



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y
MATERIALES

EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DE LA UTILIZACIÓN DE CARBONATO DE CALCIO DE CELULOSA EN LA INDUSTRIA DE LA REMANUFACTURA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

AMAL CONSTANZA PICHARA SAUD

PROFESOR GUÍA:
Francisco Gracia Caroca

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Alvaro Olivera Nappa
Javier Antileo Soto

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
Celulosa Arauco y Constitución S.A

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA
POR: AMAL CONSTANZA PICHARA SAUD
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: FRANCISCO GRACIA CAROCA

EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DE LA UTILIZACIÓN DE CARBONATO DE CALCIO DE CELULOSA EN LA INDUSTRIA DE LA REMANUFACTURA

Se espera que para el año 2050, se generen 3400 millones de toneladas anuales de residuos sólidos, razón por la cual se busca modificar el modelo económico lineal actual, minimizando o erradicando los residuos sólidos generados, buscando innovar en la reutilización de estos. En Chile, la industria forestal no queda exenta de la generación de residuos, por lo que la empresa Arauco se percató que el lodo de cal (carbonato de calcio húmedo), un residuo de la producción de celulosa puede ser utilizado como materia prima en la producción de molduras, por lo que se busca evaluar técnica y económicamente la posibilidad de reutilizarlo.

Con este fin se realiza una búsqueda bibliográfica, primero para entender el proceso de la generación del residuo y la producción de molduras. Luego, se hace una revisión de los usos actuales del lodo de cal que se han estudiado y los usos del carbonato de calcio en la industria forestal. Por último, se profundiza en los procesos de la empresa, la cantidad producida de lodo y los requerimientos de carbonato, en conjunto a las pruebas preliminares realizadas.

Se realizan ensayos de laboratorio, con el fin de obtener el óptimo de mezcla en la formulación de la pasta de trefila, utilizada en las molduras. Para ello se reemplaza el carbonato de calcio por lodo de cal, se varía las formulaciones y se mezcla con carbonato de proveedores. A la pasta producida, se le realizan pruebas de viscosidad, pH, granulometría, entre otras para comprobar su calidad. Debido a los inconvenientes presentados, se requiere realizar modificaciones en el lodo, este se seca y tamiza. No es posible encontrar el óptimo debido a una incompatibilidad entre el lodo y el adhesivo, que provoca una reacción ácido base, sin embargo, al tamizar el pH baja, obteniendo factibilidad técnica. Aún así, se requiere modificar el adhesivo, agregando un humectante, por excesiva saturación de la mezcla.

Con los resultados obtenidos, se diseña un proceso teórico para solucionar los inconvenientes de granulometría y humedad. El lodo de cal ingresa a un secador rotatorio y luego, a un tamizador de malla 120.

Se realiza una evaluación económica comparativa entre el caso base y la alternativa de proceso teórico de producción, en esta se restan los costos de cada alternativa. Se obtiene un valor de VAN positivo y una TIR mayor a la tasa de descuento, por lo que el proyecto es rentable.

Se concluye, que existe factibilidad técnica y económica para utilizar el lodo de cal, generando modificaciones tanto al adhesivo como al lodo de cal.

*A mi hija y mis hermanos,
son mi motivación y mi luz.*

Un abrazo

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mis padres, por haberme permitido estudiar y llevarme a donde me encuentro hoy. Gracias por la paciencia que tuvieron, todas las herramientas que me entregaron para lograr esta meta, y enseñarme que la perseverancia, es el secreto de todo triunfo. A mis hermanos, por ser constante motivación: a mi hermano Tarek por acompañarme y alegrarme la vida; y a mi hermano Sharif, que a pesar de que no te encuentres con nosotros, siempre tuviste una forma de hacerte presente en mi camino.

A mi hija, que me acompañó en todo este proceso de titulación, gracias por ser la mejor y permitirme realizar mi memoria sin mayores dificultades, eres luz y motivación, me alegra mucho que hayas sido parte de este proceso.

A mi compañero de vida, Martín. Estuviste presente a lo largo de todos los años de estudio, quedandote hasta la madrugada solo acompañando o preparando un café. Me subías el ánimo cada vez que fallaba y me hacías recapacitar cada vez que sentía que no era suficiente, entre muchas cosas más. Fuiste parte fundamental de mi vida universitaria y estoy muy agradecida de tenerte en mi vida.

A mis compañeros que vivieron conmigo esta experiencia, regalando alegrías y enseñándome a trabajar en equipo. Destaco a Juan y Dani que fueron los mejores compañeros de especialidad y mis grandes amigos. También, a mi equipo ideal de taller, por tener todo el power femenino y mostrarme de lo que somos capaces, infinitamente agradecida Dani, Flo y Gabi.

A mi amiga del alma, Maca. Por cuidar de mi pequeño bebe, motivarme a hacer deporte y por ser la mejor compañía y tía en este proceso.

Por último, me gustaría agradecer a los que forman parte de este trabajo, mi profesor guía Francisco Gracia por ayudarme cada vez que el panorama se nublaba. También agradecer a la empresa Arauco, por su increíble disposición para realizar el trabajo, en particular a Romina, Javier, Jennifer, Bruno, Carlos y Francisco, por todos los consejos, la ayuda, las conversaciones y todas las enseñanzas que dejan para mi futuro laboral.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
1.2. Alcances	3
2. Marco Teórico	4
2.1. Marco Conceptual	4
2.1.1. Pulpa de celulosa	4
2.1.2. Proceso de producción químico	5
2.1.3. Ciclo del licor	6
2.1.4. Caustificación	7
2.1.5. Horno de cal y residuos	7
2.1.6. Producción de moldura	9
2.1.7. Pasta de Trefila	9
2.2. Estado del arte	10
2.2.1. Utilización del lodo de cal	10
2.2.2. Utilización del carbonato en la industria	11
2.3. Celulosa Arauco	12
2.3.1. Proceso productivo celulosa	12
2.3.2. Proceso productivo molduras	14
2.3.3. Producción y requerimientos	15
2.3.4. Pruebas preliminares	15
3. Ensayos de laboratorio	16
3.1. Metodología ensayos de laboratorio	16
3.2. Resultados y discusiones ensayos de laboratorio	18
4. Modelo teórico de modificación lodo de cal	33
4.1. Metodología modelo teórico	33
4.2. Resultados y discusiones modelo teórico	33
5. Evaluación económica	36
5.1. Metodología evaluación económica	36
5.2. Resultados y discusiones evaluación económica	38
6. Conclusiones	42

Bibliografía	43
Anexos	48
A. Balance de masas	48
B. Planilla evaluación económica	51

Índice de Tablas

2.1.	Composición química lodo de cal [11], [12],[13].	8
2.2.	Características fisicoquímicas de la pasta de trefila [21].	10
2.3.	Composición química lodo de cal Arauco y carbonato de calcio Trucco.	14
3.1.	Resultados obtenidos en prueba n°1	19
3.2.	Resultados obtenidos en la segunda prueba.	21
3.3.	Formulación prototipo n°3	22
3.4.	Formulación prototipo n°4	23
3.5.	Resultados obtenidos de las pruebas 3 y 4.	23
3.6.	Formulación prototipo n°5.	24
3.7.	Resultados pruebas Harting.	30
3.8.	Resultados obtenidos para el lodo de cal en el tamiz	32
5.1.	Resumen parámetros económicos relevantes	39
5.2.	Porcentajes y valores del cálculo del CAPEX.	40

Índice de Ilustraciones

2.1.	Diagrama de proceso Kraft de producción de celulosa [8].	6
2.2.	Esquema proceso de producción de celulosa plantas Arauco y Nueva Aldea [5].	13
2.3.	Diagrama de bloques del proceso, elaboración propia.	14
3.1.	Equipo grindómetro [37].	17
3.2.	Comparación lodo de cal Arauco y carbonato Trucco.	18
3.3.	Comparación grindómetro pasta prototipo (izquierda) y original (derecha). . .	20
3.4.	Comparación tiempo abierto pasta prototipo (izquierda) y original (derecha).	20
3.5.	Comparación lodo de cal de Arauco seco y carbonato Trucco.	21
3.6.	Pruebas realizadas pasta prototipo n°2.	22
3.7.	Pruebas realizadas pasta prototipo n°6.	25
3.8.	Distribución de tamaño de partículas carbonato Trucco, lodo de cal y polvo PPT.	26
3.9.	Prueba de grindometría prototipo n°7	27
3.10.	Prueba de grindometría prototipo 50 % Carbonato Trucco y 50 % lodo de cal.	28
3.11.	Tiempo abierto prototipo 50 % Carbonato Trucco y 50 % lodo de cal.	29
3.12.	Prueba grindometría prototipo 70 % Carbonato Trucco y 30 % lodo de cal . .	29
3.13.	Ensayos realizados por Harting con lodo tamizado	31
4.1.	Diagrama de bloques proceso teórico diseñado.	34
4.2.	Diagrama de los equipos a instalar.	34
A.1.	Diagrama de bloques secador.	48
A.2.	Diagrama de bloques de clasificación de tamaños.	49
B.1.	Flujo de caja	51
B.2.	Flujo de caja	52
B.3.	Resultados VAN y TIR.	52

Capítulo 1

Introducción

La Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) señala que: “La gestión de residuos sólidos es un problema local con consecuencias globales” [1], la cual influye en la destrucción y contaminación de ecosistemas. En el año 2016, se generaron 2000 millones de toneladas de residuos sólidos en el mundo y se espera que para el 2050 este valor aumente a 3400 millones anuales [1]. Bajo este contexto, es que nace la economía circular, que busca modificar el modelo lineal actual, minimizando o erradicando los residuos generados en la producción, buscando innovar en la reutilización de estos, tanto dentro como fuera del proceso.

En Chile, la industria forestal está fuertemente presente, siendo catalogado como el décimo país a nivel mundial en la producción de celulosa [2]. La fabricación de este producto, el cual se sitúa principalmente macrozona sur, no queda exento de la generación de residuos y dado que se producen aproximadamente 5200 millones de toneladas de pulpa de celulosa al año [3].

El 94% de la pulpa, es producida mediante un proceso químico, conocido también como Kraft [3]. En este se adiciona hidróxido de sodio mezclado con sulfuro de sodio entre otros elementos para disolver la lignina, el componente principal de la corteza de los árboles. Este aditivo, se denomina comúnmente licor blanco y se recupera para su reutilización.

El ciclo del licor, involucra una serie de etapas con el fin de que la producción sea lo más rentable posible y que se produzcan la menor cantidad de residuos. En este, el licor blanco ingresa a la etapa de cocción, donde se transforma en licor negro débil. Luego se evapora para aumentar su concentración y así poder quemarlo en la caldera de recuperación, generando el licor verde que mediante la etapa de caustificación, vuelve a ser licor blanco. En esta última etapa se centra la memoria.

En la caustificación reacciona el licor verde con hidróxido de calcio para generar licor blanco y carbonato de calcio que precipita. El carbonato es considerado un residuo inorgánico no peligroso, que es reutilizado en el horno de cal, para producir la calcinación y devolverlo al sistema. Sin embargo, una fracción de este desecho debe ser purgada, esta purga, recibe el nombre de lodo de cal (carbonato de calcio húmedo). Por otro lado, en el horno de cal está ubicado un precipitador electroestático, el cual se utiliza para captar partículas sólidas presentes en el aire, y su componente principal es el carbonato de calcio. Este recibe el nombre de polvo PPT. Estos dos residuos son con los cuales se trabaja en esta memoria de título.

En particular, se trabaja con los residuos provenientes de la planta de celulosa Nueva Aldea y la planta de celulosa Arauco, de la empresa Arauco y Constitución S.A, la cual produce 1.027.000 toneladas de celulosa kraft blanqueada de pino y eucalipto al año [4]. Por otro lado, se producen más de 8.000 toneladas anuales de lodo de cal, el cual se envía a una empresa externa para su valorización, como fertilizante. Es por esta razón, que en la búsqueda de posibles soluciones, compatibles con la economía circular, la empresa se percató que el carbonato de calcio se usa como materia prima, en la producción de molduras de la Planta Trupan-Cholguan, del área de remanufactura de Arauco. Por lo tanto, se ve como una oportunidad para utilizar estos residuos en vez de encargar a terceros su valorización.

En otras palabras, se busca realizar una evaluación de la utilización del lodo de cal y el polvo PPT, como ingredientes en la pasta de trefila. Esta es utilizada en las molduras producidas por el área de paneles, en Trupan-Cholguan. Junto con lo anterior, se desea buscar la composición óptima de mezcla, utilizando esta nueva materia prima. Además, teorizar sobre el proceso que se le debería realizar a los residuos, para poder reemplazar al carbonato de calcio fresco y evaluar económicamente todos los posibles escenarios, incluyendo el actual.

1.1. Objetivos

Para intentar solucionar la problemática descrita, se plantean los siguientes objetivos.

1.1.1. Objetivo General

El objetivo general que se busca cumplir, es realizar una evaluación técnica económica del uso de carbonato de calcio, proveniente de las purgas del horno de cal, como materia prima en la industria de la remanufactura de paneles.

1.1.2. Objetivos específicos

Para conseguir el objetivo general, se tienen los siguientes objetivos específicos.

- Determinar la cantidad y la calidad de carbonato de calcio requerido en la pasta de trefila, producidas en Trupan-Cholguan.
- Realizar ensayos de laboratorio para determinar las concentraciones ideales que definen el óptimo de mezcla.
- Determinar la cantidad de carbonato de calcio a utilizar a nivel industrial.
- Proponer un diseño que permita adecuar el carbonato de calcio que sale de la industria de celulosa para ser utilizado como materia prima.
- Realizar una evaluación económica de las distintas alternativas.

1.2. Alcances

La memoria tiene objetivos prácticos de realizar ensayos de laboratorio, y de calcular las cantidades necesarias para producir las pastas, actividades que se llevan a cabo. Sin embargo, el diseño para adecuar el carbonato solo se produce de manera teórica y no será probado. Por otro lado, la puesta en marcha y la aplicación industrial no será parte de este trabajo.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Marco Conceptual

En la siguiente sección, se explican todos los conceptos básicos necesarios para poder comprender los temas tocados en la memoria.

2.1.1. Pulpa de celulosa

La celulosa es un biopolímero, presente en las plantas, que está formado a partir de unidades monoméricas de glucosa. Tiene como función ser sostén, dándole resistencia y flexibilidad a las hojas, sumado a la naturaleza fibrosa de la madera [5].

La pulpa de celulosa, es un material producido a partir de la madera, el cual es generado mediante un proceso industrial con el fin de producir papel. A esta pulpa se le conoce comúnmente como celulosa.

La madera está compuesta en un 50 % por celulosa, un 25 % de hemicelulosa y un 25 % de lignina [5]. El objetivo del proceso productivo es recuperar la celulosa e idealmente eliminar la lignina.

La lignina, es un polímero presente en la corteza de los árboles. Es la encargada de otorgar rigidez al tronco y la tonalidad café que este posee. Por estas razones se desea eliminarla, para obtener un producto más maleable y blanco.

Según la especie de árbol que es utilizado para la producción, se tienen distintos tipos de celulosa. Las coníferas, como el pino radiata, generan celulosa de fibra larga, mientras que, las latifoliadas, como el eucalipto, generan celulosa de fibra corta [6]. A su vez, se pueden diferenciar por el nivel de procedimiento que se le realiza: (1) la celulosa blanqueada, denominada así porque queda blanca una vez realizado el proceso, y (2) celulosa no blanqueada, la cual mantiene un tono café dado que, no se realizan más procedimientos [6].

2.1.2. Proceso de producción químico

Para producir celulosa, se tienen diferentes métodos, los cuales se clasifican en químicos y mecánicos. Estos difieren en los procedimientos que se realizan y en las características que tiene el producto final.

En el proceso mecánico se obtiene un producto más robusto, con menor grado de purificación, que es utilizado, por ejemplo, para realizar diarios. Mientras que, el proceso químico mediante aditivos, logra un mayor nivel de purificación y su producto final posee características que permiten una amplia gama de funciones, que incluye desde papel higiénico a hojas de impresión. Actualmente, un 94 % de la celulosa es producida mediante el método químico [3].

Uno de los procesos químicos que se realiza, es el proceso Kraft. Este es uno de los más utilizados en la industria, debido a que posee una mayor eficiencia, en comparación a los otros métodos, producto de la recuperación de los químicos utilizados y la generación de energía [5].

El proceso Kraft, se divide en dos grandes áreas. La primera es el área de fibra donde se procesa la madera para generar celulosa. La segunda es el área de recuperación y energía, donde como su nombre lo describe, se recuperan los químicos utilizados y se genera energía [7].

El área de fibra comienza con la preparación de la madera, donde trozos de madera de dimensiones estandarizadas, denominados rollizos, pasan por un proceso de descortezado y son transformados en astillas (chips). Estas se acopian en pilas y son clasificadas por tamaño. Si cumplen el tamaño necesario, continúan el proceso, si son muy grandes estas se reprocesan, mientras que, las pequeñas se envían a la caldera de biomasa [7].

Una vez descortezada la madera, y transformada en astillas, se introducen al digestor, en donde se adiciona licor blanco, un compuesto de hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S). La madera entra en un proceso de cocción, mediante este licor, separándose la lignina de la celulosa. El digestor es un cilindro vertical con distintas secciones, por lo que a medida que las astillas bajan, se va formando la pulpa [5], [7].

La pulpa de celulosa formada, continúa su proceso de purificación, al ser lavada y clasificada, para reducir aún más la lignina y retirar los restos del licor negro. A este producto se le conoce como celulosa cruda o sin blanquear, dado que aún posee una tonalidad café. La celulosa cruda formada es comercializada para la producción de papeles y cartones [7].

El resto de la pulpa de celulosa, sigue con el proceso de deslignificación, el cual consiste en aplicar altas dosis de oxígeno a la pasta de celulosa con el objeto de producir la oxidación de la lignina [5]. Este proceso se realiza con el fin de reducir el consumo de químicos en la etapa de blanqueo, además de permitir que la lignina removida puede ser reprocesada en la recuperación posterior.

La última etapa es la de blanqueado. En la cual se adicionan productos químicos en forma secuencial, como el dióxido de cloro, oxígeno y peróxido de hidrógeno para blanquear la pasta. El producto obtenido, que es pasta de celulosa blanqueada, debe ser secada hasta llegar

a un porcentaje de 87 % a 92 % seco, luego se corta y embala en fardos para su exportación [7].

2.1.3. Ciclo del licor

Como se mencionó anteriormente, en este proceso se logran reutilizar los componentes químicos presentes, sumado a la producción de energía. La forma en la cual se recuperan los componentes es mediante el ciclo del licor, el cual se puede observar en la Figura 2.1 .

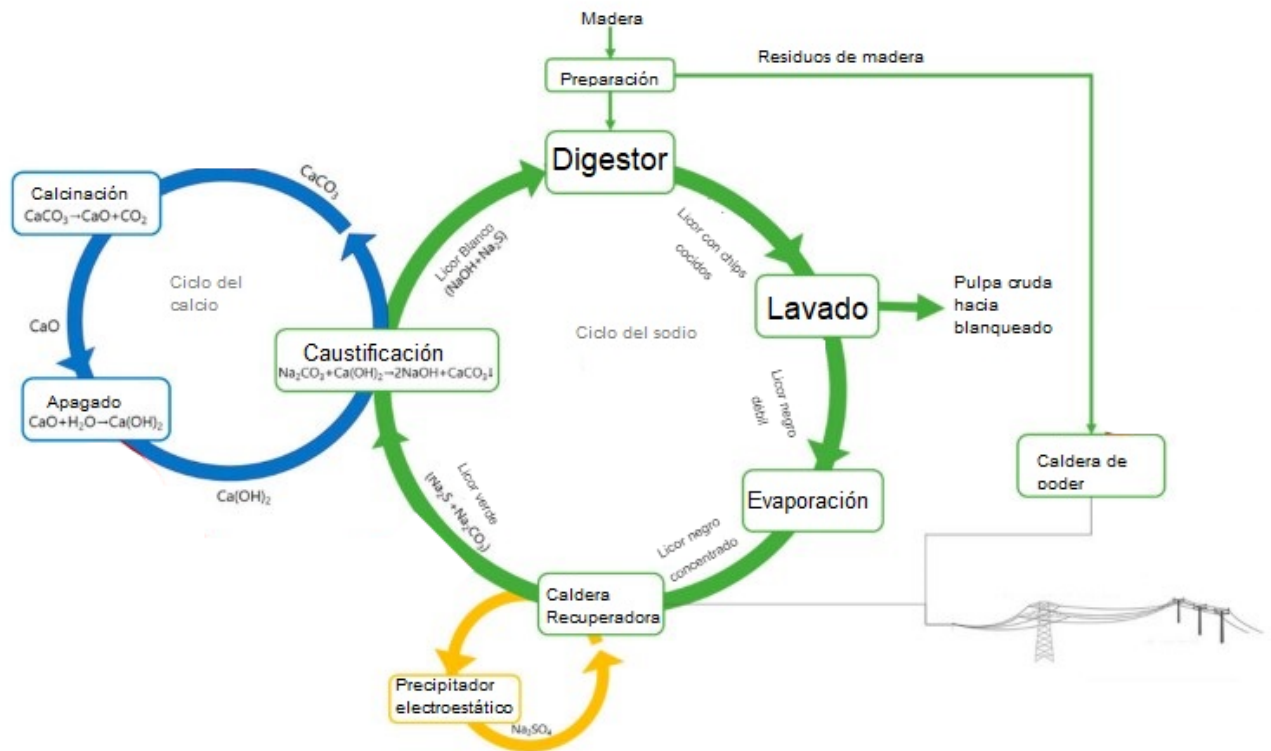


Figura 2.1: Diagrama de proceso Kraft de producción de celulosa [8].

Al final de la cocción, no solo se genera la pasta de celulosa, sino que también se produce un residuo denominado licor negro, el cual está compuesto en su mayoría por licor blanco degradado mezclado con lignina. Este licor negro es recuperado para ser procesado, iniciando el ciclo del licor.

El licor negro, que proviene del digestor, sigue un proceso de concentración mediante evaporadores de múltiple efecto, donde se busca aumentar el contenido de sólidos de este. Una vez que ha sido concentrado y depurado, el licor entra a la caldera recuperadora donde la parte orgánica es quemada, liberando su energía en el proceso de combustión, la que se aprovecha produciendo vapor. El vapor generado es conducido hacia un turbo generador, a través del cual se genera energía eléctrica para los procesos de la planta industrial o para su venta al Sistema Interconectado Central. Luego el vapor a más baja presión y temperatura es usado en la calefacción de diferentes procesos dentro de la planta [7].

La parte inorgánica es recuperada y esta recibe el nombre de licor verde, el cual se com-

pone principalmente de sulfuro de sodio (NaS) y carbonato de sodio (Na₂CO₃). Este licor verde se transforma nuevamente en licor blanco mediante el proceso de caustificación.

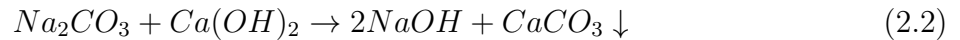
2.1.4. Caustificación

En la etapa de caustificación, se busca transformar el licor verde en blanco para poder reingresarlo al sistema de producción de celulosa. El licor verde que proviene de la caldera, es filtrado y clarificado para eliminar las impurezas [5].

El licor verde limpio, se introduce en el apagador, donde se ingresa cal (CaO) al sistema, la cual se transforma en hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) mediante la ecuación 2.1 de apagado, donde el agua del licor verde con la cal reaccionan [5].



La reacción de caustificación comienza en el apagador y continúa en los caustificadores. En esta el hidróxido de calcio reacciona con el carbonato de sodio del licor verde, formando hidróxido de sodio, uno de los componentes del licor blanco, y carbonato de calcio, el cual precipita, como muestra la ecuación 2.2.

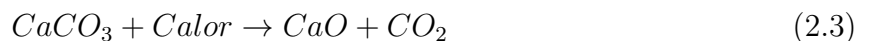


Una vez terminada la reacción, el hidróxido de sodio se reingresa al sistema, para producir pulpa de celulosa, mientras que el carbonato de calcio ingresa al horno de cal.

2.1.5. Horno de cal y residuos

El carbonato de calcio formado en la etapa de caustificación, se encuentra en forma de lodos y recibe comúnmente el nombre de lodo de cal.

El lodo de cal es separado del licor blanco, se lava y se introduce al horno de cal, con el fin de producir la reacción de calcinación (Ecuación 2.3), generando cal viva que se reingresa al proceso de caustificación.



Una cantidad del lodo de cal debe ser purgado y se reemplaza por carbonato de calcio fresco, produciendo una cantidad variable del residuo. Esta depende de las diferencias que se generan entre la producción de licor blanco y la capacidad de producción del horno de cal [8]. Aproximadamente, se producen 0,5 [ton] de lodo de cal por 1 [ton] de pulpa de celulosa [10].

En la salida de los gases del horno de cal, se encuentra un precipitador electrostático, el cual cumple la función de controlar las emisiones gaseosas producidas en la reacción de calcinación [9]. Este equipo además de captar partículas de dióxido de azufre, logra concentrar partículas de carbonato de calcio, las cuales al ser recolectadas, reciben el nombre de polvo PPT. Este es similar al lodo de cal, pero con un estado físico diferente. Tienen una caracterización química similar, pero difieren en granulometría y humedad.

En cuanto a las propiedades del lodo de cal, en la Tabla 2.1 se muestra la caracterización química del compuesto, basada en 3 muestras provenientes de China, Suecia y Brasil. La caracterización, se encuentra expresada en óxidos y se utilizó la técnica de fluorescencia de rayos X (XRF) para determinarla. Sumado a lo anterior, en la tabla se encuentra la pérdida de ignición (L.O.I), parámetro mediante el cual se estima la cantidad de materia orgánica presente en el lodo.

Tabla 2.1: Composición química lodo de cal [11], [12],[13].

Composición química lodo de cal			
	[11] m/m(%)	[12] m/m(%)	[13] m/m(%)
CaO	44,4-52,4	57,12	54,1
MgO	0,6-3,4	0,91	0,86
SiO ₂	3,4-11	3,58	0,34
Al ₂ O ₃	0,5-1,4	0,07	0,06
Fe ₂ O ₃	0,2-1,2	0,2	0,15
Na ₂ O	-	2,32	0,09
K ₂ O	-	0,26	0,06
P ₂ O ₅	-	0,03	0,97
MnO	-	-	0,09
SO ₃	-	0,4	-
L.O.I	31,5-43,5	-	-

Se puede observar, que como se espera, la muestra es rica en calcio, pero se tienen trazas de otros elementos como magnesio, silicio, aluminio, hierro, sodio, potasio y fósforo. Realizando una comparación con la ficha técnica del carbonato de calcio obtenido por proveedor, la cantidad de calcio presente es similar, al igual que las cantidades trazas de elementos [14]. En cuanto a la pérdida de ignición esta presenta un valor alto y se debe a la descarbonatación de la calcita en lugar de materia orgánica [10].

La fase mineral que posee el lodo de cal es principalmente calcita, en un 90% [10]. Esta característica es compartida con el carbonato de calcio adquirido mediante proveedor [14].

El contenido de humedad presente en el lodo varía según la decisión de cada empresa, dado que una alta humedad ayuda a reducir las emisiones de sulfuro en la posterior calcinación del producto [15]. Esto debido a que el sulfuro puede reaccionar a las altas temperaturas presentes en el horno de cal. Por otro lado, una alta humedad influye en el costo de transporte

del lodo, por lo que se suele buscar un porcentaje equilibrado [8]. El rango encontrado en bibliografía va desde un 28 % a un 60 % [11],[16],[17],[18].

2.1.6. Producción de moldura

Los residuos antes mencionados, se quieren utilizar en la industria de la remanufactura, en particular, en la producción de molduras. Las molduras son listones de madera que se utilizan de forma ornamental o de unión de dos puntos, generalmente en la parte superior de las paredes.

El proceso de producción de molduras se inicia con alguna de sus dos posibles materias primas, los tableros MDF o madera sólida proveniente de aserraderos. Estos son cortados mediante sierras, formando listones cortos. Dependiendo de los requerimientos, el listón se puede derivar a la línea “finger-joint”, donde se realizan cortes de ensambles para unir dos tablas, o se dirige al proceso de moldeado.

En el proceso de moldeado, se le da forma a la tabla según un molde pre-diseñado. Posteriormente, el listón entra a la etapa de interés el trefilado. En esta etapa, se aplica la pasta de trefila. Luego, la pasta debe secarse, por lo que a continuación hay una etapa de secado, seguida de un proceso de pulido mediante una lija. En caso de ser necesario, el trefilado y secado se pueden volver a repetir [19],[20].

2.1.7. Pasta de Trefila

En el proceso de trefilado se utiliza la pasta de trefila, con el fin de reparar grietas o nudos presentes en la madera. Esta es un compuesto de textura pastosa, blanca, cuyo principal ingrediente es el carbonato de calcio y es la que entrega el color blanco a las molduras.

Las características fisicoquímicas de la pasta de trefila se muestran en la tabla 2.2, estos son algunos de los parámetros que se medirán, para ver la efectividad del uso de lodo de cal como reemplazante total o parcial del carbonato de calcio. De las características mostradas, las más importantes para su aplicación industrial son: (1) la viscosidad, (2) la tixotropía, que es la capacidad de mantener la viscosidad en el tiempo, (3) los sólidos presentes y (4) el tiempo abierto, que es el tiempo que se demora la pasta en secarse a temperatura ambiente. Sumado a esto, es importante que en la prueba de grindometría, la molienda sea igual o mayor a 5 [H].

Tabla 2.2: Características fisicoquímicas de la pasta de trefila [21].

Parámetro	Valor	Unidad
Viscosidad	30000-35000	cps
Tixotropía	<2	
Sólidos	73-77	%
pH	7-9	-
Tiempo abierto	>2:30	min
Densidad	1,7-1,83	g/cc ³
Grado de molienda	>4	NS
Tamaño de Partícula	<50	μm

2.2. Estado del arte

En la siguiente sección, se muestra la bibliografía encontrada con respecto a investigaciones del mismo ámbito. Primero se exponen los distintos usos que se han estudiado para el lodo de cal, para luego indagar en los usos del carbonato de calcio en la industria forestal.

2.2.1. Utilización del lodo de cal

Debido a la gran cantidad de lodo de cal que se produce, y la necesidad de reducir la generación de residuos generados a nivel mundial, se ha estudiado la posibilidad de utilizarlo en distintas industrias.

A nivel de laboratorio se probó la utilización del lodo de cal como un ingrediente en la fabricación de cemento. Se probaron distintas formulaciones, produciéndolo efectivamente, manteniendo sus propiedades térmicas y disminuyendo en las mecánicas pero, aún cumpliendo con las normas establecidas [22]. También, se realizó la producción de cerámicas anortita, con un 36 % en peso de lodo de cal, resultando en una cerámica liviana y con una gran absorción de agua, por lo que se concluye que podría utilizarse [11]. Dentro del mismo ámbito, se probó su uso como ingrediente de ladrillos, los cuales cumplen con la normativa de sus propiedades físicas y mecánicas, si son secados en hornos, con hasta un 20 % de lodo de cal añadido [23].

Por otro lado, se comprobó el uso del lodo de cal como una de las capas de relleno intermedio, en un relleno sanitario municipal. Se concluye, que tiene un fuerte potencial para este uso pero, se debe tener en consideración la presencia de sodio, que podría afectar la actividad bacteriana [12].

También se ha estudiado la posibilidad de que este residuo aporte en el ámbito medioambiental. Se utiliza el lodo de cal para sintetizar nanopartículas de hidróxido de calcio, y se investiga la capacidad de estas de remover fósforo de una solución acuosa, realizándolo exitosamente [24]. En este mismo ámbito, se estudia su uso como sorbente de dióxido de azufre

(SO₂), en una caldera de lecho fluidizado, contrastando con el derivado de caliza que es normalmente utilizado en este proceso [25].

En la industria agrícola, Roger-Tardif, Whalen y Rivest [26] utilizan el lodo como reemplazante de la cal en bosques de arboles de maple que poseen acidificación de suelos, logrando contrarrestar este efecto sin aumentar las emisiones de dióxido de carbono (GHG por sus siglas en inglés) al corto plazo.

Dentro de otros posibles usos, que se han estudiado del lodo está la creación de un catalizador. Este se construye mezclando el residuo con fluoruro de potasio, y se utiliza en la reacción de transesterificación, logrando alcanzar una mayor conversión [27]. Por último, se mostró la capacidad del residuo para adsorber lignocelulosas disueltas en el licor de prehidólisis (PHL) de la producción de pulpa de celulosa [28].

2.2.2. Utilización del carbonato en la industria

El carbonato de calcio no solo se puede utilizar en la pasta de trepala en la industria forestal, sino que hay un número de posibles usos que se han investigado y que se describen a continuación.

Mohsen [29] utiliza carbonato de calcio como relleno en una emulsión de polivinilo de acetato, el cual es un adhesivo de maderas. El relleno logra reducir la penetración en el sustrato poroso, resultando en una mayor resistencia de la madera, debido a que disminuye la absorción del adhesivo. También se utiliza para cambiar la reología de la emulsión y bajar los costos del uso de adhesivo [29]. Se recomienda utilizar el carbonato de calcio en composiciones de 10-20 % en el adhesivo, debido a que mayores composiciones comienzan a afectar la resistencia de este. Otros autores, concluyen que aumentando la temperatura del relleno a 200°C se puede agregar hasta en una proporción de 40 % [30].

Otro factor importante en la mantención de las propiedades de la madera, es la granulometría. Se concluyó que partículas finas de calcita, con distribución de tamaño de partícula estrecha y una baja área de superficie activa, mejoran la fuerza y elasticidad del adhesivo [31].

En la producción de tableros MDF, también se puede utilizar el carbonato como relleno. Sin embargo, esta vez se introduce a una resina formada por urea formaldehído, sulfato de amonio y parafina. Se producen tableros MDF de roble y pino, con 1,5 % y 3 % de calcita agregada en la resina. Los tableros producidos presentan mejoras en sus características físicas, sumado a esto, los paneles que contienen 3 % de calcita presentan menores emisiones de formaldehído [32].

Por otro lado, en los últimos años, se ha estudiado la capacidad que tendrían las partículas de carbonato de calcio para limitar la degradación térmica producida por el fuego. Esto dado que el carbonato forma cristales en las paredes de la madera, generando una barrera física que impide, en cierto grado, la acción de la llama [33],[34]. Esta propiedad, se ha estudiado a nivel internacional, pero en Chile se está realizando a través de un fondo Conicyt y está en proceso de patente, por lo que no está publicado el trabajo [35].

2.3. Celulosa Arauco

Celulosa Arauco y Constitución S.A. es una sociedad anónima formada en septiembre de 1979, tras la fusión de Industrias de Celulosa Arauco S.A. y Celulosa Constitución S.A. Ambas empresas fueron creadas por la corporación de fomento de la producción (CORFO), con el fin de desarrollar los recursos forestales del país, mejorar la calidad del suelo en terrenos agrícolas degradados y fomentar el empleo en zonas aisladas [7]. Actualmente, están presentes en toda la cadena de valor forestal, por lo que cuentan con el área forestal, celulosa, maderas, paneles y Bioenergía [36].

El caso de estudio específico de esta memoria es en la empresa Arauco, por lo que se describen sus procesos productivos de la celulosa y de las molduras: un producto del área de paneles, en conjunto a la producción y requerimiento de los residuos y el carbonato, respectivamente.

2.3.1. Proceso productivo celulosa

En Chile, Arauco cuenta con 5 plantas productoras de celulosa, las cuales son Arauco, Constitución, Licancel, Nueva Aldea y Valdivia. En este caso, el lodo de cal a utilizar proviene de las plantas Arauco y Nueva Aldea, donde se produce celulosa blanqueada de eucalipto y pino radiata.

El proceso llevado a cabo en las plantas de Nueva Aldea y Arauco, es el proceso químico explicado en la sección 2.1.2. Un esquema de la producción, se puede observar en la Figura 2.2. Como se menciona en el marco conceptual, las plantas de Arauco cuentan con el área de fibra, encargada de producir celulosa y el área de recuperación, donde se recupera el licor blanco y se produce energía. Además de lo mencionado, Arauco y Nueva Aldea poseen una planta de tratamiento de efluentes, con el fin de tratar los residuos líquidos para que no se produzca un impacto adverso al verterlos al río [7].

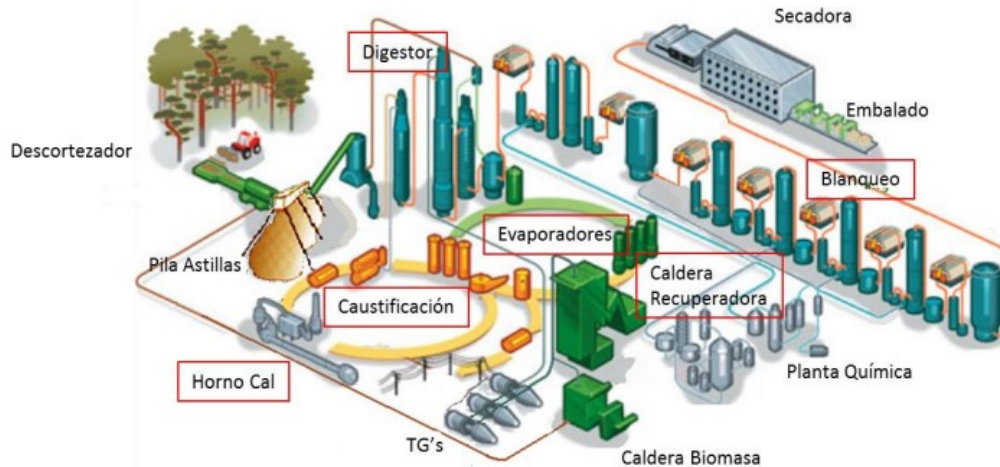


Figura 2.2: Esquema proceso de producción de celulosa plantas Arauco y Nueva Aldea [5].

Se debe destacar que el polvo PPT, solo se produce en planta Nueva Aldea. Esto debido a que, en planta Arauco no se cuenta con un precipitador electrostático en el área del horno de cal, por lo que el residuo solo se encuentra en forma de lodos.

Se realizó una caracterización química del lodo de cal proveniente de Arauco, la cual se describe en la Tabla 2.3. En él se puede ver que lo producido en Arauco es similar a las características mostradas en bibliografía (Tabla 2.1) . Se realizó una comparación del lodo de cal con el adquirido mediante proveedores, donde se pudo notar que la cantidad de carbonato de calcio presente en ambas muestras es similar, difiriendo en un 0,28%. Esto considerando que en el documento de la Minera Trucco, el carbonato de calcio se expresa previo al proceso de calcinación, por lo que el contenido de CO_2 presente corresponde a carbonato de calcio y fue expresado así en la tabla. La principal diferencia entre estos componentes, se encuentra en la cantidad de silicio y aluminio, siendo menor en el lodo. Por último, el contenido de humedad del lodo es similar a lo encontrado en bibliografía, alrededor de un 23% siendo bastante mayor a lo que presenta el polvo de carbonato, de aproximadamente 0,6%.

Tabla 2.3: Composición química lodo de cal Arauco y carbonato de calcio Trucco.

Composición química carbonatos		
	Trucco [14]	Arauco
CaCO ₃	95 %	95,28 %
Fe ₂ O ₃	0,7 %	0,146 %
SiO ₂	4,7 %	0,333 %
MgO	0,3 %	0,923 %
Al ₂ O ₃	1,1 %	0,058 %
P	0,1 %	0,144 %
S	-	0,047 %
MnO	0,1 %	0,066 %
K ₂ O	0,7 %	-
TiO ₂	0,1 %	-

2.3.2. Proceso productivo molduras

En la planta Trupan, del área de paneles de Arauco, se realiza el proceso de producción de molduras. En este, el tablero MDF entra al proceso de dimensionado, donde se corta y dimensiona, mediante sierras que generan listones cortos. Luego, comienzan con el proceso de moldurado, donde se les da la forma o diseño específico que se requiere para el producto. Posteriormente, se produce el proceso de treflado el cual comienza con la caja de trefila 1, donde se aplica la pasta para inmediatamente entrar al horno de secado. Después la moldura se enfría en una mesa de enfriamiento y se pule, mediante un sistema de lijas, para terminar con un nuevo proceso de treflado y secado. En la Figura 2.3, se puede observar el diagrama de bloques del proceso.

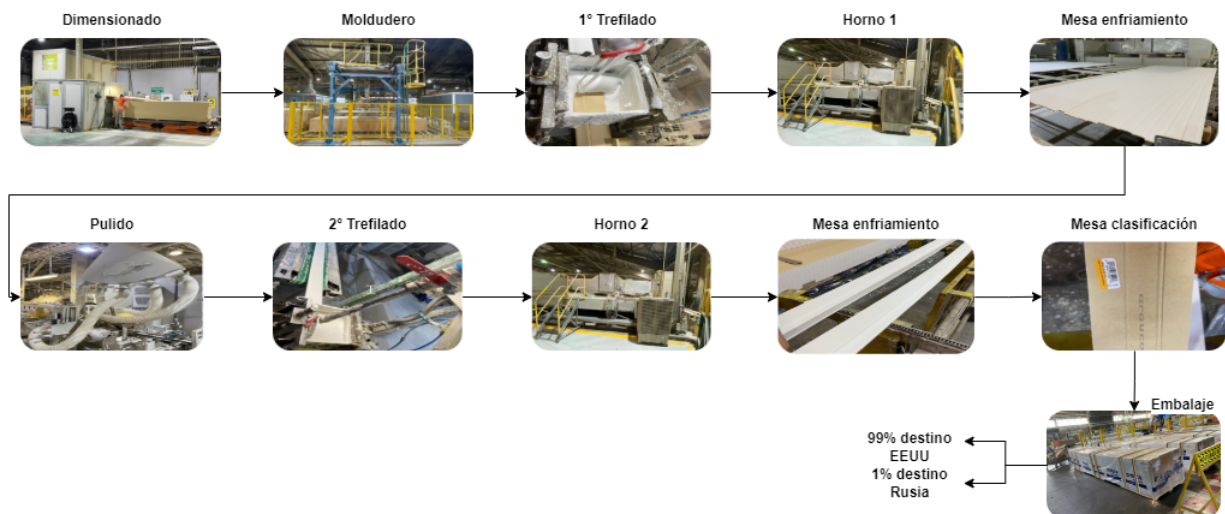


Figura 2.3: Diagrama de bloques del proceso, elaboración propia.

La pasta de trefila, también es elaborada en la planta y tiene una formulación específica

diseñada para el tipo de adhesivo utilizado. Esta se compone de un 10 % de agua, 20 % de adhesivo y un 70 % de carbonato de calcio. Los parámetros fisicoquímicos que deben incluir son similares a los expresados en la Tabla 2.2 sin embargo, la viscosidad requerida depende de si es aplicada en la primera o segunda caja de trefila, dado que la segunda capa requiere de menor viscosidad.

2.3.3. Producción y requerimientos

Actualmente, en la planta Nueva Aldea se producen, en promedio, 650 toneladas al mes de carbonato en forma de lodo, mientras que, en planta Arauco se producen 400 toneladas al mes. Por otro lado, la planta Trupan actualmente requiere de, aproximadamente, 600 toneladas al mes de carbonato, para la elaboración de pasta de trefila. Con estos datos, se puede concluir que la demanda de carbonato podría ser cubierta, si se logra reemplazar el carbonato de calcio adquirido mediante proveedor.

2.3.4. Pruebas preliminares

Posterior a la formalización del proyecto se realizaron pruebas en la planta Trupan con lodo de cal y polvo PPT proveniente de la planta Nueva Aldea.

La observación inicial del lodo de cal, es que posee un tono plumizo, lo que genera inconvenientes en el color de la pasta que debe ser blanco, debido a que las molduras se encuentran expuestas.

El lodo de cal se tamiza por malla 400 y se logra preparar pasta de trefila con la formulación original de 20,5 % de adhesivo, 69,5 % de lodo de cal y 10 % de agua. Al medir los parámetros de la pasta, se obtuvo una viscosidad de 16.950 [cps] lo que se encuentra fuera del rango esperado. Se aprecia que no existe disolución de las partículas del lodo en la pasta. Sumado a la viscosidad, se realiza la prueba de grindometría, la cual no cumple los parámetros esperados, presentando granulometría mayor a lo requerido, lo que se explica por la falta de disolución del residuo.

Por otro lado, se realizan pruebas con polvo PPT proveniente de planta Nueva Aldea, también se mantuvo la formulación original pero, esta vez no se pudo completar la mezcla, debido a que se produce saturación. Por esta razón, se modifica la formulación agregando 100 g más de agua, 200 g más de adhesivo y solo se logra adicionar 4 kg de un total de 6 kg del polvo PPT. El color es menos plumizo que el lodo de cal, sin embargo aún no cumple con las condiciones necesarias de color. La viscosidad obtenida es de 28.200 [cps], la cual está dentro del rango requerido para la caja de trefila 2. En cuanto a la grindometría, esta mejora con respecto al lodo de cal pero aun no presenta la uniformidad requerida.

Capítulo 3

Ensayos de laboratorio

Se desea comprobar la factibilidad técnica de utilizar el lodo de cal como reemplazante de carbonato de calcio en la pasta de trepila, para esto se realizan ensayos de laboratorio. En este capítulo se expone sobre estos, se inicia por la metodología utilizada, para luego mostrar los resultados obtenidos, junto con sus discusiones.

3.1. Metodología ensayos de laboratorio

Con el fin de encontrar el óptimo de mezcla, se realizan ensayos de laboratorio en la planta Trupan y en el laboratorio Bioforest de la empresa Arauco. En ellos se produce pasta de trepila con lodo de cal y polvo PPT.

Inicialmente se mantiene la composición original de la pasta, la cual corresponde a un 69,5 % de carbonato de calcio, 20,5 % del adhesivo y un 10 % de agua. En las primeras pruebas, el carbonato de calcio es reemplazado en un 100 % por los residuos, y las posteriores se complementa con carbonato marca Trucco.

En la planta Trupan, se producen 10 kg de pasta de trepila. El proceso de producción de la pasta inicia con el pesaje de los componentes, para luego mezclar el agua y el adhesivo con un mezclador helicoidal, durante 3 minutos. Una vez realizado este procedimiento, se adiciona el polvo de carbonato, a medida que se va mezclando. Al terminar de agregar el carbonato, se mezcla por 5 minutos.

Una vez producida la pasta prototipo, se realizan mediciones para comprobar la calidad y el funcionamiento de esta. Se generan pruebas de viscosidad mediante un viscosímetro, en ella se introduce una cantidad de la mezcla en un recipiente, en el cual se inserta el vástago Rv-6 del equipo. Este debe estar en contacto total con la pasta pero no debe tocar el fondo del recipiente. También se calcula su densidad. Para realizarlo se sitúa la mezcla en un recipiente de volumen definido y se pesa, con estos valores se calcula el parámetro dividiendo estos.

Sumado a lo anterior, se realizan pruebas de sólidos con una balanza de humedad, en este equipo se genera un secado de la muestra y se pesa para medir la cantidad de agua que fue retirada, por lo que una cantidad de la muestra se introduce en un plato de aluminio y se coloca en el equipo, el cual entrega el valor de humedad en base seca.

El pH de la muestra es medido con un medidor portátil de pH, el cual también mide su temperatura. Este se sumerge en el recipiente con la mezcla, se enciende y mide los parámetros. Por otro lado, se realizan pruebas de grindómetro, para calcular su grado de molienda, esta prueba consiste en colocar un ligero exceso de muestra en el extremo profundo de la ranura del equipo, y con el raspador de borde recto se extrae la muestra hasta el extremo poco profundo de la ranura [37], para mayor claridad de lo descrito se muestra una imagen del equipo en la Figura 3.1.

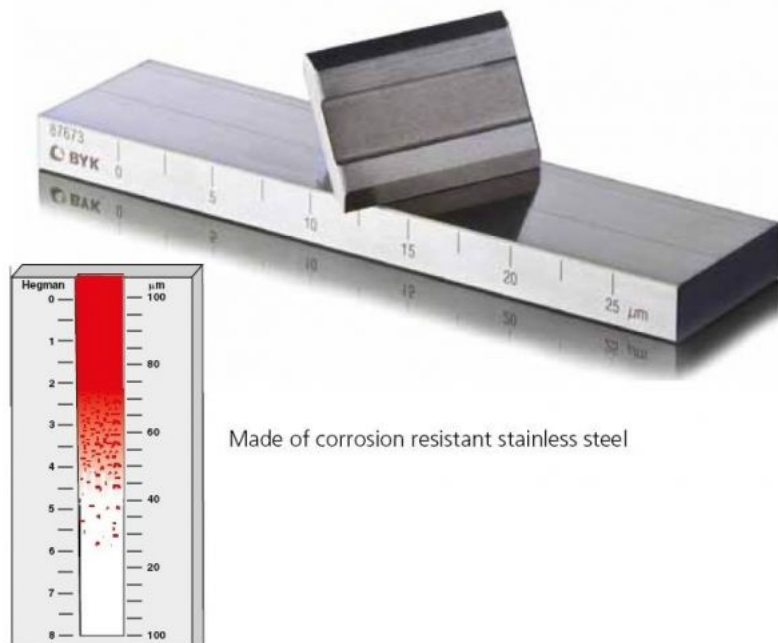


Figura 3.1: Equipo grindómetro [37].

Por último, se mide el tiempo abierto. Esto consiste en generar una capa de pintura en una placa de vidrio, para que mediante un cronómetro, se calcule el tiempo que se demora la pasta en secarse al tacto completamente.

En las pruebas del laboratorio Bioforest, solo se realizan mediciones de viscosidad y grindometría, debido a la disponibilidad de equipos y a la relevancia de los parámetros mencionados. Las pruebas se realizan en formato de 200 [g] y 400 [g].

El reemplazo de un 100% de carbonato de calcio por lodo de cal no genera resultados positivos, razón por la cual, se busca modificar la formulación de la pasta de trefila. Se aumenta en un 5% y un 10% la cantidad de agua, se disminuye el porcentaje de lodo de cal y se mantiene el del adhesivo. Basado en los resultados, se decide realizar una tercer prueba con un porcentaje intermedio de 7% adicional de agua.

También se prueba la adhesión de carbonato de calcio de la empresa Trucco, en conjunto, al residuo utilizando la fórmula original para probar la posible inclusión de un porcentaje del

residuo en la fórmula.

En las pruebas iniciales, se identificaron posibles inconvenientes que tiene el lodo de cal para poder ser utilizado como materia prima. Por esta razón, en las siguientes pruebas se busca implementar soluciones a estos, para confirmar su relevancia de su aplicación en la pasta. Se realiza un proceso de secado para el lodo de cal y tamizado, para comprobar su incidencia en los resultados obtenidos.

3.2. Resultados y discusiones ensayos de laboratorio

Se realiza la primera prueba, en planta Trupan, con lodo de cal proveniente de la planta Arauco. En ella se mantiene la composición original, se preparan 10 [kg] y se produce con éxito pasta de trefila.

Las observaciones iniciales del lodo de cal son: (1) Se encuentra húmedo, lo que genera aglomeraciones, pudiendo presentar inconvenientes en la granulometría de la muestra. (2) El lodo es un poco más oscuro que el carbonato Trucco, como muestra la Figura 3.2, pero aún cumple con el nivel de color que se espera.

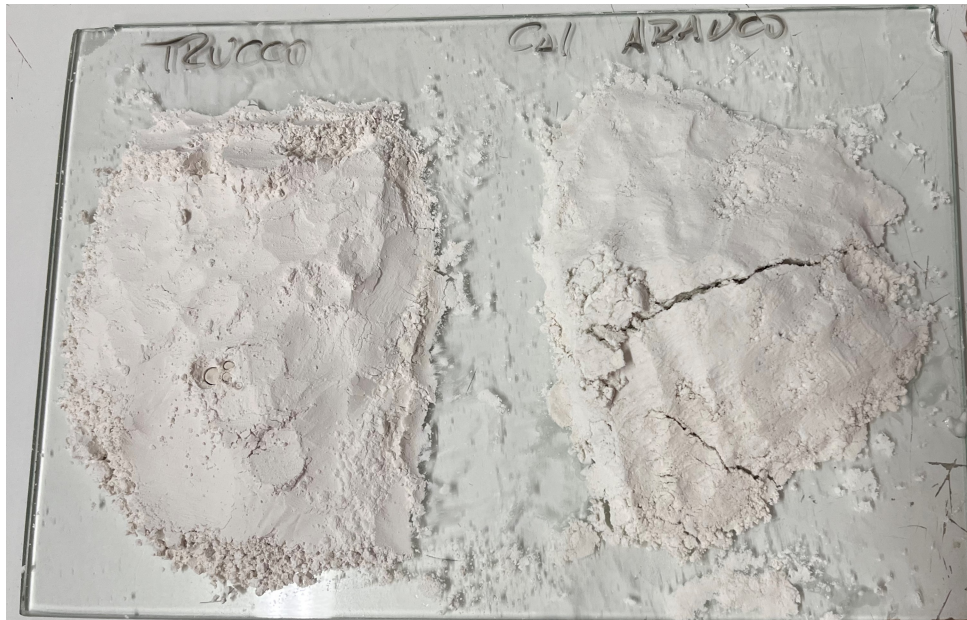


Figura 3.2: Comparación lodo de cal Arauco y carbonato Trucco.

Una vez producida la pasta, se midieron los parámetros requeridos, obteniendo los resultados expuestos en la Tabla 3.1 .

Tabla 3.1: Resultados obtenidos en prueba n°1

Parámetro	Valor Obtenido	Valor esperado	Unidad
Viscosidad	7300	26.000-38.000	[cps]
pH	11,2	7-9	-
Tiempo abierto	1:57	2:30-3:00	[min]

Lo primero que llama la atención de los resultados obtenidos es la viscosidad, debido a que el parámetro es 18.700 [cps] más bajo de lo requerido, es decir, alcanza un 28% de la viscosidad requerida. Sumado a esto, mientras se realizaban otras pruebas la viscosidad fue disminuyendo aún más, hasta llegar a 5000 [cps] lo que equivale a la viscosidad del adhesivo, por lo que se cree que existió algún tipo de reacción entre los ingredientes de la pasta.

El pH de la muestra se encuentra fuera de rango, lo que era de esperar dado que como se expresa en el marco teórico, el pH del lodo de cal es más alcalino que el carbonato de calcio de la empresa Trucco. Los inconvenientes que genera el valor obtenido de pH, se explican más adelante en el documento.

El tiempo abierto, es de los parámetros más relevantes dentro de la aplicación industrial de la pasta de trepila. Esto debido a que por una parte, un tiempo menor a 2 minutos y 30 segundos, puede afectar al sistema de *pipiing*, porque se puede secar la pasta en el trayecto a la caja de aplicación o en la caja misma. Por otro lado, un tiempo mayor a 3 minutos produciría problemas en el secado, ya que no se alcanzaría a secar en el horno. El tiempo encontrado para la pasta piloto es menor que el necesario. No se tiene claridad aún de lo que provoca este efecto, por lo que no se pueden plantear posibles soluciones y se sigue experimentando.

En la Figura 3.3 , se puede observar la comparación entre las pruebas de grindómetro, donde en la derecha se encuentra el resultado esperado y a la izquierda el obtenido en la prueba.

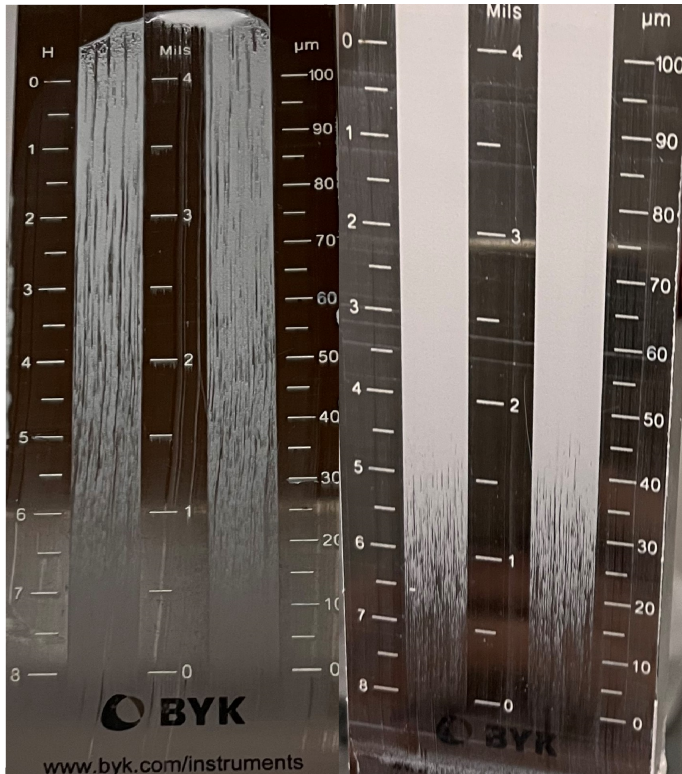


Figura 3.3: Comparación grindómetro pasta prototipo (izquierda) y original (derecha).

Al examinar los resultados obtenidos, se puede notar que la prueba de grindómetro está bajo lo esperado, mostrando un grado de molienda menor a 0 [H], parámetro que se espera tenga un valor mayor o igual a 5 [H]. Esto se produce debido a la humedad del lodo, la cual genera aglomeraciones, por lo que en la pasta se encuentran partículas de tamaños superiores a 100 [μm], que pueden generar discontinuidades en el pintado sobre la moldura.

En la Figura 3.4 , se muestra el resultado de la prueba de tiempo abierto.



Figura 3.4: Comparación tiempo abierto pasta prototipo (izquierda) y original (derecha).

En esta se observa que la pasta prototipo, mostrada en la izquierda de la placa, efectivamente carece del color blanco que entrega el carbonato y parece ser solo adhesivo. Esto confirma, en cierta medida, la teoría de que el carbonato reacciona, ya sea con el agua o con el adhesivo. Dados los resultados de la primera prueba, se decide secar el lodo de cal, para corroborar la incidencia de la humedad en la preparación de la pasta prototipo.

El lodo de cal se seca en un horno, a 100°C hasta una humedad de 0,6%. Esta humedad difiere en 0,1 grados con la del carbonato Trucco y se prepara la pasta. El lodo, una vez seco, tiene un color más blanco que el utilizado normalmente, lo que se ilustra en la Figura 3.5.



Figura 3.5: Comparación lodo de cal de Arauco seco y carbonato Trucco.

En el caso del segundo prototipo, con carbonato seco, no se puede terminar la mezcla debido a que ocurre saturación. Este efecto se produce debido a una alta tensión superficial, que impide que se continúe adicionando el sólido. Se agregan 3,3 [kg] de un total de 6,96 [kg] de carbonato y se miden los parámetros necesarios, los cuales se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Resultados obtenidos en la segunda prueba.

Parámetro	Valor Obtenido	Valor esperado	Unidad
Viscosidad	30.200	26.000-38.000	[cps]
Tixotropia	1,75	<2	-

Tanto la viscosidad de la muestra como la tixotropía se encuentran en los rangos esperados para la pasta de Trefila. Por esta razón se continúa con la prueba de grindrometría mostrada en la Figura 3.6.a.

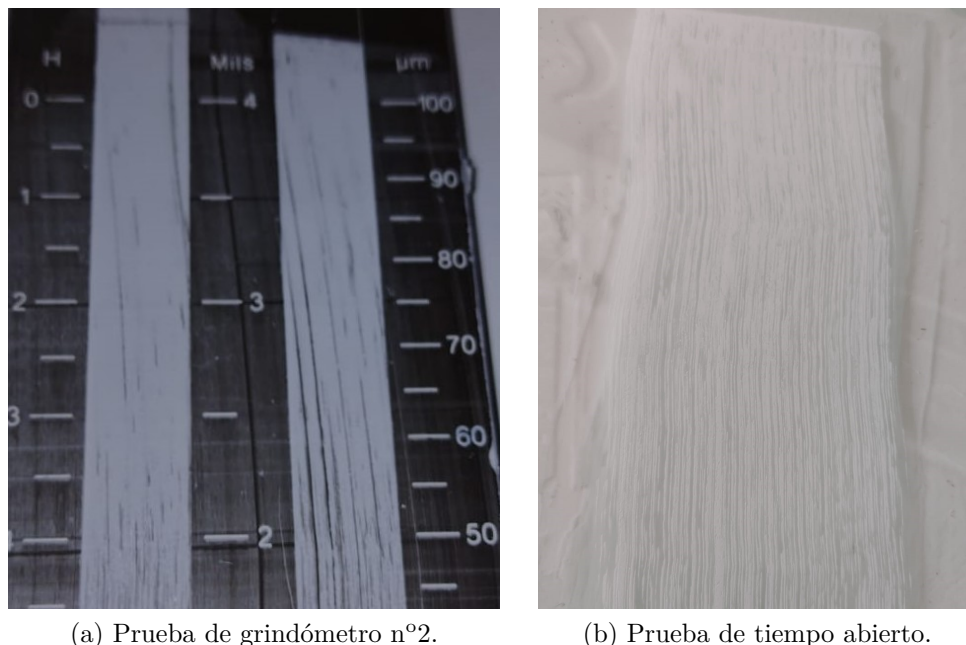


Figura 3.6: Pruebas realizadas pasta prototipo n°2.

La muestra presenta una mejora con respecto a la anterior (Figura 3.3) pero, aún posee partículas más grandes de lo necesario. Sumado a esto, en la Figura 3.6.b se muestra que la pasta aún no posee uniformidad y no tiene la tonalidad requerida.

Como el lodo de cal proveniente de Arauco presenta mejores resultados, en cuanto a color, de los que presenta el de Nueva Aldea (Ver Sección 2.3.4), se decide solo continuar experimentando con lodo de cal proveniente de planta Arauco. Por esta misma razón, se desestima la utilización del polvo PPT, debido a que este solo es producido en planta Nueva Aldea, y posee la misma tonalidad. Además, el polvo PPT por si solo, no cumple con los requerimientos de carbonato de calcio.

Debido a los resultados obtenidos, se experimenta cambiando la formulación de la pasta para corregir la saturación de esta. Se generan pruebas con 5% y 10% más de agua y se disminuye la cantidad de lodo de cal. Un 10% adicional de agua es la máxima cantidad que se puede agregar, debido a que un porcentaje mayor afectaría en el secado de la moldura, lo que provoca un aumento en la energía requerida en el proceso, al tener que aumentar la temperatura del horno. Las formulaciones se muestran en las Tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3: Formulación prototipo n°3

Compuesto	Porcentaje
Lodo de cal	65 %
Agua	15 %
Adhesivo	20 %

Tabla 3.4: Formulación prototipo n°4

Compuesto	Porcentaje
Lodo de cal	60 %
Agua	20 %
Adhesivo	20 %

En este caso se utiliza una nueva muestra de lodo de cal, la cual también proviene de planta Arauco. Se mide la humedad inicial, la cual es de 37,71 %, valor que se encuentra 15 % sobre la muestra anterior. Es importante notar esta diferencia, debido a que para el diseño del proceso de secado de la muestra, se debe considerar un amplio margen de humedad producto de la variabilidad del parámetro.

El lodo, al igual que en la segunda prueba, fue secado. Sin embargo, debido a falta de tiempo, no se pudo secar completamente, razón por la cual se trabaja con una humedad de 10,04 % pero, a diferencia de la primera prueba, esta cantidad de agua presente en el lodo fue corregida en los gramos a adicionar, considerando la presencia de agua en el residuo.

En estas pruebas solo se midió la viscosidad, dado que no se cuenta con otro instrumento en la ocasión. Al realizar las pruebas, se selecciona erróneamente la aguja del viscosímetro, por lo que los resultados se corrigen mediante una estimación. Esta se realiza aplicando regla de 3, con los datos obtenidos al calcular la viscosidad con ambos vástagos de la misma muestra. Los valores obtenidos, junto a su estimación, son mostrados en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Resultados obtenidos de las pruebas 3 y 4.

N° Prueba	Viscosidad V74	Viscosidad Rv-6
3	Fuera de rango	No se puede estimar
4	7.263 [cps]	4.8074 [cps]

El primer valor de viscosidad obtenido queda fuera del rango, por lo que no es posible estimarlo. Se cree que con el instrumento correcto sí se podría haber medido. El valor aproximado es de 32.889 [cps]. Este se calcula considerando que la viscosidad aumenta de manera lineal, y que al haber adicionado el 77 % del lodo de cal, la viscosidad medida fue de 37.740 [cps], lo que estimada equivale a 25.325 [cps].

El valor de viscosidad obtenido en el prototipo número 4, es muy bajo en comparación de lo requerido, incluso más bajo que la viscosidad del adhesivo. La cantidad de agua adicionada generó una disolución por lo que no cumple los requerimientos, y se descarta como posible formulación.

Que la primera prueba esté fuera de rango implica que su viscosidad es muy alta, de hecho existe saturación en la mezcla. Basado en esto, se decide realizar una tercera prueba adicionando una cantidad intermedia en comparación a las dos pruebas anteriores. Se realiza

el prototipo número 5 con un 7% más de agua. La formulación de este se encuentra en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Formulación prototipo n°5.

Compuesto	Porcentaje
Lodo de cal	63 %
Agua	17 %
Adhesivo	20 %

En este caso la viscosidad corregida es de 29.620 [cps], lo que se encuentra en el rango requerido. Sin embargo, nuevamente se satura la pasta, al haber adicionado el 84% del lodo de cal. Por lo que se genera un cambio de metodología para esta prueba, se agrega agua y carbonato a la mezcla hasta alcanzar la viscosidad requerida, cabe destacar que se realiza con la viscosidad calculada y no la estimada, por lo que el resultado final no fue el esperado.

Se logra aplicar el 89% del carbonato con esta metodología y se alcanza una viscosidad de 26.694 [cps]. Los resultados obtenidos permiten establecer que la viscosidad de la pasta es un parámetro sensible, debido a que con variaciones de 1,5% en la cantidad de agua, la viscosidad baja drásticamente en un 60%. Esto puede implicar riesgos, ante una posible aplicación industrial, ya que el margen de error es muy pequeño, pudiendo perder una preparación completa lo que genera residuos extras y pérdidas económicas.

Para las siguientes pruebas, la muestra se seca con el fin de eliminar el 10,04% de humedad restante. Parte del residuo es cribado en húmedo y puesto a secar. En este se logra eliminar toda la humedad, mientras que, el lodo sin selección de tamaños logra una humedad de 0,8%.

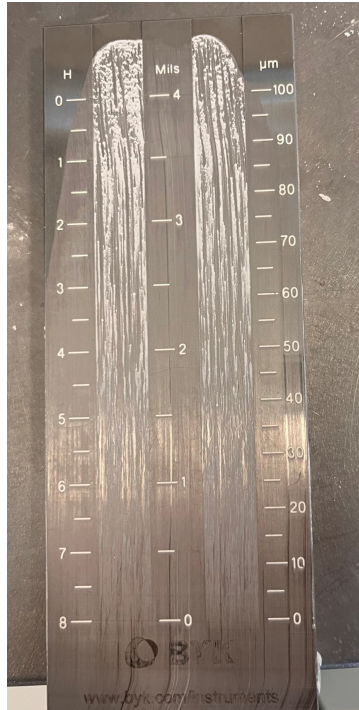
Se cree que la humedad que contiene el lodo en los prototipos 3,4 y 5 puede ser la responsable de que no se haya alcanzado la viscosidad requerida. Por esta razón, se trabaja con la formulación del prototipo 5, mostrada en la Tabla 3.6, pero esta vez con carbonato con 0% de humedad.

En este caso, se preparan 400 [g] de pasta de trefila. También, se prepara otra pasta con la formulación original y carbonato Trucco, para poder comparar efectivamente los resultados bajo las mismas condiciones.

En la pasta de trefila original, se obtuvo una viscosidad de 34.250 [cps], mientras que en el prototipo n°6 la viscosidad se encuentra 10.000 [cps] más bajo, con un valor de 23.750 [cps]. El resultado obtenido no es de todo desalentador, debido a que se ha utilizado pasta de trefila anteriormente con este valor, por lo que se realizan las siguientes pruebas.

En el grindómetro, la pasta nuevamente presenta una granulometría más grande de lo requerido, como se puede observar en la Figura 3.7.a. Sumado a esto, la pasta presenta gránulos (véase Figura 3.7.b) y textura de polvo, de lo que se infiere que el carbonato no se está disolviendo en la mezcla. En la prueba de contraste, Figura 3.7.c, al igual que las pruebas anteriores, la pasta no presenta el color y uniformidad requerida, por lo que aún se mantiene

la teoría de la reacción.



(a) Prueba de grindómetro n°6.



(b) Granulos presentes en pasta de trefila prototipo n°6.



(c) Contraste prototipo n°6 y pasta de trefila Trucco.

Figura 3.7: Pruebas realizadas pasta prototipo n°6.

Se concluye que la granulometría puede ser el problema, por lo que se desarrollan ensayos de distribución de tamaño de partícula, cuyos resultados se muestran en la Figura 3.8. En rojo se expresan los resultados del carbonato Trucco, en verde lodo de cal de planta Arauco, y en azul el polvo PPT de planta Nueva Aldea.

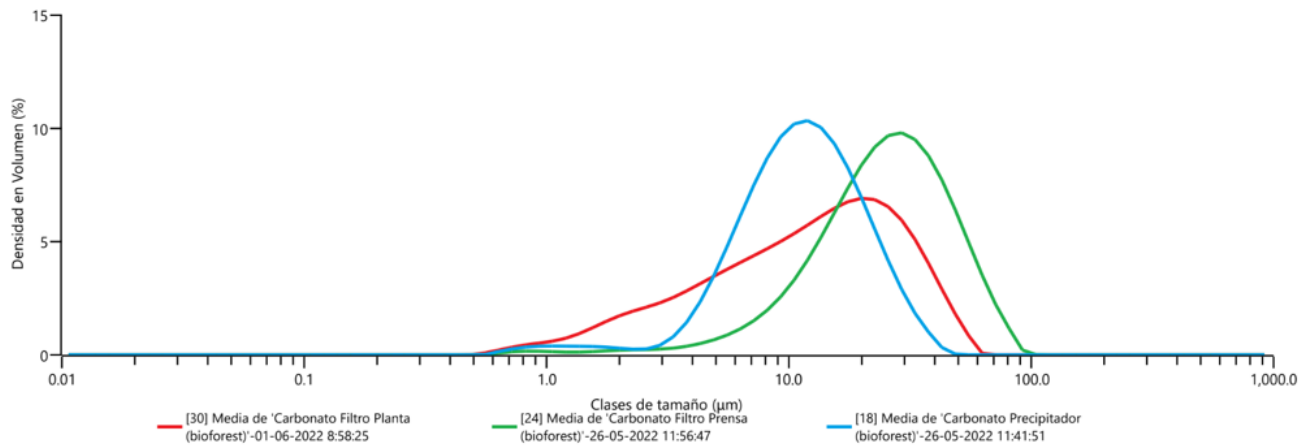


Figura 3.8: Distribución de tamaño de partículas carbonato Trucco, lodo de cal y polvo PPT.

De la figura anterior, se destaca que el carbonato Trucco presenta una distribución más uniforme y con tamaños de partículas más variado. El lodo de cal, efectivamente presenta partículas más grandes que el carbonato de calcio. Junto con esto presenta una densidad de tamaño de partícula mayor en 5%. Debido a los resultados obtenidos, en las siguientes pruebas se busca clasificar los tamaños de partículas del lodo, con el fin de que se asemeje la distribución al carbonato Trucco y corregir así la granulometría de la pasta.

Se criba la muestra, esta vez en seco, en un tamizador, bajo una malla 120 ($125[\mu\text{m}]$). Con este se realiza pasta de trefila con la formulación del prototipo n°5, mostrada en la Tabla 3.6.

Se obtiene una viscosidad de 26.200 [cps], parámetro dentro del rango requerido, que es útil para su utilización en la segunda caja de trefila. Se presenta la prueba de grindómetro realizada a la pasta prototipo 6, en la Figura 3.9.

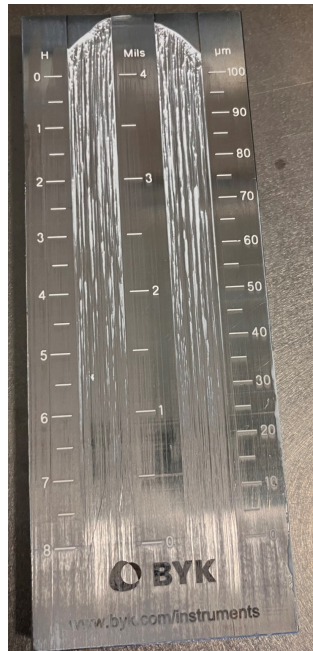


Figura 3.9: Prueba de grindometría prototipo n°7

Nuevamente, la prueba de grindometría no cumple con lo esperado. La muestra previamente es cribada y se espera que exista algún tipo de disolución de las partículas en la pasta, sin embargo, esto no ocurre. La textura de la pasta es polvosa, por lo que se tiene la teoría de que el problema lo ocasiona una incompatibilidad del adhesivo con el lodo de cal.

Debido a esta incompatibilidad, se decide explorar la opción de complementar el carbonato Trucco con lodo de cal. Inicialmente se prueba la composición 50:50 de cada uno. Se preparan 10 [kg] de pasta de trefila, con la formulación original de 20,5 % de adhesivo, 10 % de agua, 34,75 % de carbonato Trucco y 34,75 % de lodo de cal.

La pasta se satura al haber adicionado 1,944 [kg], 57,38 % del carbonato que se debe agregar. Aún así, se calculan los parámetros fisicoquímicos: la viscosidad tiene un valor de 36.200 [cps] y una tixotropía de 2,36. La viscosidad se encuentra dentro del rango aceptable, sin embargo, la tixotropía se encuentra sobre el rango, razón por la cual la pasta prototipo tiene poca fluidez. La prueba de grindometría se muestra en la Figura 3.10.

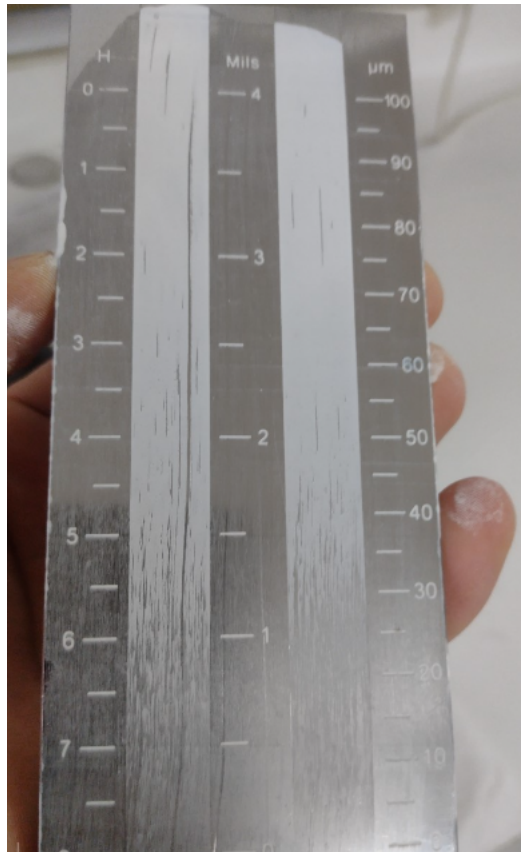


Figura 3.10: Prueba de grindometría prototipo 50 % Carbonato Trucco y 50 % lodo de cal.

Se puede notar, que hay una clara mejoría en comparación a las pruebas anteriores. Donde la pasta, en términos generales, presenta una molienda de tamaño esperado: 5[H], a excepción de algunas partículas que presentan tamaños menores, de aproximadamente 95 [μm]. En la Figura 3.11, al igual que en el grindómetro, se puede observar que la muestra presenta mayor uniformidad y se asemeja a la pasta de trefila original. El tiempo abierto, tiene un valor de 3 minutos con 50 segundos, lo que está sobre el rango esperado y podría generar inconvenientes en el secado de la moldura, en particular, en las molduras que poseen algún tipo de pliegue o diseño.

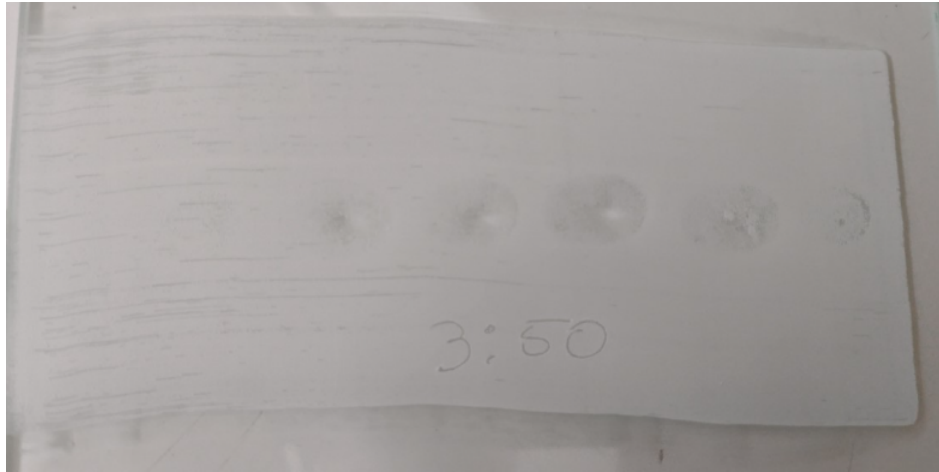


Figura 3.11: Tiempo abierto prototipo 50 % Carbonato Trucco y 50 % lodo de cal.

Con el fin de encontrar el óptimo de mezcla, se realiza una nueva prueba, esta vez con 30 % de lodo de cal y 70 % de carbonato Trucco. En este caso, se obtiene un resultado bastante similar al prototipo 50:50. Este presenta mayor uniformidad de la pasta, en comparación al anterior, lo que se puede observar en la Figura 3.12.

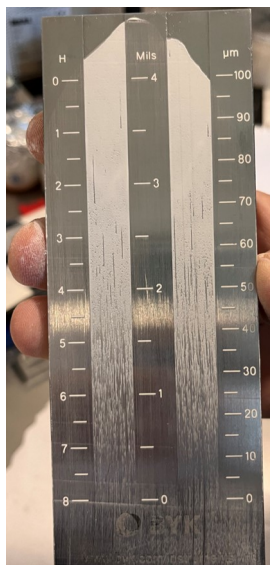


Figura 3.12: Prueba grindometría prototipo 70 % Carbonato Trucco y 30 % lodo de cal

A pesar de tener mejores resultados, se decide desistir de encontrar el óptimo de mezcla entre los carbonatos. Esto debido a que se encontró la causa de la incompatibilidad del adhesivo y el lodo de cal, por lo que se le da prioridad a esta opción, ya que implica utilizar todo o la gran mayoría del lodo. Además de otras razones que se exponen más adelante.

Harting, empresa que realiza el adhesivo para la pasta de trefila, también realiza ensayos de laboratorio para producir pasta de trefila con lodo de cal. Se realizan tres pruebas: la primera, en la cual se produce pasta de trefila con carbonato Trucco, la segunda reemplazando

el 100 % del carbonato por lodo de cal y una última con 50 % de carbonato Trucco y 50 % de lodo de cal. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 3.7. Se debe destacar que todas las pruebas se realizan con el lodo de cal seco.

Tabla 3.7: Resultados pruebas Harting.

Parámetros	Pasta original	100 % lodo de cal	Mezcla 50:50
Viscosidad	27200 [cps]	74400 [cps]	50500 [cps]
Tixotropía	2,8	4,2	4,0
pH	6,95	12,8	12,4

La viscosidad obtenida en las pruebas es mayor al rango aceptado, al igual que en los ensayos realizados por Arauco, el prototipo con solo lodo se satura, razón por la cual no se puede adicionar toda la carga de carbonato de la formulación. La tixotropía tampoco se encuentra en el rango esperado, lo que se nota en la pasta al tener poca o nula fluidez. Por otro lado, llama la atención el pH.

Junto con lo anterior, se destaca el bajo poder cubriente de la pasta y la estabilidad negativa de sus parámetros fisicoquímicos. Esto es lo mencionado con el prototipo n°5, donde parámetros como la viscosidad, generan cambios bruscos con pequeñas variaciones.

Con estos resultados, la empresa Harting llega a la misma conclusión: existe una incompatibilidad entre el adhesivo y el lodo de cal. La causa de esto es el pH, debido a que el adhesivo posee un pH entre 4 y 6, lo que es considerado ácido, mientras que, el lodo de cal presenta uno muy alcalino 10-11, más que el carbonato Trucco. Por esta razón efectivamente ocurre una reacción ácido-base entre el lodo y el adhesivo. Esto explica los resultados obtenidos y la estabilidad negativa de los parámetros.

Inicialmente se piensa que el pH no tiene incidencia dentro de la pasta de trefila, debido a que no se tenía en consideración la acidez del adhesivo. Pese a los resultados, no se descarta la posibilidad de utilizar el lodo de cal, sino que se descarta la opción de utilizarlo con el adhesivo actual, por lo que se propone que Harting realice una nueva formulación, exclusiva para utilizar con el residuo.

Se descarta la posibilidad de mezcla entre Trucco y lodo de cal Arauco (manteniendo el adhesivo actual), al conocer que el pH era la causa de la incompatibilidad, debido a que se pone en riesgo la operación en planta Trupan, considerando que está ocurriendo una reacción ácido base, pero en menor escala debido a la menor cantidad de lodo de cal.

El pH alcalino del lodo de cal, se debe a las etapas anteriores a la calcinación, donde está incluida la mezcla, y a su recirculación dentro del sistema. Por esta razón, dentro del lodo hay calcio en forma de hidróxido de calcio y sodio, en forma de hidróxido de sodio. Considerando esto, se descarta modificar el pH del lodo, ya que al adicionar un ácido se puede generar otra reacción con las trazas de elementos que traen aguas abajo, junto a que la manipulación del ácido produciría una nueva problemática de manejo de residuos.

La empresa Harting, continua realizando ensayos de laboratorio para las modificaciones del adhesivo. En este proceso, se percatan que al tamizar el lodo de cal en M120 el pH baja de 11 a 8,5. Por lo que, solo agregando un humectante al adhesivo, se tienen resultados favorables, como muestra la Figura 3.13 .



Figura 3.13: Ensayos realizados por Harting con lodo tamizado

Las muestras F3 y F4 son las que poseen mejores resultados y se realizan con lodo de cal en proporción 50:50 con carbonato Trucco, la composición original y un humectante en conjunto a dos tipos de ligante vinílico, como el que se utiliza actualmente. Se destaca la fluidez de la pasta y los parámetros se encuentran en el rango esperado.

Se cree que el hecho del que pH baje al tamizar el lodo se debe a la presencia de hidróxido de sodio. Este compuesto se encuentra en el proceso de producción de celulosa, por lo que se encuentran trazas dentro del lodo de cal. El hidróxido de sodio es altamente soluble, por lo que aumenta el pH de la solución, este a su vez se adhiere a las partículas del carbonato de calcio, generando una gran partícula, la cual queda retenida en el tamiz.

Al agregar humectante se corrige el problema de la saturación. Inicialmente se cree que este efecto era provocado por el tamaño de partícula, sin embargo, al realizar los ensayos de tamiz se puede notar que el carbonato de calcio Trucco es malla 500, mas pequeño que el lodo de cal. Por lo que se cree que la forma de la partícula que presenta el residuo, es la que genera mucha absorción de agua y seca la mezcla.

Se realizan ensayos en el tamiz para tener claridad de la cantidad de lodo de cal que atraviesa la malla 120 y que podría ser utilizada. Los resultados se observan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Resultados obtenidos para el lodo de cal en el tamiz

Medida de bandejas	Peso bandejas [gr]	Peso bandeja/muestra [gr]	Cant. de muestra por bandeja [gr]
Malla 30	618,4	618,5	0,1
Malla 40	576	576,1	0,1
Malla 50	564,6	564,7	0,1
Malla 120	8,5	24,7	16,2
Malla 450	297,4	340,6	43,2
Malla 500	301	337,9	36,9
Fondo	487,9	491,2	3,3

Como se observa en la tabla, el 83,4% de las partículas pasan a través de la malla 120 lo que es un excelente retorno.

Se debe tener en consideración, que a pesar de que se busca la modificación del adhesivo, el lodo de cal para ser utilizado debe transitar por procesos de secado y molienda, por esta razón se diseña el proceso teórico para realizarlo y se evalúa económicamente.

Capítulo 4

Modelo teórico de modificación lodo de cal

Debido a la necesidad de modificar el lodo de cal para poder utilizarlo en la pasta de trefila, se propone un modelo teórico para su realización, lo cual se expone en el presente capítulo.

4.1. Metodología modelo teórico

Se desea proponer un diseño industrial que corrija las características de los residuos que generen inconvenientes en su uso en la pasta de trefila. Para realizarlo, lo primero que se hace es encontrar los parámetros alterados, junto con la característica que los genera mediante las pruebas realizadas.

Una vez identificados los parámetros, se realiza una búsqueda bibliográfica, de los distintos equipos mediante los cuales se pueden corregir el parámetro, las aplicaciones típicas industriales y la disponibilidad de equipos en la planta.

Sumado a lo anterior, se realiza un balance de masas para poder calcular el flujo que entra en los equipos y poder así buscar mediante catálogos los necesarios. Con esta información, se propone el proceso teórico y se procede a la evaluación económica del mismo.

4.2. Resultados y discusiones modelo teórico

Se concluye de los ensayos de laboratorio realizados, que para utilizar el lodo de cal en la pasta de trefila, se debe modificar la humedad y la granulometría de este. Por esta razón, se propone la creación de un proceso teórico, el cual se realiza en la planta de celulosa Arauco, con el fin de enviar el lodo de cal listo para utilizar. Este se ilustra en la Figura 4.1.

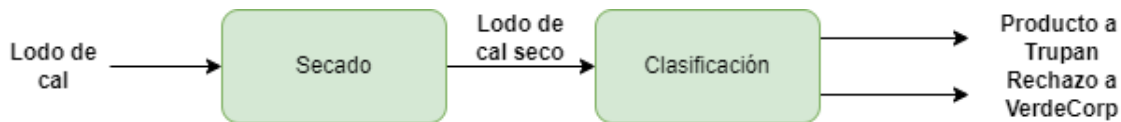


Figura 4.1: Diagrama de bloques proceso teórico diseñado.

Como se puede observar en la figura anterior, es necesario una etapa de secado. Posteriormente se clasifica el tamaño de partículas. Las partículas de tamaños mayores se envían a Verdecorp ¹ para su valorización, mientras que, las partículas pequeñas, se utilizan en el proceso.

Para dimensionar los equipos necesarios para cada etapa se realiza un balance de masas, cuyo detalle se encuentra en el Anexo A.

Inicialmente se requiere un proceso de secado. En este se busca minimizar la humedad hasta un valor de 0,6 %. Para esto, se utiliza un secador rotatorio, que está diseñado para un flujo de $0,5 \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]$. Este flujo, es parte del balance de masas y, se calcula considerando las 400 toneladas mensuales que actualmente desecha la planta Arauco, tomando en cuenta, que se trabaja en continuo, es decir, las 24 horas y todos los días del mes. El cálculo se muestra en la ecuación 4.1.

$$F_{\text{entrada}} = \frac{400 \left[\frac{\text{ton}}{\text{mes}} \right]}{30 \left[\frac{\text{día}}{\text{mes}} \right] \cdot 24 \left[\frac{\text{h}}{\text{día}} \right]} = 0,5 \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] \quad (4.1)$$

Al finalizar este proceso, a la salida del secador se instala un tamizador, con malla 120. Para el calculo de la cantidad que pasa a través del tamiz, se considera que según los resultados de distribución de tamaño en el tamiz, mostrados en la Tabla 3.8, el 83,4 % de las partículas pasan a través de la malla 120, con este dato se calcula el flujo. La cantidad de lodo de cal modificado que se dirige hacia Trupan, es 0,32 ton/h mientras que, el flujo enviado hacia Verdecorp es 0,06 ton/h.

Para mayor claridad del proceso, se presenta un diagrama de los equipos a instalar, el cual se muestra en la Figura 4.2

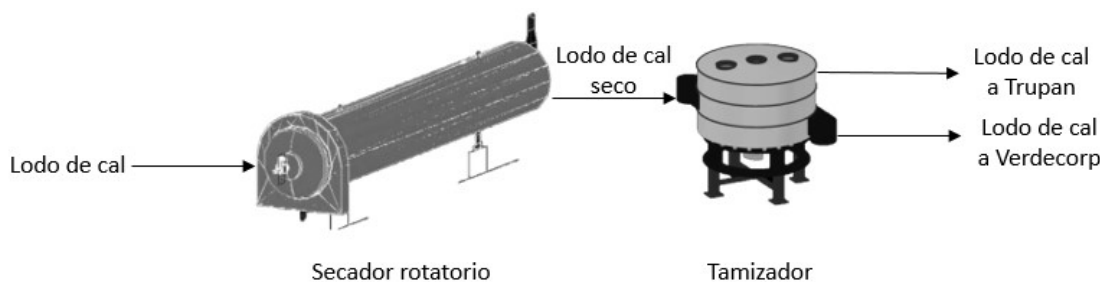


Figura 4.2: Diagrama de los equipos a instalar.

¹ Verdecorp en la actual empresa de valorización a la que se entrega lodo de cal en forma de Drids

Se consideró la utilización de un molino, para las partículas más grandes descartadas, pero esto no es viable debido a la presencia de hidróxido de sodio. Este aumenta el pH de la muestra, y genera una reacción ácido-base con el adhesivo, por lo que, si se muele el lodo de cal tamizado, se tendría nuevamente una incompatibilidad.

Se debe tener en cuenta, que este proceso ha sido probado exclusivamente a nivel de laboratorio, con equipos distintos a los mostradas, en teoría funciona y soluciona los inconvenientes presentados por el lodo de cal, sin embargo, esto se debe probar a nivel de prototipo industrial para comprobar su efectividad y aplicación.

Capítulo 5

Evaluación económica

Se realiza una evaluación económica de la alternativa propuesta, cuya metodología, resultados y discusiones se expresan en el presente capítulo.

5.1. Metodología evaluación económica

Se requiere evaluar económicamente, la alternativa que se tiene para la utilización del lodo de cal, para esto se ocupa la siguiente metodología.

Primero se define cada escenario, y los elementos que contempla un flujo de caja de cada opción. Luego, se recopila toda la información necesaria para proceder a realizar el flujo de caja.

El flujo de caja difiere de la metodología tradicional, dado que se quiere hacer énfasis en la cantidad que se está dejando de gastar al generar el proyecto. Por esta razón, los costos se calculan como una diferencia entre la alternativa y el caso base. El signo que posee esta diferencia se deja tal cual, por lo que si se está gastando menos que en el caso base, se suma a pesar de ser un costo. Así se puede obtener un valor positivo, aunque no se consideren los ingresos por venta como parte del proyecto a evaluar.

El caso base, es el caso actual. Dentro de sus costos fijos, se encuentran los costos de mano de obra. En estos se consideran los sueldos por cada puesto necesario para la producción de pasta de trepala: un jefe de operaciones, un ingeniero de gestión, un supervisor de planta, tres operadores de tipo A (los cuales están especializados en el proceso) y tres operadores tipo B. Además, se tienen los gastos de servicio de administración, los cuales corresponden a un 10 % de los costos de mano de obra [38].

Los costos variables del caso base, en primer lugar incluyen los costos de consumibles: carbonato de calcio y adhesivo. El carbonato de calcio actualmente tiene un valor de USD 152 por tonelada, mientras que el adhesivo tiene un valor de USD 1923 por tonelada con transporte incluido. Para el carbonato de calcio, se incluye el costo de transporte que tiene un valor de 18 dólares por tonelada.

En segundo lugar, se tienen los costos de insumos necesarios. En ellos se considera la can-

tividad de agua a utilizar, la cual es basada en la formula de la pasta de trefila, considerando 600 toneladas de carbonato de calcio requerido al mes y 10 % de agua. La energía eléctrica utilizada, se calcula considerando la cantidad de kilowatts que consumen los dos mezcladores helicoidales, en los cuales se realiza la pasta. El precio de los insumos, es basado en la información de los proveedores del servicio [39],[40].

El costo de valorización del lodo de cal, consiste en el transporte de este a las instalaciones de la empresa encargada, Verdecorp, y el costo mismo de valorización, esto entrega un total de USD 30 por tonelada.

Por último, se considera el costo de mantención, el cual equivale al 20 % del OPEX total, según lo encontrado por bibliografía [38].

En este caso, se tiene una alternativa que consiste en la implementación del modelo teórico para la modificación del lodo de cal. En este escenario, se considera un operador adicional por turno, es decir tres operadores tipo B más, los cuales se incluyen en la implementación del proceso.

Por otro lado, disminuye el costo del carbonato Trucco debido a que se necesita menor cantidad, mientras que el costo del adhesivo se estima que aumenta en un 5 % debido a las modificaciones necesarias para su uso.

Al agregar equipos en la fabricación de la pasta de trefila, aumenta el consumo eléctrico. En este caso se adiciona un secador rotatorio y un tamizador.

Se adiciona un costo extra en la alternativa por el transporte del lodo de cal desde Arauco hacia Trupan, este se calcula considerando el costo por tonelada del transporte de lodo de cal que equivale a USD 28.

En la alternativa, se consideran los costos de la inversión inicial, la cual contempla la compra de los equipos necesarios, sumado a los costos de instalación de estos, *piping*, instrumentación y control, instalación eléctrica y construcciones, entre otros. Para calcular el CAPEX, se divide el costo de los equipos por el porcentaje que ocupa esta categoría del total del proyecto, multiplicado por 100 %. El porcentaje utilizado del item, es escogido por las características del proyecto y basado en bibliografía. Con esto se obtiene el CAPEX total.

El costo de equipos se calcula en base a la cotización mediante la página *alibaba*, los equipos cotizados se encuentran la bibliografía [41], [42]. Para este caso, se considera que el *Cost, Insurance and Freight* (CIF) es un 12 % adicional del (*Free On Board* (FOB) [38]. También se calcula la depreciación de los equipos, considerando una vida útil de 15 años, como lo expresa el servicio de impuestos internos [43].

Una vez que se realiza el flujo de caja, se calcula el valor actual neto (VAN) de comparación de cada alternativa. Con este parámetro se realiza la comparación: si el valor del VAN es positivo el proyecto es rentable, en caso contrario, no lo es.

Por otro lado se calcula la tasa interna de retorno (TIR), la cual corresponde a la tasa

de interés o de rentabilidad que nos ofrece la inversión, si el valor es superior a la tasa de descuento (5,4 %) [44] entonces el proyecto es rentable.

Con los resultados, se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros más relevantes. Estos son: (1) la cantidad mensual a disponer, (2) el precio del adhesivo y (3) la cantidad de partículas a descartar. Se varían estos parámetros en un 5 % y también se busca el punto de inflexión.

5.2. Resultados y discusiones evaluación económica

Se realiza una evaluación económica de la alternativa propuesta, en comparación al caso base actual.

En el flujo de caja, se genera una resta entre los costos de un mismo ámbito, debido a que se desea realizar una comparación entre los costos, y notar la disminución de estos. Si el resultado de la alternativa es menor, el costo se considera positivo para el calculo del VAN. Esto se ejemplifica de mejor manera en el Anexo B , donde se encuentra la planilla.

Bajo esta metodología, se obtiene un valor de USD 1.844.764, para el VAN de la alternativa en comparación al caso base. Este es un valor positivo, por lo que el proyecto se considera rentable. Por otro lado, se tiene un valor para la TIR de 543 %, lo que está sobre la tasa de descuento, por lo que se puede invertir en el proyecto y se obtiene la rentabilidad suficiente.

El detalle de los costos considerados para cada caso, se describe en la sección de metodología 5.1. Los más relevantes para el proyecto, los cuales tienen una diferencia entre caso base y alternativa son: (1) el costo mano de obra,(2) costo de disposición del lodo de cal, (3) el costo de compra de insumos y de consumibles.

En cuanto a los costos de mano de obra, se produce una diferencia entre caso base y alternativa, debido a la adición de un operador por turno para los nuevos equipos. El valor de esta diferencia es de USD 45.000, lo que implica un aumento del 25,8 % en los costos de mano de obra. Este efecto también se ve reflejado en los gastos generales fijos, dado que el cálculo de este costo depende directamente de los costos de mano de obra. Los costos fijos de este proyecto son mayores que en el caso base, generando un impacto en la evaluación, pero, que era esperado debido al aumento del personal.

Dentro de los costos variables, se tiene el costo por valorización del lodo de cal, lo que se realiza mediante la empresa Verdecorp. Debido a que la cantidad de lodo de cal que se dispone disminuye en un 88,4 %, los costos asociados disminuyen la misma cantidad, obteniéndose una diferencia de USD 127.267. En este caso, la diferencia es positiva dado que esta cantidad se ahorra en la alternativa.

Dentro de los insumos, la compra de carbonato de calcio disminuye significativamente, debido a que se reemplaza por lodo de cal. Se compra un 48,3 % menos de carbonato de calcio, lo que implica una diferencia de USD 477.765, que se ahorrarían con el proyecto.

El adhesivo, uno de los insumos con mayor valor, aumenta su precio debido a las modifi-

caciones necesarias para su uso con el lodo de cal. Dado que aún no se conoce la variación del precio de este, se estima que aumenta en un 5% para los efectos de la evaluación. A pesar de ser un valor pequeño, genera una gran diferencia en cuanto al costo, debido a su alto precio. Esta diferencia equivale a un valor de USD 204.388.

Los consumibles para este proyecto son el agua y la energía eléctrica. En el caso del agua, no hay una variación en la cantidad necesaria de esta, por lo que no hay variaciones dentro del flujo de caja y la diferencia es 0. La energía eléctrica sí presenta variaciones, debido a los nuevos equipos; en el caso base se gasta USD 2.837 menos que en la alternativa.

Debido a la disminución de la adquisición de carbonato de calcio y los costos de disposición, los costos de operación (OPEX) de la alternativa son USD 396.792 menores que en el caso base. Esto implica una diferencia en los costos de mantención, debido a que se calculan como el 20% del OPEX total.

Se puede notar que a pesar que el gasto de adhesivo, electricidad y mano de obra aumentan, estos son amortiguados por la cantidad de carbonato de calcio que ya no se compra y el costo de valorización que disminuyen. Esto se ve ejemplificado en el costo de operación (OPEX) de la alternativa, el cual es 5,9% menor que el del caso base.

A modo de resumen se presenta la Tabla 5.1, en ella se puede notar el precio de compra de carbonato de calcio con envío incluido, el precio de valorización del lodo de cal en forma de fertilizante, el OPEX con y sin el proyecto implementado, junto con, el valor obtenido para el VAN y la TIR.

Tabla 5.1: Resumen parámetros económicos relevantes

Resumen parámetros económicos relevantes		
Parámetro	Valor	Unidad
Precio carbonato	152	pesos/ton
Precio Valorización carbonato	30	usd/ton
OPEX s/proyecto	6.635.354	usd/año
OPEX c/ proyecto	6.238.562	usd/año
VAN	1.844.764	USD
TIR	543	%

En el caso de la alternativa, se consideran los costos de la inversión inicial, la cual contempla una serie de items y se define qué porcentaje del CAPEX del proyecto total representan, basado en las características del proyecto en bibliografía [38]. Estos se encuentran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Porcentajes y valores del cálculo del CAPEX.

Costos	Porcentaje	Valor	Moneda
Equipos	26 %	8.154	USD
Instalación de equipos	10 %	3.136	USD
Instrumentación y control	6 %	1.882	USD
<i>Piping</i>	17 %	5.332	USD
Instalación eléctrica	6 %	1.882	USD
Construcciones	0,5 %	157	USD
Ingeniería y supervisión	7 %	2.195	USD
Gastos de construcción	2,5 %	784	USD
Honorarios de contratistas	5 %	1.568	USD
Contingencia	20 %	6.272	USD
CAPEX total	100 %	31.360	USD

Se considera que los gastos principales del proyecto son los equipos, piping e instalación de equipos, esto debido a que como se están instalando en una planta ya construida y en funcionamiento, las otras categorías requieren menor inversión y trabajo.

Se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros que se consideran más relevante y que podrían generar algún cambio drástico en el proyecto.

La cantidad de carbonato que se dispone, es variable y es discontinua, por esta razón, se analiza este parámetro. Al modificar la cantidad a disponer, en un 5 %, se produce una variación en el VAN de 10,5 % por lo que el parámetro es sensible a los cambios de cantidad de lodo de cal pero no drásticamente, por lo que se considera que a pesar de que exista variabilidad en el parámetro y que esta afecte al proyecto, no es un impedimento para realizarlo, ni tampoco generaría pérdidas. En cuanto al punto de inflexión este se encuentra en 210 toneladas al mes, hay un margen de aproximadamente 50 %, por lo que se apoya lo dicho anteriormente.

A pesar de que la cantidad de partículas gruesas enviadas a Verdecorp se calculan experimentalmente, se cree que se pueden generar variaciones dependiendo de la efectividad del tamiz, ya que se pueden generar aglomeraciones que impida que traspase las mismas cantidad de partículas cada vez que se utilice, aun que esto se puede prevenir con el correcto uso del equipo. Al realizar variaciones de 5 % hay variaciones de 2 % en el VAN, por lo que el proyecto no es muy sensible a este parámetro. Por esta misma razón, el punto de inflexión es bastante alto, y equivale a un 57,8 % de partículas destinadas a Verdecorp. Se concluye, que a pesar de las posibles pérdidas, no existe gran impacto en el proyecto.

Como no se conoce el precio exacto de la nueva formulación del adhesivo, este es un factor que podría afectar el resultado de la evaluación económica. Al modificar el precio en un 5 % el valor del VAN cambia drásticamente, en un 41,6 % por lo que el proyecto depende fuertemente de el valor del adhesivo, siendo el valor máximo que puede tomar un 10 % más del valor actual.

Capítulo 6

Conclusiones

El objetivo general de esta memoria es realizar una evaluación técnica y económica de la utilización de carbonato de calcio, proveniente del proceso de caustificación en la producción de celulosa, en la pasta de trefila de la industria de la remanufactura de paneles. Esto se logra llevar a cabo y se concluye que existe factibilidad, tanto técnica como económica, de llevar a cabo el proyecto de reutilización del lodo de cal.

Dentro de los objetivos específicos se encuentra el determinar la cantidad y la calidad del lodo de cal y polvo PPT. Con este fin, se realiza un balance de lo entregado por planta Arauco, junto con lo requerido por planta Trupan. Además, se realiza una caracterización química comparativa entre los residuos y el carbonato de calcio utilizado normalmente de la marca Trucco. Esta información se expresa en el marco teórico, debido a que era una tarea primordial para el correcto desarrollo de los ensayos de laboratorio y la continuidad del proyecto. La planta Arauco y Nueva aldea logran cumplir con los requerimientos de planta Trupan. En cuanto a la calidad del carbonato existe una alta presencia de calcio y cercana en comparación al carbonato Trucco, con alta pureza.

Se realizan ensayos de laboratorio con el objetivo de encontrar el punto de mezcla, se llega a la conclusión que no existe el punto de mezcla con los ingredientes actuales de la pasta. Esto debido a que existe una incompatibilidad entre los residuos y el adhesivo, la cual se produce debido a el pH alcalino que presentan los primeros, que genera una reacción ácido base con el adhesivo que posee un pH ácido. Sin embargo, esto no impide la factibilidad técnica, debido a que se descubre que al tamizar el lodo de cal el pH baja, debido a que retira las partículas de hidróxido de sodio presentes.

A pesar de solucionar la incompatibilidad descubierta, aún existe problemas de saturación en la pasta, la cual ocurre debido a la forma de la partícula del lodo de cal, que provoca una mayor absorción de agua. Se propone la creación de un nuevo adhesivo, al cual se le agrega humectante, para que así se pueda utilizar con lodo de cal.

Se desea determinar la cantidad de carbonato de calcio a utilizar a nivel industrial. Se debe destacar que gracias a los ensayos de laboratorio realizados, se descarta el uso de lodo de cal y polvo PPT proveniente de Nueva aldea, debido al color que presenta. Tomando en cuenta el balance realizado, y que solo la planta Arauco presenta factibilidad técnica, se propone la utilización de 400 toneladas al mes de carbonato de calcio a nivel industrial. Estas deben

ser complementadas con carbonato Trucco, para cumplir los requerimientos y adecuadas, mediante un proceso diseñado.

Además de la incompatibilidad, los principales inconvenientes que presenta el lodo de cal para ser utilizado son la humedad y la granulometría. Por ende, se diseña un proceso teórico que corrige estos parámetros, este consiste en un secador rotatorio y un tamizador que entregan lodo de cal (carbonato de calcio) listo para ser utilizado como materia prima.

En este caso, debido a que no se encuentra el óptimo de mezcla, solo se tiene una alternativa que es la aplicación del proceso teórico, con la modificación del adhesivo. Se realiza una evaluación económica del caso actual, en comparación a la implementación del proceso teórico de modificación del lodo de cal. Esta entrega un valor de VAN de 1.844.764 y de TIR de 543%, por lo que se concluye que es un proyecto rentable.

Se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros más relevante, de lo que se concluye que el proyecto depende, en gran medida, de la variación en el precio del adhesivo. También es sensible a la cantidad a disponer, mientras que, a cambios en la cantidad destinada a valorización es solo un 1% sensible.

Finalmente, se concluye que es viable realizar el proyecto debido a su factibilidad técnica y económica, sin embargo se hace necesario seguir evaluando, escalando el nivel de las pruebas.

Bibliografía

- [1] Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, “Mejores prácticas para la gestión de residuos sólidos: Una Guía para los responsables de la toma de decisiones en los países en vías de desarrollo”, Abt Associates, EPA 530-R-20-002-S, octubre de 2020. [En línea]. Disponible: https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-02/documents/swm_guide-spanish-reducedfilesize_pubnumber_october.pdf
- [2] Instituto Forestal (INFOR), “El sector forestal chileno 2019”, Ministerio de agricultura, ISSN 2452-5987, 2020. Accedido el 28 de abril de 2022. [En línea]. Disponible: https://wef.infor.cl/publicaciones/sector_forestal/2019/SectorForestal_2019.pdf
- [3] Instituto Forestal (INFOR), “Anuario forestal 2021”, Ministerio de agricultura, ISSN 2454-4360, septiembre de 2021. [En línea]. Disponible: <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/31292>
- [4] “Visita industrial a planta de celulosa arauco nueva aldea. - noticias”. Departamento ingeniería industrial universidad del Bío bío, Chile. <http://industrial.ubiobio.cl/web/noticias/visita-industrial-a-planta-de-celulosa-arauco-nueva-aldea/> (accedido el 2 de diciembre de 2021).
- [5] C. Sánchez, “Optimización del nivel de inventarios de pulpa de celulosa en el proceso productiv”, trabajo de grado, Universidad de Chile, Santiago, 2017. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/148342/Optimizacion-del-nivel-de-inventarios-de-pulpa-de-celulosa-en-el-proceso-productivo.pdf?sequence=1>
- [6] A. Laroze y G. Ortiz, “Evolución de la producción de celulosa en Chile (1990-2006)”, a Oficina de Estudios y Políticas Agrarias – ODEPA, I.S.S.N. 0717-0386, julio de 2007. [En línea]. Disponible: <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos/evolucion-de-la-produccion-de-celulosa-en-chile-1990-2006-2>
- [7] L. Lopez, “Estudio técnico y económico para mejorar la confiabilidad del transportador auxiliar de cal, horno de cal línea 2. celulosa arauco”, trabajo de grado, Universidad técnica Federico Santa María, Concepción, 2018. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/46233/3560901550047UTFSM.pdf?sequence=1>
- [8] M. J. Quina y C. T. Pinheiro, “Inorganic waste generated in kraft pulp mills: The transition from landfill to industrial applications”, Applied Sciences, vol. 10, n.º 7, p. 2317, marzo de 2020. Accedido el 2 de Diciembre de 2021. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/app10072317>
- [9] M. Oyarce, “Plan de mantenimiento de Precipitadores Electroestáticos de una planta de celulosa”, trabajo de grado, Universidad del bío-bío, Concepción, 2014. [En línea]. Disponible: http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1086/1/Oyarce_Olavarria_Mario_Gonzalo.pdf

- [10] T. Kinnarinen, M. Golmaei, E. Jernström y A. Häkkinen, “Separation, treatment and utilization of inorganic residues of chemical pulp mills”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 133, pp. 953–964, octubre de 2016. Accedido el 13 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.024>
- [11] J. Qin, C. Cui, X. Cui, A. Hussain, C. Yang y S. Yang, “Recycling of lime mud and fly ash for fabrication of anorthite ceramic at low sintering temperature”, *Ceramics International*, vol. 41, n.º 4, pp. 5648–5655, mayo de 2015. Accedido el 14 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.149>
- [12] R. M. P. Farage, C. M. Silva, A. A. Passos Rezende, J. J. Lelis Leal de Souza, A. Teixeira de Matos y A. J. Vinha Zanuncio, “Intermediate covering of municipal solid waste landfills with alkaline grits, dregs and lime mud by-products of kraft pulp production”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 239, p. 117985, diciembre de 2019. Accedido el 14 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117985>
- [13] M. Mahmoudkhani, T. Richards y H. Theliander, “Recycling of Solid Residues to the Forest”, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 82, n.º 3, pp. 230–237, mayo de 2004. Accedido el 14 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1205/095758204323065993>
- [14] “Información técnica de producto: Polvo de carbonato de calcio T5Tr”, Minera Trucco, 2007.
- [15] M. Suhr et al., *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board*. Luxemburgo: Joint Research Centre, 2015. [En línea]. Disponible: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/PP_revised_BREF_2015.pdf
- [16] S. Royer-Tardif, J. Whalen y D. Rivest, “Can alkaline residuals from the pulp and paper industry neutralize acidity in forest soils without increasing greenhouse gas emissions?”, *Science of the Total Environment*, vol. 663, pp. 537–547, mayo de 2019. Accedido el 15 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.337>
- [17] H. Eroglu, H. H. A. ., O. U. . y S. I. ., “Soil stabilization of forest roads sub-base using lime mud waste from the chemical recovery process in alkaline pulp mill”, *Journal of Applied Sciences*, vol. 6, n.º 5, pp. 1199–1203, febrero de 2006. Accedido el 15 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3923/jas.2006.1199.1203>
- [18] L. Simão, D. Hotza, F. Raupp-Pereira, J. A. Labrincha y O. R. K. Montedo, “Wastes from pulp and paper mills - a review of generation and recycling alternatives”, *Cerâmica*, vol. 64, n.º 371, pp. 443–453, septiembre de 2018. Accedido el 15 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643712414>
- [19] J. Lima y C. Farías, “Estudio de caracterización de la cadena de producción y comercialización de la industria forestal: Estructura, agentes y prácticas”, *Oficina de estudios y políticas agrarias del ministerio de agricultura (ODEPA)*, Santiago, diciembre de 2016. Accedido el 9 de septiembre de 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/InformeIndustriaForestal2016.pdf>
- [20] J. Tohar y B. Ruiz, “Ampliación línea molduras MASISA S.A., planta cabrero”, *Comisión regional del medio ambiente de la viii región del bio bio*, Concepción, Resolución Exenta N° 206, julio de 2005. Accedido el 9 de septiembre de 2021. [En línea]. Disponible: <https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=46/64/1c93367d6f9>

- [21] C. Anabalón, "Informe prueba de carbonato caustificación plantas de celulosa", Paneles Arauco, Cholguan, mayo de 2021.
- [22] L. H. Buruberri, M. P. Seabra y J. A. Labrincha, "Preparation of clinker from paper pulp industry wastes", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 286, pp. 252–260, abril de 2015. Accedido el 16 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.053>
- [23] R. Sarkar, R. Kurar, A. K. Gupta, A. Mudgal, V. Gupta y S. K. Shukla, "Use of paper mill waste for brick making", *Cogent Engineering*, vol. 4, n.º 1, p. 1405768, enero de 2017. Accedido el 16 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1405768>
- [24] H. Vu et al., "Utilization of lime mud waste from paper mills for efficient phosphorus removal", *Sustainability*, vol. 11, n.º 6, p. 1524, marzo de 2019. Accedido el 16 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/su11061524>
- [25] Y. Li, R. Sun, J. Zhao, K. Han y C. Lu, "Sulfation behavior of white mud from paper manufacture as SO₂ sorbent at fluidized bed combustion temperatures", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 107, n.º 1, pp. 241–248, abril de 2011. Accedido el 16 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1537-2>
- [26] S. Royer-Tardif, J. Whalen y D. Rivest, "Can alkaline residuals from the pulp and paper industry neutralize acidity in forest soils without increasing greenhouse gas emissions?", *Science of the Total Environment*, vol. 663, pp. 537–547, mayo de 2019. Accedido el 16 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.337>
- [27] H. Li, S. Niu, C. Lu, M. Liu y M. Huo, "Transesterification catalyzed by industrial waste—Lime mud doped with potassium fluoride and the kinetic calculation", *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 1110–1117, octubre de 2014. Accedido el 16 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.082>
- [28] J. Shen, P. Fatehi, P. Soleimani y Y. Ni, "Recovery of lignocelluloses from pre-hydrolysis liquor in the lime kiln of kraft-based dissolving pulp production process by adsorption to lime mud", *Bioresource Technology*, vol. 102, n.º 21, pp. 10035–10039, noviembre de 2011. Accedido el 16 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.058>
- [29] R. M. Mohsen, "Effect of calcium carbonate filler on polyvinyl acetate emulsion as wood adhesive", *Pigment & Resin Technology*, vol. 21, n.º 10, pp. 10–11, octubre de 1992. Accedido el 16 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1108/eb042981>
- [30] G. A. Sabirova, R. R. Safin y N. R. Galyavetdinov, "Effect of wood filler concentration on physical and mechanical properties of pla-based composites", *Key Engineering Materials*, vol. 887, pp. 110–115, mayo de 2021. Accedido el 16 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.887.110>
- [31] V. Kovačević, S. Lučić, D. Hace, A. Glasnović, I. Šmit y M. Bravar, "Investigation of the influence of fillers on the properties of poly(vinyl acetate) adhesives", *The Journal of Adhesion*, vol. 47, n.º 1-3, pp. 201–215, septiembre de 1994. Accedido el 16 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1080/00218469408027100>
- [32] O. Camlibel, "Effect of calcite addition on technical properties and reduction of for-

- maldehyde emissions of medium density fiberboard”, BioResources, vol. 16, n.º 2, pp. 3718–3733, abril de 2021. Accedido el 16 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.15376/biores.16.2.3718-3733>
- [33] Y. Tao, P. Li, L. Cai y S. Q. Shi, “Flammability and mechanical properties of composites fabricated with CaCO₃-filled pine flakes and Phenol Formaldehyde resin”, Composites Part B: Engineering, vol. 167, pp. 1–6, junio de 2019. Accedido el 16 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.005>
- [34] Y. Martínez López, J. B. Paes y E. Martínez Rodríguez, “Propiedades ignífugas de tableros de madera plástica producidos con diferentes especies forestales y termoplásticos reciclados”, Madera y Bosques, vol. 24, n.º 2, junio de 2018. Accedido el 16 de junio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421495>
- [35] M. Salazar. “Proyecto de la Universidad de Concepción modifica químicamente la madera para retardar su combustión”. Madera 21. <https://www.madera21.cl/blog/2020/03/02/proyecto-de-la-universidad-de-concepcion-modifica-quimicamente-la-madera-para-retardar-su-combustion/> (accedido el 16 de junio de 2022).
- [36] “Este es arauco archivo - arauco chile”. Arauco Chile. https://www.arauco.cl/chile/este_es_arauco/ (accedido el 17 de junio de 2022).
- [37] “Equipo pruebas de molienda - grindometro - printex - solo lo mejor”. Printex. <https://www.printex.net/equipo-pruebas-de-molienda-grindometro/> (accedido el 7 de septiembre de 2022).
- [38] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus y R. E. West, Plant Design and Economics for Chemical Engineers. McGraw Hill Higher Education, 2007.
- [39] Aguas andinas, “Tarifas vigentes aguas andinas”, Santiago, mayo de 2022. Accedido el 29 de julio de 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.aguasandinas.cl/documents/20450/52092/Tarifas%20Vigentes%20Aguas%20Andinas>
- [40] Comisión nacional de energía, “Precio medio de mercado sistema eléctrico nacional”, abril de 2022. Accedido el 21 de julio de 2022. [En línea]. Disponible: https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2022/08/Precio_Medio_de_Mercado-08_22.pdf
- [41] “Nuevo Tipo De China Secador De Cilindro Rotativo - Buy Secador De Cilindro Rotativo, Secador De Cilindro Rotativo, Secador De Cilindro Rotativo Product on Alibaba.com”. Alibaba.com: Manufacturers, Suppliers, Exporters Importers from the world’s largest online B2B marketplace. https://www.alibaba.com/product-detail/Nuevo-tipo-de-China-secador-de_60041178169.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.11467f39C0Nu9t (accedido el 2 de agosto de 2022).
- [42] “Industrial Sifter Separator Vibrator Sieve Vibrating Screen Machines - Buy Industrial Sifter, Vibrating Screen, Industrial Vibrating Sieve Product on Alibaba.com”. Alibaba.com: Manufacturers, Suppliers, Exporters Importers from the world’s largest online B2B marketplace. https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-Sifter-Industrial-Sifter-Separator-Vibrator_1600448473926.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.174548bb8Zm0Dq&s=p (accedido el 6 de septiembre de 2022).
- [43] Servicio de Impuestos Internos - Chile. https://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm (accedido el 29 de julio de 2022).
- [44] BSO chile, “Estudio tasas de descuento”, Santiago, Reporte 23, 2022.

Anexos

Anexo A. Balance de masas

En el presente anexo, se muestra la memoria de cálculo del balance de masas para el proceso teórico de modificación del lodo de cal.

Inicialmente se tiene un secador rotatorio, a este ingresa el lodo de cal con una humedad variable e ingresa aire. A la salida del equipo existe una corriente con lodo de cal seco y otra con aire húmedo. En la Figura A.1 se puede observar la operación unitaria con sus corrientes.

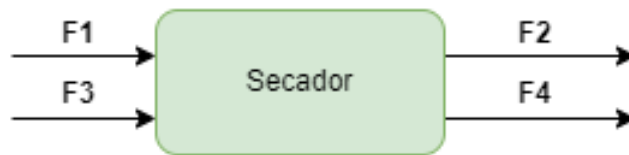


Figura A.1: Diagrama de bloques secador.

La corriente F1 es la entrada de lodo de cal, con 30 % de humedad, esta humedad puede variar a lo largo del proceso, pero se selecciono este valor como una aproximación de los obtenidos de las muestras de los ensayos de laboratorio. La corriente F3, es la entrada de aire. La salida F2, contiene lodo de cal seco, mientras que la salida F4 contiene aire húmedo.

Se calcula el flujo de entrada de lodo de cal. Esto se realiza cuantificando las 400 toneladas mensuales que actualmente desecha la planta Arauco, tomando en cuenta, que se trabaja en continuo, es decir, las 24 horas y todos los días del mes. El cálculo se muestra en la ecuación A.1 .

$$F_{entrada} = \frac{400 \left[\frac{ton}{mes} \right]}{30 \left[\frac{dia}{mes} \right] \cdot 24 \left[\frac{h}{dia} \right]} = 0,5 \left[\frac{ton}{h} \right] \quad (A.1)$$

Junto con este dato se tiene que la humedad de entrada es de 30 %, como ya se mencionó. Además, se desea imponer la condición que el lodo salga del proceso con una humedad de 0,6 %.

Se realiza un balance de masas de la cantidad de solido, el cual se muestra en la Ecuación A.2

$$X_{1,lodo} \cdot F_1 = X_{2,lodo} \cdot F_2 \quad (A.2)$$

Como se tiene los valores de la humedad en base seca, se conoce la fracción de lodo presente en la corrientes. Realizando la resta de un 100 %. Reemplazando en la Ecuación A.2 se obtiene lo siguiente.

$$0,7 \cdot 0,5 \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] = 0,994 \cdot F_2$$

$$F_2 = \frac{0,7 \cdot 0,5 \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]}{0,994}$$

$$F_2 = 0,39 \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]$$

El objetivo de este balance era encontrar el valor de la corriente 2, para dimensionar los equipos a continuación, por esta razón el balance se deja hasta acá y no se calcula la corriente de aire, debido a que no es una dimensión característica para la elección del secador rotatorio.

Posteriormente se continua con la etapa de selección de tamaños. Esto se representa en el diagrama de la Figura A.2.

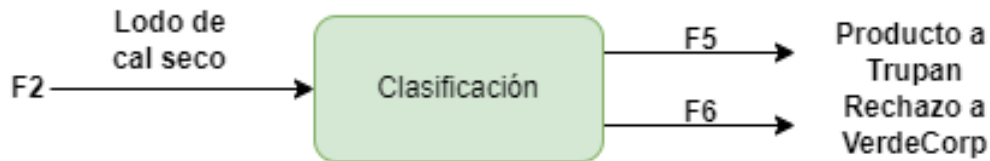


Figura A.2: Diagrama de bloques de clasificación de tamaños.

Para este balance, se tiene el valor del flujo 2 del proceso anterior. Por otro lado, se considera que según los ensayos de tamiz realizados el 83,4 % de las partículas de lodo de cal pasan a través de la malla 120. Con esto el sistema queda totalmente determinado.

Con estos valores, se calcula la corrientes de salida hacia Trupan como se muestra en la Ecuación A.3.

$$F_5 = F_2 \cdot 83,4\% \tag{A.3}$$

$$F_5 = 0,39 \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] \cdot 0,834$$

$$F_5 = 0,32 \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]$$

También se puede calcular la corriente que va hacia valorización en Verdecorp, como se muestra en la Ecuación A.4

$$F_6 = F_2 \cdot (1 - 83,4\%) \tag{A.4}$$

$$F_6 = 0,39 \left[\frac{ton}{h} \right] \cdot 0,166$$

$$F_6 = 0,07 \left[\frac{ton}{h} \right]$$

Anexo B. Planilla evaluación económica

Se muestra la planilla del flujo de caja para la evaluación económica en las Figuras B.1, B.2 y B.3.

II. Flujo Incrementales	Unidades	VAN													
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Costos fijos	Usd/año	-49500	-34500	-34500	-34500	-34500	-34500	-34500	-34500	-34500	-34500	-34500	-34500	-34500	-34500
Costo mano de obra s/ proyecto	Usd/año	-174000	-174000	-174000	-174000	-174000	-174000	-174000	-174000	-174000	-174000	-174000	-174000	-174000	-174000
Costo de mano de obra c/ proyecto	Usd/año	-219000	-204000	-204000	-204000	-204000	-204000	-204000	-204000	-204000	-204000	-204000	-204000	-204000	-204000
	Usd/año	-45000	-30000	-30000	-30000	-30000	-30000	-30000	-30000	-30000	-30000	-30000	-30000	-30000	-30000
Gastos generales fijos s/proyecto	Usd/año	-17400	-17400	-17400	-17400	-17400	-17400	-17400	-17400	-17400	-17400	-17400	-17400	-17400	-17400
Gastos generales fijos c/proyecto	Usd/año	-21900	-21900	-21900	-21900	-21900	-21900	-21900	-21900	-21900	-21900	-21900	-21900	-21900	-21900
	Usd/año	-4900	-4500	-4500	-4500	-4500	-4500	-4500	-4500	-4500	-4500	-4500	-4500	-4500	-4500
Costo Variable	Usd/año	318,329.82	337,022.37	337,022.37	337,022.37	337,022.37	337,022.37	337,022.37	337,022.37	337,022.37	337,022.37	337,022.37	337,022.37	337,022.37	337,022.37
Costo disposición s/ proyecto	Usd/año	-144000	-144000	-144000	-144000	-144000	-144000	-144000	-144000	-144000	-144000	-144000	-144000	-144000	-144000
Costo disposición c/ proyecto	Usd/año	-16732.8	-16732.8	-16732.8	-16732.8	-16732.8	-16732.8	-16732.8	-16732.8	-16732.8	-16732.8	-16732.8	-16732.8	-16732.8	-16732.8
	Usd/año	127267.2	127267.2	127267.2	127267.2	127267.2	127267.2	127267.2	127267.2	127267.2	127267.2	127267.2	127267.2	127267.2	127267.2
Costo Carbonato Truco s/ proyecto	Usd/año	-1,228,540.19	-1,228,540.19	-1,228,540.19	-1,228,540.19	-1,228,540.19	-1,228,540.19	-1,228,540.19	-1,228,540.19	-1,228,540.19	-1,228,540.19	-1,228,540.19	-1,228,540.19	-1,228,540.19	-1,228,540.19
Costo Carbonato Truco c/ proyecto	Usd/año	-750.775	-750.775	-750.775	-750.775	-750.775	-750.775	-750.775	-750.775	-750.775	-750.775	-750.775	-750.775	-750.775	-750.775
	Usd/año	477,765.63	477,765.63	477,765.63	477,765.63	477,765.63	477,765.63	477,765.63	477,765.63	477,765.63	477,765.63	477,765.63	477,765.63	477,765.63	477,765.63
Costo adhesivo s/ proyecto	Usd/año	-4087764.837	-4087764.837	-4087764.837	-4087764.837	-4087764.837	-4087764.837	-4087764.837	-4087764.837	-4087764.837	-4087764.837	-4087764.837	-4087764.837	-4087764.837	-4087764.837
Costo adhesivo c/ proyecto	Usd/año	-4292153.079	-4292153.079	-4292153.079	-4292153.079	-4292153.079	-4292153.079	-4292153.079	-4292153.079	-4292153.079	-4292153.079	-4292153.079	-4292153.079	-4292153.079	-4292153.079
	Usd/año	204388.2419	204388.2419	204388.2419	204388.2419	204388.2419	204388.2419	204388.2419	204388.2419	204388.2419	204388.2419	204388.2419	204388.2419	204388.2419	204388.2419
Costo energía eléctrica s/ proyecto	Usd/año	-16645.16807	-16645.16807	-16645.16807	-16645.16807	-16645.16807	-16645.16807	-16645.16807	-16645.16807	-16645.16807	-16645.16807	-16645.16807	-16645.16807	-16645.16807	-16645.16807
Costo energía eléctrica c/ proyecto	Usd/año	-19482.41263	-19482.41263	-19482.41263	-19482.41263	-19482.41263	-19482.41263	-19482.41263	-19482.41263	-19482.41263	-19482.41263	-19482.41263	-19482.41263	-19482.41263	-19482.41263
	Usd/año	2837,244558	2837,244558	2837,244558	2837,244558	2837,244558	2837,244558	2837,244558	2837,244558	2837,244558	2837,244558	2837,244558	2837,244558	2837,244558	2837,244558
Costo agua s/ proyecto	Usd/año	-1046.444651	-1046.444651	-1046.444651	-1046.444651	-1046.444651	-1046.444651	-1046.444651	-1046.444651	-1046.444651	-1046.444651	-1046.444651	-1046.444651	-1046.444651	-1046.444651
Costo agua c/ proyecto	Usd/año	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo mantenimiento s/proyecto	Usd/año	-1078895.606	-1078895.606	-1078895.606	-1078895.606	-1078895.606	-1078895.606	-1078895.606	-1078895.606	-1078895.606	-1078895.606	-1078895.606	-1078895.606	-1078895.606	-1078895.606
Costo mantenimiento c/proyecto	Usd/año	-1079910.403	-1061217.859	-1061217.859	-1061217.859	-1061217.859	-1061217.859	-1061217.859	-1061217.859	-1061217.859	-1061217.859	-1061217.859	-1061217.859	-1061217.859	-1061217.859
	Usd/año	1014,796633	17677,74737	17677,74737	17677,74737	17677,74737	17677,74737	17677,74737	17677,74737	17677,74737	17677,74737	17677,74737	17677,74737	17677,74737	17677,74737
Costo transporte todo s/proyecto	Usd/año	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo transporte todo c/proyecto	Usd/año	-78462.72	-78462.72	-78462.72	-78462.72	-78462.72	-78462.72	-78462.72	-78462.72	-78462.72	-78462.72	-78462.72	-78462.72	-78462.72	-78462.72

Figura B.1: Flujo de caja

	Usd/año	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	
BRUTA																			
Depreciación	Usd/año	268.829,82	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37	302.522,37
Depreciación s/prov.	Usd/año	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación c/prov.	Usd/año	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44	-3261,44
EBIT	Usd/año	265.568,38	299.260,93	299.260,93	299.260,93	299.260,93	299.260,93	299.260,93	299.260,93	299.260,93	299.260,93	299.260,93	299.260,93	299.260,93	299.260,93	299.260,93	299.260,93	299.260,93	299.260,93
Impuesto	Usd/año	-71703,46391	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079	-80800,45079
MOPAT	Usd/año	193.864,92	218.460,48	218.460,48	218.460,48	218.460,48	218.460,48	218.460,48	218.460,48	218.460,48	218.460,48	218.460,48	218.460,48	218.460,48	218.460,48	218.460,48	218.460,48	218.460,48	218.460,48
TIR																			
Depreciación	Usd/año	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44	3261,44
Inversión	Usd/año	-31360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IVA Inversión	Usd/año	-5958,4	5958,4																
Recuperación del IVA de inversión	Usd/año																		
FCF	Usd/año	-31360	159.807,96	227.680,32	221.721,92	221.721,92	221.721,92	221.721,92	221.721,92	221.721,92	221.721,92	221.721,92	221.721,92	221.721,92	221.721,92	221.721,92	221.721,92	221.721,92	221.721,92

Figura B.2: Flujo de caja

Tasa de descuento	real anual	5%
VAN	USD	1.844.764
TIR	real anual	543%

Figura B.3: Resultados VAN y TIR.