, mientras que el ducto de descarga, en función de su diámetro, determina la velocidad del flujo de transporte, como se analizará más adelante.

A continuación, se presenta una tabla resumen con el área de la toma, la potencia nominal y el diámetro de salida correspondiente a cada ventilador triturador. La sala de conversión dispone de diez unidades, una por cada máquina, con excepción de la PASABAN 1, que opera con dos ventiladores debido a su configuración particular.

Los datos de potencia y velocidad fueron levantados directamente en planta mediante la inspección de las placas características, previa apertura de los encerramientos acústicos y desmontaje parcial de las carcasas, en coordinación con el equipo de mantenimiento mecánico. Todos los ventiladores operan a una velocidad nominal de 3000 rpm, correspondiente a su única condición de funcionamiento, sin variación de régimen.



(a) Boca succión de orillo.



(b) Motor y Ventilador Triturador.

Figura 2.2.2 Ventiladores triturador y succión de orillo[e.p.]

Tabla 2.2.2 Características geométricas de las tomas de aire [e.p.].

Cortadora	Largo [cm]	Ancho [cm]	Área [m ²]
Pasaban 1A	38,5	14	0,054
Pasaban 1B	39,5	14	0,055
Pasaban 2	22,0	9,5	0,020
Pasaban 3	22,0	10,0	0,022
Pasaban 4	11,0	9,0	0,010
Pasaban 5	12,0	8,0	0,005
Pasaban 6	12,0	8,5	0,010
Pasaban 7	21,5	7,5	0,016
Jagenberg	17,5	9,0	0,015
Rebobinadora	61,0	41,5	0,253

Tabla 2.2.3 Potencia nominal y diámetro de salida de los ventiladores trituradores [e.p.].

Cortadora asociada	Potencia [kW]	ϕ salida [mm]
Pasaban 1A	18,5	280
Pasaban 1B	18,5	280
Pasaban 2	37,3	280
Pasaban 3	37,3	280
Pasaban 4	22,4	280
Pasaban 5	18,5	230
Pasaban 6	37,3	230
Pasaban 7	37,3	250
Jagenberg	15,0	230
Rebobinadora	27,0	300

Las Tablas 2.2.2 y 2.2.3 evidencian una variabilidad significativa tanto en la geometría de las tomas de aire como en las características de los ventiladores trituradores instalados. En particular, los largos de las tomas varían entre 11 y 61 cm, mientras que las áreas de succión se distribuyen entre 0,005 y 0,253 m². A su vez, las potencias nominales de los ventiladores oscilan entre 15 y 37,3 kW, con diámetros de salida entre 230 y 300 mm.

Esta dispersión de parámetros indica que la capacidad de captación y transporte no es homogénea entre cortadoras, lo que sugiere diferencias estructurales tanto en el diseño de las tomas como en el dimensionamiento de los ventiladores trituradores asociados. En consecuencia, el comportamiento del sistema neumático no puede asumirse uniforme, debiendo analizarse cada línea en función de su configuración particular.

2.2.3. Separadores de orillo

Los separadores de orillo cumplen la función de recibir el flujo proveniente de las cortadoras y separar los recortes triturados del aire cargado con polvo, gracias a la malla mostrada en la Figura 2.2.3. Permitiendo que el material sólido sea derivado hacia la enfardadora, mientras que el flujo de aire con partículas finas se dirige hacia los filtros de mangas para su captación final. En este sentido, el separador constituye la primera etapa efectiva de clasificación del flujo proveniente de los ventiladores trituradores. El sistema cuenta con 3 separadores de distintas capacidades, las cuales se presentan en la Tabla 2.2.4.

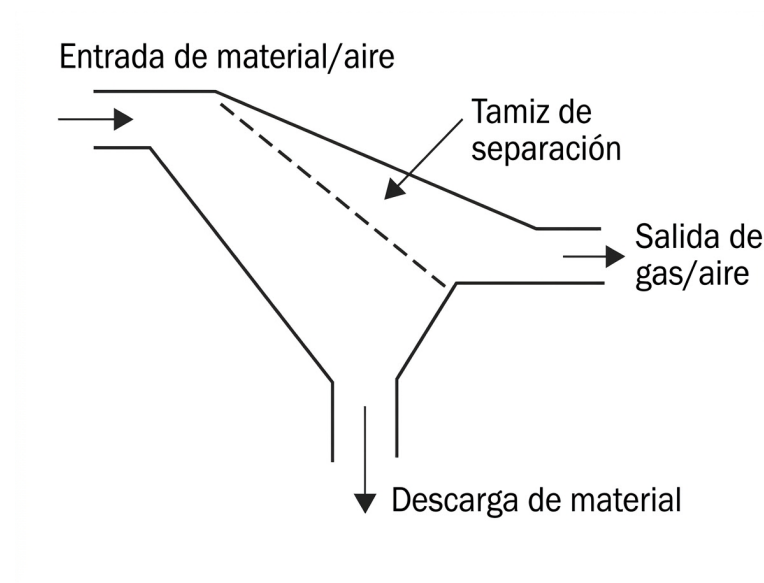


Figura 2.2.3 Principio de funcionamiento de separadores por gravedad en sistemas de transporte neumático de sólidos [1].

Tabla 2.2.4 Características principales de los separadores instalados [e.p.]

Separador	Marca	Ancho [m]	Caudal Máximo [m ³ /h]
213A	Santa Lucia	1,8	25.000
213B	Santa Lucia	1,5	21.000
213C	Deltoid	1,5	21.000

Como se observa en la Tabla 2.2.4, los separadores presentan distintas capacidades de operación. El caudal máximo se determina en función del área efectiva de malla, utilizando coeficientes empíricos del tipo CFM/in² empleados por distintos fabricantes, los cuales relacionan el caudal volumétrico de aire con el área disponible para la separación.

2.2.4. Filtros de manga

Los filtros de mangas constituyen el principal sistema de depuración del aire proveniente de los separadores de sólidos del sistema de transporte neumático. Su función es retener el material particulado arrastrado por la corriente de aire, permitiendo que únicamente el aire limpio sea liberado a la atmósfera. Para ello, el flujo cargado con polvo de cartulina atraviesa un conjunto de mangas filtrantes que proporcionan una amplia superficie efectiva de filtración, alcanzando eficiencias superiores al 99 % incluso para partículas de tamaño fino [16]

Durante la operación, la acumulación progresiva de polvo sobre la superficie de las mangas genera un incremento en la presión diferencial del equipo. Cuando este diferencial alcanza el valor de consigna, se activa el sistema de limpieza neumática tipo *Jet-Pulse*, el cual inyecta pulsos de aire comprimido en sentido inverso al flujo de filtración. Este mecanismo desprende la capa de polvo adherida a la tela filtrante, permitiendo que el material caiga por gravedad hacia la tolva inferior. Posteriormente, el polvo es evacuado mediante una válvula rotativa hacia el acumulador correspondiente, como se muestra en la Figura 2.2.4, o bien descargado a través de compuertas manuales, según la configuración operativa. En la tabla siguiente se presenta un resumen de las principales características técnicas de cada uno de estos filtros de mangas.

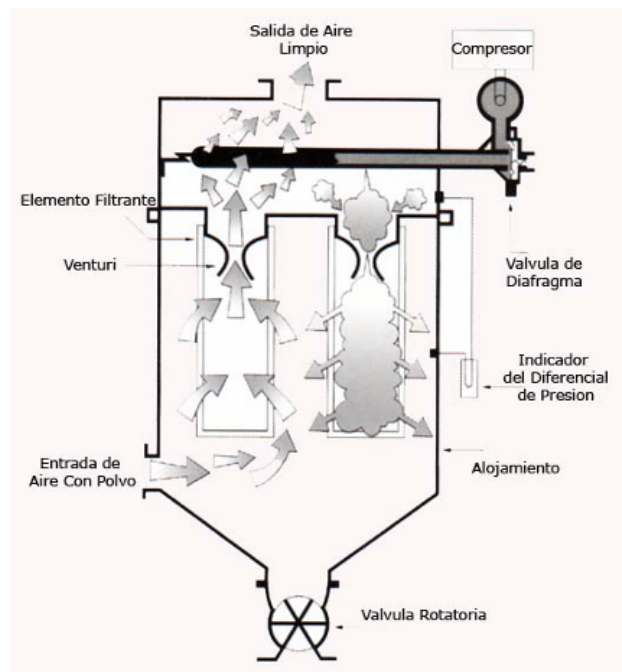


Figura 2.2.4 Funcionamiento Filtro de Mangas JetPulse

Tabla 2.2.5 Comparación técnica entre equipos FM1 y FM2

Fuente	Fabricación Nacional	REIMAQ
Equipo	Filtro Mangas 1	Filtro Mangas 2
Caudal [m ³ /h]	17500	25000
Área filtrado [m ²]	187,8	276,3
Cantidad elementos filtrantes	120	168
Cantidad válvulas	10	14
Descarga material	516×520 mm	10"

El sistema de manejo de recortes de la planta dispone de los filtros de mangas previamente descritos, los cuales operan en paralelo con el fin de distribuir la carga de material transportado. El primero recibe siete flujos provenientes de distintos puntos del proceso, correspondientes a la Línea 1, mientras que el segundo procesa los tres flujos asociados a la Línea 2. La configuración general del sistema se presenta en la Figura 2.1.1.

Los valores de caudal y área de filtrado del equipo cuya fuente es desconocida fueron estimados mediante una aproximación basada en filtros dimensionados por Reimaq, obteniéndose un coeficiente de determinación $R^2=0,996$.

2.2.5. Ventiladores centrífugos

El ventilador centrífugo es el elemento encargado de generar la succión necesaria para impulsar el flujo de aire cargado con partículas de polvo desde la descarga del separador hasta el sistema de filtración, asegurando que únicamente el aire limpio sea liberado a la atmósfera tras su paso por el filtro de mangas. Las configuraciones correspondientes a cada equipo se presentan en las Figuras 2.2.5a y 2.2.5b. El sistema actual de manejo de recortes dispone de dos ventiladores centrífugos de tipo radial, cada uno asociado directamente a su respectivo filtro de mangas. Esta configuración define dos líneas independientes de captación, transporte y tratamiento de aire dentro de la sala de conversión. Las principales características técnicas de estos equipos se presentan en la tabla siguiente.



(a) Ventilador Centrífugo FM1



(b) Ventilador Centrífugo FM2

Figura 2.2.5 Ventiladores Centrífugos[e.p.]

Tabla 2.2.6 Características principales de los ventiladores centrífugos.

Equipo	VC FM1	VC FM2
Marca	Reimaq	Reimaq
Potencia motor [kW]	132	37
Caudal [m ³ /h]	57.000	25.000
Presión estática [mmca]	450	300
Velocidad nominal [rpm]	1500	1070
Accionamiento	VDF	VDF

La Tabla 2.2.6 evidencia diferencias significativas entre ambos equipos, principalmente en la potencia instalada y el caudal de operación, lo que confirma que cada línea presenta requerimientos distintos y debe evaluarse de forma independiente.

2.3. Condición operacional observada

2.3.1. Configuración general de operación

El sistema de manejo de recortes opera bajo un régimen no continuo, condicionado por la operación intermitente de las cortadoras. Las detenciones por cambio de formato o término de rollo generan variaciones en la carga de recorte, alternando entre condiciones de plena carga, carga parcial y ausencia temporal de alimentación.

En la configuración actual, cada cortadora dispone de una única captación controlada por los ventiladores trituradores, estos operan a velocidad fija y su puesta en marcha depende del operador. Son el equipo encargado de aspirar aire, polvo y orillo, triturarlo e impulsarlo hacia los separadores.

Posteriormente, el aire cargado con polvo es conducido a filtros de mangas asociados a ventiladores centrífugos. La descarga de material se realiza mediante retiro manual en el FM1 y mediante válvula rotativa en el FM2. La Figura 2.3.1 muestra la configuración general de ductos de entrada a separadores y descarga hacia enfardadora.



Figura 2.3.1 Ductos de entrada a separadores y descarga hacia enfardadora [e.p.].

2.3.2. Línea 1

En la Línea 1 se observó taponamiento recurrente de la malla de los separadores, condición que obliga a operar con la compuerta de mantenimiento abierta para restablecer la continuidad operacional, como se muestra en la Figura 2.3.2a. Asimismo, la descarga inferior del FM1 permanece abierta al ambiente, permitiendo el ingreso de aire falso al sistema (Figura 2.3.2b).

Durante la inspección se verificó además que el controlador del ventilador centrífugo PIC 196 opera al máximo limitado, condición coherente con una alta demanda de succión del sistema. En conjunto, estos antecedentes indican que la Línea 1 requiere medidas operacionales compensatorias para sostener su funcionamiento y no opera de manera estable bajo su configuración nominal.



(a) Compuerta de mantenimiento abierta en el separador.



(b) Descarga inferior del filtro de mangas FM1 abierta al ambiente.

Figura 2.3.2 Condiciones operacionales observadas en la Línea 1.

2.3.3. Línea 2

En la Línea 2 se observó que el separador 213C opera con la descarga de sólidos abierta para mantener la continuidad operacional, como se muestra en la Figura 2.3.3. Esta condición reduce la eficiencia del equipo y obliga a realizar limpiezas frecuentes. Adicionalmente, se detectó presencia de polvo en la zona limpia del filtro FM2, por lo que su limpieza difiere de la aplicada en FM1: en este caso no solo se retira el polvo acumulado, sino que además se desmontan las mangas para limpiar el interior completo del equipo.

En términos operacionales, estos antecedentes indican que la Línea 2 también funciona bajo condiciones compensatorias, distintas de su régimen nominal, para sostener la continuidad del proceso.



Figura 2.3.3 Separador 213C operando con la descarga de sólidos abierta.

2.4. Mediciones y caracterización del material

2.4.1. Caudal de entrada a separadores

Con el objetivo de cuantificar el caudal real de aire que ingresa a los separadores, se realizaron mediciones de velocidad en ductos del sistema de transporte neumático. Este levantamiento permite caracterizar la condición operacional actual y constituye la base para el análisis posterior del grado de utilización de los separadores.

Las mediciones se efectuaron mediante un anemómetro con tubo de Pitot acoplado a un manómetro diferencial, en puntos representativos del sistema. Previo a su ejecución, se gestionaron los permisos de seguridad correspondientes y se coordinó la actividad con el líder del área y el prevencionista de riesgos, con el fin de asegurar condiciones de trabajo seguras y representativas de la operación normal.

La Figura 2.4.1 muestra el equipo utilizado, el punto de medición habilitado en el ducto y la toma de datos realizada durante el levantamiento.



(a) Equipo de medición.



(b) Punto de medición.



(c) Toma de datos.

Figura 2.4.1 Medición de velocidad en ductos del sistema de transporte neumático [e.p.].

No todos los ductos pudieron ser medidos directamente en terreno debido a restricciones de acceso y condiciones operacionales. En estos casos, los caudales fueron complementados con registros históricos proporcionados por el área de ingeniería de la planta [24]. Adicionalmente, en la línea PASABAN 7 se realizó una medición directa en la descarga del ventilador triturador, debido a que este punto presentaba condiciones adecuadas de acceso y menor interferencia de turbulencias.

El detalle del procedimiento de medición, las características del instrumento utilizado, las ecuaciones empleadas para el cálculo de caudal y el desarrollo del cálculo del área efectiva requerida para cada separador se presentan en el Anexo A.2.

Los caudales estimados en la llegada a los separadores se resumen en la Tabla 2.4.1.

Tabla 2.4.1 Caudal de aire en la llegada a separadores [e.p.].

Cortadora	Caudal [m ³ /h]
Pasaban 2	8.850
Pasaban 1A	6.277
Pasaban 1B	6.189
Jagenberg	4.378
Pasaban 3	7.911
Pasaban 4	6.305
Pasaban 5	4.378
Pasaban 6	5.347
Pasaban 7	5.301–6.507
Rebobinadora	7.125

Estos resultados permiten estimar la carga aerodinámica que ingresa a cada separador y contrastarla posteriormente con la capacidad efectiva de separación disponible. En particular, los caudales presentados son utilizados en el diagnóstico de subdimensionamiento desarrollado en la Sección 3.2.1, donde se evalúa el flujo específico de aire sobre el área efectiva de malla.

2.4.2. Condiciones para la generación de carga electrostática

Con el objetivo de caracterizar las condiciones operacionales asociadas a la generación de carga electrostática, se analizaron variables relevantes del sistema, tales como humedad relativa, velocidad del flujo de aire y condiciones de disipación de carga en los equipos.

Las mediciones de humedad relativa se realizaron utilizando un termo-anemómetro digital portátil. Las especificaciones del equipo se presentan en la Tabla 2.4.2.

Tabla 2.4.2 Especificaciones del termo-anemómetro digital utilizado para medición de humedad relativa [e.p.].

Variable	Rango	Resolución	Exactitud
Humedad relativa [%HR]	0 a 100	0,1	$\pm 0,2\%$
Temperatura [°C]	-20 a 70	0,1	$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$
Velocidad del aire [m/s]	0 a 30	0,1	$\pm 5\%$

Durante el levantamiento en terreno se registró una humedad relativa de 28,9 % en el ducto asociado al separador 213B, condición representativa de baja humedad en el sistema. Este nivel de humedad favorece la acumulación de carga electrostática en materiales fibrosos, debido a la disminución de la conductividad superficial [25].

Asimismo, durante la inspección visual no se observaron conexiones de puesta a tierra en algunos componentes críticos del sistema, a diferencia de configuraciones industriales estándar donde se incorporan conexiones conductivas para favorecer la disipación de carga electrostática. La Figura 2.4.2 presenta la medición de humedad relativa realizada en terreno y una referencia de conexión a tierra utilizada en sistemas industriales de filtración.



(a) Medición de humedad relativa (28,9 %) en ducto asociado al separador B [e.p.].



(b) Ejemplo de conexión a tierra en filtros de mangas industriales (NEU-JKF) para disipación de carga electrostática.

Figura 2.4.2 Condiciones asociadas a la generación y disipación de carga electrostática.

Adicionalmente, las velocidades elevadas de transporte identificadas en algunos ductos pueden incrementar la fricción partícula-pared y la frecuencia de colisiones, favoreciendo mecanismos de electrificación por contacto en sistemas de transporte neumático [1, 26]. Este aspecto se analiza posteriormente en la Sección 3.3.5.

Finalmente, en reunión con personal encargado de la limpieza de los filtros de mangas, se reportaron descargas electrostáticas durante actividades de soplado con aire comprimido. Estos antecedentes permiten caracterizar condiciones favorables para la generación y acumulación de carga electrostática en el sistema, las cuales deben ser consideradas en el diagnóstico técnico posterior.

2.4.3. Caracterización cualitativa del polvo

Con el objetivo de complementar la caracterización del material transportado, se realizó un análisis cualitativo de una muestra de polvo recolectada a la salida del filtro de mangas 2. El ensayo se llevó a cabo en laboratorio mediante observación microscópica y aplicación de reactivos químicos selectivos.

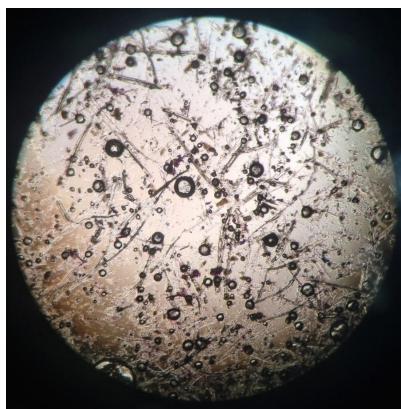
Se utilizaron tres reactivos con fines de identificación específica: ácido clorhídrico, empleado para detectar la presencia de estuco (carbonatos); reactivo Heisenberg, utilizado para evidenciar fibras de madera (lignina); y reactivo Lungo, orientado a la identificación de celulosa y pulpa mecánica.

Los resultados evidencian una predominancia de fibras de origen celulósico, junto con la presencia de estuco, ambos consistentes con la composición de la cartulina procesada. No se observaron partículas metálicas ni contaminantes ajenos al proceso productivo.

En conjunto, estos resultados confirman que el material corresponde a un polvo fibroso típico de la industria papelera, caracterizado por baja densidad aparente y alta capacidad de suspensión, lo cual resulta relevante para el análisis del transporte neumático y los mecanismos de separación asociados.



(a) Ácido clorhídrico: detección de estuco.



(b) Reactivo Heisenberg: fibras de madera.



(c) Reactivo Lungo: celulosa y pulpa.

Figura 2.4.3 Caracterización cualitativa del polvo mediante reactivos químicos y observación microscópica [e.p.].

2.4.4. Granulometría del polvo

Con el objetivo de complementar la caracterización del material transportado, se realizó un análisis granulométrico por tamizado de una muestra de polvo recolectada a la salida del filtro de mangas. El ensayo se efectuó el 27/11/2025 en el Laboratorio de Química de CMPC Maule, utilizando una muestra de 6,4940 g.

La distribución de tamaños obtenida (Tabla 2.4.3) presenta un error de cierre cercano al 4 %, consistente con la naturaleza fibrosa del material [27]. Los resultados muestran que más del 80 % del polvo corresponde a partículas mayores a $250\ \mu\text{m}$, con una fracción menor en el rango fino ($> 25\ \mu\text{m}$), potencialmente más susceptible a permanecer en suspensión.

Este análisis permite complementar la caracterización del material, sin constituir un factor determinante en las problemáticas operacionales identificadas.



Tabla 2.4.3 Resultados del ensayo de tamices para polvo de cartulina

Fracción / Tamiz	Peso retenido [g]	% retenido
$> 1,4\ \text{mm}$	2,7307	42,06 %
$> 250\ \mu\text{m}$	2,6327	40,54 %
$> 150\ \mu\text{m}$	0,3194	4,92 %
$> 25\ \mu\text{m}$	0,5536	8,52 %
$< 25\ \mu\text{m}$	~ 0	0 %
Peso total de la muestra	6,4940 g	

Figura 2.4.4 Columna de tamices utilizada para el análisis granulométrico.

Capítulo 3

Diagnóstico técnico, brechas e impactos del sistema

3.1. Análisis causa–efecto y priorización de causas

El diagnóstico causal se desarrolló en dos etapas complementarias. En primer lugar, se empleó el diagrama de Ishikawa para estructurar sistemáticamente las posibles causas asociadas al fenómeno observado. Posteriormente, las hipótesis identificadas se evaluaron mediante una matriz de criticidad, con el propósito de priorizar aquellas que presentan una mayor probabilidad de ocurrencia e impacto financiero-operacional.

El diagrama de Ishikawa permite agrupar las posibles causas en categorías operacionales ampliamente utilizadas en el análisis de procesos industriales: Máquina, Método, Material, Mano de obra, Medida y Entorno. Esta estructura facilita la identificación de hipótesis de falla y la detección de brechas de información en sistemas caracterizados por una alta variabilidad operacional y por la interacción de múltiples equipos acoplados.

En el presente estudio, el análisis se desarrolla en torno al problema definido como **desempeño subóptimo del sistema de transporte neumático de recortes**. Esta condición se manifiesta en fenómenos observados en terreno, tales como generación de polvo, pérdidas de recorte, atascamientos e inestabilidades en el transporte neumático. A partir de esta definición, el diagrama permite vincular dichas observaciones con posibles factores asociados al diseño de los equipos, las condiciones de operación, las características del material transportado y las prácticas de monitoreo y mantención del sistema.

A diferencia de los enfoques lineales de causa y efecto, el método de Ishikawa permite representar relaciones multicausales entre los distintos elementos del proceso, favoreciendo la trazabilidad entre los síntomas observados durante la operación y las variables del sistema que podrían originarlos. De esta forma, el diagrama constituye una base estructurada para orientar el análisis posterior e identificar las áreas en las que resulta necesario profundizar el diagnóstico.

En la Figura 3.1.1 se presenta el diagrama de Ishikawa desarrollado para el sistema de transporte neumático de recortes. En este esquema se resumen las principales hipótesis causales identificadas, agrupadas según las categorías Máquina, Método, Material, Mano de obra, Medida y Entorno.

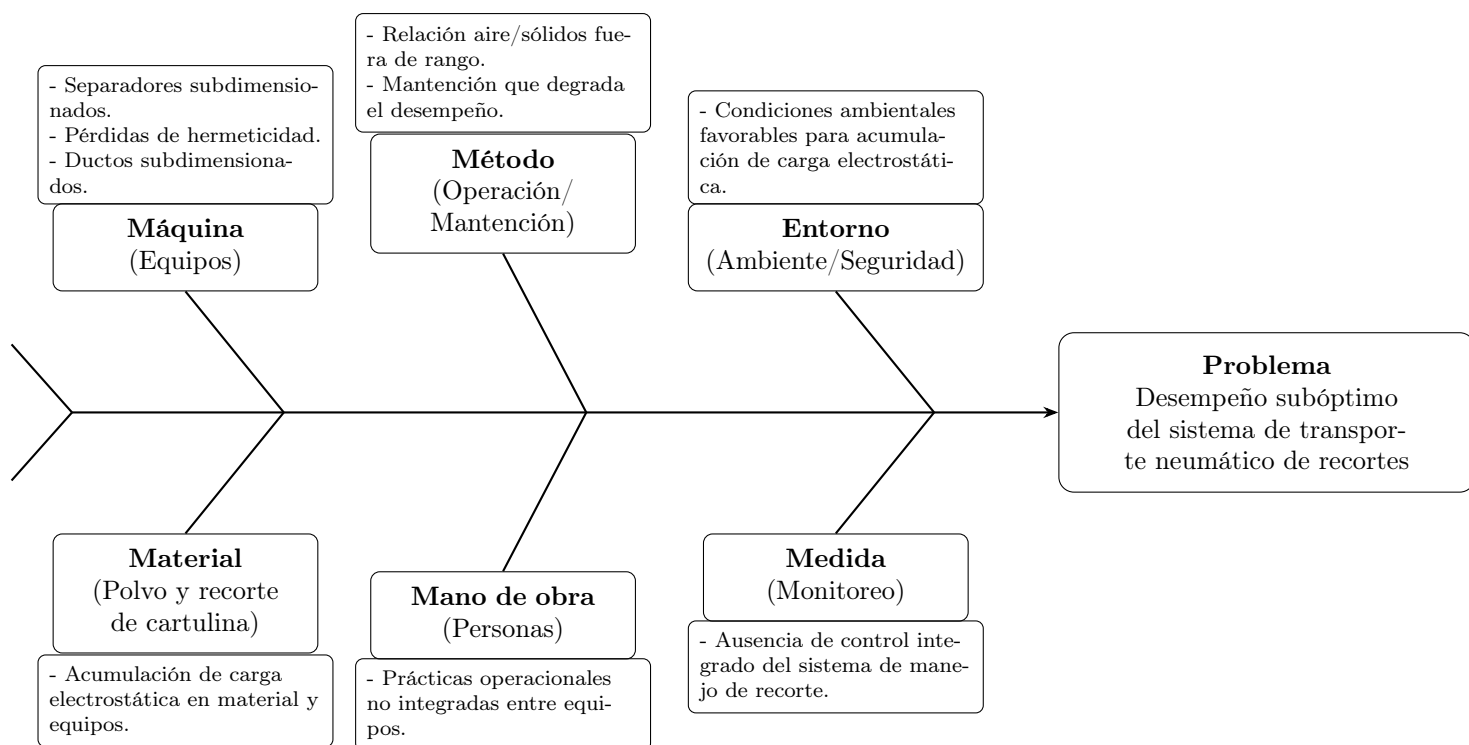


Figura 3.1.1 Diagrama de Ishikawa para el análisis causa-efecto del sistema de transporte neumático.

Priorización de las causas mediante matriz de criticidad

Una vez estructuradas las hipótesis causales mediante el diagrama de Ishikawa, se elaboró una matriz de criticidad para determinar su relevancia relativa dentro del diagnóstico. La evaluación consideró dos criterios: la probabilidad de ocurrencia y el impacto financiero-operacional. Cada causa fue valorada en una escala de 1 a 5, donde 1 representa una condición de baja criticidad y 5 una condición de alta criticidad. El nivel de criticidad se obtuvo mediante el producto de ambos criterios.

Tabla 3.1.1 Matriz de evaluación de causas basada en probabilidad de ocurrencia e impacto financiero/operacional.

Causa	Probabilidad	Impacto financiero	Nivel de riesgo
Ductos subdimensionados	3	2	6
Separadores subdimensionados	5	3	15
Sistema de control no integrado	5	2	10
Relación aire/sólidos fuera de rango	2	4	8
Sistema no cuenta con puesta a tierra	2	4	8
Pérdidas de hermeticidad	4	2	8
Diseño y condiciones de mantención	4	2	8

A partir de los resultados presentados en la Tabla 3.1.1, se identifica que el subdimensionamiento de los separadores presenta el mayor nivel de criticidad, con un valor de 15, debido a su alta probabilidad de ocurrencia y a su impacto financiero-operacional. En segundo lugar se encuentra el sistema de control no integrado, con un nivel de criticidad de 10. Aunque esta causa presenta un impacto relativo menor, su presencia es recurrente durante la operación del sistema.

Las demás hipótesis obtuvieron niveles de criticidad entre 6 y 8. Si bien estos valores no permiten descartarlas, indican que su contribución relativa al problema es menor frente al subdimensionamiento de los separadores y a la ausencia de una estrategia de control integrada. En consecuencia, el análisis posterior se concentra en estas dos causas principales, mientras que las demás condiciones se abordan como hallazgos que pueden contribuir al desempeño subóptimo del sistema.

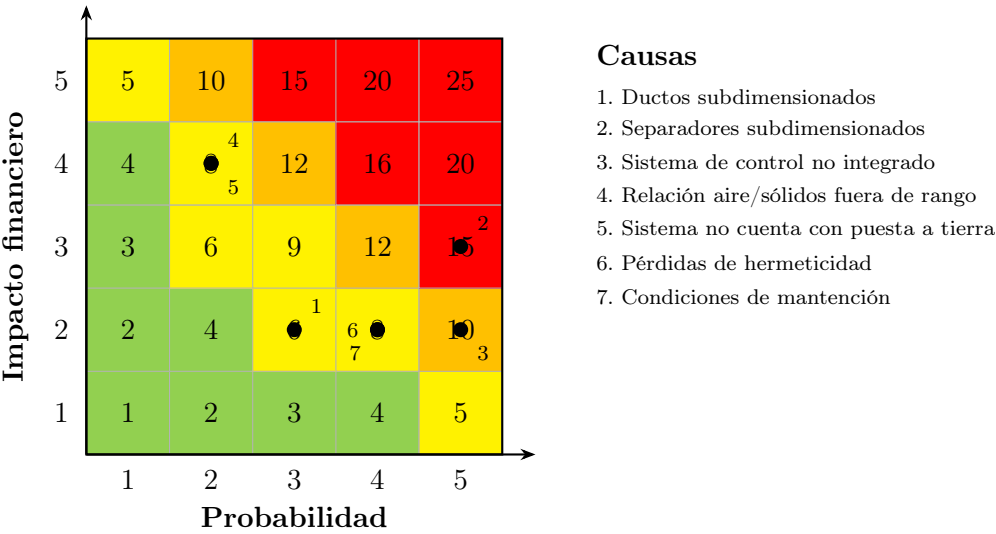


Figura 3.1.2 Priorización de las causas según su probabilidad de ocurrencia e impacto financiero-operacional.

3.2. Causas principales identificadas

3.2.1. Separadores subdimensionados

A partir de los caudales reales de operación y de las dimensiones efectivas de malla de los separadores, se evaluó el flujo específico de aire sobre la superficie disponible para la separación. Este parámetro permite analizar el nivel de exigencia aerodinámica al que se encuentra sometida la superficie de malla y evaluar si los equipos disponen de área suficiente para separar adecuadamente el recorte de la corriente de aire bajo las condiciones reales de operación del sistema.

El detalle del procedimiento de medición, el levantamiento realizado con tubo de Pitot, las ecuaciones utilizadas y el cálculo del área efectiva requerida para cada separador se presentan en el Anexo A.2.

Para evaluar la suficiencia del área de separación se adoptó un flujo específico de referencia de

$$\phi_{\text{ref}} = 2,0 \text{ CFM/in}^2.$$

Este valor se utiliza exclusivamente como criterio técnico referencial para comparar la condición operacional de los separadores y estimar la superficie adicional requerida. Por lo tanto, no corresponde a un límite normativo ni a una especificación universal de diseño. Bajo este criterio, valores superiores a 2,0 CFM/in² indican que una mayor cantidad de aire atraviesa cada unidad de superficie efectiva de malla, aumentando la exigencia sobre el equipo y reduciendo su holgura para efectuar la separación del recorte respecto de la corriente de aire.

El porcentaje de exceso se determinó comparando el flujo específico actual de cada separador con el criterio de referencia adoptado. Asimismo, el déficit de área corresponde a la superficie efectiva adicional necesaria para que el equipo opere con un flujo específico igual a 2,0 CFM/in². Los resultados principales se resumen en la Tabla 3.2.1.

Tabla 3.2.1 Evaluación resumida del subdimensionamiento de separadores respecto del flujo específico de referencia.

Separador	ϕ_{act}	Exceso respecto a	Déficit de área
	[CFM/in ²]	ϕ_{ref} [%]	[m ²]
213A	2,44	22,0	0,81
213B	2,39	19,5	0,60
213C	3,71	85,5	1,79

Los resultados muestran que los tres separadores operan por sobre el criterio de referencia adoptado. En particular, el separador 213C presenta la condición más exigente, con un flujo específico de 3,71 CFM/in², equivalente a un exceso de 85,5 % respecto del valor referencial. En la Línea 1, compuesta por los separadores 213A y 213B, el déficit total de área efectiva se estima en 1,41 m², mientras que en la Línea 2 el déficit alcanza 1,79 m².

Esta condición es consistente con las observaciones realizadas en terreno, donde se identificaron fugas, acumulación de material, formación de tapones y presencia de recorte y polvo aguas abajo de la zona de separación. La Figura 3.2.1 presenta evidencia visual de estas condiciones operacionales.



(a) Fugas en el separador 213A, registradas el 09/03/26.



(b) Tapón de material en la malla asociado al deflector.



(c) Aglomeración de recorte y polvo posterior a la malla.

Figura 3.2.1 Condiciones observadas en el separador de orillo, incluyendo fugas, acumulación de material y puntos de estancamiento [e.p.].

Desde una perspectiva técnica, el aumento del flujo específico sobre la malla implica que un mayor caudal de aire debe atravesar una superficie limitada de separación. Esta condición puede reducir la capacidad efectiva del equipo para separar el recorte de la corriente de transporte neumático y favorecer fenómenos como rearrastre, turbulencia local, acumulación de material y atascamientos.

En consecuencia, los resultados obtenidos respaldan el diagnóstico de una capacidad insuficiente de separación frente a la carga aerodinámica actualmente manejada. Por lo tanto, el subdimensionamiento de los separadores se identifica como una de las causas principales asociadas al bajo desempeño del sistema.

3.2.2. Sistema de control no integrado

De acuerdo con el diagrama del sistema presentado en la Figura 1.2.1, la estrategia de control actual se basa en lazos locales e independientes. Los lazos 020-PIC-213A, 213B y 213C regulan la presión en la cámara de salida de cada separador mediante dampers, mientras que los lazos 020-PIC-196 y 197 controlan la presión en la entrada de los filtros de mangas mediante la variación de frecuencia de los ventiladores centrífugos.

Si bien esta configuración permite mantener referencias locales de presión, no incorpora una lógica orientada al desempeño global del sistema. En particular, no existe una variable de control que represente el balance de caudales entre ramas ni la estabilidad del transporte neumático en función de la carga de recorte generada. Por lo tanto, el sistema regula presiones puntuales, pero no asegura una distribución adecuada del flujo entre captaciones ni una operación coordinada entre separadores, filtros de mangas y ventiladores.

Esta condición resulta especialmente relevante en la Línea 1, donde los separadores 213A y 213B descargan hacia un subsistema común asociado a un mismo ventilador centrífugo. Como se observa en la Figura 3.2.2, ambas descargas convergen hacia un troncal común con distinta ubicación relativa respecto del ventilador, lo que puede generar diferencias de tiraje entre ramas. En sistemas de transporte neumático, el caudal tiende a distribuirse preferentemente hacia las trayectorias de menor pérdida de carga si no existe una estrategia específica de balanceo [1, 12].



Figura 3.2.2 Descarga común de los separadores 213A y 213B en la Línea 1, con desbalance de tiraje entre ramas.

Por otra parte, la Figura 3.2.3 muestra que la regulación de separación y filtración se ejecuta mediante lazos desacoplados, sin una coordinación explícita entre generación de recorte, distribución de caudales, capacidad de separación y nivel de succión del ventilador. En términos prácticos, el sistema controla presión local, pero no controla directamente la distribución de flujo ni la condición de transporte de recorte, que son las variables que gobiernan su desempeño operacional.

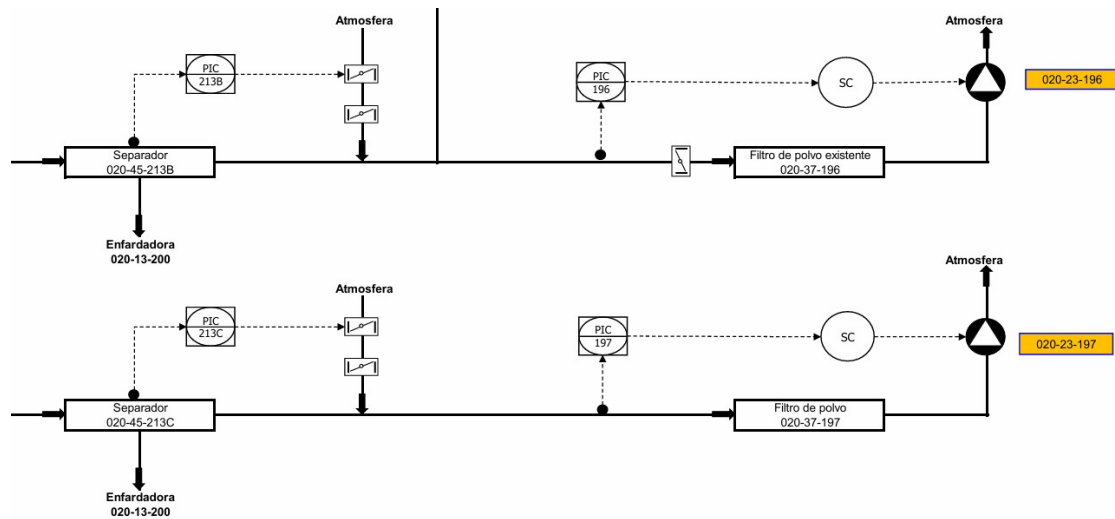


Figura 3.2.3 Esquema de control actual del sistema de manejo de recortes, con lazos locales de presión y sin integración del control global.

Los antecedentes levantados en terreno son consistentes con este comportamiento, observándose ajustes manuales frecuentes de dampers, acumulación diferencial de recortes, atascamientos e inestabilidad operacional. En consecuencia, la configuración física del sistema y su arquitectura de control respaldan la hipótesis de que opera bajo un esquema no integrado, contribuyendo al desbalance de aspiración y al desempeño subóptimo del sistema.

3.3. Hallazgos que afectan el desempeño del sistema

Los siguientes hallazgos corresponden a condiciones observadas en terreno que, si bien no se consideran causas principales del problema, pueden afectar negativamente el desempeño del sistema y contribuir a su operación subóptima. Se excluyen de este listado aquellas condiciones ya incorporadas dentro de las hipótesis principales de causa.

- En ambos filtros de mangas se reporta una baja eficiencia en la descarga de material, condición que puede favorecer acumulaciones locales y una evacuación menos estable del polvo separado.
- En el filtro de mangas FM2 se reporta presencia de polvo en la zona limpia posterior a la filtración, lo que sugiere un desempeño deficiente del equipo en esa condición particular de operación.
- La operación de cortadoras y ventiladores trituradores se desarrolla bajo un régimen intermitente, asociado a cambios de formato, término de rollo y otros eventos operacionales, lo que introduce perturbaciones frecuentes en la estabilidad del sistema.
- El ángulo del deflector en los separadores se asocia a episodios de atascamiento o, en la condición opuesta, a la generación de turbulencias elevadas, lo que evidencia una ventana operacional sensible en ese elemento [2].
- Los filtros de mangas no cuentan con certificación ATEX/NFPA declarada, por lo que resulta necesario contrastar su diseño y resguardos con criterios de mitigación de explosiones de polvo aplicables al servicio.
- La gestión operativa de los filtros de mangas tiende a basarse en eventos de saturación, sin indicadores instrumentados ni registro sistemático de variables relevantes, tales como presión diferencial o ciclos de limpieza, lo que limita la detección oportuna de desviaciones operacionales.
- No existe un historial consolidado de datos operacionales y de mantención del área desde aproximadamente 2015, lo que dificulta la trazabilidad de fallas y el análisis de tendencias del sistema.

3.3.1. Presencia de polvo en zona limpia de FM2

En la Línea 2 se observó acumulación de polvo en la zona limpia del filtro de mangas FM2, junto con emisión de material particulado al ambiente. Adicionalmente, se reportó un amago de incendio en la chimenea de descarga del sistema.

Con el fin de identificar la causa del fenómeno, se comparó el polvo presente en la cámara sucia con el material acumulado en la zona limpia, verificándose que ambos correspondían al mismo tipo de particulado. Este resultado indica que el material presente en la zona limpia proviene del flujo no retenido por el sistema de filtración.

Durante una inspección interna del equipo se detectó una manga filtrante desprendida de su sistema de sujeción, condición que se presenta en la Figura 3.3.1a. Esta falla genera un bypass directo entre la cámara sucia y la cámara limpia, permitiendo el paso de aire con partículas sin atravesar el medio filtrante. La acumulación de polvo en la zona limpia se muestra en la Figura 3.3.1b.

La condición observada es consistente con guías técnicas de diagnóstico para filtros de mangas, en las cuales las mangas desprendidas, mal instaladas o con deficiencias de sellado se identifican como causas frecuentes de presencia de polvo en la zona limpia del equipo [18].

En consecuencia, se concluye que la presencia de polvo en la zona limpia de FM2 se asocia a la pérdida de integridad del sistema de filtración producto del desprendimiento de al menos una manga. Esta condición compromete el desempeño del equipo, favorece la emisión de material particulado y genera implicancias operacionales y de seguridad.



(a) Manga filtrante desprendida durante la inspección del filtro.



(b) Acumulación de polvo en la zona limpia del filtro.

Figura 3.3.1 Evidencia observada durante la inspección del filtro de mangas de la Línea 2.

3.3.2. Efecto del deflector en la operación del separador

La posición del deflector condiciona la trayectoria de ingreso del material al separador y, por tanto, su distribución inicial sobre la malla. Como se muestra en la Figura 3.3.2, cuando el deflector se encuentra en una posición intermedia, el material tiende a caer de forma más directa y uniforme sobre la superficie de separación. En cambio, si el deflector se ubica demasiado alto, el flujo impacta preferentemente sobre la primera bandeja, favoreciendo la acumulación de material y la ocurrencia de atochamientos. Por el contrario, si se ubica demasiado bajo, el material se descarga con mayor energía hacia la salida del equipo, incrementando la turbulencia en la zona de descarga.

Durante la inspección se observaron ambas condiciones desfavorables, evidenciándose tanto acumulación de material en la primera bandeja como desprendimiento de tapas en la descarga. Estos antecedentes indican que el desempeño del separador presenta una alta sensibilidad a la posición del deflector, con una ventana operacional estrecha entre una condición de atochamiento y otra de exceso de turbulencia.

De acuerdo con referencias técnicas de separadores tipo *slanted screen*, la posición recomendada del deflector corresponde aproximadamente a una ubicación intermedia respecto de la malla, de modo de favorecer una distribución más uniforme del material y reducir simultáneamente la probabilidad de impacto localizado y de turbulencia excesiva en la descarga.

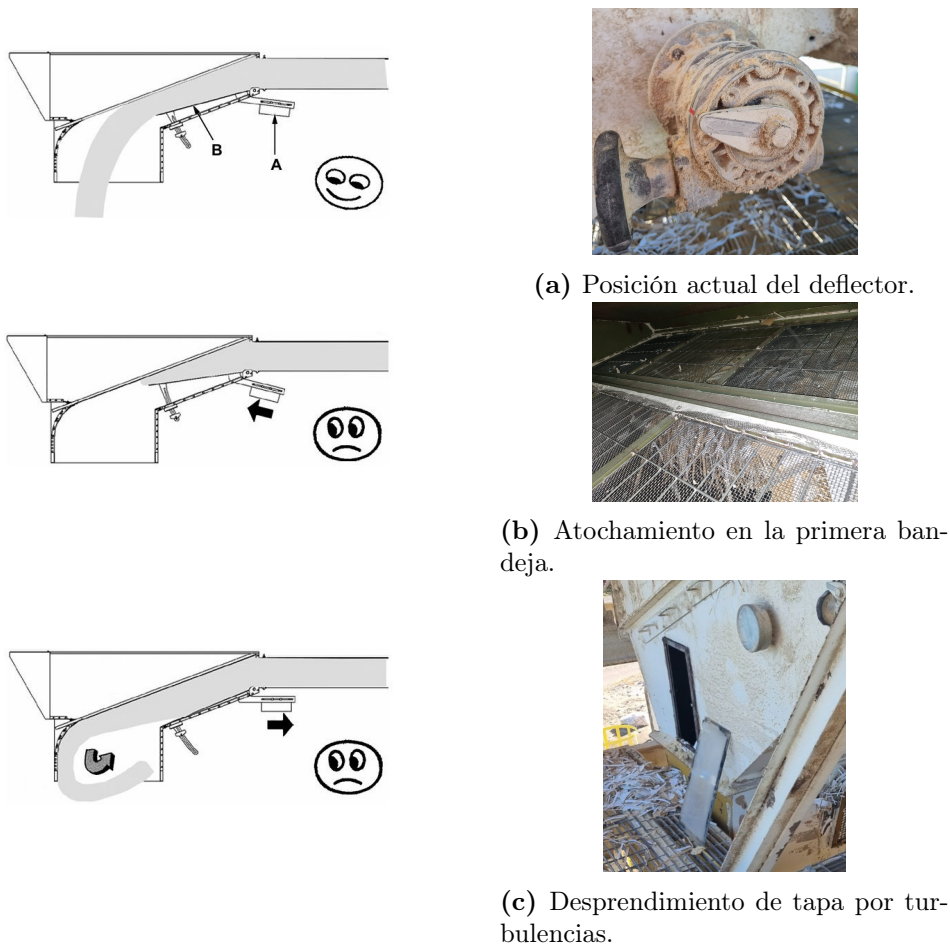


Figura 3.3.2 Relación entre configuraciones del deflector [2] y efectos observados en la operación del separador [e.p.]

3.3.3. Descarga ineficiente en filtros de mangas

Aun cuando los filtros de mangas pertenecen a líneas independientes, ambos operan con polvo de cartulina, material que presenta una fracción fibrosa apreciable, tal como se observó en el análisis de laboratorio (Figura 2.4.3). Esta condición favorece la formación de puentes (*bridging*) y acumulaciones en tolvas de descarga, fenómeno reportado para polvos fibrosos en colectores de polvo [22].

En FM1, la descarga inferior corresponde a un sistema manual no instalado, por lo que la salida de la tolva permanece abierta al ambiente. En FM2, la descarga se realiza mediante válvula rotativa e inyección manual de aire comprimido para evitar acumulaciones. Sin embargo, durante la operación se observó que dichas inyecciones no aumentan el flujo de caída del material. En contraste, la percusión manual de la tolva incrementa casi instantáneamente la descarga, evidenciando retención de polvo.

Durante las labores de limpieza se registró además una acumulación importante de material en la tolva de FM2, condición coherente con un vaciado deficiente. La comparación entre una descarga libre esperada y la condición observada en la ventana de inspección muestra que, al retirar la compuerta, el material no cae de forma continua, sino que permanece retenido y adherido en la tolva, comportamiento consistente con *bridging*.

Desde el punto de vista operacional, esta condición restringe la evacuación continua del polvo separado, puede incrementar la pérdida de carga del filtro y afectar indirectamente la succión disponible en los separadores de orillo, reduciendo la eficiencia global del sistema de manejo de recortes.

La Figura 1.2.2a presenta evidencia visual de la descarga abierta en FM1 y de la acumulación de polvo en la tolva de FM2. La Figura 3.3.3 compara una descarga libre esperada con la condición observada en FM2.



(a) Referencia de descarga gravitacional libre en tolva de colector de polvo.



(b) Polvo retenido en la tolva de FM2 al retirar la compuerta de inspección.

Figura 3.3.3 Comparación entre una condición de descarga libre esperada y la retención de polvo observada en la tolva de FM2, consistente con un fenómeno de *bridging*.

3.3.4. Ventilador centrífugo operando en rango crítico

Durante la inspección en terreno se verificó, mediante el panel del variador de frecuencia del ventilador centrífugo de la Línea 1, que el equipo opera en un rango entre 17 y 34 Hz, alcanzando el valor máximo configurado cuando el sistema se encuentra abierto al ambiente, como se muestra en la Figura 3.3.4. Complementariamente, a partir del plano técnico del equipo [3], se identificó una velocidad crítica de 548 rpm y un rango de velocidades no recomendadas entre 380 y 715 rpm, según se presenta en la Tabla 3.3.1.

Dado que el variador registra la velocidad del motor y no la del rotor del ventilador, la velocidad real del equipo se estimó a partir de la relación de poleas indicada en el plano y de las rpm observadas en el panel de control. El cálculo arrojó un rango de operación aproximado entre 382,5 y 765 rpm para el ventilador, tal como se resume en la Tabla 3.3.1. Este resultado indica que el equipo opera parcialmente dentro del intervalo de velocidades críticas definido por el fabricante.

Desde el punto de vista dinámico, esta condición implica que, ante una modificación del sistema que reduzca el ingreso de aire falso o aumente la restricción aguas abajo, el ventilador podría atravesar o permanecer dentro de una zona de resonancia. Este riesgo resulta especialmente relevante considerando que el conjunto motor-ventilador presenta una masa aproximada de 1.957 kg, por lo que una operación sostenida en dicho rango podría comprometer la integridad mecánica del equipo y aumentar la probabilidad de vibraciones excesivas.

En consecuencia, se identifica como hallazgo relevante que el ventilador centrífugo de la Línea 1 presenta un rango de operación que intersecta las velocidades críticas informadas en su plano de diseño, condición que debe ser considerada en cualquier modificación futura del sistema de control o de las condiciones de operación.

Tabla 3.3.1 Especificaciones técnicas del ventilador centrífugo de la Línea 1 [3].

Parámetro	Valor	Unidad
Modelo equipo	12M 57/33	–
Caudal	54.000	m ³ /h
Potencia	132	kW
Tensión / frecuencia	380 / 50	V / Hz
Presión estática	550	mm.c.a
Velocidad de giro	1090	rpm
Velocidad crítica	548	rpm
Velocidad no recomendada	380–715	rpm



Figura 3.3.4 Pantalla VDF ventilador centrífugo 1 durante la inspección en terreno.

3.3.5. Velocidades altas en ductos

A partir de los caudales levantados en terreno y de las dimensiones de los ductos, se identificaron velocidades elevadas en distintos tramos del sistema de transporte neumático, principalmente en líneas asociadas a ventiladores trituradores de 37,3 kW. El detalle del procedimiento de medición y del cálculo de caudales se presenta en el Anexo A.2.

Las velocidades medidas a la entrada de los separadores se resumen en la Tabla 3.3.2. Los valores promedio se sitúan entre 35,69 y 39,90 m/s, superando el rango recomendado para transporte neumático de trim en fase diluida [1].

Tabla 3.3.2 Velocidades medidas a la entrada de los separadores [e.p.].

Cortadora	Velocidad promedio [m/s]	Ducto [mm]	Velocidad máxima [m/s]
Pasaban 2	39,90	280	47,99
Pasaban 6	35,70	230	42,83
Pasaban 7*	36,82	250	40,63
Pasaban 3	35,69	280	42,93

Desde el punto de vista mecánico, velocidades elevadas incrementan la energía de impacto del material transportado sobre las paredes del ducto, especialmente en cambios de dirección. La literatura técnica indica que el desgaste erosivo se intensifica a altas velocidades y que los codos constituyen zonas susceptibles a daño localizado [28]. Esta condición es consistente con lo observado en el ducto de la Pasaban 2, donde se identificó una perforación en un codo del tramo ascendente hacia los separadores, como se muestra en las Figuras 3.3.5a y 3.3.5b.



(a) Perforación en codo.



(b) Recorte acumulado.

Figura 3.3.5 Evidencia de daño y pérdida de material asociada al ducto de la Pasaban 2.

Adicionalmente, el aumento del ancho de orillo incrementa la carga de recorte transportada por el sistema. De acuerdo con el estudio de tendencia presentado en el Anexo A.3, durante el año 2025 se observaron condiciones de operación por sobre el valor de referencia de 1,5 cm considerado en el diseño original.

En conjunto, las velocidades elevadas aumentan la exigencia mecánica sobre ductos y accesorios, favorecen el desgaste de componentes y pueden contribuir a pérdidas de material en puntos críticos. Por lo tanto, este hallazgo debe considerarse en futuras modificaciones de ductería, especialmente en tramos asociados a ventiladores trituradores de alta potencia.

3.3.6. Costos asociados al bajo rendimiento del proceso

Se estimó el costo operacional anual asociado a labores de limpieza preventiva del sistema de manejo de recortes, considerando (i) limpieza de correas ejecutada con personal interno (11 personas) y (ii) limpieza de filtros de mangas contratada a empresa externa. La valorización de mano de obra se basó en una tarifa de referencia indicada por un experto del área, y el servicio externo de limpieza de filtros se respaldó con boleta. Las actividades consideradas se ilustran en las Figuras 3.3.6a y 3.3.6b

Tabla 3.3.3 Estimación de costos anuales de limpieza asociados al sistema de manejo de recortes 2026.

Concepto	Costo [CLP/año]
Limpieza correas (horizontal + inclinada)	24.681.228
Limpieza filtros de mangas (servicio externo; 2 filtros cada 4 semanas)	14.638.000
Total anual estimado	39.319.228

El costo anual actual asociado a limpieza se estima en 39.319.228 CLP/año. Como referencia de operación en condiciones normales, el fabricante Reimaq recomienda una limpieza anual por filtro, y se considera la limpieza de correas incluida en mantenciones programadas. Bajo este escenario, el costo anual se reduce a 1.126.000 CLP/año, equivalente a un ahorro potencial de aproximadamente 38.193.228 CLP/año.



(a) Limpieza Correa Horizontal



(b) Limpieza FM 2

Figura 3.3.6 Actividades de limpieza consideradas en la estimación de costos operacionales.

Durante la inspección realizada en la mantención del 28/08/2025, se identificaron diversas anomalías operativas y de diseño:

- Filtros de manga rotos, lo que reduce significativamente la capacidad de captación de polvo y permite la fuga de partículas al ambiente.



(a) Manga con polvo en su interior y sello roto



(b) Manga completamente rota

Figura 3.3.7 Estado de mangas del filtro 196

- Sistema de limpieza por pulsos de aire comprimido (Jet Pulse) fuera de servicio, impidiendo la autolimpieza de las mangas y provocando la pérdida de eficiencia del filtrado.



Figura 3.3.8 Válvulas Jetpulse no conectadas

- Acumulación de polvo en el interior del filtro, intensificada por la operación a temperatura bajo el punto de rocío, lo que favorece la compactación del material.
- Presencia de recortes de tamaño anormal dentro del filtro, lo que indica fugas en separador previo.

3.3.7. Gestión del polvo extraído

Complementariamente, se identificó que la gestión del polvo extraído también constituye un riesgo relevante para la operación y el ambiente. El material removido durante la mantención se acumula en sacos o bolsas, los cuales son posteriormente trasladados y eliminados mediante el servicio de recolección de basura convencional. Durante el proceso de carga, compactación y descarga de estos residuos, los camiones compactadores rompen o comprimen las bolsas, generando la liberación de polvo al ambiente, tal como se observa en las Figuras 3.3.9a y 3.3.9b. Este comportamiento, registrado repetidamente por el personal de mantención, constituye una fuente secundaria de emisión de partículas, aumentando la exposición de los trabajadores, afectando las áreas cercanas de la planta y contraviniendo las buenas prácticas de manejo seguro de polvo combustible. Esta situación refuerza la necesidad de implementar un sistema de contención y disposición adecuado, que evite la dispersión del material y mantenga el control del riesgo incluso fuera del equipo.



(a) Extracción de bolsas de polvo — 29/08/2025



(b) Extracción de bolsas de polvo
— 16/10/2025

Figura 3.3.9 Extracciones de residuos de polvo realizadas en dos fechas diferentes.

Capítulo 4

Propuestas de mejora y evaluación técnico-económica

A partir del diagnóstico desarrollado, se concluye que el bajo desempeño del sistema de manejo de recortes y polvo responde a la interacción de brechas de diseño, operación, control y mantención. En particular, las causas principales identificadas corresponden a la capacidad insuficiente de separación y a la ausencia de una estrategia de control integrada.

En este contexto, las propuestas de mejora buscan intervenir ambas causas de manera conjunta, aumentando la capacidad efectiva de separación, estabilizando la distribución de caudales, reduciendo la operación bajo condiciones compensatorias y disminuyendo las emisiones fugitivas y las pérdidas de material.

El presente capítulo se estructura en dos secciones principales. En primer lugar, se describen las alternativas técnicas formuladas a partir de las brechas identificadas. Posteriormente, estas alternativas se evalúan y priorizan con el propósito de definir una propuesta integrada y analizar preliminarmente su viabilidad económica.

4.1. Descripción de propuestas

Las propuestas de mejora fueron formuladas considerando las causas principales y los hallazgos identificados durante el diagnóstico técnico. Las alternativas comprenden intervenciones asociadas al control del sistema, la capacidad de separación y filtración, la regulación de caudales, la descarga de material y la adecuación de ductos críticos.

4.1.1. Implementación de control integrado

La primera propuesta consiste en incorporar una lógica de control integrada para el sistema de manejo de recortes y polvo. Para la configuración futura se consideran seis puntos principales de control: cuatro asociados a separadores y dos asociados a filtros de mangas. Esta medida busca reemplazar la operación actual, basada en lazos locales de presión, por una estrategia orientada al desempeño global del sistema.

El control integrado permitiría coordinar la operación de dampers, ventiladores centrífugos y filtros de mangas, reduciendo la dependencia de ajustes manuales, mejorando el balance

de caudal entre ramas y disminuyendo la probabilidad de atascamientos asociados a una operación desbalanceada.

La inversión estimada para esta propuesta corresponde a USD 30.000.

4.1.2. Aumento de capacidad de separación y filtración

La segunda propuesta considera aumentar la capacidad efectiva de separación y filtración mediante la incorporación de un nuevo separador de recortes y un filtro de mangas asociado. Esta medida se fundamenta en el subdimensionamiento identificado en los separadores actuales, los cuales operan por sobre el criterio de referencia adoptado para el flujo específico sobre el área efectiva de malla.

El aumento de capacidad permitiría reducir la carga aerodinámica sobre los equipos existentes, mejorar la separación aire-material y disminuir la acumulación de recorte y polvo en puntos críticos del sistema.

Como referencia técnica, se considera una capacidad adicional de separación del orden de $3,2 \text{ m}^2$ de área efectiva de malla y un filtro de mangas con al menos 238 m^2 de área de filtración. Este último fue dimensionado a partir del criterio de razón aire-tela utilizado en el diseño preliminar de filtros de mangas [16].

La memoria de cálculo que respalda el dimensionamiento mínimo de estos equipos se presenta en el Anexo A.4.

4.1.3. Balance de caudal y automatización de dampers

La tercera propuesta consiste en reemplazar los dampers actuales por elementos compatibles con una estrategia de control automático e integrado. Su objetivo es mejorar el balance de caudal entre las distintas ramas y reducir la operación desbalanceada del sistema.

Actualmente, los dampers cumplen principalmente una función de regulación local de presión, sin asegurar una distribución adecuada del flujo entre las distintas captaciones. Por ello, su automatización permitiría ajustar la succión de acuerdo con las condiciones reales de operación de cada línea.

Esta medida debe implementarse en conjunto con la lógica de control integrada, ya que la sustitución aislada de los dampers no garantiza por sí sola una mejora en el desempeño global del sistema.

4.1.4. Mejora de seguridad y descarga de material

La cuarta propuesta considera la instalación de válvulas rotatorias con características adecuadas para el manejo de polvo combustible en cuatro separadores y dos filtros de mangas correspondientes a la configuración futura del sistema.

El objetivo de esta medida es mejorar la descarga continua del material, disminuir el ingreso de aire falso y aumentar la seguridad operacional durante el manejo del polvo separado.

La propuesta responde a las deficiencias observadas en la descarga de los filtros de mangas, la acumulación de polvo en las tolvas y la necesidad de realizar intervenciones manuales para favorecer su vaciado.

La incorporación de válvulas rotatorias permitiría mantener una descarga más controlada, reducir la exposición del sistema al ambiente y disminuir la necesidad de manipulación directa del material por parte de los trabajadores.

4.1.5. Adecuación del transporte neumático en ductos críticos

La quinta propuesta corresponde al aumento de diámetro en ductos críticos asociados a ventiladores trituradores de 50 HP. Esta medida busca reducir las velocidades de transporte en aquellos tramos donde se identificaron valores superiores al rango recomendado para el transporte neumático de recortes.

El aumento del diámetro permitiría disminuir la velocidad del flujo para un mismo caudal volumétrico, reduciendo la energía de impacto del material transportado, el desgaste localizado y la probabilidad de perforaciones en ductos y accesorios.

Esta propuesta debe evaluarse individualmente para cada tramo, asegurando que la velocidad resultante continúe siendo suficiente para mantener el material en suspensión y evitar la sedimentación de recorte y polvo.

4.2. Evaluación de propuestas

Una vez descritas las alternativas técnicas, se evaluaron en función de su impacto esperado, factibilidad de implementación y contribución a la reducción de emisiones, pérdidas de material e inestabilidad operacional.

Esta evaluación permite establecer un orden de prioridad y seleccionar las acciones que, implementadas conjuntamente, conforman la propuesta integrada de mejora.

4.2.1. Priorización de propuestas

Las alternativas se priorizaron de acuerdo con su impacto esperado sobre el desempeño del sistema, su factibilidad de implementación y su aporte a la reducción de polvo, emisiones fugitivas y pérdidas de material.

Tabla 4.2.1 Priorización de acciones de mejora.

Acción de mejora	Impacto esperado	Factibilidad	Prioridad
Control integrado	Alto	Alta	Alta
Aumento de capacidad de separación y filtración	Alto	Media	Alta
Automatización de dampers	Alto	Alta	Alta
Válvulas rotatorias para descarga de material	Medio-alto	Alta	Alta
Adecuación de ductos críticos	Medio	Media	Media

La priorización muestra que las acciones de mayor relevancia corresponden al control integrado, el aumento de capacidad de separación y filtración, la automatización de dampers y la mejora del sistema de descarga mediante válvulas rotatorias.

Estas medidas abordan directamente las causas principales identificadas durante el diagnóstico y conforman la base de la propuesta integrada de mejora.

La adecuación de los ductos críticos se clasifica con prioridad media, debido a que requiere una evaluación particular para cada tramo. En estos casos, debe verificarse que la reducción de velocidad obtenida mediante el aumento de diámetro no genere sedimentación de material ni afecte la estabilidad del transporte neumático.

4.2.2. Propuesta integrada

A partir de las brechas identificadas y de la priorización realizada, se plantea una propuesta integrada orientada a intervenir las principales causas del bajo desempeño del sistema de manejo de recortes y polvo.

La propuesta considera la implementación conjunta de una estrategia de control integrada, el aumento de la capacidad de separación y filtración, la automatización de los dampers y la mejora del sistema de descarga mediante válvulas rotatorias. Estas medidas fueron seleccionadas debido a su alto impacto esperado y a su relación directa con las principales causas identificadas durante el diagnóstico.

La integración de estas acciones busca abordar simultáneamente el subdimensionamiento de los separadores, el desbalance de caudales, la operación no coordinada de los lazos de control y las deficiencias en la descarga de material. El aumento de la capacidad de separación y filtración permitiría disminuir la carga aerodinámica sobre los equipos existentes, mientras que

la automatización de los dampers y la incorporación de una estrategia de control integrada favorecerían una distribución más estable del flujo entre las distintas ramas del sistema.

Por su parte, la instalación de válvulas rotatorias permitiría mejorar la descarga continua del material, reducir el ingreso de aire falso y disminuir la necesidad de intervenciones manuales. Para la configuración futura se consideran cuatro separadores y dos filtros de mangas asociados al sistema de manejo de recortes y polvo.

De esta forma, la propuesta no se limita a una intervención puntual, sino que configura una solución sistémica orientada a mejorar la estabilidad operacional, reducir las emisiones fugitivas, disminuir las pérdidas de material y aumentar la seguridad del proceso.

La Tabla 4.2.2 resume la inversión estimada para cada componente de la propuesta integrada.

Tabla 4.2.2 Inversión estimada de la propuesta integrada de mejora.

Ítem	Inversión estimada [USD]
Control integrado	30.000
Separador y filtro de mangas	205.000
Dampers automáticos	21.000
Válvulas rotatorias	39.000
Inversión total estimada	295.000

Los valores indicados corresponden a una estimación preliminar y no incluyen los costos asociados a ductería, montaje, transporte, impuestos, aranceles ni ingeniería de detalle. Por lo tanto, deben entenderse como una referencia para apoyar la toma de decisiones de ingeniería y no como un presupuesto definitivo de ejecución.

4.2.3. Evaluación económica preliminar

La evaluación económica preliminar considera una inversión inicial estimada de USD 295.000 y un ahorro operacional anual de USD 106.782/año, asociado a la reducción de las pérdidas diagnosticadas en el sistema de manejo de recortes y polvo.

Para efectos del análisis, este ahorro se atribuye a la implementación de la propuesta integrada y se supone constante durante todo el horizonte de evaluación.

Para la estimación del valor actual neto (VAN) y de la tasa interna de retorno (TIR), se consideró un horizonte de evaluación de 10 años, una tasa de descuento anual de 10 %, flujos anuales de ahorro constantes y ausencia de valor residual al término del periodo de evaluación.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.2.3.

Tabla 4.2.3 Evaluación económica preliminar de la propuesta integrada de mejora.

Indicador económico	Propuesta integrada de mejora
Inversión inicial estimada	USD 295.000
Ahorro operacional anual estimado	USD 106.782/año
Periodo de recuperación de la inversión (PRI)	2,76 años, equivalente a aproximadamente 33 meses
Valor actual neto (VAN)	USD 361.129
Tasa interna de retorno (TIR)	34,3 %

El VAN estimado de USD 361.129 indica que, bajo los supuestos considerados, los ahorros operacionales esperados permitirían recuperar la inversión inicial y generar un beneficio neto actualizado positivo durante el horizonte de evaluación.

Asimismo, la TIR estimada de 34,3 % supera la tasa de descuento de 10 % utilizada en el análisis, lo que indica que la propuesta presenta una rentabilidad preliminar favorable bajo las condiciones consideradas.

En consecuencia, la propuesta integrada presenta una evaluación económica preliminar positiva. No obstante, los resultados deben interpretarse como una estimación conceptual, debido a que el análisis no incorpora costos de ductería, montaje, transporte, aranceles, impuestos, ingeniería de detalle, contingencias ni posibles variaciones del ahorro anual durante el horizonte de evaluación.

Capítulo 5

Conclusión

El diagnóstico realizado permite concluir que el bajo desempeño del sistema de manejo de recortes y polvo de la sala de conversión no responde a una falla aislada, sino a una condición sistémica asociada principalmente a una capacidad insuficiente de separación y a una estrategia de control que no considera la interacción entre los distintos equipos. La operación mediante ajustes manuales, aperturas al ambiente y otras medidas compensatorias evidencia que el sistema dispone de una holgura operacional limitada frente a las cargas actuales de aire y material.

El análisis de los separadores mostró que los tres equipos operan por sobre el flujo específico de referencia adoptado. La condición más exigente corresponde al separador 213C, con un flujo específico de $3,71 \text{ CFM/in}^2$, equivalente a un exceso de 85,5 % respecto del valor referencial. Asimismo, se estimó un déficit de área efectiva de $1,41 \text{ m}^2$ para la Línea 1 y de $1,79 \text{ m}^2$ para la Línea 2. Estos resultados, en conjunto con la presencia de tapones, acumulaciones, fugas y recorte aguas abajo de las mallas, respaldan la existencia de una capacidad de separación insuficiente para los caudales actualmente manejados.

Por otra parte, la regulación mediante lazos locales de presión no garantiza una distribución equilibrada del caudal entre las distintas ramas ni una coordinación adecuada entre separadores, filtros de mangas y ventiladores centrífugos. En consecuencia, las variaciones en la operación de las cortadoras pueden generar desbalances de aspiración, ajustes frecuentes de dampers e inestabilidad en el transporte neumático. Por lo tanto, el problema no puede resolverse únicamente mediante intervenciones de mantención o ajustes locales, sino que requiere una estrategia de control orientada al desempeño global del sistema.

Los demás hallazgos identificados, entre ellos las deficiencias en la descarga de los filtros de mangas, la pérdida de integridad de elementos filtrantes, las velocidades elevadas en ductos, la operación del ventilador de la Línea 1 dentro de un intervalo crítico y la gestión inadecuada del polvo extraído, agravan la condición general del sistema. Si bien estos aspectos no fueron clasificados como las causas principales, contribuyen a la acumulación y dispersión de material, al desgaste de componentes, a la necesidad de limpiezas frecuentes y al aumento de los riesgos operacionales.

A partir de estos resultados, la alternativa técnicamente más adecuada corresponde a una intervención integrada que combine el aumento de la capacidad de separación y filtración, la incorporación de una estrategia de control global, la automatización de dampers y la mejora del sistema de descarga mediante válvulas rotatorias. La implementación conjunta de estas medidas permitiría aumentar la holgura operacional, estabilizar la distribución de caudales,

reducir las emisiones fugitivas y las pérdidas de material, y disminuir la dependencia de acciones manuales para mantener la continuidad del proceso.

Bajo los supuestos considerados, la propuesta integrada requiere una inversión inicial estimada de USD 295.000 y presenta un ahorro operacional anual potencial de USD 106.782. La evaluación económica preliminar entrega un periodo de recuperación de 2,76 años, un valor actual neto de USD 361.129 y una tasa interna de retorno de 34,3 %. Estos resultados indican que la alternativa presenta una rentabilidad preliminar favorable; sin embargo, su evaluación definitiva deberá incorporar los costos de ductería, montaje, transporte, impuestos, aranceles, ingeniería de detalle y contingencias no incluidos en la estimación conceptual.

En consecuencia, se concluye que la mejora del sistema requiere abordar conjuntamente sus brechas de capacidad, control, descarga y seguridad, en lugar de continuar aplicando soluciones aisladas. Como etapa posterior, se recomienda desarrollar la ingeniería de detalle de la propuesta, verificar el comportamiento dinámico de los ventiladores, definir la redistribución de los caudales entre las líneas y validar en terreno el desempeño de la configuración seleccionada antes de su implementación definitiva.

Apéndice A

Anexos

A.1. Cortadoras

A.1.1. Jagenberg

cortadora Jagenberg conforma pilas de cartulina según las especificaciones de pedido, procesando distintos gramajes, anchos y largos mediante cortes longitudinales y transversales. Integra alimentación automática, control de registro y apilado, asegurando tolerancias dimensionales y calidad de borde para expedición al cliente o etapas posteriores. El manejo de recortes se realiza de dos maneras: los ductos de succión conectados al ventilador triturador extraen el recorte del primer corte longitudinal y lo envían triturado al separador de orillo B; en paralelo, el ducto de rechazo descarga el recorte directamente a la enfardadora a través de correas transportadoras en configuración horizontal e inclinada.



Figura A.1.1 Cortadora Jagenberg en la actualidad e.p.

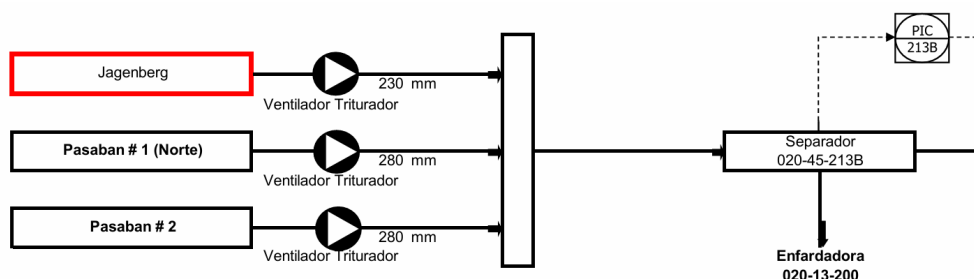


Figura A.1.2 Zoom P&ID Jagenberg e.p.

Tabla A.1.1 Características técnicas del modelo Jagenberg Synchro 350–2800

Ancho máximo	Gramaje máximo	Velocidad máxima
2800 mm	420 g/m ²	350 m/min

La máquina no dispone de un sistema específico de extracción de polvo. Tras el recambio de cuchillas en 2017 —anunciadas como “sin emisión” durante el corte— se retiraron los extractores. Como resultado, la operación actual se realiza sin captación de polvo, lo que disminuye la eficiencia del manejo, acelera el desgaste de componentes y afecta la calidad de presentación de las pilas, al evidenciarse depósitos de polvo en su entorno.



(a) Cuchillas cortadoras sin extracción de polvo en la Jagenberg.



(b) Polvo visible acumulado sobre cables.

Figura A.1.3 Condición operativa de la rebobinadora Jagenberg y evidencias de acumulación de polvo.

El equipo recibe mantención preventiva cada seis meses, centrada principalmente en la limpieza general, revisión de ajustes mecánicos y lubricación de componentes móviles. Estas intervenciones buscan mantener la continuidad operativa y prevenir fallas asociadas al desgaste o acumulación de polvo en zonas críticas.

A.1.2. Cortadora 3 (PASABAN 1)

La cortadora PASABAN 1 KDD 2500 conforma pilas de cartulina según las especificaciones de pedido, procesando distintos gramajes, anchos y largos mediante cortes longitudinales y transversales. Integra alimentación automática, control de registro y apilado, asegurando tolerancias dimensionales y calidad de borde adecuadas para la expedición al cliente o etapas posteriores del proceso. El manejo de recortes se realiza a través de dos sistemas de succión independientes: el ventilador triturador norte, que extrae los recortes del primer corte longitudinal y los envía triturados al separador de orillo B; y el ventilador triturador sur, que cumple la misma función para los recortes del sector opuesto, enviándolos al separador de orillo C mediante su correspondiente línea de transporte neumático.



Figura A.1.4 Cortadora PASABAN 1 en la actualidad e.p.

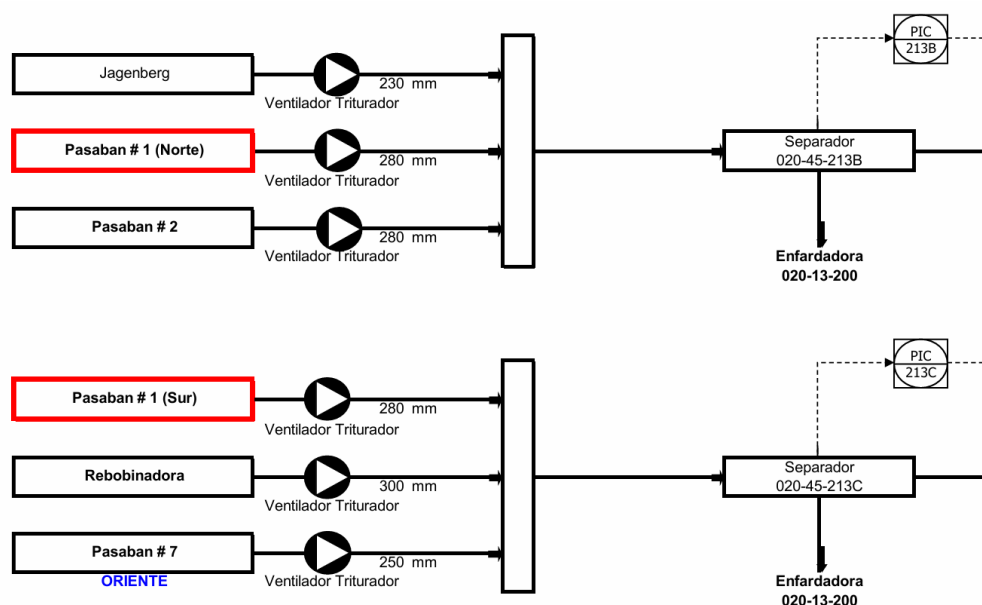


Figura A.1.5 Zoom P&ID PASABAN 1 e.p.

La KDD 2500 cuenta con las siguientes características de fabrica.

Tabla A.1.2 Características técnicas del modelo KDD 2500 de PASABAN

Ancho máximo	Gramaje máximo	Velocidad máxima
2500 mm	420 g/m ²	400 m/min

La PASABAN 1 es una de las pocas cortadoras de pilas que cuentan con ductos exclusivos de extracción de polvo (2 de 8 unidades en operación). En este equipo, el ventilador triturador sur se destina exclusivamente a la aspiración de polvo. Sin embargo, su aprovechamiento es deficiente, ya que no se dispone un punto de captación en cada línea de corte (véase la figura siguiente), lo que reduce la efectividad de la extracción. Según el operador experto, para evitar el levantamiento de la hoja, la cual compromete la continuidad de la producción, se ha limitado la succión, lo que resulta en una captación insuficiente de polvo.



Figura A.1.6 PASABAN 1 ejecutando 4 cortes sin aspiración de polvo e.p.

El equipo recibe mantención preventiva cada seis meses, centrada principalmente en la limpieza general, revisión de ajustes mecánicos y lubricación de componentes móviles. Estas intervenciones buscan mantener la continuidad operativa y prevenir fallas asociadas al desgaste o acumulación de polvo en zonas críticas.

A.1.3. Cortadora 4 - PASABAN 2 - Sheeter 24.

La cortadora PASABAN 2 KDD 2500 conforma pilas de cartulina según las especificaciones de pedido, procesando distintos gramajes, anchos y largos mediante cortes longitudinales y transversales. Integra alimentación automática, control de registro y apilado, asegurando tolerancias dimensionales y calidad de borde adecuadas para la expedición al cliente o etapas posteriores del proceso. El manejo de recortes se realiza a través de dos sistemas de succión independientes: el ventilador triturador, que extrae los recortes del primer corte longitudinal y los envía triturados al separador de orillo A; y las mangas extractoras de polvo, que envía este al filtro de mangas a su lado que aliviana el sistema pero sin embargo no es utilizado constantemente.



Figura A.1.7 Cortadora PASABAN 2 en la actualidad e.p.

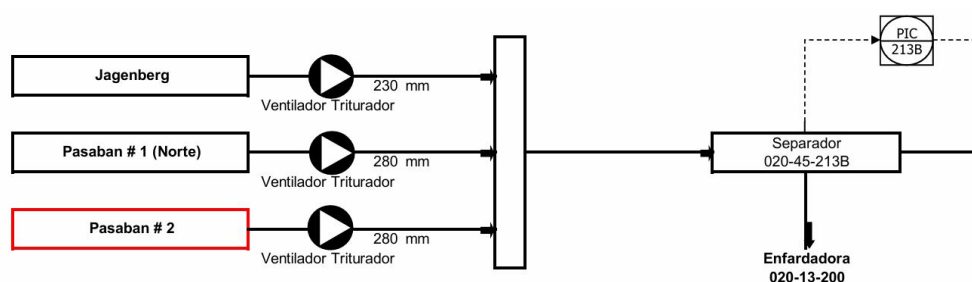


Figura A.1.8 Zoom P&ID PASABAN 1 e.p.

La KDD 2500 cuenta con las siguientes características de fabrica.

Tabla A.1.3 Características técnicas del modelo KDD 2500 de PASABAN

Ancho máximo	Gramaje máximo	Velocidad máxima
2500 mm	420 g/m ²	400 m/min

La PASABAN 2 es una de las pocas cortadoras de pilas que disponen de ductos exclusivos para la extracción de polvo (2 de 8 unidades en operación). Este equipo incorpora un filtro de mangas propio Figura A.1.9b, concebido para capturar y almacenar el polvo y enviar únicamente los orillos a los separadores. Sin embargo, dicho sistema no se encuentra en uso: el operador experto ha señalado que la succión del circuito podría levantar la hoja, y adicionalmente se ha observado limitada familiaridad operativa con el manejo del sistema de mangas, lo que desincentiva su utilización. Como consecuencia, el ventilador triturador se emplea tanto para la aspiración de polvo como para el transporte de los orillos hacia el separador B, situación que introduce ineficiencias y desvía al equipo de la configuración de captación prevista por diseño.



(a) Sin aspiración de polvo.



(b) Filtro de mangas exclusivo.

Figura A.1.9 Condiciones operativas de la PASABAN 2.

El equipo recibe mantención preventiva cada seis meses, centrada principalmente en la limpieza general, revisión de ajustes mecánicos y lubricación de componentes móviles. Estas intervenciones buscan mantener la continuidad operativa y prevenir fallas asociadas al desgaste o acumulación de polvo en zonas críticas.

A.1.4. Cortadora 5 - PASABAN 3 - Sheeter 25.

La cortadora PASABAN 3 KDD 2500 conforma pilas de cartulina según las especificaciones de pedido, procesando distintos gramajes, anchos y largos mediante cortes longitudinales y transversales. Integra alimentación automática, control de registro y apilado, asegurando tolerancias dimensionales y calidad de borde adecuadas para la expedición al cliente o etapas posteriores del proceso. El manejo de recortes se realiza a través de dos sistemas de succión independientes: el ventilador triturador, que extrae los recortes del primer corte longitudinal y los envía triturados al separador de orillo A; y las mangas extractoras de polvo, que actualmente no son utilizadas.



Figura A.1.10 Cortadora PASABAN 3 en la actualidad e.p.

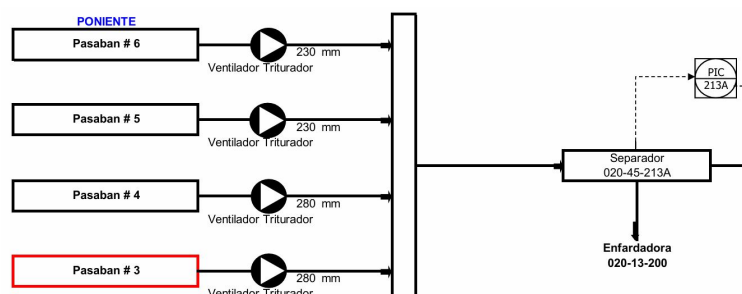


Figura A.1.11 Zoom P&ID PASABAN 3 e.p.

La KDD 2500 cuenta con las siguientes características de fabrica.

Tabla A.1.4 Características técnicas del modelo KDD 2500 de PASABAN

Ancho máximo	Gramaje máximo	Velocidad máxima
2500 mm	420 g/m ²	400 m/min

La PASABAN 3 es una de las cortadoras de pilas de mayor producción diaria. Sin embargo, las mangas extractoras de polvo no se utilizan; solo operan los canales de extracción de orillos. El operador experto recomienda emplear estos canales hasta un máximo de 150 mm de orillo por lado y, para cortes mayores, derivarlos por rechazo a la correa horizontal. Adicionalmente, la succión del circuito de mangas podría levantar la hoja dependiendo de la velocidad de la máquina. Como resultado, el ventilador triturador se usa tanto para la aspiración de polvo como para el transporte de orillos hacia el separador A, lo que introduce ineficiencias. Esto se evidencia en las acumulaciones de polvo observadas en los ductos sobre la máquina, confirmando la baja eficacia de la extracción en la condición actual Figura A.1.12b.



(a) PASABAN 3 ejecutando cuatro cortes sin aspiración de polvo.



(b) Acumulación de polvo en ductos de extracción y sobre la máquina.

Figura A.1.12 Condición operativa de la PASABAN 3 y evidencias de ineficiencia en la extracción de polvo.

El equipo recibe mantención preventiva cada seis meses, centrada principalmente en la limpieza general, revisión de ajustes mecánicos y lubricación de componentes móviles. Estas intervenciones buscan mantener la continuidad operativa y prevenir fallas asociadas al desgaste o acumulación de polvo en zonas críticas.

A.1.5. Cortadora 6 - PASABAN 4 - Sheeter 26.

La cortadora PASABAN 4 (KB-1900) conforma pilas de cartulina según las especificaciones de pedido, procesando distintos gramajes, anchos y largos mediante cortes longitudinales y transversales. El equipo integra alimentación automática, control de registro y apilado, lo que permite mantener tolerancias dimensionales estrechas y una calidad de borde adecuada para la expedición al cliente o para etapas posteriores del proceso.

El manejo de recortes se realiza mediante dos sistemas de succión independientes: un ventilador triturador, que extrae los recortes del primer corte longitudinal y los conduce, ya triturados, al separador de orillo A; y un extractor de polvo de corte, diseñado para transportar neumáticamente el polvo directamente al separador. Este último no se encuentra actualmente en operación, tal como se aprecia en la Figura A.1.15a.



Figura A.1.13 Cortadora PASABAN 4 en la actualidad e.p.

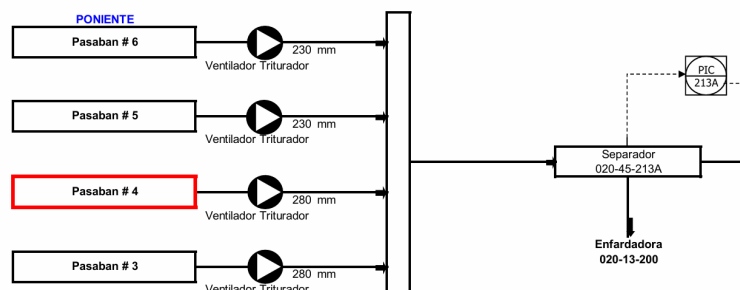


Figura A.1.14 Zoom P&ID PASABAN 4 e.p.

Tabla A.1.5 Características técnicas del modelo KB 1900 de PASABAN

Ancho máximo	Gramaje máximo	Velocidad máxima
1800 mm	500 g/m ²	300 m/min

La Figura A.1.15a muestra la condición operativa actual de la máquina, en la que se realizan dos cortes. El corte del lado izquierdo es extraído mediante el ducto que conduce al ventilador triturador. El corte del lado derecho, en cambio, no dispone del ducto central de la máquina para su conducción directa; por ello, el recorte es guiado manualmente hacia el ducto central ubicado bajo la máquina, donde se observa atascado en la Figura A.1.15b. Esta situación genera ineficiencias en el manejo de recortes y reduce el desempeño global del equipo, alejándolo de su producción objetivo mensual.



(a) Ausencia de ductos flexibles para la extracción de polvo en la PASABAN 4.



(b) Atasco en la PASABAN 4 debido a la falta de ducto extractor.

Figura A.1.15 Condición operativa de la PASABAN 4 y efectos de la ausencia de extracción de polvo.

El equipo recibe mantención preventiva cada seis meses, centrada principalmente en la limpieza general, revisión de ajustes mecánicos y lubricación de componentes móviles. Estas intervenciones buscan mantener la continuidad operativa y prevenir fallas asociadas al desgaste o acumulación de polvo en zonas críticas.

A.1.6. Cortadora 8 - PASABAN 5 - Sheeter 28.

La cortadora PASABAN 5 (KB-1900) conforma pilas de cartulina según las especificaciones de pedido, procesando distintos gramajes, anchos y largos mediante cortes longitudinales y transversales. El equipo integra alimentación automática, control de registro y apilado, lo que permite mantener tolerancias dimensionales estrechas y una calidad de borde adecuada para la expedición al cliente o para etapas posteriores del proceso.

El manejo de recortes se realiza mediante dos sistemas de succión independientes: un ventilador triturador, que extrae los recortes del primer corte longitudinal y los conduce, ya triturados, al separador de orillo A; y un extractor de polvo de corte, diseñado para transportar neumáticamente el polvo directamente al separador. Este último no se encuentra actualmente en operación, tal como se aprecia en la Figura A.1.18a.



Figura A.1.16 Cortadora PASABAN 5 en la actualidad e.p.

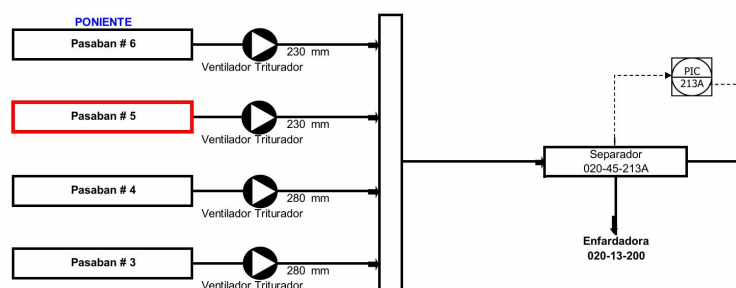


Figura A.1.17 Zoom P&ID PASABAN 5 e.p.

Tabla A.1.6 Características técnicas del modelo KB 1900 de PASABAN

Ancho máximo	Gramaje máximo	Velocidad máxima
1800 mm	500 g/m ²	300 m/min

La Figura A.1.18a muestra la condición operativa actual de la máquina: se ejecutan dos cortes, ambos captados por el ducto que alimenta al ventilador triturador. La operación se realiza sin activación del sistema de extracción de polvo, lo que genera material particulado en suspensión sobre y alrededor de la máquina, tal como se aprecia en la Figura A.1.18b. Esta situación evidencia ineficiencias en el manejo de polvo del proceso de conversión.



(a) PASABAN 5 ejecutando dos cortes sin extracción de polvo.



(b) Polvo visible sobre la máquina cortadora.

Figura A.1.18 Condición operativa de la PASABAN 5 y evidencias de acumulación de polvo.

El equipo recibe mantención preventiva cada seis meses, centrada principalmente en la limpieza general, revisión de ajustes mecánicos y lubricación de componentes móviles. Estas intervenciones buscan mantener la continuidad operativa y prevenir fallas asociadas al desgaste o acumulación de polvo en zonas críticas.

A.1.7. Cortadora 9 - PASABAN 6 - Sheeter 29.

La PASABAN 6 (KB-2100) está dedicada a la formación de pilas de cartulina conforme a los requerimientos de pedido, con capacidad para distintos gramajes, anchos y largos mediante cortes longitudinales y transversales. Su arquitectura incorpora alimentación automática, control de registro y apilado, lo que sostiene tolerancias dimensionales ajustadas y una calidad de borde consistente para expedición o procesos subsiguientes.

En cuanto al manejo de recortes, el equipo dispone de dos circuitos de succión. El ventilador triturador captura los recortes del primer corte longitudinal y los entrega, ya triturados, al separador de orillo A. En paralelo, el extractor de polvo de corte está concebido para transferir neumáticamente el material particulado hacia un separador de polvo dedicado de la propia máquina. Este último permanece fuera de servicio en la condición actual, como se evidencia en la Figura A.1.21.



Figura A.1.19 Cortadora PASABAN 6 en la actualidad e.p.

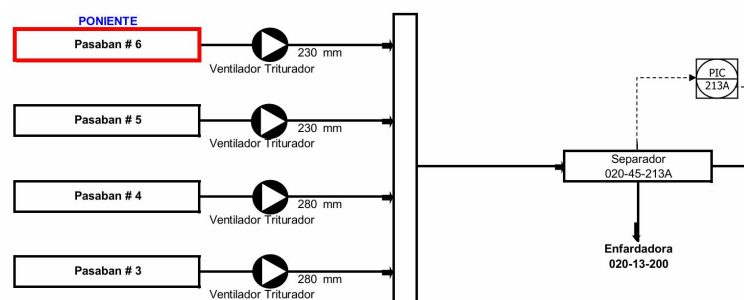


Figura A.1.20 Zoom P&ID PASABAN 6 e.p.

Tabla A.1.7 Características técnicas del modelo KB 2100 de PASABAN

Ancho máximo	Gramaje máximo	Velocidad máxima
2100 mm	500 g/m ²	300 m/min



Figura A.1.21 Filtro de mangas exclusivo de PASABAN 6 e.p.

La Figura A.1.22 muestra la condición operativa actual de la máquina: se ejecutan dos cortes, ambos captados por el ducto que alimenta al ventilador triturador. La operación se realiza sin activar el sistema de extracción de polvo y, adicionalmente, cuando se efectúan cortes centrados, el operador debe conducir manualmente el orillo hacia el punto de captación, como se observa en la Figura A.1.23 . Esta configuración evidencia ineficiencias en el manejo de orillos y limita la eficacia del control de polvo en el proceso de conversión.



Figura A.1.22 PASABAN 6 ejecutando 2 cortes sin extracción de polvo e.p.



Figura A.1.23 Manejo de orillo semi-manual PASABAN 6 e.p.

El equipo recibe mantención preventiva cada seis meses, centrada principalmente en la limpieza general, revisión de ajustes mecánicos y lubricación de componentes móviles. Estas intervenciones buscan mantener la continuidad operativa y prevenir fallas asociadas al desgaste o acumulación de polvo en zonas críticas.

A.1.8. Cortadora 10 - PASABAN 7 - Sheeter 31.

La cortadora PASABAN 7 (KB-2500) conforma pilas de cartulina según las especificaciones de pedido, procesando distintos gramajes, anchos y largos mediante cortes longitudinales y transversales. El equipo integra alimentación automática, control de registro y apilado, lo que permite mantener tolerancias dimensionales estrechas y una calidad de borde adecuada para la expedición al cliente o para etapas posteriores del proceso.

El manejo de recortes se realiza mediante dos sistemas de succión independientes: un ventilador triturador, que extrae los recortes del primer corte longitudinal y los conduce, ya triturados, al separador de orillo C; y un extractor de polvo de corte, diseñado para transportar neumáticamente el polvo en conjunto con los recortes triturados al separador. Este último no se encuentra actualmente en operación, tal como se aprecia en la Figura A.1.26.



Figura A.1.24 Cortadora PASABAN 7 en la actualidad e.p.

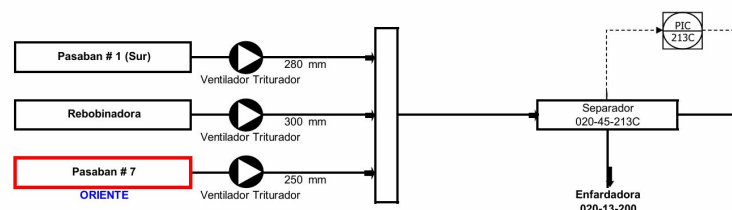


Figura A.1.25 Zoom P&ID PASABAN 7 e.p.

Tabla A.1.8 Características técnicas del modelo KB 2100 de PASABAN

Ancho máximo	Gramaje máximo	Velocidad máxima
2500 mm	600 g/m ²	300 m/min

La Figura A.1.26 corresponde a la máquina en condición de mantención. Al igual que la mayoría de las cortadoras, opera sin emplear la extracción directa de polvo, lo que se traduce en acumulaciones visibles de material particulado generadas por los cortes: sobre la cuchilla A.1.27 y en superficies de la propia máquina A.1.28. Esta situación evidencia deficiencias en el control de polvo, compromete la eficiencia del proceso de conversión y reduce la efectividad de las medidas de higiene operativa.



Figura A.1.26 PASABAN 7 ejecutando 2 cortes sin extracción de polvo e.p.



Figura A.1.27 Polvo en cuchilla cortadora PASABAN 7 e.p.



Figura A.1.28 Polvo en rodillos de la PASABAN7 e.p.

El equipo recibe mantención preventiva cada seis meses, centrada principalmente en la limpieza general, revisión de ajustes mecánicos y lubricación de componentes móviles. Estas intervenciones buscan mantener la continuidad operativa y prevenir fallas asociadas al desgaste o acumulación de polvo en zonas críticas.

A.1.9. Rebobinadora - Sheeter 13.

La rebobinadora Jagenberg es una de las máquinas más antiguas y, a la vez, más críticas de la sala de conversión. Su condición operativa actual se muestra en la Figura A.1.29. Es la única encargada de atender pedidos en formato bobina; el resto de los equipos fabrica exclusivamente pilas, por lo que su disponibilidad e integración al flujo de producción resultan determinantes para el cumplimiento de la demanda.

El equipo dispone de un ventilador triturador sin especificaciones técnicas verificables, condición que limita el trabajo a velocidades de operación óptimas. En consecuencia, se encuentra en proceso la selección y dimensionamiento de un nuevo ventilador adecuado a los requerimientos de caudal y pérdida de carga del sistema. Adicionalmente, la rebobinadora integra un sistema de extracción de polvo localizado en la cuchilla de corte Figura A.1.33 , que conduce el material particulado generado por el corte longitudinal hacia su propio filtro de mangas, presentado en la Figura A.1.32. Esta configuración busca minimizar la acumulación de polvo en la zona de corte y mejorar las condiciones de higiene y confiabilidad del proceso.



Figura A.1.29 Rebobinadora en la actualidad e.p.

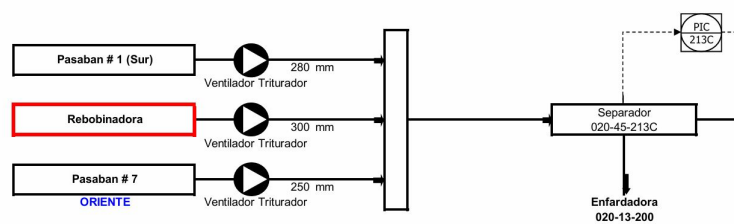


Figura A.1.30 Zoom P&ID Rebobinadora e.p.



Figura A.1.31 Corte longitudinal en Rebobinadora e.p.



Figura A.1.32 Mantenimiento a filtro de mangas rebobinadora e.p.



Figura A.1.33 Extracción de polvo en cuchilla Rebobinadora e.p.

El equipo recibe mantención preventiva cada seis meses, centrada principalmente en la limpieza general, revisión de ajustes mecánicos y lubricación de componentes móviles. Estas intervenciones buscan mantener la continuidad operativa y prevenir fallas asociadas al desgaste o acumulación de polvo en zonas críticas.

A.2. Cálculo de flujo específico y déficit de área en separadores

En este anexo se presenta el procedimiento utilizado para evaluar el subdimensionamiento de los separadores de orillo. El análisis considera el levantamiento de información técnica de los equipos, las mediciones de velocidad realizadas con tubo de Pitot, el cálculo de caudales volumétricos, la estimación del flujo específico de aire sobre el área efectiva de malla y la determinación del déficit de área requerido para cada separador.

Las imágenes asociadas al procedimiento de medición en terreno se presentan en la Figura 2.4.1 del cuerpo principal del informe.

A.2.1. Características de los separadores instalados

Tabla A.2.1 Características principales de los separadores instalados consideradas para el cálculo [e.p.].

Separador	Marca	Ancho [m]	Caudal máx. teórico [m ³ /h]	Caudal actual [m ³ /h]
213A	Santa Lucia	1,8	25.000	23.941
213B	Santa Lucia	1,5	21.000	19.505
213C	Deltoid	1,5	21.000	20.490

Los caudales actuales corresponden a la suma de los aportes de las cortadoras que descargan hacia cada separador, considerando las mediciones realizadas en terreno y los registros históricos proporcionados por el área de ingeniería cuando no fue posible realizar mediciones directas.

A.2.2. Instrumento utilizado

Las mediciones de velocidad se realizaron utilizando un anemómetro con tubo de Pitot acoplado a un manómetro diferencial, modelo Extech Pitot Tube Anemometer + Differential Manometer. Las principales características del instrumento se presentan en la Tabla A.2.2.

Tabla A.2.2 Especificaciones del anemómetro con tubo de Pitot utilizado en las mediciones [e.p.].

Parámetro	Escala	Resolución	Precisión
Velocidad del aire [m/s]	1 a 80,0	0,01	
Velocidad del aire [ft/min]	200 a 15733	1	
Velocidad del aire [km/h]	3,5 a 288,0	0,1	±1 % escala total
Velocidad del aire [mph]	2,25 a 178,66	0,01	+ 5 dígitos de la lectura
Velocidad del aire [nudos]	2,0 a 154,6	0,1	

A.2.3. Procedimiento de medición con tubo de Pitot

Las mediciones de velocidad se realizaron en los ductos de alimentación de los separadores, utilizando perfiles transversales de velocidad. Para asegurar condiciones representativas, los puntos de medición se ubicaron en tramos rectos de ducto, procurando minimizar perturbaciones del flujo asociadas a codos, derivaciones u otros accesorios.

En particular, se verificó una relación geométrica $L/D = 5,75$, consistente con el rango recomendado por la norma ISO 3966 para mediciones en ductos, lo que permite reducir la incertidumbre asociada a perfiles de velocidad no desarrollados.

En cada ducto se habilitó un punto de medición mediante una perforación controlada. El tubo de Pitot se introdujo a lo largo del diámetro del ducto, realizando mediciones a intervalos de 1 pulgada. En cada punto se registraron dos mediciones independientes, las cuales fueron promediadas para reducir la variabilidad asociada a fluctuaciones del flujo.

A.2.4. Cálculo del caudal volumétrico

A partir de la presión dinámica medida con el tubo de Pitot, se estimó la velocidad local del aire mediante:

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (\text{A.1})$$

donde v corresponde a la velocidad local del aire, ΔP a la presión dinámica medida y ρ a la densidad del aire.

Posteriormente, se estimó la velocidad promedio del ducto a partir de las mediciones realizadas en el perfil transversal. El caudal volumétrico se calculó mediante:

$$\dot{V} = v_{\text{prom}} \cdot A \quad (\text{A.2})$$

donde $\dot{V}$ corresponde al caudal volumétrico de aire, v_{prom} a la velocidad promedio medida en el ducto y A al área de la sección transversal.

A.2.5. Cálculo del flujo específico sobre la malla

El flujo específico de aire sobre el área efectiva de malla se calculó mediante:

$$\phi = \frac{\dot{V}}{A_{\text{ef}}} \quad (\text{A.3})$$

donde ϕ corresponde al flujo específico de aire, $\dot{V}$ al caudal volumétrico que ingresa al separador y A_{ef} al área efectiva de malla disponible para la separación.

Para representar la superficie realmente disponible para el proceso de separación, se consideró un área efectiva equivalente al 90 % del área geométrica de malla:

$$A_{\text{ef}} = 0,90 \cdot A_{\text{geom}} \quad (\text{A.4})$$

A.2.6. Criterio de referencia adoptado

Como criterio de referencia se adoptó un flujo específico máximo de $2,0 \text{ CFM/in}^2$, utilizado como valor base de comparación para evaluar la holgura operacional de los separadores. Este valor permite estimar si el área efectiva disponible resulta suficiente frente al caudal actualmente tratado por cada equipo.

El uso de este criterio permite comparar la condición operacional actual de los separadores con una condición de diseño referencial, evaluando si la superficie de malla disponible es suficiente para el caudal de aire manejado por cada equipo.

A.2.7. Cálculo del área requerida

El área efectiva requerida para operar dentro del criterio de referencia se calculó mediante:

$$A_{\text{req}} = \frac{\dot{V}}{\phi_{\text{ref}}} \quad (\text{A.5})$$

donde A_{req} corresponde al área efectiva requerida, $\dot{V}$ al caudal volumétrico actual del separador y ϕ_{ref} al flujo específico de referencia.

El déficit de área efectiva se obtuvo como la diferencia entre el área requerida y el área efectiva actualmente disponible:

$$\Delta A = A_{\text{req}} - A_{\text{ef}} \quad (\text{A.6})$$

donde ΔA representa el déficit de área efectiva de malla requerido para operar dentro del criterio de referencia adoptado.

A.2.8. Resultados del cálculo

Tabla A.2.3 Flujo específico de aire sobre área efectiva de malla en separadores instalados [e.p.].

Separador	Dimensiones [m]	Área geom. [m ²]	Área efec. [m ²]	Caudal actual [m ³ /h]	Flujo esp. [CFM/in ²]
213A	$2,3 \times 1,8$	4,14	3,72	23.941	2,44
213B	$2,3 \times 1,5$	3,45	3,10	19.505	2,39
213C	$1,5 \times 1,55$	2,33	2,10	20.490	3,71

Los resultados muestran que los separadores instalados operan con un flujo específico superior al criterio de referencia adoptado. Esta condición indica que el área efectiva de malla disponible no es suficiente para los caudales actualmente manejados, lo que permite cuantificar el déficit de área requerido para mejorar la condición de separación.

Tabla A.2.4 Déficit de área efectiva de malla en separadores respecto al flujo específico de referencia [e.p.].

Separador	ϕ_{act} [CFM/in ²]	Exceso sobre 2,0 [%]	Déficit de área [m ²]
213A	2,44	22,0	0,81
213B	2,39	19,5	0,60
213C	3,71	85,5	1,79

A partir de estos resultados, se estima que la Línea 1, compuesta por los separadores 213A y 213B, requiere un incremento total de área efectiva de aproximadamente 1,41 m². En tanto, la Línea 2, correspondiente al separador 213C, requiere aproximadamente 1,79 m² adicionales. Estos valores sustentan el diagnóstico de subdimensionamiento presentado en la Sección 3.2.1.

A.3. Estudio de tendencia

Con el objetivo de caracterizar el ancho de orillo durante el año 2025, se solicitó el informe de producción y se analizaron los registros de las distintas cortadoras de la sala de conversión. Para ello, se filtraron los datos asociados a rechazos o condiciones no representativas del sistema de manejo de recortes.

El análisis muestra que el ancho de orillo tiende a operar por sobre el valor de referencia inicial de 1,5 cm, considerado en el diseño del sistema. Esta condición implica una mayor carga de recorte hacia los separadores y, por tanto, una mayor exigencia para el sistema de transporte y separación.

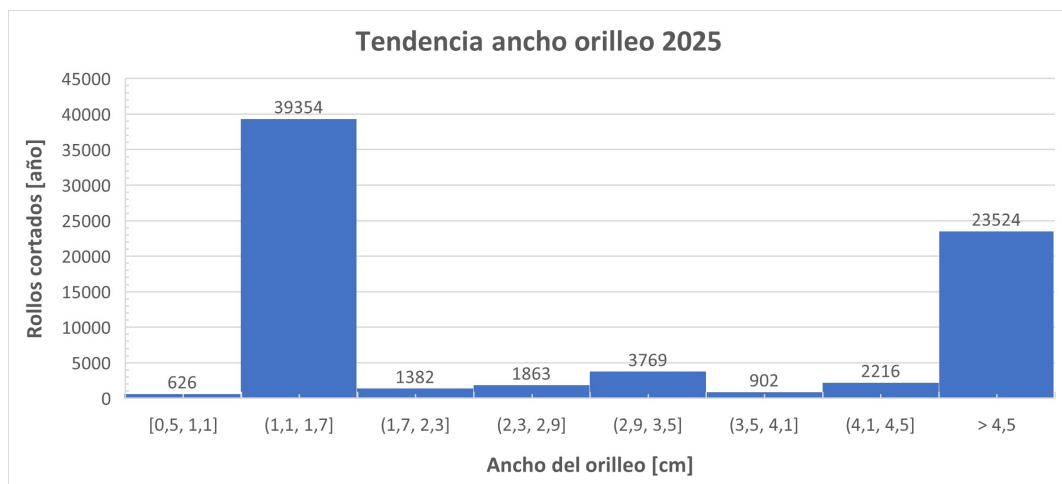


Figura A.3.1 Tendencia del ancho de orillo durante el año 2025 [e.p.].

A.4. Memoria de cálculo para la Propuesta 2

En este anexo se presenta la memoria de cálculo utilizada para definir los requerimientos mínimos considerados en la Propuesta 2, correspondiente al aumento de capacidad de separación y filtración del sistema de manejo de recortes. El dimensionamiento considera dos criterios principales: el área adicional de separación requerida para suplir el déficit identificado en los separadores actuales y el área mínima de filtración requerida para el filtro de mangas asociado.

A.4.1. Área adicional de separación requerida

El área adicional de separación requerida se estimó a partir del déficit de área efectiva identificado en los separadores existentes. Dicho déficit fue calculado previamente en el Anexo A.2, considerando el flujo específico de aire sobre el área efectiva de malla y un valor de referencia de 2,0 CFM/in².

Los déficits obtenidos para cada separador se resumen en la Tabla A.4.1.

Tabla A.4.1 Déficit de área efectiva considerado para el dimensionamiento de la Propuesta 2.

Separador	Déficit de área efectiva [m ²]
213A	0,81
213B	0,60
213C	1,79
Total	3,20

A partir de estos resultados, se estima que el sistema requiere una capacidad adicional de separación del orden de 3,20 m² de área efectiva de malla para suplir el déficit identificado en los separadores actuales. Este valor se utiliza como referencia mínima para evaluar la capacidad del nuevo separador propuesto.

A.4.2. Área mínima de filtración

El área mínima de filtración del filtro de mangas se estimó mediante el criterio de razón aire–tela, también denominado *air-to-cloth ratio*. Este parámetro relaciona el caudal volumétrico de aire que ingresa al filtro con el área total disponible de medio filtrante, y constituye un criterio habitual de diseño preliminar para filtros de mangas [16].

El área de filtración requerida se calculó mediante:

$$A_{\text{filtro}} = \frac{\dot{V}}{v_{\text{filtracion}}} \quad (\text{A.7})$$

donde A_{filtro} corresponde al área mínima de filtración, $\dot{V}$ al caudal volumétrico de aire a tratar y $v_{\text{filtracion}}$ a la velocidad de filtración admisible.

Para el presente análisis se adoptó una velocidad de filtración de referencia de 9 ft/min, equivalente aproximadamente a:

$$9 \text{ ft/min} \approx 2,74 \text{ m/min} \quad (\text{A.8})$$

Considerando un caudal de diseño del orden de 39,100 m³/h, equivalente a 651,7 m³/min, el área mínima requerida se estima como:

$$A_{\text{filtro}} = \frac{651,7 \text{ m}^3/\text{min}}{2,74 \text{ m/min}} \quad (\text{A.9})$$

$$A_{\text{filtro}} \approx 238 \text{ m}^2 \quad (\text{A.10})$$

En consecuencia, el filtro de mangas propuesto debe contar con un área de filtración igual o superior a 238 m². La alternativa considerada, correspondiente a un filtro tipo Jetline V con aproximadamente 300 m² de área filtrante, entrega una holgura operacional respecto del requerimiento mínimo estimado.

A.4.3. Resumen de requerimientos mínimos

La Tabla A.4.2 resume los criterios utilizados para definir los requerimientos mínimos de la Propuesta 2.

Tabla A.4.2 Requerimientos mínimos considerados para la Propuesta 2.

Componente	Criterio utilizado	Requerimiento mínimo
Separador de recortes	Déficit total de área efectiva de malla	3,20 m ²
Filtro de mangas	Razón aire–tela	238 m ²

A partir de estos resultados, la Propuesta 2 considera como referencia técnica un aumento de capacidad de separación del orden de 3,20 m² de área efectiva de malla y un filtro de mangas con al menos 238 m² de área filtrante. La alternativa considerada cumple con estos requerimientos, al incorporar un sistema de separación adicional y un filtro de mangas de aproximadamente 300 m², lo que permite aumentar la holgura operacional del sistema y reducir la condición de sobrecarga identificada en el diagnóstico.

A.5. Resumen de cotización Puhl

La empresa Puhl (Gallatin, Tennessee, USA) presentó una estimación presupuestaria para el suministro de un sistema de separación de recortes tipo *back-to-back* como se presenta en la Figura A.5.1 . El alcance considera el suministro del separador, tolva, soportes estructurales, sección de chute hacia enfardadora y documentación de ingeniería. El suministro se realiza cargado en planta del proveedor, no incluyendo transporte, instalación ni impuestos.

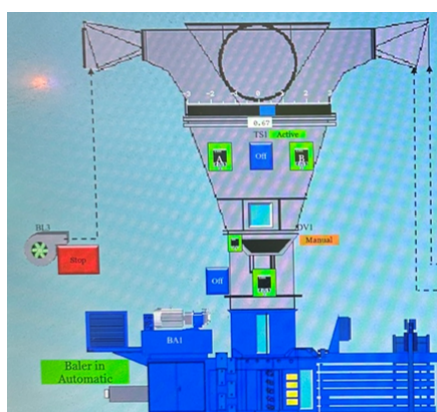


Figura A.5.1 Referencia de la oferta

Tabla A.5.1 Resumen de equipamiento incluido en la oferta.

Elemento	Descripción
Separador de recortes	Configuración <i>back-to-back</i> de 120" de ancho por unidad, con ancho total de malla de 240". Incluye ventanas de inspección, <i>airfoil</i> ajustable y mallas reemplazables.
Tolva (Hopper)	Tolva de descarga asociada al separador.
Estructura de soporte	Soportes estructurales para montaje del sistema.
Chute hacia enfardadora	Hasta 5 ft de chute con ventanas para transición hacia la enfardadora.
Dampers de entrada	Dampers antirretorno con contrapeso (no certificados).
Ingeniería	Planos de aprobación y desarrollo de ingeniería.

Tabla A.5.2 Requisitos de instalación del sistema.

Parámetro	Valor
Altura libre requerida	26 ft (aprox. 7,9 m) sobre nivel de piso
Acceso a entradas del separador	No incluido; requiere plataforma o elevador del cliente
Lugar de entrega	Planta Puhl, 240 Airport Road, Gallatin, TN, USA

Tabla A.5.3 Estimación presupuestaria.

Concepto	Precio (USD)
Sistema separador de recortes (estimación base)	135.526
Sistema opcional de detección de tapones mediante <i>photo eyes</i>	10.500

El sistema opcional de detección de tapones incluye dos sensores fotoeléctricos, alarma con torre luminosa, gabinete eléctrico y supresor de estática. El sistema requiere un suministro de aire comprimido de aproximadamente 8 SCFM a 90 PSI, limpio y seco.

Los precios indicados corresponden a una estimación presupuestaria y no incluyen transporte, instalación, impuestos, aranceles ni costos asociados a la importación.

Bibliografía

- [1] D. Mills, “Pneumatic conveying design guide.” <https://pneumaticconveying.org/wp-content/uploads/2016/01/Pneumatic%20Conveying%20Design%20Guide.pdf>, 2004. Butterworth-Heinemann, Elsevier. Technical reference on pneumatic conveying systems.
- [2] Kongskilde Industries A/S, “Static trim handling systems: Rvs and sts separators.” <https://www.iceva.se/media/1752/123001464-exp-gb-trim-handling-0318.pdf>, 2018. Technical datasheet for static trim separators used in pneumatic conveying systems.
- [3] REIMAQ y Cía. Ltda., “Ventilador proyecto recortes cmpc cartulinas. plano n° rm 10.037-vc-f-a.01.” Plano técnico. Lista de materiales, Modelo 12M-575/3, Rev. 1, Cliente: CMPC Cartulinas.
- [4] K. Boharb, A. Allouhi, R. Saidur, T. Kousksou, A. Jamil, and A. Derouich, “Energy conservation potential of an energy audit within the pulp and paper industry,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 148, pp. 102–113, 2017.
- [5] FAO, “Environmental auditing in the pulp and paper industry,” 1996.
- [6] W. Marx, “Energy audit methodology for belt conveyors,” master’s thesis, University of Pretoria, 2005.
- [7] A. Abe, S. Thapa, and R. Fernando, “Pneumatic conveying technology: Recent advances and future outlook,” in *Proceedings of the Engineering Conference*, 2023.
- [8] Kongskilde Industries A/S, “Pneumatic conveying and trim removal systems for paper and converting applications.” <https://kongskilde-industries.com/industrial/application/cut-trim-extraction-of-cut-paper-cardboard-and-plastic-trim/>. Technical product documentation and application guidelines.
- [9] K. Industries, “Trim handling systems: Pneumatic conveying solutions for trim, dust and waste.” https://kongskilde-industries.com/industrial/wp-content/uploads/sites/3/123001489-KNA-GB-Trim-handling-0324_web.pdf, 2024. Technical brochure.
- [10] G.F. Puhl Company, “Trim handling and pneumatic conveying systems for paper and converting industries.” <https://www.gfpuhl.com/>. Technical literature and application guidance for pneumatic trim systems.
- [11] A. Inc., “Airtrim products and services: Trim and dust removal systems.” <https://airtrim.com/wp-content/uploads/2022/09/AirTrim-2022-Products-and-Services.pdf>, 2022. Product catalog.

- [12] Department of Defense, “Ufc 3-410-04: Industrial ventilation.” https://www.wbdg.org/FFC/DOD/UFC/ufc_3_410_04_2017.pdf, 2017. Unified Facilities Criteria. Design guidance for industrial ventilation systems, including balancing procedures.
- [13] S. E. Guffey, “A goal method and a target method for balancing exhaust ventilation duct systems with dampers.” https://stacks.cdc.gov/view/cdc/208232/cdc_208232_DS1.pdf, 2007. NIOSH technical report on balancing exhaust ventilation duct systems.
- [14] Titus, “Air balancing application guide.” https://www.titus-hvac.com/file/11072/AirBalancing_AG_2016.pdf, 2016. Application guide for air balancing in duct systems.
- [15] Air Infiltration and Ventilation Centre, “Balancing air flow in ventilating duct systems.” https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_13493.pdf. Technical document on airflow balancing in duct branches.
- [16] A. Bhatia, “Design and sizing of baghouse dust collectors.” <https://www.cedengineering.com/>. Course No: D06-005, Credit: 6 PDH.
- [17] Baghouse.com, “Controlling secondary dust sources to increase dust collection system efficiency.” <https://baghouse.com/es/controlling-secondary-dust-sources-to-increase-dust-collection-system-efficiency/>, 2018.
- [18] M. E. F. Group, “Baghouse filter troubleshooting.” <https://www.micronicsinc.com/es/filtration-news/baghouse-filter-troubleshooting/>, 2023.
- [19] I. IVI, “Common issues in baghouse maintenance.” <https://www.ivinc.com/common-issues-in-baghouse-maintenance-blog/>, 2020.
- [20] F. I. Services, “Expert tips for troubleshooting baghouse filter blockages.” <https://www.fabcoind.com/expert-tips-for-troubleshooting-baghouse-filter-blockages/>, 2025.
- [21] Donaldson Company, Inc., “Adjusting dust collector fan dampers to save time and money.” <https://www.donaldson.com/en-us/industrial-dust-fume-mist/technical-articles/dust-collector-fan-dampers-save-time-money/>. Technical article on the use of dampers for airflow control in dust collection systems.
- [22] Donaldson, “Steps to avoid bridging in dust collector hoppers.” <https://www.donaldson.com/en-be/industrial-dust-fume-mist/technical-articles/reducing-bridging-dust-collector-hoppers/>, 2024. Technical article on hopper bridging in dust collectors, with emphasis on fibrous wood dust.
- [23] Control Concepts, Inc., “7 most common bulk materials prone to bridging and ratholing.” <https://controlconceptsusa.com/common-bridging-and-ratholing/>, 2024. Technical article identifying sawdust and wood chips as materials prone to bridging and ratholing.
- [24] Cartulinas CMPC S.A., “Diagrama del sistema de manejo de recortes y polvo.” Documento interno, Planta Maule. Gerencia Técnica, Departamento de Ingeniería.
- [25] W. Xu and H. Grosshans, “Experimental study of humidity influence on triboelectric charging of particle-laden duct flows,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 81, p. 104970, 2023.

- [26] Y. Shen, D. Tao, L. Zhang, H. Shao, X. Bai, and X. Yu, “An experimental study of triboelectrostatic particle charging behavior and its associated fundamentals,” *Powder Technology*, p. 118880, 2023.
- [27] T. Allen, *Particle Size Measurement*. London: Chapman and Hall, 5th ed., 1997.
- [28] I. B. Haugland, J. Chladek, and M. Halstensen, “Monitoring of erosion in a pneumatic conveying system by non-intrusive acoustic sensors – a feasibility study,” in *Proceedings of the 60th SIMS Conference on Simulation and Modelling (SIMS 2019)*, vol. 170 of *Linköping Electronic Conference Proceedings*, pp. 78–84, 2020.