UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

SEDE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA Y MEDIO AMBIENTE

Evaluación de factibilidad para la creación de una empresa de reciclaje de PVB a partir de residuos de vidrio laminado.

Trabajo de titulación para optar al título profesional de: Ingeniero de Ejecución en Química Mención Control.

Alumno:

Gustavo Pino Nova

Profesor Guía:

Prof. Juan Pablo Inostroza Saldias

2024

AGRADECIMIENTOS

Mis primeros agradecimientos siempre serán a Dios, quién me permitió cumplir este esquivo y pendiente anhelo en mi vida, dándome la fuerza necesaria para no rendirme y seguir creyendo pese a las dificultades. Sin duda no fue un camino fácil, pero Él no sólo me acompañó y guio en todo momento, sino también me regaló una hermosa familia a quienes dedico este importante logro, siempre han sido pilares fundamentales en mi crecimiento y desarrollo a lo largo de mi vida, en especial a mis padres Laura y Gustavo que siempre han estado junto a mí, para animarme y alentarme cuando el camino se ha tornado difícil y con su esfuerzo, dedicación, amor permanente y constantes oraciones, han hecho de mi un hombre de bien, que hoy con la obtención de este título profesional, retribuye en parte esa confianza incondicional y esfuerzo incansable.

Gracias a mis hermanas Poulet y Marlyn, sin las cuales tampoco hubiese alcanzado este objetivo, han sido siempre una motivación a superarme y a ser mejor cada día.

Agradezco también de manera muy especial a mis abuelos, que siempre me han hecho sentir su amor, apoyo y preocupación, esos abrazos tan sinceros y esas permanentes oraciones, han sido mi fortaleza en innumerables ocasiones.

Para finalizar, cómo no recordar a los que ya partieron, pero que llevo siempre en mi memoria y corazón. Mi abuelo Luis y especialmente a mis abuelos Luisa y Gustavo, esto también es para ustedes que siempre creyeron en su nieto de forma incondicional y aunque ya no están físicamente, siempre han sido y serán parte de mí.

¡¡¡A todos ustedes, infinitas gracias!!!

RESUMEN

El constante crecimiento de la industria inmobiliaria, la tendencia a la construcción de edificios y rascacielos, así como también la evolución de los centros comerciales con grandes vitrinas, fachadas de vidrio y numerosas lucernas, ha llevado a generar nuevas regulaciones en materia de seguridad para este tipo de arquitectura. Esto ha dado lugar a un gran aumento en la demanda de vidrio laminado, cuyo principal componente además del vidrio monolítico, es la inter lámina que lo dota de inigualables cualidades de resistencia al impacto y rotura.

Esta tan especial inter lámina, no es otra cosa que un polímero llamado Butiral de Polivinilo, o más conocido en la industria del vidrio laminado como PVB.

Lamentablemente este versátil material, es también un desecho generado permanentemente en la producción de vidrio laminado, y que, al no ser biodegradable, se cataloga como un residuo sólido nada amigable con el medio ambiente, que impacta negativamente el recurso suelo.

Este proyecto evalúa la factibilidad técnica, medio ambiental y económica para la creación de una planta de reciclaje de PVB, a partir de los antecedentes provistos por la Subgerencia de Calidad, Medio ambiente, Salud y Seguridad de la empresa Vidrios Lirquén S.A., cuya línea de producción de vidrio laminado genera mensualmente alrededor de 2.1 toneladas de PVB incoloro, el cual es dispuesto en relleno sanitario Copiulemu bajo el concepto de "Basura industrial".

Esta evaluación mostró como resultado que, con respecto a la factibilidad técnica, de acuerdo con estudios realizados por el CIPA a muestras de este residuo provistas por la empresa Vidrios Lirquén, la mejor performance se obtuvo generando una mezcla en 30/70 de PVB/PEBD, obteniendo mediante extrusión pellets comercializables como materia prima para la producción de una amplia gama de productos, validando así la reprocesabilidad de este residuo para generar nuevos productos con valor agregado.

Con respecto a la factibilidad medio ambiental, la evaluación mostró el impacto positivo que tendría el reciclaje de este residuo, evitando así la contaminación del recurso suelo, disminuyendo la huella de carbono asociada actualmente a la disposición final de este residuo, contribuyendo a la economía circular y cumplimientos de normas medio ambientales como la Ley REP y el DS N°148.

Por último, el análisis de flujo de caja en una proyección a 5 años mostró un resultado, si bien moderado, con rentabilidad positiva, obteniendo un VAN de $ 14.981.578, a una tasa de descuento del 15% y una TIR del 20%.

El proyecto es factible técnica, medio ambiental y económicamente.

ÍNDICE DE MATERIAS

INTRODUCCIÓN 1
OBJETIVOS 2
Objetivo General 2
Objetivos Específicos 2
ALCANCE DEL PROYECTO 3
CAPÍTULO 1: BUTIRAL DE POLIVINILO, SUS APLICACIONES E IMPACTO AMBIENTAL 4
1. BUTIRAL DE POLIVINILO 5
Figura 1-1 Estructuras PVB, PVA y PVAc 5
1.1 Polimerización 6
Figura 1-2. Resina de Butiral de polivinilo 6
1.2 Química de Post polimerización 7
1.3 Propiedades físicas 7
1.4 Su desarrollo industrial 8
1.1 EL PVB EN LA INDUSTRIA DEL VIDRIO LAMINADO 9
Tabla 1-1. Principales propiedades del PVB comercial. 9
1.2 VIDRIO LAMINADO 10
Figura 1-3. Vidrio laminado 10
Figura 1-4. Aplicaciones del vidrio laminado. 12
..... 12
1.3 IMPACTO MEDIOAMBIENTAL 12
Tabla 1-2. Toneladas de PVB enviadas a Landfill Planta Copiulemu 14
Tabla 1-3. Matriz Evaluación de Impacto Ambiental Vidrios Lirquén. 14
CAPÍTULO 2: IMPACTO ECONÓMICO Y ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD 15
2. IMPACTO ECONÓMICO 16
Tabla 2-1. Costos asociados a disposición residuos PVB en relleno sanitario 16
Figura 2-1. Maxi saco con residuos de PVB 16
Tablas 2-2. Costos reales pagados por cada ítem para disposición residuos PVB en relleno sanitario 17
2.1 EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD 17
2.2.1. Análisis Pestel 18
Factores Económicos 18
Factores Sociales 18
Factores Tecnológicos 19
Factores Ecológicos 19
Factores Legales 20
2.2.2. Factibilidad Técnica 20
2.2.2.1. Evaluación técnica de reprocesabilidad 20
Figura 2-2. Muestra de PVB recibida por el CIPA 21
Tabla 2-3. Torque de mezclado de muestras de PVBr con PEBD. 22
Figura 2-3. Mezclas y curvas de mezclado de PVBr con PEBD. T45DP50 (arriba) y T45DP70 (abajo). 22

Figura 2-4. Modelo ilustrativo de hoja técnica propuesto por CIPA 23
2.2.2.2 Extrusión de pellets de mezcla PVBr-PEBD 23
Figura 2-5. Alimentación de PVBr picado y PEBD virgen (izquierda) y pellets de mezcla T45DP70 obtenidos vía extrusión (derecha). 24
2.2.3. Aplicaciones potenciales 24
2.2.4 Factibilidad económica 25
Inversiones iniciales (Costos fijos) 25
Costos operativos 25
Ingresos estimados 25
Rentabilidad 25
Análisis de sensibilidad y escenarios 25
2.2.4.1. Evaluación factibilidad económica 26
2.2.4.2. Detalle de costos y Flujo de caja 26
Tabla 2-4. Detalle inversión inicial y costos anuales del proyecto (USD) 26
2.2.4.3. Análisis del Flujo de caja 27
Figura 2-6. Gráfico TPM último semestre 2024. 27
Figura 2-7. Gráfico Tasa de interés comerciales promedio. 28
Figura 2-8. Comportamiento del VAN a diferentes Tasas de descuento. 29
Figura 2-9. Gráfico del comportamiento del VAN con respecto a la variación de la tasa de descuento. 29
Figura 2-10. Grafico Flujos netos efectivos anuales del proyecto. 30
2.2.2.4. Beneficios ambientales y sociales 30
2.2.2.5. Resumen resultados factibilidad económica 31
Tabla 2-5. Resumen indicadores económicos del proyecto 31
CONCLUSIONES 32
BIBLIOGRAFÍA 33
ANEXOS 34
ANEXO A: FLUJO DE CAJA 35
ANEXO B: EQUIPOS 37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Estructuras PVB, PVA y PVAc 5
Figura 1-2. Resina de Butiral de polivinilo 6
Figura 1-3. Vidrio laminado 10
Figura 1-4. Aplicaciones del vidrio laminado. 12
..... 12
Figura 2-1. Maxi saco con residuos de PVB 16
Figura 2-2. Muestra de PVB recibida por el CIPA 21
Figura 2-3. Mezclas y curvas de mezclado de PVBr con PEBD. T45DP50 (arriba) y T45DP70 (abajo). 22
Figura 2-4. Modelo ilustrativo de hoja técnica propuesto por CIPA 23

Figura 2-5. Alimentación de PVBr picado y PEBD virgen (izquierda) y pellets de mezcla T45DP70 obtenidos vía extrusión (derecha). 24
Figura 2-6. Gráfico TPM último semestre 2024. 27
Figura 2-7. Gráfico Tasa de interés comerciales promedio. 28
Figura 2-8. Comportamiento del VAN a diferentes Tasas de descuento. 29
Figura 2-9. Gráfico del comportamiento del VAN con respecto a la variación de la tasa de descuento. 29
Figura 2-10. Grafico Flujos netos efectivos anuales del proyecto. 30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Principales propiedades del PVB comercial. 9
Tabla 1-2. Toneladas de PVB enviadas a Landfill Planta Copiulemu 14
Tabla 1-3. Matriz Evaluación de Impacto Ambiental Vidrios Lirquén. 14
Tabla 2-1. Costos asociados a disposición residuos PVB en relleno sanitario 16
Tablas 2-2. Costos reales pagados por cada ítem para disposición residuos PVB en relleno sanitario 17
Tabla 2-3. Torque de mezclado de muestras de PVBr con PEBD. 22
Tabla 2-4. Detalle inversión inicial y costos anuales del proyecto (USD) 26
Tabla 2-5. Resumen indicadores económicos del proyecto 31

SIGLAS

PVB : Polivinil Butiral o Butiral de Polivinilo

CIPA : Centro de Investigación de Polímeros Avanzados

PEBD : Polietileno de baja densidad

Ley REP : Ley de Responsabilidad Extendida del Productor

DS : Decreto supremo

VAN : Valor actual neto

TIR : Tasa interna de retorno

PVA : Alcohol de polivinilo

BA : Butiraldehído

EVA : Etileno-acetato de vinilo

TPU : Poliuretano termoplástico

PC : Policarbonatos

PET : Tereftalato de polietileno

PU : Poliuretanos

PMMA : Polimetilmetacrilatos

RCA : Resolución de calificación ambiental

PVBr : Polivinil Butiral reciclado

INTRODUCCIÓN

Motivada por los complejos momentos que vivimos actualmente en materia climática y medioambiental, la demanda de soluciones sostenibles en la gestión de residuos es creciente, impulsando así la búsqueda permanente de alternativas innovadoras para el tratamiento de materiales difíciles de reciclar. Uno de estos materiales es el Butiral de polivinilo (PVB), un polímero de gran adherencia y durabilidad, utilizado principalmente en la industria del vidrio.

El Butiral de polivinilo se utiliza como una lámina que, gracias a sus propiedades de adherencia y transparencia, es idónea para la unión de hojas de vidrio monolítico, permitiendo la transmisión de esfuerzos entre los vidrios uniéndolos como uno solo.

La lámina de PVB se utiliza para impedir el desprendimiento de fragmentos de vidrio en caso de que se produzca una rotura, por lo que se emplea ampliamente en parabrisas de vehículos y en vidrios arquitectónicos que puedan presentar riesgo para las personas, como lo son ventanas, lucernarios o vitrinas, entre otros.

Sin embargo, a pesar de sus valiosas propiedades, los residuos de PVB generados en la fabricación de vidrios de seguridad son generalmente desechados, lo que representa un desafío ambiental significativo y una pérdida permanente de recursos para la industria que produce el vidrio laminado.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Realizar una evaluación de factibilidad técnica, económica y medioambiental para la creación de una empresa que transforme los residuos de PVB generados por una planta productora de vidrio laminado.

Objetivos Específicos

- Evaluar los costos y beneficios económicos de la implementación de una planta de tratamiento de PVB.

- Estudiar los aspectos técnicos y operativos necesarios para el diseño de una planta de reciclaje de PVB.

- Analizar las normativas ambientales y legales aplicables al reciclaje y tratamiento del PVB.

ALCANCE DEL PROYECTO

El proyecto "Evaluación de factibilidad para la creación de una empresa de reciclaje de PVB a partir de residuos de vidrio laminado" tiene como principal objetivo, realizar una evaluación de factibilidad técnica, económica y medioambiental, para la creación de una empresa dedicada al reciclaje de PVB, transformando estos residuos generados durante la producción de vidrio laminado, en productos terminados de alto valor añadido.

Este proyecto contempla presentar el piloto de una planta de reciclaje de PVB cuya capacidad de producción este dada por las toneladas de este residuo que son generadas mensualmente por una línea de producción de vidrio laminado.

El proyecto se desarrollará en un plazo de 90 días y la evaluación abarcará aspectos técnicos, económicos y medioambientales, determinando la viabilidad de implementar un modelo de negocio que contribuya a la reducción de desechos, además de la economía circular y sostenibilidad en la industria del vidrio laminado.

CAPÍTULO 1: BUTIRAL DE POLIVINILO, SUS APLICACIONES E IMPACTO AMBIENTAL

1. BUTIRAL DE POLIVINILO

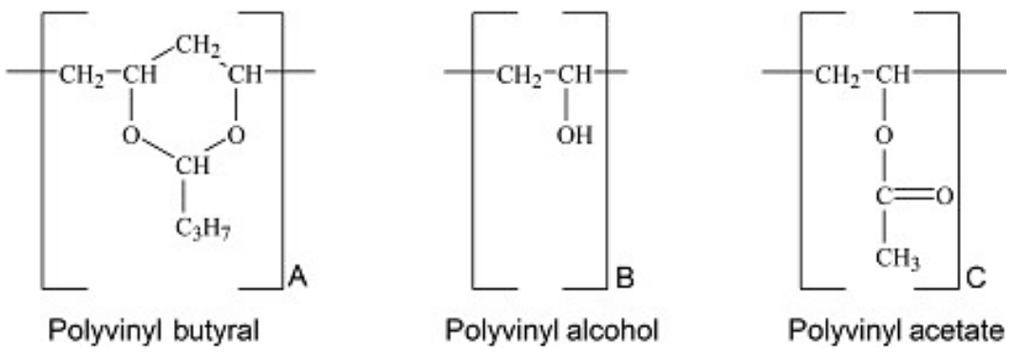
El Butiral de polivinilo o conocido más comúnmente como PVB, es un compuesto químico resultado de mezclar alcohol de polivinilo (PVA) con Butiraldehído.

El polivinil butiral (PVB) se considera un acetal y se forma a partir de la reacción de un aldehído y un alcohol.

Si bien la estructura del PVB se muestra en la figura 1-1, generalmente no se fabrica exactamente en esta forma, sino más bien el polímero es una mezcla de segmentos de PVB, alcohol polivinílico (PVOH) y acetato de polivinilo como se muestra en la figura completa.

Las cantidades relativas de estos segmentos están controladas, pero generalmente se distribuyen aleatoriamente a través de la cadena molecular. Las propiedades de los polímeros se pueden optimizar controlando las proporciones de los tres segmentos.

Figura 1-1 Estructuras PVB, PVA y PVAc



Fuente: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/polyvinyl-butyral

1.1 Polimerización

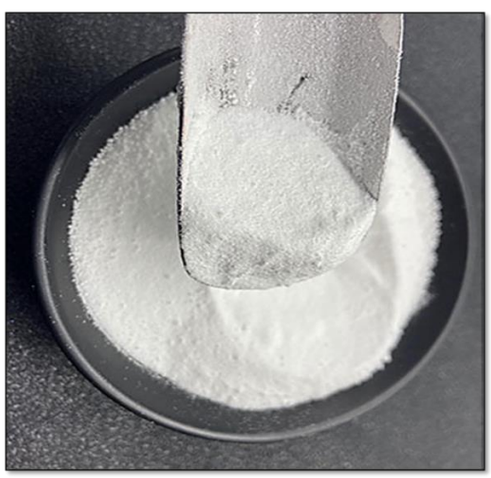
La polimerización en suspensión o en solución, del acetato de vinilo, es la que da origen al poli acetato de vinilo, material de inicio para producir el PVB, obteniendo la resina de PVB que se observa en la figura 1-2.

En primer lugar, el PVA se obtiene a partir de poli acetato de vinilo mediante transesterificación (alcoholisis) habitualmente con metanol y catálisis básica. La hidrólisis de poli acetato de vinilo produce PVA con unidades de 1,3-glicol predominantes y también unidades de 1,2-glicol que provienen de la configuración de cabeza a cabeza de monómeros de acetato de vinilo y, dependiendo de las condiciones de polimerización, también ramificaciones.

En segundo lugar, la conocida reacción entre aldehídos y alcoholes, en la que la adición nucleofílica de un alcohol al grupo carboxílico de un aldehído produce un hemiacetal, y los hemiacetales inestables reaccionan con otro alcohol para producir un anillo acetal estable, se utiliza para formar acetal en condiciones de catálisis ácida. Finalmente, en la reacción neta, una molécula de aldehído reacciona con dos moléculas de alcohol.

El PVA reacciona con un aldehído principalmente para formar anillos de seis miembros entre grupos hidroxilo intramoleculares adyacentes; en menor medida también se forman acetales intermoleculares. Esta reacción secundaria puede conducir a un polímero ramificado y eventualmente reticulado. La reacción puede usarse para la fabricación de cualquier polímero de acetal de vinilo y procede en las diversas unidades en reacciones intramoleculares.

Figura 1-2. Resina de Butiral de polivinilo



Fuente: https://es.schem.net/

1.2 Química de Post polimerización

El PVB es un material termoplástico soluble en una gran cantidad de disolventes orgánicos, pero puede reticularse con varias especies debido a los grupos OH, de esta manera se puede mejorar la resistencia a disolventes.

La capacidad de reticulación depende del número de grupos OH disponibles. Se pueden utilizar, fenólico, melamina, epoxi, isocianato, aldehído e hidrato de formaldehído. La urea y la melamina, así como el poli isocianato, permiten el curado a temperatura ambiente con catalizadores ácidos.

1.3 Propiedades físicas

- Densidad

  La densidad del PVB varía de 1.083 g/cm3 para PVB con un contenido de VA del 11% en peso (28.5% en moles) hasta 1.100 g/cm3 con un contenido de VA del 19% en peso (43,1% en moles).

- Termo oxidación

  Por su composición, el PVB es muy sensible a la degradación y migración de plastificantes. La oxidación térmica del PVB en condiciones suaves como las que se encuentran durante el procesamiento (150– 180°C) se ha revisado esencialmente en vista de la estabilización de los polímeros y del envejecimiento y reciclaje a largo plazo, ya que puede tener un efecto sobre las propiedades ópticas y mecánicas.

- Temperatura de transición vítrea

  Generalmente, el PVB es amorfo, solo los polímeros con un contenido de VA muy alto (superior al 63,3% en peso de VA) son cristalizables y la temperatura de fusión se encuentra entre 171°C y 218°C, acercándose a la del PVA. En todos los demás casos, el PVB es amorfo y muestra una transición vítrea fácilmente observable.

  El efecto del contenido de vinilo en la transición vítrea de PVB se ha estudiado en detalle variando el contenido de VA, y se encontró que la temperatura de transición vítrea aumentaba con el contenido molar de VA.

  Los grupos butirales tienen un efecto plastificante y el aumento en el contenido de grupos hidroxilo da lugar a un aumento de los enlaces de hidrógeno, lo que conduce a una desviación significativa de la aditividad del grupo.

1.4 Su desarrollo industrial

El desarrollo del polivinil butiral (PVB) a nivel industrial, ha sido impulsado principalmente por la gran demanda de vidrio de seguridad por parte de la industria automotriz.

El descubrimiento del endurecimiento del vidrio por laminación con una capa sintética se remonta a principios del siglo XX y fue de manera totalmente inesperada, debido a una torpeza de Édouard Benedictus, un científico francés que mientras trabajaba en su laboratorio, accidentalmente volcó un frasco de vidrio con reactivo de nitrato de celulosa en el piso, grande fue su sorpresa cuando observó que el frasco lleno de estrellas no se rompía.

Benedictus descubrió repentinamente, el vidrio laminado, al cual bautizó como Triplex. Sin embargo, el proceso de fabricación de vidrio laminado se puso en marcha 30 años después, pero hasta 1935, la única capa intermedia que se utilizó fue el nitrato de celulosa, conocido como Pyralin. Este era el único material transparente, claro y suficientemente fuerte disponible para adherirse al vidrio con una resina natural llamada bálsamo de Canadá, descubierto en Alemania por Haehnel y Herrmann en 1924.

El posterior patentamiento de su acetalización y los grandes esfuerzos de desarrollo por parte de varias de las empresas durante las décadas de 1930 y 1940 llevaron, entre otras, a la patente de PVB por parte de la empresa química Union Carbide and Carbon Corporation en el año 1935.

El nuevo polímero termoplástico logró reemplazar el nitrato de celulosa en el vidrio de seguridad laminado para automóviles, aunque la comercialización de varios polímeros de acetal de vinilo ya había comenzado a principios de la década de 1930, se descubrió que el PVB preparado a partir de butiraldehído (BA) era superior a otros polímeros de acetal de vinilo debido a sus mejores características de temperatura fría y dureza en un amplio rango a bajas temperaturas.

Desde entonces, los principales fabricantes han cambiado su oferta de PVB para la industria del vidrio laminado y así cumplir con diferentes tipos de procesos de laminación, la cual consiste en la desgasificación o calandrado al vacío, ya sea con o sin autoclave.

A esto se suman los requisitos de crecimiento y productividad de la industria automotriz desde el año 1960, la construcción desde 1980 y actualmente también la industria fotovoltaica.

Además, el PVB también ha encontrado otras aplicaciones como aglutinante y material de revestimiento, esto debido a sus propiedades de adhesión relacionadas con la capacidad de unión, que a su vez está relacionada con la química de las unidades monoméricas. No obstante, los productos laminados siguen siendo la aplicación

principal, aunque los PVB que se utilizan hoy en día ya no son comparables a los de la primera generación porque su composición química se ha ajustado y su rendimiento físico ha mejorado considerablemente, especialmente tras las innovaciones de procesamiento tecnológico.

Actualmente también existen los PVB de grado especial como lo son el PVB acústico, PVB solar, PVB estructural, entre otros. Estos satisfacen las necesidades emergentes de diferentes mercados.

En particular, los fabricantes de PVB habían ignorado el mercado fotovoltaico en la década de 1980, permitiendo así que el etileno-acetato de vinilo (EVA) se convierta en el material líder en esta área, debido a sus propiedades superiores de permeabilidad y flexibilidad sin aditivos. Sin embargo, desde entonces la crisis también alcanzó al mercado de la industria automotriz y la construcción, lo cual ha generado que se renueve el esfuerzo por alcanzar un desarrollo hacia grados que también sean capaces de cumplir los requisitos y satisfacer las actuales necesidades de la industria de módulos solares.

1.1 EL PVB EN LA INDUSTRIA DEL VIDRIO LAMINADO

Con respecto a la industria del vidrio, este polímero proporciona excelentes propiedades ópticas y mecánicas al vidrio laminado, alta resistencia mecánica, alta deformación antes de la rotura, buena adhesión al vidrio (después del proceso de laminación) y alta transmisión de luz. Por otro lado, es importante señalar que las condiciones climáticas pueden degradar el PVB: la humedad ambiental puede causar una pérdida en la adhesión con el vidrio y la radiación ultravioleta puede disminuir sus propiedades mecánicas. La Tabla 1-1 muestra las propiedades de las láminas de PVB, con 0,76 mm de espesor, de los tres principales fabricantes.

Tabla 1-1. Principales propiedades del PVB comercial.

Parámetro	Valor	Unidades
PVB estándar		
Precio	4.02–4.82	€/ m^2
Densidad	915–1070	kg/ m^3
Absorción de agua (ASTM D-570)	3.6	% en peso
Coeficiente de expansión térmica	22–40	$K^{-1} \cdot 10^{-15}$
Transmitancia	88–89	%
Índice de amarillez	12.5	–
Resistencia máxima a la tracción	20.8	MPa
Alargamiento en el momento del fallo	190–350	%
Módulo de Young	n / A	MPa

Coeficiente de Poisson	0,5	–
Temperatura de transición vítrea	8 – 42	°C
Técnica de unión	Laminación, curado UV	–
PVB estructural		
Resistencia máxima a la tracción	33	MPa
Alargamiento en el momento del fallo	190	%
Módulo de Young	2.36	MPa

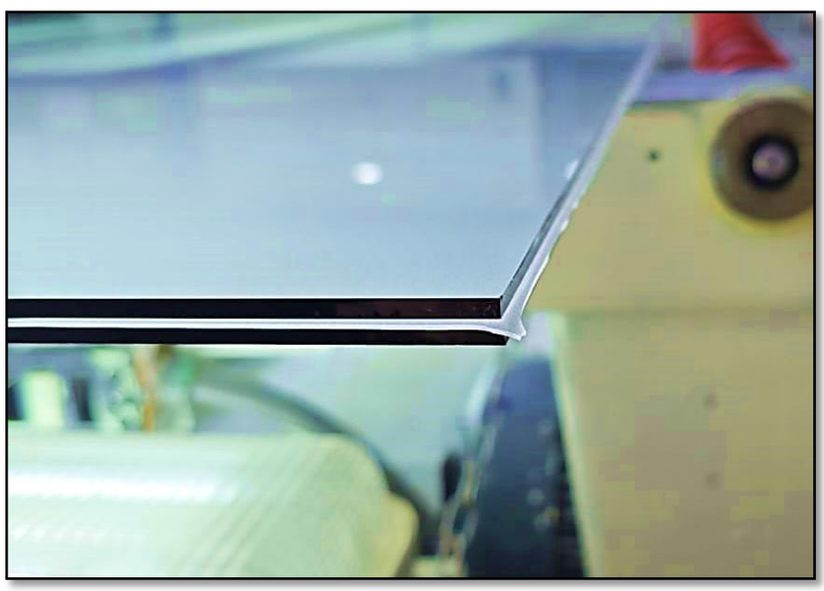
Fuente: https://www.sciencedirect.com/science/article

Recientemente se han desarrollado nuevos tipos de PVB con el fin de mejorar algunas de sus propiedades para ciertas aplicaciones. Por ejemplo, el PVB estructural se basa en PVB, pero con un nivel menor de plastificante, lo que aumenta su temperatura de transición vítrea y, por lo tanto, su rigidez. La temperatura de transición vítrea de los polímeros se define normalmente como un rango de temperaturas, aunque en el caso del PVB este amplio rango se debe al contenido variable de plastificante. También existe la posibilidad de mejorar otras propiedades del PVB, por ejemplo, aumentar su transparencia o su aislamiento acústico.

1.2 VIDRIO LAMINADO

El vidrio laminado, como muestra la figura 1-3, consta de al menos dos paneles de vidrio monolítico y una capa polimérica intermedia (capa intermedia), mediante la cual los paneles de vidrio se unen a la capa intermedia en el proceso de fabricación.

Figura 1-3. Vidrio laminado



Fuente: Línea producción laminado Vidrios Lirquén S.A.

Esta unión se produce debido a la unión química entre grupos hidroxilo (polímero) y grupos silanol (vidrio). Este tipo de enlace químico ocurre para todas las capas intermedias con grupos hidroxilo, que la mayoría de ellas tienen, incluyendo PVB, TPU, EVA e ionómeros. Este material compuesto mejora enormemente el comportamiento del vidrio, tanto antes como después de la rotura. Antes de la rotura, cuando un panel de vidrio laminado se somete a una flexión fuera del plano, el material de la capa intermedia transfiere tensiones de corte entre las superficies de vidrio enfrentadas y, como consecuencia, afecta a su rigidez a la flexión. En el caso de rotura del vidrio, los fragmentos de vidrio rotos permanecen adheridos a la capa intermedia. En algunos casos, dependiendo del escenario de carga y la rigidez de la capa intermedia, la capa intermedia puede unir grietas por los paneles adyacentes intactos. Las fuerzas aplicadas que hacen que aparezcan grietas y se propaguen pueden ser redirigidas por tensiones de corte en el material de la capa intermedia a las capas de vidrio adyacentes intactas; ese mecanismo de bloqueo de grietas evita que las grietas se abran sobre el laminado.

Debido a estas propiedades de unión, el vidrio laminado presenta un cierto nivel de resistencia residual después de la rotura. Esto se debe a que el material de la capa intermedia puede proporcionar un cierto nivel de tensión de tracción, mientras que los fragmentos de vidrio rotos aún pueden proporcionar resistencia a la compresión, pero no a la tracción.

En consecuencia, el vidrio laminado tiene un mayor nivel de resistencia posterior a la rotura que el vidrio monolítico. La resistencia posterior a la rotura del vidrio laminado depende, entre otros factores, de la resistencia, la rigidez, el espesor y el nivel de adhesión del material de la capa intermedia con el vidrio.

Dado que las propiedades deseadas del material de la capa intermedia del vidrio laminado son la transparencia y la capacidad de unir láminas de vidrio, los polímeros amorfos son la opción más adecuada. Los materiales de capa intermedia poliméricos se pueden dividir en dos grupos principales dependiendo del proceso de fabricación.

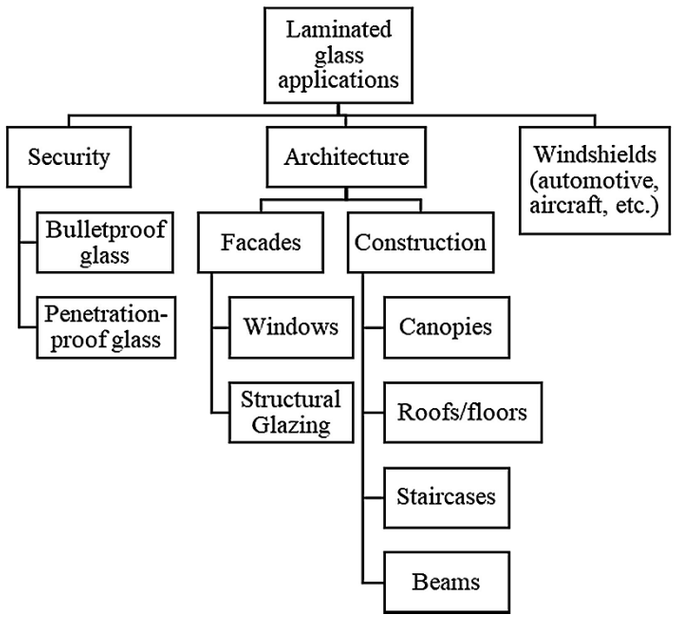
El primero incluye los materiales de capa intermedia más comunes, unidos mediante un proceso de laminación; polímeros tipo lámina, como polivinil butiral (PVB), etileno-acetato de vinilo (EVA), ionómeros (por ejemplo, SentryGlas), poliuretano termoplástico (TPU), policarbonatos (PC) y tereftalato de polietileno (PET).

El segundo grupo reúne las capas intermedias fundidas en el lugar (CIP) basadas en poliuretanos (PU), polimetilmetacrilatos (PMMA) y epoxis.

Si bien se han utilizado diferentes materiales poliméricos como capas intermedias en vidrio laminado, es importante destacar que hasta ahora el PVB presenta un uso extendido en todos los campos de aplicación del vidrio laminado.

La tendencia de la arquitectura contemporánea es incluir el vidrio no sólo en ventanas y puertas sino también en una amplia variedad de soluciones constructivas, como vigas, suelos o escaleras. La posibilidad de superponer varios paneles de vidrio, alternados con intercalaciones poliméricas, e incluso añadir capas de polímeros rígidos transparentes, puede dificultar su rotura y penetración. Por esa razón, el vidrio laminado se utiliza en múltiples aplicaciones, como las señaladas en el esquema de la figura 1-4, dentro de las cuales destacan principalmente vitrinas y cristales antibalas.

Figura 1-4. Aplicaciones del vidrio laminado.



Fuente: https://www.sciencedirect.com/science/article

1.3 IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

Desde la perspectiva ambiental, un gran factor a considerar es la reciclabilidad del PVB. Desde este punto de vista, el reciclaje de material entre capas debe abordarse de una manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Mientras en la actualidad el vidrio se recicla comúnmente, lamentablemente no ocurre lo mismo con los materiales entre capas como el PVB. "El reciclaje de PVB presenta diversas dificultades que impiden su reutilización como capa intermedia, por lo que solo se recicla el 9 %".[3] Es por esta razón que estos materiales actualmente terminan como subproductos desechables de la industria del reciclaje de vidrio. Sin embargo, en la actualidad también hay empresas comprometidas con el medio ambiente, que apuestan por fomentar la sostenibilidad y el reciclaje. Por ejemplo, la gran multinacional francesa Tarkett, especializada en la producción de revestimientos para

pisos y paredes, señala en un artículo, formó una importante asociación con un proveedor del cual obtienen PVB reciclado como una de las principales materias primas utilizadas para sus productos. Es así como a partir de esa asociación impulsaron un exitoso programa de reciclaje de PVB, que actualmente les permite llevar 3300 toneladas de desechos de suelos a sus instalaciones de reciclaje anualmente.

El reciclaje de PVB mediante procesos mecánicos para valorizarlo en otras aplicaciones, es una alternativa cada vez más común en Europa, logrando así evitar el constante depósito de este residuo sólido en rellenos sanitarios. Sin embargo, el PVB reciclado presenta variaciones en su estructura y propiedades inferiores al polímero original.

Es por tanto una de las grandes limitaciones del PVB, la disponibilidad para un reciclaje efectivo, por lo que en algunos casos se hace interesante considerar la posibilidad de combinarlo con otros materiales reciclables para generar nuevos productos y lograr una revalorización tecnológica efectiva.

Actualmente, la línea de producción laminado de Vidrios Lirquén S.A., genera mensualmente alrededor de 2 toneladas de residuos de PVB incoloro, los cuales deben ser dispuestos periódicamente bajo el concepto de "basura industrial", con considerables costos asociados por conceptos como almacenamiento, flete y disposición en relleno sanitario, además de la huella de carbono ligada a estas actividades.

De acuerdo con los registros llevados por la empresa, entre abril de 2022 y diciembre de 2023, tal como se muestra en la tabla 1-2, se derivaron a relleno sanitario Planta Copiulemu 23,88 toneladas de PVB incoloro, para lo cual se necesitaron 6 fletes durante ese periodo de tiempo.

El PVB es un residuo no biodegradable. Debido a su gran sensibilidad a la hidrólisis y capacidad de absorber agua, su proceso de degradación es muy lento, estimándose que podría incluso superar los 100 años.

Tabla 1-2. Toneladas de PVB enviadas a Landfill Planta Copiulemu

Fecha envío a relleno sanitario	Toneladas PVB enviadas
01-04-2022	**10,8**
01-06-2022	**1,8**
01-07-2022	**2,19**
01-11-2022	**3,83**
01-08-2023	**4,0**
01-12-2023	**1,26**
Total toneladas enviadas a Landfill	**23,88**

Fuente: Registro disposición residuos PVB incoloro Vidrios Lirquén S.A.

En la tabla 1-3, tomada de la matriz de evaluación de impacto ambiental de Vidrios Lirquén, se señala que este residuo tiene un impacto negativo, cuya criticidad es alta y actualmente no cuenta con atenuantes ni medidas de mitigación a dicho impacto.

Tabla 1-3. Matriz Evaluación de Impacto Ambiental Vidrios Lirquén.

Actividad/ Evento	Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Agente	Recurso	Tipo de Impacto (signo)	Criticidad previa	Criticidad final	***SIGNIFICANCIA FINAL***
Elaboración de vidrio laminado	Generación de Residuos sólidos (Suelo)	Alteración del recurso suelo	Vidrio Laminado	SUELO	NEGATIVO (-)	Alto	Alto	Significativo

Fuente: Documentos SGI Vidrios Lirquén S.A.

CAPÍTULO 2: IMPACTO ECONÓMICO Y ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

2. IMPACTO ECONÓMICO

A continuación, en la tabla 2-1 se muestran los costos relacionados al manejo de este residuo, considerando desde su generación en la línea de producción laminado, hasta su disposición final en relleno sanitario, periodo durante el cual se va disponiendo diariamente como se observa en la figura 2-1, en maxi sacos que son almacenados hasta el momento del flete.

Tabla 2-1. Costos asociados a disposición residuos PVB en relleno sanitario

ITEM	COSTO	UNIDAD
Arriendo Contenedor 9,5m^3 para almacenaje	2,46	UF/Mes
Flete Contenedor Abierto 9,5 m^3	7,7	UF/Viaje
Disposición Basura Industrial	2,0	UF/Ton

Fuente: Registro disposición residuos PVB incoloro Vidrios Lirquén S.A.

Figura 2-1. Maxi saco con residuos de PVB



Fuente: Línea producción laminado Vidrios Lirquén S.A.

Tablas 2-2. Costos reales pagados por cada ítem para disposición residuos PVB en relleno sanitario

Costo mensual arriendo contenedor (UF)	Total meses arriendo contenedor	Valor UF aproximado ($)	Costo total ($)
2,46	20	$ 34.785	$ 1.711.422

Costo flete (UF)	Cantidad de fletes	Valor UF aproximado ($)	Costo total ($)
7,7	6	$ 34.785	$ 1.607.067

Costo disposición basura industrial (UF/ton)	Toneladas dispuestas en Landfill	Valor UF aproximado ($)	Costo total ($)
2,0	23,88	$ 34.785	$ 1.661.332

Fuente: Registro disposición residuos PVB incoloro Vidrios Lirquén S.A.

Como se registra en el conjunto de tablas 2-2, la empresa Vidrios Lirquén S.A., en el periodo comprendido entre abril 2022 a diciembre 2023 gastó la suma de $ 4.979.821 por conceptos asociados a la disposición de residuos de PVB en relleno sanitario.

Tal como se demuestra a través de los datos señalados al inicio de este capítulo, la gestión y disposición final del PVB como residuo, requiere trazar toda una cadena logística que conlleva destinar una considerable cantidad de recursos tanto humanos, como económicos con la finalidad de mitigar lo más posible el impacto negativo de este residuo tanto en la economía circular de la empresa, como en materia medioambiental, donde sin duda alguna es un problema difícil de sobrellevar.

2.1 EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD

Con la finalidad de proporcionar una visión más clara de la factibilidad del proyecto y el entorno en el cual será desarrollado, se llevó a cabo un análisis PESTEL para la creación de una planta de reciclaje de PVB.

2.2.1. Análisis Pestel

Factores Políticos

- Estabilidad Política
  Desde el punto de vista medioambiental, Chile ofrece un entorno político estable y una estructura robusta, lo cual favorece inversiones a largo plazo en materia ambiental.
- Iniciativas Gubernamentales
  En nuestro país el gobierno impulsa políticas ambientales y de economía circular como la reconocida Ley REP (Responsabilidad Extendida del Productor), la cual fomenta la recolección y reciclaje de residuos.
- Regulaciones Ambientales
  Cumplimiento de normativas ambientales vigentes, como el Decreto Supremo N°148 referente al manejo de residuos peligrosos y no peligrosos.
- Subsidios y apoyos
  Existen beneficios o financiamiento a proyectos sostenibles como el Crédito Verde de Corfo y el Fondo de Protección Ambiental (Municipalidades).

Factores Económicos

- Economía circular creciente
  Oportunidades económicas en sectores que reutilizan residuos para generar nuevos productos con valor agregado.
- Demanda de productos reciclados
  El mercado de productos fabricados a partir de material reciclado muestra un crecimiento, tanto a nivel nacional como internacional.
- Costos de inversión
  Se requiere evaluar los costos iniciales para infraestructura, maquinaria de reciclaje, transporte de residuos y mano de obra.
- Costo de energía
  En nuestro país los costos energéticos son elevados, sin embargo, en la actualidad hay mayor posibilidad de acceso a energías renovables.
- Acceso a financiamiento
  Disponibilidad de créditos verdes y fondos para proyectos sostenibles.

Factores Sociales

- Conciencia Ambiental
  La población está cada vez más sensibilizada con respecto a temas ambientales y conceptos como la sostenibilidad y reciclaje.

- Fuente laboral
  La planta de reciclaje podría generar empleos locales, mejorando así la percepción del proyecto en la comunidad.
- Educación y capacitación
  Necesidad de formar personal capacitado para el manejo de procesos de reciclaje y fabricación de productos derivados del PVB.
- Tendencias de consumo
  El aumento en el uso de algunas tecnologías como la impresión 3D, favorece la demanda de productos como podrían ser los filamentos fabricados a partir de este material reciclado.

Factores Tecnológicos

- Innovación en reciclaje
  Acceso a tecnologías avanzadas en materia de separación, limpieza y transformación del PVB.
- Automatización
  Integración de procesos automatizados que permitan mejorar la eficiencia y favorezcan la reducción de costos operativos.
- Transferencia tecnológica
  Posibilidades de importar maquinaria y tecnologías de países con experiencia en reciclaje de polímeros.
- Investigación y desarrollo
  Oportunidad de trabajar con universidades e instituciones de investigación, en el desarrollo de nuevos productos derivados del PVB reciclado.

Factores Ecológicos

- Impacto Ambiental
  El reciclaje de PVB contribuye a la reducción de residuos industriales que pueden tardar más de 100 años en degradarse.
- Reducción Huella de carbono
  Procesos sostenibles alineados con los compromisos climáticos de nuestro país, como la carbono neutralidad para 2050.
- Normas de gestión de residuos
  Necesidad de cumplir con las regulaciones de manejo adecuado de residuos no biodegradables.
- Preservación de recursos
  El reciclaje del PVB promueve la economía circular y repercute así en la disminución de la extracción de nuevos materiales.

Factores Legales

- Cumplimiento normativo
  Alineación con leyes como la Ley REP (Ley 20.920) y el Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos (DS N°148).
- Permisos ambientales
  Obtención de Resolución de Calificación Ambiental (RCA) para la operación de la planta de reciclaje.
- Normativas laborales
  Cumplir con las leyes laborales chilenas y garantizar condiciones seguras para los trabajadores de la planta.
- Regulaciones comerciales
  Si se exportan productos reciclados, cumplir con estándares internacionales de calidad y comercio.

2.2.2. Factibilidad Técnica

La mezcla de dos plásticos típicamente da como resultado un sistema inmiscible, caracterizado por una morfología compleja y una mala adhesión entre las fases. Estas mezclas tienen dominios de fase dispersa de gran tamaño y poca compatibilidad entre ellos. Es por ello que se busca mejorar la miscibilidad de las mezclas de polímeros mediante el uso de aditivos adecuados como agentes compatibilizantes. Sin embargo, como un primer acercamiento, es necesario evaluar el desempeño de mezclas del PVB reciclado (recuperado de procesos industriales) con un plástico reciclable con alta difusión y disponibilidad en el mercado. Entre las opciones disponibles se encuentra el polietileno de baja densidad (PEBD), ya que se han encontrado resultados interesantes en los que se combinan PEBD con otro polímero de vinilo muy importante y relativamente similar al PVB: el polivinil alcohol (PVA). Adicionalmente, existen casos de estudio de PEBD-PVB para el desarrollo y la obtención de nano fibras plásticas.

2.2.2.1. Evaluación técnica de reprocesabilidad

Es en lo descrito anteriormente, donde el concepto de reciclaje cobra relevancia, generando inquietud con respecto a la factibilidad técnica de reprocesar los residuos de PVB generados en la producción de vidrio laminado, con la finalidad de generar nuevos productos con valor agregado.

Ante esta posibilidad fue que el año 2022, la jefatura del área de producción de vidrio laminado, solicitó al Centro de Investigación de Polímeros Avanzados (CIPA), una evaluación de reprocesabilidad de los residuos de PVB generados por su línea de producción.

Fue después del análisis de diversas muestras iniciales, que el CIPA señala en su informe técnico que, tras un mezclado en fundido, el caso más interesante para el desarrollo del estudio corresponde a muestras de PVB Trosifol tras 45 días de exposición al medio ambiente, las cuales se pueden observar en la figura 2-2. Estas muestras fueron procesadas a temperaturas cercanas a 120 °C (T45D120). Señalando además que, si este caso daba lugar a buenos resultados, los casos de PVB reciclado (PVBr) sin haber sido expuesto a condiciones ambientales resultarían también exitosos, y con mayor facilidad.

Figura 2-2. Muestra de PVB recibida por el CIPA



Fuente: Informe Técnico CIPA - Evaluación de reprocesabilidad de PVB

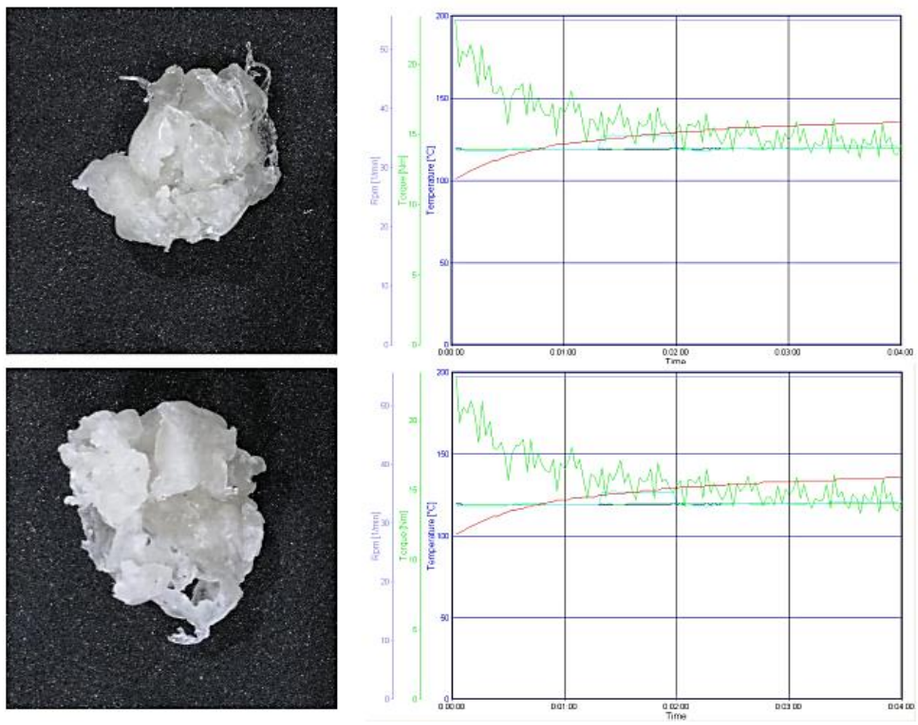
Finalmente, de acuerdo a lo señalado en el informe técnico, se consideró para el estudio generar mezclas con un termoplástico de alta disponibilidad en el mercado, dicho termoplástico en este caso fue el polietileno de baja densidad (PEBD), y las mezclas se realizaron por 4 minutos a 120 °C y 60 rpm, bajo los parámetros de torque señalados en la tabla 2-3, obteniéndose los resultados representados en la figura 2-3 y detallados más adelante.

Tabla 2-3. Torque de mezclado de muestras de PVBr con PEBD.

Muestra	Composición (%)		Torque de mezclado en estado estacionario (Nm)
	Trosifol 45 días	PEBD	
T45DP50	50	50	15,1± 0,8
T45DP70	30	70	15,4 ± 0,9

Fuente: Informe Técnico CIPA - Evaluación de reprocesabilidad de PVB

Figura 2-3. Mezclas y curvas de mezclado de PVBr con PEBD. T45DP50 (arriba) y T45DP70 (abajo).



Fuente: Informe Técnico CIPA - Evaluación de reprocesabilidad de PVB

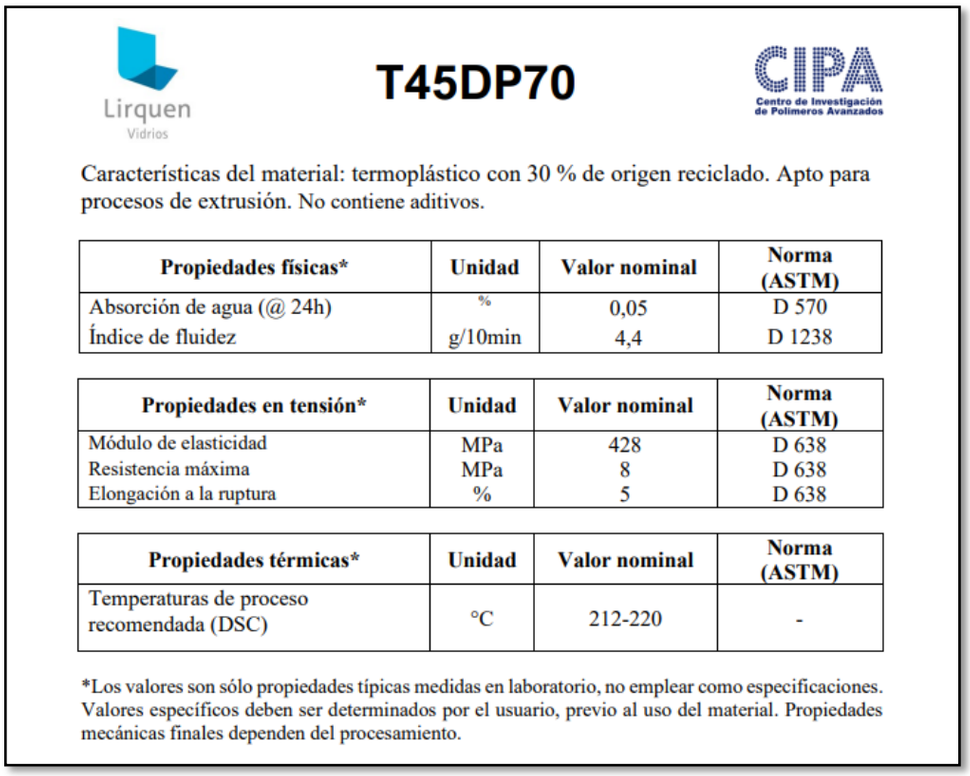
A continuación, y tras la caracterización de la muestra mediante uso de múltiples técnicas de laboratorio, según indica el informe técnico, se señala que el estudio realizado comprendió lo siguiente;

- Análisis termogravimétrico (o TGA, por sus siglas en inglés).
- Análisis diferencial de barrido (o DSC).
- Determinación de índice de fluidez y absorción de agua.
- Evaluación de las propiedades mecánicas a tracción.

Tras la obtención de esta serie de resultados, se propone por parte del CIPA a modo ilustrativo, un modelo de hoja técnica del material T45DP70, que se puede observar en la figura 2-4. Dicho material corresponde a una mezcla compuesta por 30 % de PVB

Trosifol recuperado tras 45 días de exposición a condiciones ambientales y 70 % de PEBD virgen.

Figura 2-4. Modelo ilustrativo de hoja técnica propuesto por CIPA



Lirquen Vidrios

T45DP70

CIPA Centro de Investigación de Polímeros Avanzados

Características del material: termoplástico con 30 % de origen reciclado. Apto para procesos de extrusión. No contiene aditivos.

Propiedades físicas*	Unidad	Valor nominal	Norma (ASTM)
Absorción de agua (@ 24h)	%	0,05	D 570
Índice de fluidez	g/10min	4,4	D 1238

Propiedades en tensión*	Unidad	Valor nominal	Norma (ASTM)
Módulo de elasticidad	MPa	428	D 638
Resistencia máxima	MPa	8	D 638
Elongación a la ruptura	%	5	D 638

Propiedades térmicas*	Unidad	Valor nominal	Norma (ASTM)
Temperaturas de proceso recomendada (DSC)	°C	212-220	-

*Los valores son sólo propiedades típicas medidas en laboratorio, no emplear como especificaciones. Valores específicos deben ser determinados por el usuario, previo al uso del material. Propiedades mecánicas finales dependen del procesamiento.

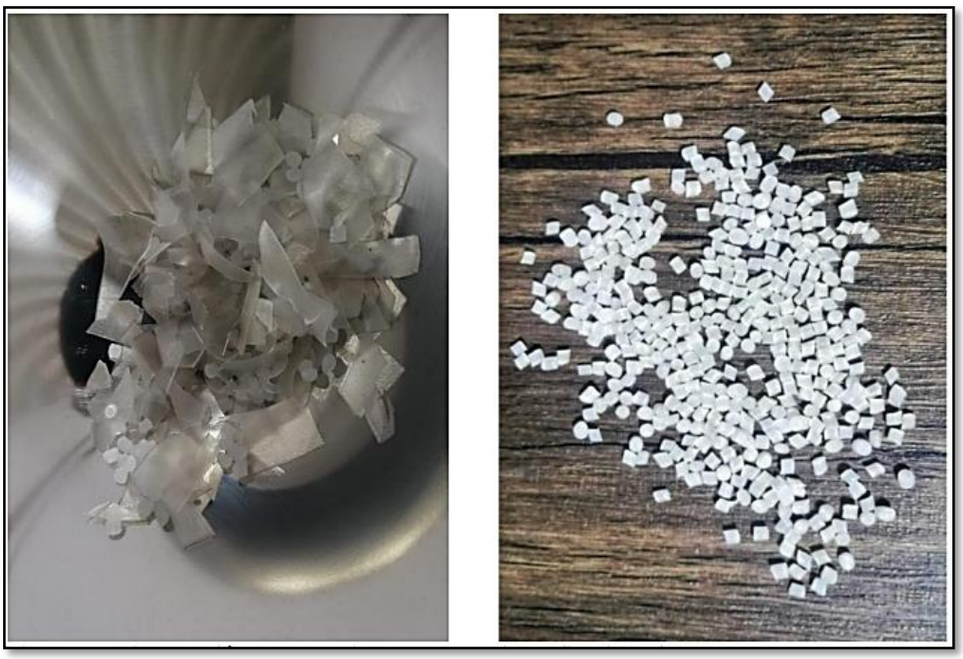
Fuente: Informe Técnico CIPA - Evaluación de reprocesabilidad de PVB

2.2.2.2 Extrusión de pellets de mezcla PVBr-PEBD

Dentro del informe también se señala que para demostrar la factibilidad de generar pellets de la mezcla T45DP70 a nivel industrial, se realizaron ensayos de extrusión de filamentos y pellets en una extrusora mono tornillo (Thera Instruments, relación L/D de 13:1 y diámetro de tornillo 30 mm), permitiendo procesar la mezcla a nivel piloto.

Se establece que para esto fue necesario picar los retazos de PVBr de forma manual para reducir el tamaño del material y así alimentarlo en la extrusora, mezclado con el 70% de pellets de PEBD, como se muestra en la figura 2-5 (respetando la proporción de la muestra T45DP70). El ensayo fue conducido a 140 °C. No hubo ninguna dificultad en el proceso, permitiendo generar los pellets visibles en la imagen de la derecha.

Figura 2-5. Alimentación de PVBr picado y PEBD virgen (izquierda) y pellets de mezcla T45DP70 obtenidos vía extrusión (derecha).



Fuente: Informe Técnico CIPA - Evaluación de reprocesabilidad de PVB

2.2.3. Aplicaciones potenciales

Según los resultados y conclusiones indicados en el informe, se puede considerar que el material T45DP70 posee atributos y prestaciones prometedoras para generar productos como; láminas y recubrimientos, revestimientos, algunos tipos de textiles, productos para aplicaciones eléctricas y electrónicas, enchufes, interruptores, conectores, relés, cojinetes, espumas, agarraderas y mangos.

También se destaca que, por las características de sus componentes, es posible que el material tenga un buen desempeño en productos tipos film y bolsas, por lo que sería interesante realizar estudios específicos en ese ámbito.

Otras posibles aplicaciones que podrían llegar a ser de interés para el PVBr, pero sin mezclarlo con PEBD, son las pinturas, los recubrimientos anticorrosivos, los aglutinantes y las imprimaciones.

Sin embargo, para dicho caso sería recomendable realizar un estudio específico.

Por tanto, del informe se desprende que las mezclas de PEBD y PVBr (expuesto o no al medio ambiente) pueden abarcar una interesante gama de aplicaciones y usos, pero dependiendo del requerimiento específico para cumplir con algún tipo de producto se puede elegir el tipo de PEBD y su porcentaje en la composición de la mezcla para garantizar los mejores resultados y desempeño.

2.2.4 Factibilidad económica

Para evaluar la factibilidad económica de este proyecto es necesario analizar los siguientes aspectos, para llegar así al flujo de caja representado en la tabla 2-4:

Inversiones iniciales (Costos fijos)

- Infraestructura: Terreno e instalaciones.
- Maquinaria: Equipos de reciclaje y extrusión.
- Equipos y herramientas: Equipos móviles, sistemas de control de calidad y otros.
- Costos instalación: Montaje y puesta en marcha de planta de reciclaje.
- Capital de trabajo inicial: Sueldos, materiales, servicios básicos.

Costos operativos

- Materia prima: Adquisición y transporte de residuos PVB.
- Mano de obra: Sueldos personal operativo y administrativo.
- Energía: Recursos energéticos necesarios para la operación de la planta.
- Mantenimiento: Mantenciones, reparaciones y repuestos de maquinaria.
- Costos gestión de residuos: Subproductos generados en el proceso.
- Servicios: Agua, seguros, arriendos, permisos y licencias.

Ingresos estimados

- Venta de productos: Identificación demanda de mercado local y precios.
- Subproductos valorizables: Identificar subproductos comercializables.

Rentabilidad

- Punto de equilibrio: Ventas necesarias para cubrir costos totales.
- Valor Actual Neto: Evaluar si flujos futuros de ingresos son mayores que los costos iniciales.
- Tasa Interna de Retorno: Rentabilidad esperada del proyecto.
- Periodo de Recuperación: Tiempo necesario para recuperar la inversión inicial.

Análisis de sensibilidad y escenarios

- Costos variables: Evaluar impacto de cambios en costos de energía, transporte o materia prima.
- Demanda fluctuante: Analizar el impacto de distintos niveles de venta.
- Precios del mercado: Competencia con otros productos similares.

2.2.4.1. Evaluación factibilidad económica

Producción mensual estimada

- PVB disponible: 2,1 toneladas/mes
- Mezcla recomendada: 30% PVB + 70% PEBD
- PEBD necesario: 4,9 toneladas/mes
- Eficiencia planta: 85%
- Producción estimada: 5,95 toneladas/mes

Costo estimado materia prima

- Tonelada PEBD: $ 1.212.000 CLP/tonelada (Quiminet)
- Costo mensual PEBD: $ 5.938.800 CLP/mes

Precio venta Pellets

- Precio pellets PEBD reciclado: $ 3.400 CLP/kilogramo (Eolas Prints)
- Ingreso mensual estimado: $ 20.230.000 CLP/mes

2.2.4.2. Detalle de costos y Flujo de caja

En la tabla 2-4 se detallan los costos asociados a la inversión inicial, así como los costos anuales de producción estimados.

Tabla 2-4. Detalle inversión inicial y costos anuales del proyecto (USD)

CONCEPTO	COSTO (USD)	
Inversión inicial	**USD 133.431**	**% Inversión inicial**
Extrusora	USD 53.990	40,5%
Trituradora	USD 1.881	1,4%
Transporte	USD 4.200	3,1%
Costos aduanales	USD 1.300	1,0%
Instalación	USD 1.500	1,1%
Materia prima	USD 70.560	52,9%
Costos variables	**USD 49.110**	**% Costos variables**
Energía	USD 45.150	92%
Packing	USD 3.960	8%
Costos fijos	**USD 47.525**	**% Costos fijos**
Salarios	USD 42.775	90,0%
Mantenimiento	USD 4.750	10,0%

Fuente: Creación propia a partir de cotizaciones potenciales proveedores y datos recopilados en la web.

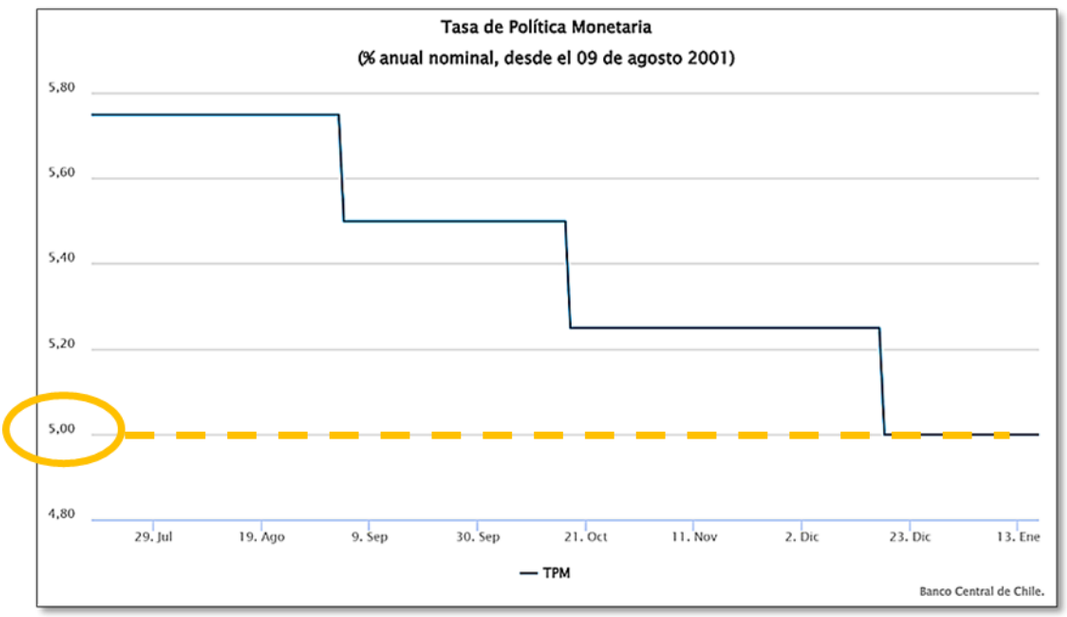
2.2.4.3. Análisis del Flujo de caja

Elección de la Tasa de descuento

De acuerdo a lo señalado por el Banco Central y tal como muestra el gráfico de la figura 2-6, actualmente la Tasa de Política Monetaria (TPM) es de un 5,0 %.[1]

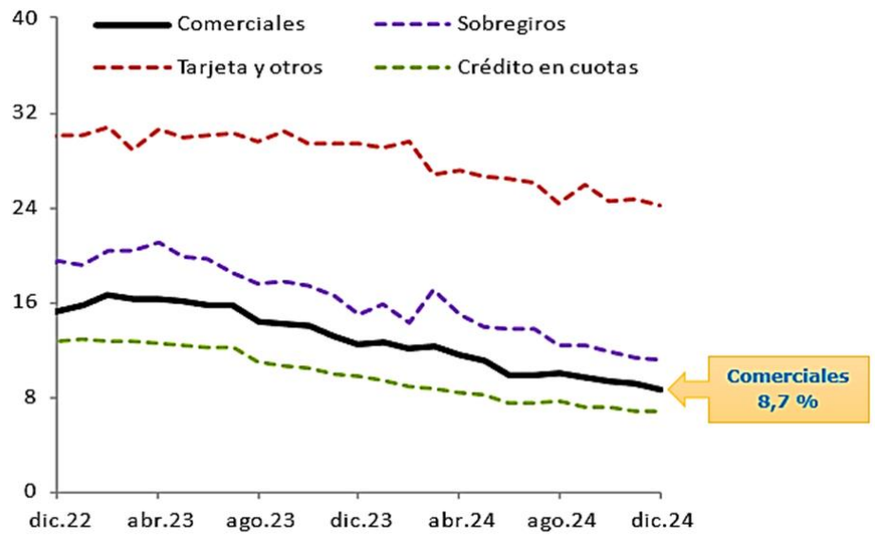
Al mismo tiempo señala que la Tasa de interés de créditos comerciales en el mes de diciembre bajó a un 8,7 %, como se observa en el gráfico de la figura 2-7.[1]

Figura 2-6. Gráfico TPM último semestre 2024.



Fuente: Banco Central de Chile

Figura 2-7. Gráfico Tasa de interés comerciales promedio.



Fuente: Banco Central de Chile

Sin embargo, pese a las tasas aquí referenciadas, existen otros factores a considerar al momento de la elección de la tasa de descuento.

Las tasas de descuento en el sector privado actualmente oscilan entre el 10% y el 20%, dependiendo del riesgo del proyecto.

Este proyecto involucra aspectos innovadores como el reciclaje de PVB, además del riesgo de mercado al tratarse de la comercialización de productos reciclados, lo cual podría presentar barreras tanto en el mercado local como en un potencial mercado internacional.

Es bajo estos argumentos que se consideró que una tasa de descuento del 15% es una tasa adecuada y prudente para este proyecto y sus riesgos asociados, ya que permite evaluar de manera más realista la viabilidad financiera del proyecto y al mismo tiempo las particularidades y riesgos inherentes a este.

A continuación, en la figura 2-8, se muestra una serie de tablas resumen que muestran el comportamiento del VAN al evaluar tasas de descuento de 10%, 15% y 20%. Así también en la figura 2-9 se presenta un gráfico de barras mostrando como el VAN desciende a medida que aumentamos la tasa de descuento.

Si bien se observa que una tasa de descuento del 10% hace al proyecto mucho más atractivo desde el punto de vista financiero, esto es demasiado optimista y no es congruente con los riesgos reales del proyecto, como el mercado incierto y la variabilidad en la producción al depender directamente de los residuos generados por otra línea de producción, la cual también podría tener variabilidad en su producción y por tanto impactar directamente en la rentabilidad del proyecto.

Figura 2-8. Comportamiento del VAN a diferentes Tasas de descuento.

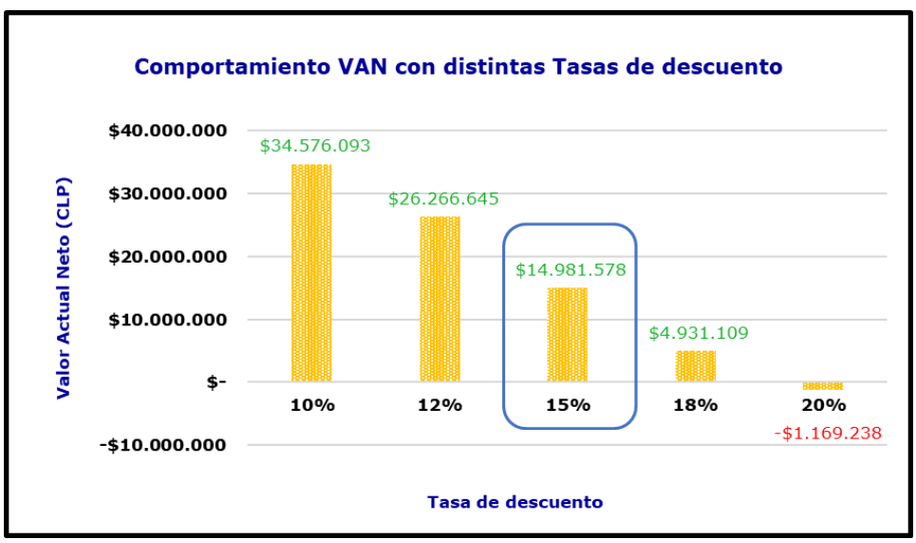
Tasa de descuento	10%
VAN	$ 34.576.093
TIR	20%

Tasa de descuento	15%
VAN	$ 14.981.578
TIR	20%

Tasa de descuento	20%
VAN	-$ 1.169.238
TIR	20%

Fuente: Elaboración propia en Excel a partir de Flujo de caja realizado.

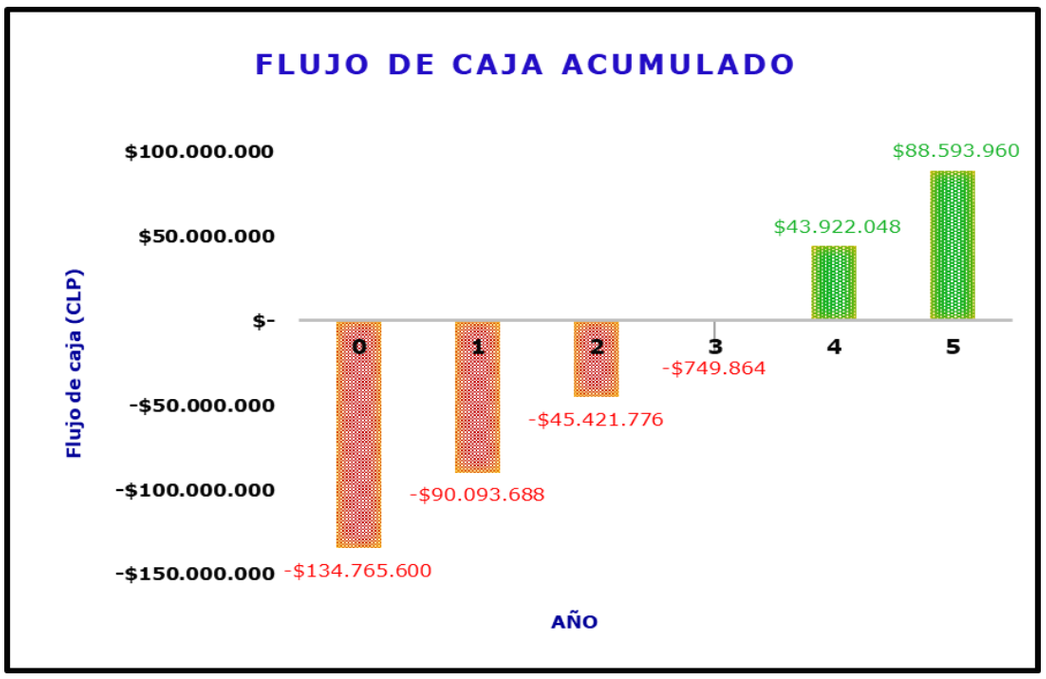
Figura 2-9. Gráfico del comportamiento del VAN con respecto a la variación de la tasa de descuento.



Fuente: Elaboración propia en Excel a partir de Flujo de caja realizado.

En la figura 2-10 presentada a continuación, se muestra un gráfico detallando el flujo de caja acumulado, en el cual se identifica como el Periodo de retorno de la inversión (PRI), se cumple en el inicio del año 4 del proyecto.

Figura 2-10. Gráfico Flujos netos efectivos anuales del proyecto.



Fuente: Elaboración propia en Excel a partir de Flujo de caja realizado.

2.2.2.4. Beneficios ambientales y sociales

Además de la rentabilidad del proyecto en el aspecto económico, existe también un beneficio con respecto al ámbito medioambiental que lleva asociado un impacto cuantificable en términos económicos.

De acuerdo con los antecedentes señalados anteriormente con respecto a la generación de residuos de PVB y la disposición de estos en relleno sanitario por parte de la empresa Vidrios Lirquén S.A., esta desembolsó la suma de $4.980.000 CLP por conceptos de flete y disposición de 23,9 toneladas de residuos de PVB en relleno sanitario.

Por tanto, además de la rentabilidad propia del proyecto, con su implementación hay también una eliminación de los costos asociados a la disposición de estos residuos en relleno sanitario.

Junto a lo ya señalado, existe también un impacto social positivo, ya que este proyecto generará nuevos puestos laborales y al mismo tiempo permitirá dar cumplimiento a normativas ambientales vigentes, como la Ley 20.920 o Ley REP, tiene como objeto según señala en su Artículo 1;

2.2.2.5. Resumen resultados factibilidad económica

Relación Beneficio-Costo

Finalmente es necesario considerar la relación Beneficio-Costo para conocer el retorno por cada dólar invertido.

Considerando los antecedentes económicos del proyecto se tiene;

Costo inicial inversión : $134.765.600

Flujo neto anual : $ 44.671.912

Tasa de descuento : 15%

Vida útil proyecto : 10 años (De acuerdo a vida útil maquinaria)

Bajo este escenario la Relación Beneficio-Costo es de 1.66, por tanto, el proyecto es viable ya que los beneficios superan los costos en un 66%.

Resumen resultados factibilidad económica

Para finalizar se presenta en la tabla 2-5, un resumen de los principales indicadores asociados a la factibilidad económica del proyecto, evaluado a una tasa de descuento del 15%.

Tabla 2-5. Resumen indicadores económicos del proyecto

Indicador	Valor
VAN	**$ 14.981.578**
TIR	**20%**
PRI	**3.02 años**
BCR	**1.66**

Fuente: Elaboración propia en Excel a partir de Flujo de caja realizado.

CONCLUSIONES

- El desarrollo de este proyecto, ha permitido plantear una solución integral a la problemática de la generación de residuos de PVB por parte de la industria del vidrio laminado en nuestro país.

- El estudio del CIPA, tras las diversas pruebas realizadas a las muestras de residuos de PVB, concluye lo siguiente; "Los pellets obtenidos fueron de color blanco y de fácil manipulación, homogéneos, por lo que no se espera mayores dificultades en su alimentación y uso en técnicas de procesamiento".[2] Así como también señala "De preferencia, se recomienda trabajar mezclas PVBr-PEBD en composiciones de al menos 70% de PEBD, para mejorar el desempeño térmico del material y producto final".

- El costo de inversión inicial de $134.765.600 se recupera los primeros días del año 4 de estar en marcha el proyecto.

- El análisis económico logró determinar un flujo de caja positivo, proyectando un VAN de $14,981,578 y una TIR del 20%, estos indicadores demuestran que el proyecto es económicamente viable bajo las condiciones planteadas y evaluadas.

- La aplicación de la técnica de extrusión señalada, permitiría reducir la totalidad de los desechos de PVB que actualmente son enviados a relleno sanitario por la empresa Vidrios Lirquén S.A., cumpliendo así con los objetivos de la Ley REP.

- Finalmente, con respecto al impacto medioambiental la iniciativa propuesta y evaluada en este proyecto, contribuye de manera significativa a la economía circular y sostenibilidad, transformando residuos sólidos no biodegradables y difíciles de reciclar, en productos útiles y comercializables.

BIBLIOGRAFÍA

1. Banco Central de Chile. [2024]. *Informe de Política Monetaria diciembre 2024.* < https://www.bcentral.cl/web/banco-central/areas/politica-monetaria/informe-de-politica-monetaria>. [consulta: 16 de enero de 2025]

2. Centro de Investigación de Polímeros Avanzados. [2022]. *Informe Técnico N° 2021111 - Asistencia técnica: Evaluación de reprocesabilidad de PVB mediante técnicas a escala de laboratorio*. Obtenido de Subgerencia CASS Vidrios Lirquén S.A.

3. European Commission. [s.a.]. *Recycled polymer works its way into laminated glass [Project SUNRISE].* <https://cordis.europa.eu/project/id/958243/es>. [consulta: 23 de octubre de 2024].

4. Ivonne Vilma Avilés Castillo. [2015]. *Plan de negocio de reciclaje para la industria del plástico.* <https://repositorio.uchile.cl>. [consulta: 27 de septiembre de 2024].

5. Laurence W. McKeen. [2017]. *Permeability Properties of Plastics and Elastomers (Fourth Edition)*. <https://www.sciencedirect.com>. [consulta: 06 de septiembre de 2024].

6. Mexpolimeros. [2018]. *Polivinil Butiral PVB*. <https://www.mexpolimeros.com>. [consulta: 06 de septiembre de 2024].

7. Ministerio del Medio Ambiente. [2016]. *Ley N° 20.920: Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje. Diario Oficial de la República de Chile.* <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894>. [consulta: 27 de octubre de 2024]

8. Ministerio del Medio Ambiente. [2020]. *Ley Marco para la Gestión de Residuos, Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje*. <https://economiacircular.mma.gob.cl>. [consulta: 23 de octubre de 2024]

9. Ministerio del Medio Ambiente. [2020]. *Ley REP*. <https://economiacircular.mma.gob.cl>. [consulta: 23 de octubre de 2024]

10. Subgerencia CASS Vidrios Lirquén S.A. [2023]. *Registro disposición y manejo de residuos Planta Lirquén.* Obtenido de Subgerencia CASS Vidrios Lirquén S.A.

11. Subgerencia CASS Vidrios Lirquén S.A. [2024]. *Matriz de Identificación de Peligros y Evaluación de Riesgos ambientales.* Obtenido de Subgerencia CASS Vidrios Lirquén S.A.

ANEXOS

ANEXO A: FLUJO DE CAJA

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingresos						
Ventas (kg)		71400	71400	71400	71400	71400
Precio Venta (precio/kg)		$ 3.400	$ 3.400	$ 3.400	$ 3.400	$ 3.400
Ingresos por venta		**$ 242.760.000**	**$ 242.760.000**	**$ 242.760.000**	**$ 242.760.000**	**$ 242.760.000**
Gastos						
Costos variables		$ 120.865.600	$ 120.865.600	$ 120.865.600	$ 120.865.600	$ 120.865.600
Costos fijos		$ 48.000.000	$ 48.000.000	$ 48.000.000	$ 48.000.000	$ 48.000.000
Equipamiento	$ 63.500.000					
Depreciación (5 años)		$ 12.700.000	$ 12.700.000	$ 12.700.000	$ 12.700.000	$ 12.700.000
Material (PEBD)	$ 71.265.600					
Inversión inicial	**$ 134.765.600**					
Utilidad Bruta		$ 61.194.400	$ 61.194.400	$ 61.194.400	$ 61.194.400	$ 61.194.400
Impuestos (27%)		$ 16.522.488	$ 16.522.488	$ 16.522.488	$ 16.522.488	$ 16.522.488
Utilidad Neta	**-$ 134.765.600**	**$ 44.671.912**	**$ 44.671.912**	**$ 44.671.912**	**$ 44.671.912**	**$ 44.671.912**
Flujo caja acumulado	**-$ 134.765.600**	**-$ 90.093.688**	**-$ 45.421.776**	**-$ 749.864**	**$ 43.922.048**	**$ 88.593.960**
Tasa de descuento	**15%**					
VAN	**$ 14.981.578**					
TIR	**20%**					

Cálculo BCR

$$Inversión\ inicial\ (VPC): \$\ 134.765.600$$

$$Flujo\ Neto\ Anual\ (FNE): \$\ 44.671.912$$

$$Tasa\ de\ descuento: 15\ \%$$

$$Vida\ útil: 10\ años$$

$$Valor\ presente\ de\ los\ beneficios\ (VPB) = FNE * \frac{1-(1+r)^{-n}}{r}$$

$$BCR = \frac{VPB}{VPC}$$

$$VPB = \$\ 44.671.912 * \frac{1-(1+0.15)^{-10}}{0.15}$$

$$VPB = \$\ 224.127.520$$

$$BCR = \frac{\$\ 224.127.520}{\$\ 134.765.600}$$

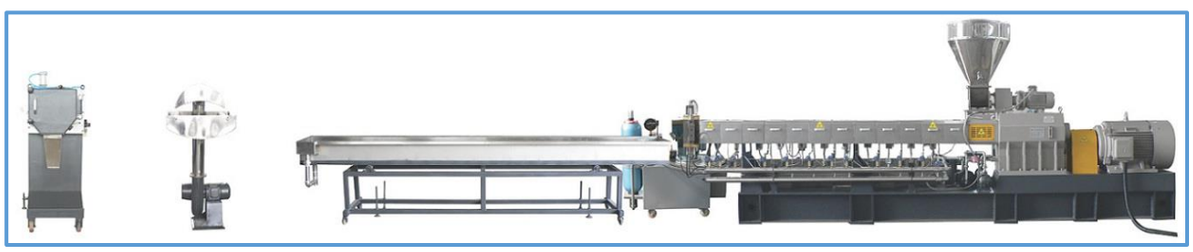
BCR= 1.66

ANEXO B: EQUIPOS

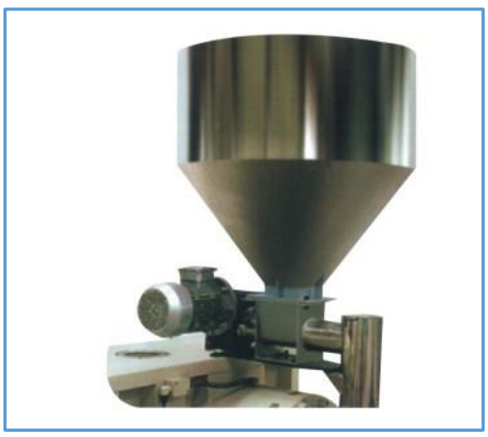


Producción

150-200kg/h, Aprox. de acuerdo a la materia prima, formula y condición de procesamiento, etc.



Composición de la Línea de Peletizado



- **Sistema de alimentación (Tova de alimentación)**

  Potencia de motor：1.5kw

  Velocidad regulada por transductor ALPHA;

  Agitador y mezclador- ventilación de alimentación;

  Equipado con una tolva de material de acero inoxidable.

- **Extrusor Principal: VMSE-65/600-90kw-40**

  1) Diámetro de tornillo: 62.4mm. L/D = 40

  2) Motor principal: AC 90KW, WN de China. Velocidad regulada por transductor ABB.

  3) Velocidad tornillo rotativo: 60～600rpm

  4) Cuchillas de tornillo hechas con acero de alta dureza 40CrNiMoA.

  5) Los barriles están equipados con revestimientos holísticos bimetálicos (45 # steel + α101), procesamiento de tratamiento térmico. HRC = 60 ~ 62. El material de los elementos de tornillo es acero de alta velocidad W6Mo5Cr4V2, tratamiento de nitrógeno. HRC = 58 ~ 60. Los barriles incluyen la sección de alimentación, la sección de desgasificación y la sección cerrada.



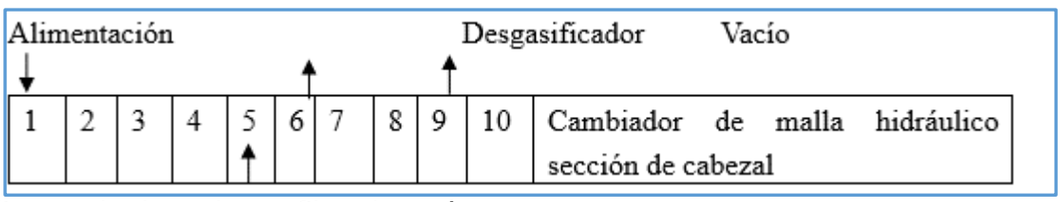
  6) Largo de cada barril 240mm, total 10 piezas de barriles

  7) 1st barril es el alimentador principal, el 6th desgasificador natural ,9th sección de vacío, y los otros los de cierre.

  8) moldeado de cobre de colada para 2-3 barriles.

  Calentadores de aluminio. Total, de energía: ～38KW.

<u>Plano del extrusor:</u>



Alimentador lateral para fibra de vacío.

9) Reducción y distribución de caja de cambios: La caja reductora reduce la velocidad del motor a la velocidad de los ejes del tornillo y la distribuye a los dos ejes de salida. La caja de cambios consta de:

Acoplamientos de dientes de engranaje complejos entre los ejes de salida y los ejes de los tornillos de montaje.

Conjunto de cojinete de empuje integrado, cojinetes radiales del eje de salida son productos NSK

Parte inferior de la carcasa diseñada como sumidero de aceite.

10) El agua blanda enfría los barriles con condensador.

El material de las tuberías de entrada y salida es de acero inoxidable.

Válvula solenoide: productos importados.

Válvula manual: acero inoxidable.

El motor de la bomba de agua en el sistema de agua blanda es de 0.55KW.

El agua blanda es agua destilada



- **Sistema de vacío.**
  El motor de la bomba de vacío es de 2.2KW, el sistema de vacío completo equipa válvulas de un canal en el sistema de vacío para evitar el reabastecimiento del agua.



- **Sección de cabezal y cambiador de malla hidráulico.**
  Potencia del motor, 1.5kw.
  Potencia del calentador para el cambiador de pantalla,3.4kw.
  Material de acero nitrurado de alta calidad, (38CrMoAlA).
  1 juego de cambiador de pantalla estilo placa hidráulica.
  Potencia de la estación hidráulica, 1.5KW.
  Tamaño de la malla, 140.8 * 80.8 mm
  Diámetro del agujero, 4 mm.
  Cantidad del agujero, 171

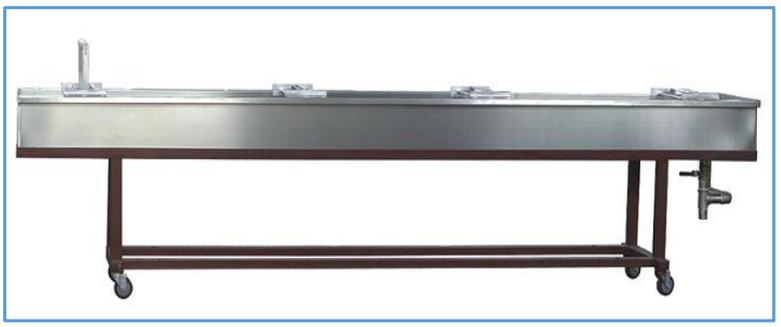


- **Peletización de filamento por enfriamiento.**



- **Canal de enfriamiento de agua.**

(1 Set) Longitud: 4M, profundidad de 500mm. El material del tanque es de acero inoxidable. Está equipado con 4 juegos de accesorios.



- **Soplador/Secador.**
  (1 set), Potencia de motor 1500W.



- **Panel de Control Eléctrico.**

1) Medidor de control de temperatura: RKC de Japón. Es de dos canales, con función de autoajuste del parámetro PID e indicación del corte del calentador.
2) Medidor de amperaje RKC al motor de accionamiento principal japonés.
3) La presión de la matriz y la temperatura de fusión se muestran en el armario. Y la presión está enclavada con la máquina principal.
4) Breaker principal: de marca Schneider.
5) Elementos eléctricos de protección de las máquinas auxiliares de marca Schneider.
6) Botones de control y las lámparas de señal de marca Schneider.



KÖSNER

Chipeadora Trituradora de Plástico KSN-180

- Alta disponibilidad
- Fácil operación y transporte
- Ideal para reducir envases plásticos



Unidad Motriz	Modelo	**KSN-180**
	Potencia Motor	**2,2 KW**
	Tensión	**380 V 50 HZ**
	Cuchillos Giratorios	**9**
	Cuchillos Fijos	**2**
	Dimensión Plásticos de Salida	**8 mm**
	Capacidad Máxima	**100 KG/Hora**
	Tamaño Tolva	**180 x 160 mm**
Dimensiones	Equipo (Largo x Alto x Ancho)	**700 x 480 x 1000 mm**
Peso	Neto	**100 kg**
Diseño	Color	**Azul y Negro**