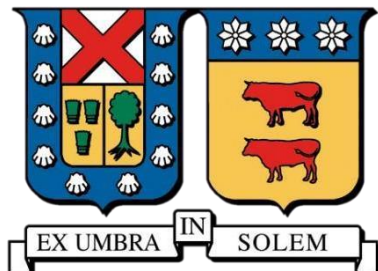


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL VALPARAISO-CHILE**



**“ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE UN PROCESO PARA LA
ELABORACIÓN DE HARINA A PARTIR DE BAGAZO DE CERVEZA”**

ESTEBAN IGNACIO ACUÑA BAHAMONDES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

PROFESOR GUÍA DANIEL RAMÍREZ

2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis Técnico Económico de un Proceso Para la Elaboración de Harina a Partir de Bagazo de Cerveza.

Nombre del candidato(a): Esteban Ignacio Acuña Bahamondes

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Química

Campus: Casa Central Valparaíso **Departamento:** Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Daniel Ramirez L, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente

DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 05-11-2025

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 04-11-2025

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible que esta etapa llegara a su fin. En primer lugar, a mis padres, por todo lo que me han dado a lo largo de la vida, por su apoyo incondicional y por brindarme siempre oportunidades que me han permitido crecer. Gracias a su esfuerzo y cariño hoy puedo finalizar mi carrera universitaria, aun cuando tuve que vivir esta experiencia lejos de ellos. A mis hermanos, por estar siempre presentes, acompañándome en cada paso y dándome fuerzas.

A Valentina, mi pareja, por estar conmigo en los momentos más difíciles de esta experiencia, apoyándome y entregándome ánimo cuando más lo necesitaba, incluso en los días en que estaba malhumorado o estresado.

A mi profesor guía, Daniel Ramírez, y a mi jefa, Darlyn Riquelme, por la paciencia, la orientación y la confianza que me entregaron. Su apoyo fue clave para poder superar este proceso.

A mis amigos de Concepción: Bastían, Catalina, Gonzalo y Rodrigo, quienes me acompañaron a la distancia y siempre estuvieron ahí para recibirme y compartir conmigo cada vez que volví a casa.

A mis amigos de la universidad, en especial a Constanza, que fue un apoyo fundamental en todo este proceso. Su amistad y cariño marcaron mi paso por la universidad. También agradezco a Ángelo, Carlos, Herman, Kevin y Saba, con quienes compartí momentos importantes y que, de distintas maneras, fueron parte esencial de esta etapa.

A mis amigos de la quinta región: Alois, Álvaro, Braulio, Christopher e Ignacio, que con el tiempo se transformaron en familia y me dieron la compañía y el cariño necesarios para sobrellevar múltiples situaciones que aportaron al fin de esta etapa universitaria.

A todos ustedes, gracias por estar, por creer en mí y por ayudarme a crecer. Este logro no es solo mío, sino también de ustedes, que fueron parte de este camino y que, de una u otra manera, me permitieron llegar hasta aquí.

Resumen

La investigación abordó la valorización del bagazo cervecero como materia prima para la elaboración de harina funcional, evaluando tanto los aspectos técnicos del proceso como su factibilidad económica. El estudio se enmarca en el interés creciente por ingredientes sostenibles y en las oportunidades que ofrece la economía circular para transformar residuos agroindustriales en productos con valor agregado.

El estudio incluye el diseño conceptual de un secador rotatorio en flujo continuo, definido a partir de balances de masa y energía, junto con la aplicación de los modelos de Fick y Page para estimar parámetros de secado. El modelo consideró una alimentación de bagazo con 65 % de humedad y un objetivo de reducción al 10 %. Para validar los resultados, se comparó el diseño con cotizaciones comerciales de secadores de bandejas, rotatorio y flash.

En términos técnicos, el consumo energético específico del diseño conceptual se ubicó en el rango de 0,94–1,26 [kWh/kg de agua evaporada], mientras que los equipos comerciales reportaron valores de 1,05–1,25 [kWh/kg] para bandejas, 3,51 [kWh/kg] para rotatorio y 3,87 [kWh/kg] para flash. Se demostró que la incorporación de un pretratamiento previo al secado permite reducir la carga de evaporación, con un impacto directo en la reducción de los costos operativos.

Adicionalmente, el estudio consideró la recirculación parcial de gases de salida en seis escenarios de temperatura (105–50 [°C]), comprobándose una reducción del consumo energético de hasta 29 % en condiciones de alta temperatura y de 20–25 % en escenarios intermedios y bajos, aunque con restricciones operativas asociadas a la humedad relativa.

El análisis económico consideró una inversión inicial entre \$178 y \$181 millones CLP, en función de la alternativa tecnológica seleccionada. Los resultados mostraron un VAN de \$115,2 millones CLP, TIR de 18 % y payback en 2031 para el secador rotatorio; un VAN de \$86,8 millones CLP, TIR de 16 % y payback también en 2031 para el secador de bandejas; y un VAN de \$282,5 millones CLP, TIR de 26 % para el secador flash. Si bien este último presentó los mejores indicadores financieros, el análisis destacó al secador rotatorio como la opción más robusta y escalable, por su continuidad operativa y su mejor integración con las etapas de la línea productiva.

El proyecto demuestra que es posible convertir un subproducto abundante de la industria cervecera en una alternativa económicamente viable y con impacto ambiental positivo, consolidándose como una opción real de implementación industrial en el país.

Abstract

This study investigated the valorization of brewers' spent grain (BSG) as a raw material for the production of functional flour, evaluating both the technical aspects of the process and its economic feasibility. The research is framed within the growing interest in sustainable ingredients and the opportunities offered by the circular economy to transform agro-industrial residues into value-added products.

The study included the conceptual design of a rotary dryer in continuous flow, developed through mass and energy balances and the application of Fick and Page models to estimate drying parameters. The model considered a BSG feed with 65% moisture (wet basis) and a target reduction to 10%. To validate the results, the conceptual design was compared against commercial quotations for tray, rotary, and flash dryers.

Additionally, the study evaluated the partial recirculation of exhaust gases under six inlet temperature scenarios (105–50 °C). Results confirmed energy savings of up to 29% at high temperatures and 20–25% under intermediate and low conditions, although with operational constraints associated with relative humidity.

From a technical standpoint, the specific energy consumption of the conceptual design ranged between 0.94 and 1.26 [kWh/kg water evaporated], while commercial equipment reported 1.05–1.25 [kWh/kg] for tray dryers, 3.51 [kWh/kg] for rotary dryers, and 3.87 [kWh/kg] for flash dryers. It was also demonstrated that incorporating a pretreatment step prior to drying can reduce the evaporation load, with a direct impact on lowering operating costs.

The economic analysis estimated an initial investment between CLP 178 and 181 million, depending on the selected technology. Results showed a Net Present Value (NPV) of CLP 115,2 million, Internal Rate of Return (IRR) of 18%, and payback by 2031 for the rotary dryer; an NPV of CLP 86,8 million, IRR of 16%, and payback also by 2031 for the tray dryer; and an NPV of CLP 282,5 million, IRR of 26%, and investment recovery around 2030–2031 for the flash dryer. Although the latter displayed the best financial indicators, the overall analysis highlighted the rotary dryer as the most robust and scalable alternative, due to its continuous operation and better integration with downstream processing stages.

The project demonstrates that brewers' spent grain can be transformed from an abundant by-product of the brewing industry into an economically viable alternative with positive environmental impact, consolidating its potential as a real option for industrial implementation in Chile.

Índice

1.	Introducción.....	13
1.1.	Contexto general del problema.....	13
1.2.	Importancia del bagazo como recurso.....	13
1.3.	Mercado de harinas en Chile.....	14
1.4.	Justificación de la investigación.....	15
2.	Objetivos.....	15
3.	Alcances y limitaciones.....	15
4.	Estado del arte.....	16
4.1.	Industria cervecera y generación de bagazo.....	16
4.1.1.	Panorama general de la industria cervecera en Chile.....	16
4.1.2.	Proceso productivo de la cerveza.....	17
4.1.3.	Generación y características del bagazo.....	17
4.1.4.	Desafíos y oportunidades asociados al bagazo.....	18
4.1.5.	Tendencias y perspectivas futuras.....	18
4.2.	Composición fisicoquímica del bagazo de cerveza.....	19
4.3.	Aplicaciones actuales del bagazo.....	20
4.4.	Producción de harinas funcionales.....	21
4.5.	Enfoque de economía circular y sostenibilidad.....	21
5.	Estudio de Mercado.....	22
5.1.	Materias primas utilizadas.....	22
5.2.	Mercado Objetivo.....	23
5.3.	Producción nacional del producto.....	24
5.4.	Oferta de harinas funcionales en Chile.....	25
5.5.	Importaciones y comercio exterior.....	26
5.5.1.	Importaciones de harina de trigo (1101).....	26
5.5.2.	Importaciones de harinas de otros cereales (código 1102).....	27
5.5.3.	Exportaciones de harina desde Chile.....	27
5.6.	Proyección de la demanda.....	28
5.6.1.	Demanda aparente de harinas de otros cereales en Chile.....	28
5.6.2.	Proyección de la demanda.....	28

5.6.3.	Capacidad de producción proyectada del proyecto	29
5.6.4.	Participación proyectada en el mercado	29
5.7.	Oportunidades y desafíos	30
5.7.1.	Barreras de entrada	30
5.7.2.	Factores favorables	31
5.7.3.	Riesgos comerciales	31
5.7.4.	Ventajas competitivas de la propuesta	32
6.	Estudio Técnico	32
6.1.	Descripción del proceso productivo	32
6.1.1.	Recepción y manipulación del bagazo	32
6.1.2.	Pretratamiento mecánico	33
6.1.3.	Secado.....	33
6.1.4.	Molienda.....	33
6.1.5.	Tamizado y almacenamiento	34
6.2.	Diagrama de flujo	34
6.2.1.	Opción A: Secador rotatorio	34
6.2.2.	Opción B: Secador de bandejas	35
6.2.3.	Opción C: Secador flash	35
6.3.	Selección de Equipos.....	35
6.3.1.	Selección de pretratamiento mecánico	36
6.3.2.	Selección de Molino	37
6.3.3.	Selección de Tamiz	38
6.3.4.	Selección de Envasado	40
6.4.	Diseño de secador conceptual (Equipo crítico)	40
6.4.1.	Fundamentación del diseño	40
6.4.2.	Balance de masa del proceso de secado	41
6.4.3.	Análisis energético del secado.....	42
6.4.4.	Estimación del tiempo de secado.....	43
6.4.5.	Cálculo del volumen requerido del tambor	44
6.4.6.	Diseño geométrico del secador.....	44
6.4.7.	Materialidad del secador.....	46

6.4.8.	Análisis de recirculación térmica	46
6.4.9.	Comparación con alternativas comerciales cotizadas	52
6.5.	Listado de equipos	54
6.6.	Especificaciones de equipos y servicios	55
6.7.	Razones técnicas	57
6.8.	Ubicación de la planta	58
6.9.	Layout de la planta	59
6.10.	Logística del proceso	61
6.11.	Aspectos ambientales	61
6.12.	Normativa aplicable en Chile	63
6.12.1.	Normativa sanitaria	63
6.12.2.	Normativa ambiental	63
6.12.3.	Normativa laboral y de seguridad industrial	64
7.	Estudio Económico	64
7.1.	Base para evaluación económica	64
7.1.1.	Mercado Global y objetivo	65
7.1.2.	Precio del producto	65
7.1.3.	Materias primas, servicios e insumos	66
7.1.4.	Moneda utilizada en el proyecto	66
7.1.5.	Antecedentes financieros	67
7.1.6.	Horizonte de evaluación del proyecto	67
7.1.7.	Criterios de depreciación	67
7.1.8.	Listado de inversiones	68
7.1.9.	Detalle de costos	71
7.2.	Evaluación económica	73
7.2.1.	Criterios de Evaluación del Proyecto	74
7.2.2.	Flujo de Caja	74
7.2.3.	Evaluación de indicadores de Rentabilidad	75
7.2.4.	Análisis de sensibilidad	77
7.2.5.	Análisis de resultados	79
7.3.	Recomendaciones de inversión	79

8.	Conclusiones.....	81
9.	Recomendaciones	83
10.	Referencias	84
11.	Anexos	90
11.1.	Anexo A. Diagrama de la producción de cerveza	90
11.2.	Anexo B. Supuestos de humedad y Balance de masa	90
11.3.	Anexo C. Coeficientes de difusividad efectiva	91
11.4.	Anexo D. Gráfico de temperatura vs tiempo de secado	91
11.5.	Anexo E. Velocidades evaluadas para estimación de volumen	91
11.6.	Anexo F. Tabla resumen con los valores representativos de ahorro y humedad relativa para cada caso	92
11.7.	Anexo G. Gráficos de Ahorro energético y de Humedad relativa vs Fracción recirculada de aire.....	92
11.8.	Anexo H. Detalle de cotizaciones.....	96
11.9.	Anexo I. Consumos energéticos específicos del diseño conceptual.....	104
11.10.	Anexo J. Diagrama de instrumentación de secador rotatorio	105
11.11.	Anexo K. Vida útil de los equipos	105
11.12.	Anexo L. Factores de Lang.....	106

Índice de Figuras

Figura 1.	Diagrama opción A.	34
Figura 2.	Diagrama opción B	35
Figura 3.	Diagrama opción C.	35
Figura 4.	Diagrama de funcionamiento de prensa tornillo (MIVALT s.r.o., 2008).	36
Figura 5.	Ilustración de un molino de cuchillas (Song, Pei, Wang, & Tao, 2015).	38
Figura 6.	Esquema de tamiz vibratorio.....	39
Figura 7.	Gráfico de ahorro vs recirculación, caso 105 [°C].....	49
Figura 8.	Gráfico humedad vs recirculación, caso 105 [°C].	50
Figura 9.	Gráfico ahorro vs recirculación, caso 70 [°C].....	51
Figura 10.	Gráfico humedad vs recirculación, caso 70 [°C].	51
Figura 11.	Emplazamiento del proyecto en planta CODA, Casablanca	59
Figura 12.	Layout representativo de opción secador rotatorio	60
Figura 13.	Layout de opción secador de bandejas (Shouchuang).	60
Figura 14.	Layout representativo de opción secador flash	61
Figura 15.	Costos fijos caso A (secador rotatorio).	71

Figura 16. Costos fijos caso B (secador de bandejas).	71
Figura 17. Costos fijos caso C (secador flash).	72
Figura 18. Costos variables caso A (secador rotatorio).	72
Figura 19. Costos variables caso B (secador de bandejas).	73
Figura 20. Costos variables caso C (secador flash).	73
Figura 21. Flujo de caja de opción A (Secador rotatorio).	74
Figura 22. Flujo de caja de opción B (Secador de bandejas).	75
Figura 23. Flujo de caja de opción C (Secador flash).	75
Figura 24. Curva de payback para caso A.	76
Figura 25. Curva de payback para caso B.	77
Figura 26. Curva de payback para caso C.	77

Índice de Tablas

Tabla 1. Composición química promedio del bagazo de cerveza (Karlović, y otros, 2020)	19
Tabla 2. Precios de venta de harinas especiales.	25
Tabla 3. Importaciones de harina de trigo 2024 (ITC, 2025).	26
Tabla 4. Importaciones de harinas de otros cereales, 2024 (ITC, 2025).	27
Tabla 5. Exportaciones de harina desde Chile, 2024 (ITC, 2025).	27
Tabla 6. Importaciones, exportaciones y demandas aparentes anuales (ITC, 2025).	28
Tabla 7. Proyección de la demanda 2025-2035.	29
Tabla 8. Escenarios de abastecimiento de materia prima.	29
Tabla 9. Participación proyectada en el mercado nacional de harinas especiales 2025-2035.	30
Tabla 10. Prensas de tornillo cotizadas.	37
Tabla 11. Molino de cuchillas cotizados.	38
Tabla 12. Tamices vibratorios cotizados.	39
Tabla 13. Envasadora cotizada.	40
Tabla 14. Balance de masa en la etapa de secado.	42
Tabla 15. Calculo flujo masico de aire necesario.	43
Tabla 16. Estimación de tiempo de secado mediante parámetros de modelo Page.	43
Tabla 17. Estimación de volumen efectivo.	44
Tabla 18. Dimensiones según temperatura para una velocidad determinada.	46
Tabla 19. Tabla comparativa de energía térmica específica.	53
Tabla 20. Rendimiento en función del consumo energético.	53
Tabla 21. Equipos con sus respectivas funciones.	54
Tabla 22. Detalle consumo energético Opción A.	55
Tabla 23. Detalle consumo energético Opción B.	56
Tabla 24. Detalle consumo energético Opción C.	56
Tabla 25. Detalle de capacidad de Opción A.	56
Tabla 26. Detalle de capacidad de Opción B.	57

Tabla 27. Detalle de capacidad de Opción C.....	57
Tabla 28. Razones técnicas del proceso.....	57
Tabla 29. Residuos generados en las etapas correspondientes.	62
Tabla 30. Escenarios precio de venta de producto.....	66
Tabla 31. Listado de equipos para caso A (secador rotatorio)	68
Tabla 32 Listado de equipos para caso B (secador de bandejas).....	68
Tabla 33. Listado de equipos para caso C (secador flash).....	69
Tabla 34. Listado de costos para caso A (secador rotatorio)	69
Tabla 35. Listado de costos para caso B (secador de bandejas)	70
Tabla 36. Listado de costos para caso C (secador flash)	70
Tabla 37. Análisis de sensibilidad de caso A (secador rotatorio).....	78
Tabla 38. Análisis de sensibilidad de caso B (secador de bandejas).	78
Tabla 39. Análisis de sensibilidad de caso C (secador flash).	78

Nomenclatura

Variable	Significado	Unidad
EV	Valor final de la demanda	$[ton]$
BV	Valor inicial de la demanda	$[ton]$
C_p	Capacidad calorífica del aire seco	$\left[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right]$
$h(T, Y)$	Entalpía del aire húmedo por kg de aire seco (base 0 °C)	$\left[\frac{kJ}{kg \text{ aire seco}} \right]$
h_f	Entalpía específica del aire fresco	$\left[\frac{kJ}{kg \text{ aire seco}} \right]$
h_{out}	Entalpía específica del aire de salida	$\left[\frac{kJ}{kg \text{ aire seco}} \right]$
h_{mix}	Entalpía de la mezcla de aire recirculado	$\left[\frac{kJ}{kg \text{ aire seco}} \right]$
k	Constante de secado del modelo de Page	$\left[\frac{1}{min} \right]$
L	Longitud del tambor	$[m]$
$\dot{m}_{aire}$	Flujo másico total de aire	$\left[\frac{kg}{h} \right]$
$\dot{m}_{aire \text{ seco}}$	Flujo masico de aire seco requerido	$\left[\frac{kg}{h} \right]$
$\dot{m}_{agua}$	Flujo masico de agua evaporada	$\left[\frac{kg}{h} \right]$
$\dot{m}_{bagazo \text{ seco}}$	Flujo masico de bagazo seco	$\left[\frac{kg}{h} \right]$
$\dot{m}_f$	Flujo masico de aire fresco	$\left[\frac{kg}{h} \right]$
$\dot{m}_r$	Flujo masico de aire recirculado	$\left[\frac{kg}{h} \right]$
MR	Relación de humedad (Modelo de Page)	$[-]$
$n_{años}$	Número de años del periodo analizado	$[-]$
n_{page}	Exponente del modelo de page	$[-]$
P_{atm}	Presión atmosférica	$[kPa]$
$P_{sat}(T)$	Presión de saturación del agua a temperatura T	$[kPa]$

Q	Caudal volumétrico de aire	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$
Q_{ideal}	Energía mínima teórica para evaporar el agua	$[kW]$
$Q_{sin\ recirculación}$	Potencia térmica del calentador sin recirculación	$[kW]$
Q_{term}	Potencia térmica total requerida para la evaporación	$[kW]$
$Q_{con\ recirculación}$	Potencia térmica del calentador con recirculación	$[kW]$
R	Rendimiento relativo	$[\%]$
R_{real}	Fracción efectiva de recirculación	$[-]$
t	Tiempo de residencia	$[h] \text{ o } [min]$
T	Temperatura del aire	$[^{\circ}C]$
T_{mix}	Temperatura de la mezcla de aire recirculado	$[^{\circ}C]$
v	Velocidad del aire	$\left[\frac{m}{s}\right]$
$V_{efectivo}$	Volumen requerido del tambor	$[m^3]$
$V_{mín}$	Volumen mínimo del tambor	$[m^3]$
V_{tambor}	Volumen geométrico del tambor	$[m^3]$
X_{bh}	Contenido de humedad en base húmeda del bagazo	$[-]$
Y_f	Razón de humedad del aire fresco	$\left[\frac{kg\ agua}{kg\ aire\ seco}\right]$
Y_{out}	Humedad de salida del secador	$\left[\frac{kg\ agua}{kg\ aire\ seco}\right]$
Y_{mix}	Humedad de la mezcla de aire recirculado	$\left[\frac{kg\ agua}{kg\ aire\ seco}\right]$
ΔY	Incremento de humedad en el aire de secado	$\left[\frac{kg\ agua}{kg\ aire\ seco}\right]$
η_{rec}	Eficiencia de recirculación (ahorro relativo de energía)	$[-]$
λ	Calor latente de vaporización del agua	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
e	Consumo energético térmico específico	$\left[\frac{kWh}{kg\ agua}\right]$
e_{ref}	Consumo energético específico de referencia	$\left[\frac{kWh}{kg\ agua}\right]$

$\epsilon_{opción}$	Consumo energético específico de la alternativa tecnológica evaluada	$\left[\frac{kWh}{kg\ agua} \right]$
φ_{out}	Humedad relativa de salida (criterio de no saturación)	$[-]$
$\rho_{aparente}$	Densidad aparente del bagazo seco	$\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

1. Introducción

1.1. Contexto general del problema

La industria cervecera chilena ha experimentado un notable crecimiento en las últimas dos décadas, consolidándose como una de las principales actividades del sector agroindustrial. En 2023 la producción total de cerveza en el país alcanzó los 9,66 millones de hectolitros (ACECHI, 2024). Este crecimiento se refleja en un aumento significativo del consumo per cápita, que pasó de 30 litros en 2005 a 57 litros en 2023, representando un crecimiento del 88,7% en 18 años. Durante la pandemia de COVID-19, el consumo incluso alcanzó un máximo histórico de 65 litros per cápita en 2021.

Este auge productivo tiene como consecuencia una gran producción de subproductos, siendo el bagazo de cerveza uno de los más significativos. Este subproducto sólido se genera durante el proceso de filtración del mosto en la elaboración de cerveza y constituye entre el 20 y 30% del peso original de la malta utilizada. A nivel global, por cada hectolitro (100 litros) de cerveza producido, se generan aproximadamente 20 kg de bagazo húmedo, el cual representa 85% del total de residuos sólidos derivados del proceso. (Díaz Nufio, 2021)

Actualmente, la mayor parte del bagazo es utilizado como alimento animal o fertilizante, pero su alto contenido de humedad (entre 70 y 80%) limita su transporte y almacenamiento, provocando además emisiones de metano en vertederos, un gas de efecto invernadero con un impacto climático 25 veces mayor que el dióxido de carbono. Como resultado, el aprovechamiento eficiente del bagazo sigue siendo un desafío, especialmente en regiones urbanizadas donde no existen redes de recolección establecidas. (Huaman Llontop, 2024)

1.2. Importancia del bagazo como recurso

El bagazo cervecero (Brewers' Spent Grain, BSG) constituye el principal subproducto sólido de la industria cervecera, representando aproximadamente el 85% de los residuos generados durante el proceso de producción de cerveza (Gupta & Abu-Ghannam, 2010). Se estima que a nivel mundial se producen más de 40 millones de toneladas anuales de este residuo (Gupta & Abu-Ghannam, 2010).

El bagazo cervecero se caracteriza por su elevado contenido de humedad (80–85%), lo que lo hace particularmente susceptible al deterioro microbiano y limita sus posibilidades de almacenamiento y transporte sin un tratamiento previo. A pesar de esta limitación, presenta un perfil nutricional atractivo al estar constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa, lignina y proteínas, además de minerales y aminoácidos esenciales. Estas características lo convierten en una biomasa de interés tanto para la alimentación animal como para el desarrollo de productos funcionales destinados al consumo humano (Aliyu & Bala, 2010).

Históricamente, la principal aplicación del bagazo ha sido su uso como insumo de bajo costo en la alimentación ganadera, sin embargo, estudios ya destacaban la necesidad de valorizarlo en cadenas de mayor valor agregado, incluyendo la obtención de biogás, biomateriales y alimentos enriquecidos en fibra (FAO, 1995). En América Latina, resaltan que el bajo nivel de aprovechamiento responde principalmente a limitaciones de transporte en estado húmedo y a la escasa articulación de cadenas de suministro para su procesamiento (Espinoza Escobar, 2011).

El bagazo cervecero se ha posicionado como un recurso estratégico dentro de la bioeconomía y la economía circular. Su valorización no solo permite reducir la presión ambiental asociada a la disposición de residuos, sino también generar nuevas oportunidades de negocio en áreas como la biotecnología, la producción de energía renovable y la elaboración de harinas funcionales. De esta manera, su aprovechamiento contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con producción y consumo responsables, acción climática y seguridad alimentaria. Por lo tanto, el bagazo cervecero no debe considerarse un desecho, sino una materia prima estratégica para procesos sostenibles y de alto valor agregado.

1.3. Mercado de harinas en Chile

En contraste, la industria de la harina en Chile se basa principalmente en el trigo, cuya producción nacional alcanzó 1.086.140 toneladas en 2020 (ODEPA, 2021). Sin embargo, esta producción local no es suficiente para satisfacer la demanda interna, lo que obliga al país a importar cerca de 942.565 toneladas de harina de trigo en 2023, principalmente desde Canadá (44%), Estados Unidos (28%) y Argentina (19%) (TRIDGE, 2024). El mercado de harinas tradicionales enfrenta varios desafíos:

- Dependencia de monocultivos: Limita la sostenibilidad del modelo productivo.
- Competencia por recursos agrícolas: Dificulta la diversificación de la oferta alimentaria.
- Impacto ambiental: Asociado al uso intensivo de agua y suelo, además del transporte de largas distancias en el comercio internacional (FAO, 2018).

La harina de bagazo de cerveza se presenta como una alternativa sostenible y competitiva, que no solo aprovecha un subproducto abundante, sino que también diversifica el mercado de harinas, reduciendo la presión sobre el trigo como principal insumo.

1.4. Justificación de la investigación

El desarrollo de un proceso eficiente y escalable para transformar el bagazo de cerveza en harina funcional responde a múltiples desafíos y oportunidades:

- Ambientales: Reducción de residuos sólidos, emisiones de metano y la necesidad de cumplir con objetivos globales de desarrollo sostenible.
- Sociales: Generación de productos con alto valor nutricional, contribuyendo a la seguridad alimentaria y promoviendo estilos de vida saludables.
- Económicos: Aprovechamiento de un recurso subutilizado para crear nuevas oportunidades de negocio, especialmente en sectores como el de alimentos funcionales y basados en plantas, para competir en mercados nacionales e internacionales.

2. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo general, diseñar un proceso realizando un análisis técnico-económico para la elaboración de harina a partir de bagazo de cerveza, alineado con los principios de sostenibilidad y economía circular.

Los objetivos específicos son:

1. Caracterizar el bagazo de cerveza y los requerimientos para las harinas.
2. Diseñar el proceso para la obtención de harina de bagazo.
3. Evaluar la viabilidad técnica y económica de distintas opciones de desarrollo del proyecto para la producción de harina a partir de 100 toneladas/mes de materia prima (Bagazo de cerveza húmedo)

3. Alcances y limitaciones

El presente proyecto aborda la valorización del bagazo cervecero mediante su transformación en harina funcional, integrando tanto el análisis técnico como económico del proceso. Se consideran antecedentes sobre la disponibilidad de la materia prima en Chile, junto con información bibliográfica y datos experimentales reportados en la literatura, que permiten dimensionar su potencial de aprovechamiento.

Dentro de los alcances de la investigación se incluye el desarrollo de un diseño conceptual del proceso de secado como etapa crítica en la producción de harina, así como la estimación de los costos de inversión (CAPEX) y operación (OPEX) asociados. De esta manera, el estudio entrega una visión integral de la factibilidad técnica y económica del proyecto,

aportando a la generación de alternativas sostenibles y competitivas para la industria alimentaria.

No obstante, todo se desarrolla a nivel conceptual, por lo que no contempla la implementación industrial ni la validación experimental en planta piloto. Los parámetros de diseño y operación utilizados se basan en información bibliográfica, datos experimentales reportados y supuestos de ingeniería, los cuales pueden diferir de las condiciones reales de operación. Por estas razones, los resultados obtenidos deben interpretarse como una aproximación preliminar que orienta la factibilidad técnica y económica del proceso, más que como un diseño definitivo para su implementación a escala industrial.

4. Estado del arte

4.1. Industria cervecera y generación de bagazo

4.1.1. Panorama general de la industria cervecera en Chile

En las últimas dos décadas, la industria cervecera en Chile ha experimentado un notable crecimiento tanto en volumen de producción como en diversificación de la oferta. La cerveza se ha consolidado como la bebida alcohólica preferida por los chilenos, con un consumo per cápita que aumentó de 30 litros en 2005 a 57 litros en 2023, lo que representa un incremento cercano al 90% en menos de veinte años. Durante 2021, en el contexto de la pandemia por COVID-19, el consumo per cápita alcanzó un máximo histórico de 65 litros, impulsado por medidas económicas extraordinarias y el confinamiento domiciliario, que favorecieron el consumo en el hogar (ACECHI, 2024). Ese mismo año, las ventas totales crecieron un 13%, alcanzando 1.247 millones de litros, con un crecimiento proyectado de 1.400 millones de litros hacia 2026 (Euromonitor International , 2022).

El dinamismo del mercado cervecero también se refleja en la expansión de las cervezas artesanales. En 2021 se contabilizaron más de 350 cervecerías activas en el país, con marcas como Kunstmann y Austral operando a plena capacidad. Asimismo, categorías como la cerveza negra mostraron un crecimiento explosivo, con un aumento de 83% en volumen durante ese año (Euromonitor International , 2022). Estas tendencias se suman al fenómeno de la premiumización, que ha impulsado el consumo de cervezas importadas y de especialidad, con mayor valor percibido.

La producción nacional de cerveza alcanzó en 2023 los 9,66 millones de hectolitros, mientras que la Compañía de Cervecerías Unidas (CCU) concentró un 67% del volumen total vendido, consolidándose como líder del mercado, seguida por grandes actores como Anheuser-Busch InBev y Heineken, que han expandido su capacidad productiva local (ACECHI, 2024) (Euromonitor International , 2022).

En perspectiva internacional, Chile se encuentra entre los países de mayor consumo per cápita de cerveza en América Latina, por encima de Argentina y Brasil, lo que refuerza su posición estratégica dentro de la industria regional (Kirin Holdings, 2024)

4.1.2. Proceso productivo de la cerveza

El proceso productivo de la cerveza artesanal abarca una secuencia de etapas que transforman los ingredientes básicos en un producto final de alta calidad y distintivo sabor. Este proceso inicia con la maceración, en la cual la malta previamente molida se mezcla con agua caliente en un macerador para activar las enzimas que transforman los almidones en azúcares fermentables. Es en esta etapa donde se obtiene el bagazo, el residuo sólido de la malta; se estima que por cada hectolitro de cerveza producida se generan entre 15 y 20 kg de bagazo húmedo, lo que representa un subproducto de gran interés en términos de aprovechamiento y sostenibilidad.

A continuación, el mosto resultante se somete a un proceso de filtrado para separar los residuos sólidos, y posteriormente se transfiere a la olla de cocción (ebullición). Durante esta fase, se añaden lúpulos que, además de conferir el característico amargor y aroma, facilitan la coagulación de proteínas y la esterilización del mosto. El líquido, una vez cocido, se enfría rápidamente utilizando enfriadores de placas, con el fin de alcanzar la temperatura óptima para la fermentación y preservar sus cualidades organolépticas.

Con el mosto a la temperatura adecuada, se procede a la inoculación con levadura en tanques de fermentación, donde, durante varias semanas, se produce la transformación de los azúcares en alcohol y dióxido de carbono. El producto fermentado pasa luego por un período de maduración, durante el cual se estabilizan y refinan sus sabores, y se realiza una clarificación final para asegurar un aspecto limpio y atractivo.

Finalmente, la cerveza se envasa en botellas, latas o barriles, y en muchos casos se somete a un proceso de pasteurización para garantizar su estabilidad microbiológica y prolongar su vida útil. Paralelamente a estos procesos, la industria cervecera está adoptando prácticas sostenibles, optimizando el uso de agua y energía, y explorando alternativas para la reutilización del bagazo, ya sea en la elaboración de nuevos productos o como insumo en la alimentación animal, lo que contribuye a la economía circular (Chamorro Gonzáles , 2012). Para complementar esta descripción, se adjunta la secuencia de procesos y los equipos principales involucrados (ver Anexo A), así como un diagrama esquemático del flujo de producción, que ilustran de manera visual la integración de cada etapa.

4.1.3. Generación y características del bagazo

El bagazo de cerveza es el subproducto principal obtenido tras la obtención del mosto, resultante de la filtración durante el proceso de elaboración de la cerveza. Este residuo, conocido también como Brewer's Spent Grain (BSG), representa aproximadamente el 85% del total de los subproductos generados y equivale a unos 20 kg de bagazo por cada 100 litros

de cerveza producida, según estudios internacionales (Mussatto & Dragone, 2006). Se compone principalmente de los restos de la cáscara, pericarpio y cubiertas de la semilla de la cebada malteada, con un contenido de humedad que oscila entre el 80 y el 85%. Además, el bagazo posee una composición química de alto valor nutricional, ya que contiene niveles significativos de fibra (celulosa y hemicelulosa), proteínas, lípidos, minerales y vitaminas. Esta composición lo convierte en un material potencialmente valioso para su reutilización en procesos de economía circular, ya sea como insumo en la alimentación animal o para la producción de harinas y otros productos con valor agregado (Huaman Llontop, 2024).

4.1.4. Desafíos y oportunidades asociados al bagazo

El manejo del bagazo de cerveza enfrenta desafíos significativos debido a su elevado contenido de humedad y a la inestabilidad microbiológica del material fresco, lo que limita su vida útil a menos de 24 horas sin un tratamiento adecuado. Este factor genera dificultades en su transporte y almacenamiento, especialmente para cervecerías artesanales o plantas de menor escala. Sin embargo, esta misma característica representa una oportunidad: al transformar el bagazo en productos de valor agregado, como la harina de bagazo, es posible disminuir los costos de disposición y aprovechar sus propiedades nutricionales y funcionales. Por ejemplo, estudios han demostrado que la harina obtenida tras procesos de prensado, secado y molienda conserva un alto contenido de fibra y proteína, siendo apta para su incorporación en productos de panificación y otros alimentos saludables (Mussatto & Dragone, 2006).

4.1.5. Tendencias y perspectivas futuras

El crecimiento de la economía circular y la creciente conciencia ambiental están impulsando la transformación de residuos en materias primas valiosas. En este sentido, el bagazo de cerveza, tradicionalmente considerado un residuo destinado a la alimentación animal, adquiere nuevas perspectivas como insumo para la elaboración de productos de alto valor agregado, tales como harinas ricas en fibra y proteína, biocombustibles y otros compuestos funcionales (Mussatto & Dragone, 2006). Además, la inversión en investigación y desarrollo ha permitido la implementación de tecnologías que optimizan el uso de agua y energía, y que facilitan la deshidratación y transformación del bagazo en productos estables, contribuyendo a la reducción de emisiones y al aprovechamiento integral de subproductos. Estas innovaciones se alinean con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, que promueven una gestión responsable de los residuos industriales, y representan una oportunidad estratégica para que las cervecerías diversifiquen sus fuentes de ingreso y reduzcan su impacto ambiental (Díaz Nufio, 2021). Asimismo, la integración de estos procesos de revalorización se está convirtiendo en un factor diferenciador en un mercado cada vez más orientado al consumo ecológico, lo que puede traducirse en ventajas competitivas significativas a nivel global. Por lo tanto, el futuro del aprovechamiento del bagazo de cerveza tiende a ser prometedor, al promover sistemas de producción sostenibles

que fomenten el reciclaje de subproductos y la innovación en productos alimentarios, contribuyendo decisivamente a la reducción de la huella ambiental de la industria cervecera.

4.2. Composición fisicoquímica del bagazo de cerveza

El bagazo de cerveza o Brewer's Spent Grain (BSG), es el principal residuo sólido generado durante la producción de cerveza, resultante de la separación del mosto tras la maceración de la cebada malteada, como se mencionó anteriormente. Su composición refleja principalmente las capas externas del grano, cáscara, pericarpio y tegumento, las cuales no fueron solubilizadas en el proceso.

Desde el punto de vista fisicoquímico, el BSG se caracteriza por su elevado contenido de humedad, cercano al 80% en su forma fresca, lo cual condiciona su estabilidad microbiológica y su necesidad de secado para aplicaciones industriales. Los demás componentes entre ellos hemicelulosas, celulosa, lignina, proteínas, lípidos y cenizas se expresan generalmente en base seca. Además, el bagazo contiene una variedad de minerales y vitaminas que potencian su valor como materia prima para productos con valor agregado, como ingredientes funcionales, biofertilizantes o sustratos para bioprocesos. En la Tabla 1 se presenta una recopilación de la composición química del bagazo de cerveza.

Tabla 1. Composición química promedio del bagazo de cerveza (Karlovic, y otros, 2020)

Componente	Valor
Agua	75-80 %
Hemicelulosa	20-25 %
Proteína	19-30 %
Celulosa	12-25 %
Lignina	12-28%
Lípidos	10 %
Cenizas	2-5%
Minerales	
Fósforo	2000 ppm
Calcio	1040 ppm
Magnesio	690 ppm
Silicio	240 ppm
Vitaminas	
Colina	1800 ppm
Niacina (Vitamina B3)	44 ppm
Ácido Pantoténico (B5)	8,5 ppm
Riboflavina (B2)	1,5 ppm
Tiamina (B1)	0,7 ppm
Piridoxina (B6)	0,7 ppm
Ácido Fólico	0,2 ppm
Biotina	0,1 ppm

Además de su valor nutricional, el bagazo posee propiedades energéticas interesantes. Su poder calorífico neto y bruto asciende a 18,64 MJ/kg y 20,14 MJ/kg de masa seca, respectivamente (Russ, Mörtel, & Meyer-Pittroff, 2005). Además, posee una densidad promedio de 0,45 kg/L y una capacidad de absorción de triglicéridos de 1,6 g/g base seca, lo que sugiere posibles aplicaciones como absorbente en procesos industriales (Hernández & Rodríguez, 1999).

4.3. Aplicaciones actuales del bagazo

El bagazo de cerveza (BSG) es, con diferencia, el subproducto más abundante generado durante el proceso cervecero. Tradicionalmente, su aplicación ha estado orientada a la alimentación animal, principalmente en rumiantes como bovinos y ovinos, debido a su elevado contenido de fibra, proteínas y humedad. En este contexto, se utiliza tanto en estado húmedo como seco, aportando valor nutricional como suplemento proteico, energético y funcional. Su uso en dietas animales ha demostrado aumentar la producción de leche y el peso vivo, aunque puede afectar negativamente la fertilidad y algunos parámetros bioquímicos en el ganado (Karlovic, y otros, 2020).

En las últimas décadas se ha intensificado la investigación para diversificar sus aplicaciones con un enfoque de revalorización. Una de las áreas más destacadas ha sido la incorporación del bagazo en alimentos para consumo humano. Mediante procesos de secado y molienda se transforma en una harina rica en fibra y proteínas, apta para ser utilizada en panificación, galletas, barras de cereal, pastas y snacks funcionales. Aunque su inclusión debe ser moderada para evitar efectos negativos en textura y aceptabilidad sensorial, se han observado beneficios en el aporte de fibra dietaria, reducción calórica y presencia de compuestos bioactivos de interés nutricional (Saberian, y otros, 2024).

El bagazo también se emplea como sustrato en procesos biotecnológicos, incluyendo la producción de enzimas (xilanasas, amilasas y celulasas) y la fermentación para la obtención de compuestos como ácido láctico, xilosa o etanol. Además, ha demostrado ser un medio adecuado para el cultivo de microorganismos y para la inmovilización de levaduras en procesos de fermentación continua (Bartolomé & Gómez-Cordovés, 1999).

Desde la perspectiva energética, el BSG posee un poder calorífico considerable, lo que favorece su uso en combustión directa, producción de biogás mediante digestión anaerobia o en la fabricación de bioetanol. Estas alternativas representan estrategias sostenibles para disminuir la dependencia de combustibles fósiles (Arias Lafargue & López Ríos, 2015).

En cuanto a materiales, el bagazo ha sido utilizado en la elaboración de ladrillos ecológicos, actuando como agente poroso que mejora la resistencia mecánica, y en la producción de papel y biopolímeros. También se ha explorado su empleo como adsorbente natural en la remoción de metales pesados y colorantes presentes en aguas residuales (Mussatto S. I., 2014).

Estas aplicaciones posicionan al BSG como un recurso versátil con potencial de valorización en ámbitos alimentarios, energéticos y biotecnológicos, contribuyendo a estrategias de economía circular y reducción de impactos ambientales (Aliyu & Bala, 2010).

4.4. Producción de harinas funcionales

El bagazo de cerveza (BSG), una vez estabilizado y procesado, puede transformarse en una harina funcional con alto valor agregado, posicionándose como una alternativa innovadora en el desarrollo de alimentos saludables. Este proceso implica principalmente etapas de secado, molienda y tamizado, mediante las cuales se reduce el contenido de humedad hasta valores cercanos al 10 %, facilitando su conservación y posterior incorporación en matrices alimentarias secas (Martinez, 2020).

Desde el punto de vista nutricional, la harina de bagazo destaca por su elevada concentración de fibra dietaria y proteínas, así como por su contenido en minerales como calcio, fósforo, magnesio y potasio, y compuestos bioactivos (Bartolomé & Gómez-Cordovés, 1999). Este perfil composicional le confiere características funcionales que pueden ser aprovechadas en la formulación de productos orientados a poblaciones con requerimientos especiales, como personas con diabetes, dislipidemias o trastornos digestivos.

Diversos estudios han evaluado la viabilidad técnica y sensorial de la incorporación de esta harina en productos panificados, galletas, snacks, barritas energéticas y otros alimentos funcionales (Chetrariu & Dabija, 2020). En general, se recomienda su inclusión en niveles de 5 a 20 % para mantener una adecuada textura, aceptabilidad organoléptica y calidad tecnológica del producto final. La adición de harina de bagazo permite mejorar la capacidad de retención de agua, la viscosidad de la masa y el contenido de fibra total del alimento, sin comprometer significativamente sus propiedades sensoriales si se maneja adecuadamente la formulación (Huaman Llontop, 2024).

4.5. Enfoque de economía circular y sostenibilidad

La valorización del bagazo cervecero se alinea con la economía circular, cuyo objetivo es mantener el valor de los recursos en el sistema por el mayor tiempo posible, transformando subproductos industriales en insumos para nuevas cadenas productivas y desplazando el modelo lineal de “extraer-producir-desechar” (Díaz Nufio, 2021).

Este enfoque reduce impactos ambientales y, a la vez, abre oportunidades de innovación y emprendimiento local al transformar un residuo abundante y estable en oferta en productos con valor económico y funcional, fortaleciendo ecosistemas productivos más resilientes e inclusivos (Chetrariu & Dabija, 2020).

Desde la perspectiva ambiental, el aprovechamiento del bagazo disminuye la presión sobre vertederos y evita emisiones de metano asociadas a su descomposición cuando no se gestiona adecuadamente; integrar el bagazo en harinas funcionales, biocombustibles, materiales o

sustratos fermentativos sustituye materias primas vírgenes y promueve cadenas de suministro más limpias (Díaz Nufio, 2021).

A nivel de políticas y metas globales, la valorización de subproductos se enmarca en la bioeconomía y contribuye a los objetivos de sostenibilidad (consumo y producción responsables), impulsando prácticas como el análisis de ciclo de vida y la reducción de desperdicios en la industria alimentaria. Por lo tanto, el bagazo de cerveza deja de ser un pasivo ambiental para convertirse en un recurso activo que viabiliza modelos productivos más eficientes, circulares y competitivos, con beneficios ambientales, sociales y económicos (Chetrari & Dabija, 2020).

5. Estudio de Mercado

5.1. Materias primas utilizadas

La materia prima fundamental del presente proyecto es el bagazo cervecero húmedo, subproducto generado durante el proceso de elaboración de cerveza. Residuo compuesto principalmente por las capas externas del grano de cebada.

Con base en antecedentes técnicos y supuestos proyectados, se considera una alimentación mensual de 100 toneladas de bagazo húmedo, lo que corresponde a la producción estimada de residuos generados por aproximadamente 500.000 litros de cerveza al mes, tomando como referencia un rendimiento típico de 20 kg de bagazo por cada 100 litros de cerveza producida (Pérez-Alva & Martín-del-Campo, 2025). Para abastecer este volumen, se proyecta establecer vínculos con cervecías de la Región de Valparaíso, particularmente con Cervecería CODA (Casablanca), identificada como un proveedor potencial por su ubicación estratégica y escala operativa.

Aunque aún no existe un acuerdo formal, se plantea como hipótesis que el bagazo pueda obtenerse sin costo, dada su clasificación como residuo no valorizado en muchas cervecías. Sin embargo, se contempla también la posibilidad de un costo de adquisición en caso de que el proveedor lo exija. En ese escenario, la empresa UpFoods (actual colaboradora en el desarrollo del presente estudio) estima un rango de \$50 a \$200 CLP por kilogramo de bagazo húmedo como referencia para el análisis económico.

Para minimizar pérdidas por deterioro y reducir costos de almacenamiento, se proyecta un modelo de procesamiento cercano al punto de generación, evitando el acopio prolongado del bagazo. Dado que su vida útil en estado fresco es inferior a 24 horas, el diseño de planta asume un flujo de materia prima justo a tiempo, con recepción directa desde cervecías locales. Si bien aún no se dispone de datos concretos sobre los costos de transporte, se toma como premisa operativa una logística optimizada mediante el emplazamiento de la planta en las cercanías de las fuentes de suministro.

El tipo de tecnología de secado aún no ha sido definido, ya que será objeto de análisis comparativo en el capítulo técnico-económico entre tres alternativas: secador rotatorio, secador de bandejas y secador spin flash, evaluando su viabilidad energética y económica. Adicionalmente, el funcionamiento de la planta requerirá materias auxiliares como energía eléctrica y térmica, cuya demanda se integrará posteriormente en el modelo de evaluación global.

El enfoque adoptado permite aprovechar de forma eficiente un residuo agroindustrial abundante y local, generando un modelo de producción sustentable que minimiza costos operativos y refuerza los principios de valorización de residuos bajo el sistema de la economía circular.

5.2. Mercado Objetivo

El mercado objetivo de este proyecto corresponde al segmento de consumidores y empresas del sector alimentario que demandan ingredientes funcionales, sostenibles y con valor nutricional agregado. En particular, se enfoca en la comercialización de harina funcional obtenida a partir de bagazo cervecero, destinada a su uso en la formulación de productos alimenticios saludables.

Este mercado ha mostrado un crecimiento sostenido, impulsado por la adopción de dietas más conscientes, la preferencia por ingredientes con mayor contenido de fibra y proteínas de origen vegetal y la preocupación por prácticas productivas más sostenibles. Estas tendencias responden al avance de la bioeconomía y a políticas de consumo y producción responsables que promueven cadenas de suministro más limpias (FAO, 2018).

La harina de bagazo se posiciona como ingrediente de valor para panificación, pastas y cereales, actuando como agente de enriquecimiento nutricional. Se reportan mejoras del perfil nutricional y funcional con niveles de incorporación que deben optimizarse para preservar la aceptabilidad tecnológica y sensorial (Saberian, y otros, 2024).

Dentro de este mercado, se pueden identificar los siguientes subsegmentos objetivos:

- Empresas de panificación artesanal o industrial, interesadas en enriquecer sus productos con ingredientes funcionales (panes integrales, galletas, crackers, pastas, etc.).
- Emprendimientos de alimentos saludables, que desarrollan productos para consumidores con dietas específicas (veganos, celíacos, deportistas).
- Consumidores finales, interesados en alimentos con beneficios nutricionales, a través de canales como ferias, tiendas a granel, e-commerce y marketplaces especializados.
- Supermercados o marcas propias, que podrían incorporar este insumo como parte de su estrategia de sostenibilidad y reformulación de productos.

- Empresas exportadoras de alimentos diferenciados, que buscan ingredientes funcionales innovadores con narrativa ambiental.

5.3. Producción nacional del producto

La producción de harinas en Chile ha estado históricamente dominada por derivados del trigo, tanto para consumo humano directo como para aplicaciones industriales. No obstante, en los últimos años ha emergido un mercado creciente para harinas funcionales y especiales, en respuesta a la demanda de consumidores por alternativas más saludables, sostenibles y con valor nutricional agregado. Pese al auge de estas nuevas harinas, actualmente no existen registros oficiales consolidados sobre la producción industrial de harina de bagazo cervecero para consumo humano. La valorización de este subproducto se encuentra en etapa emergente en el país, limitada a experiencias de pequeña escala o de carácter experimental. Algunas iniciativas destacadas incluyen:

- R-Food: empresa chilena que trabaja con subproductos agroindustriales, incluyendo bagazo cervecero, para desarrollar harinas funcionales sostenibles. Opera bajo un modelo B2B en pequeña escala y colabora con empresas interesadas en desarrollar productos circulares (R-Food, 2025).
- Bagán (RM): emprendimiento que proviene de la empresa Upfoods, el cual elabora un paté vegetal utilizando harina de bagazo cervecero como base, habiendo valorizado cerca de 500 toneladas de bagazo desde 2021 (González Farfán, 2025).
- Proyectos universitarios: como los desarrollados en la Universidad de La Frontera (UFRO) y la Universidad Austral de Chile (UACH), enfocados en aplicaciones de bagazo en alimentación animal y acuícola.

Dado que no existen cifras públicas específicas sobre la transformación de bagazo cervecero en harina para consumo humano, se establece como supuesto técnico que actualmente menos del 0,5 % del total de bagazo generado en Chile se convierte en productos alimentarios. Esta estimación conservadora se basa en la escasa presencia comercial del producto, la ausencia de producción industrializada, y la comparación con experiencias internacionales, donde la valorización de subproductos agroindustriales en etapas iniciales rara vez supera el 1 % del volumen total (Mussatto & Dragone, 2006).

Considerando que en Chile se generan aproximadamente 200.000 toneladas anuales de bagazo cervecero húmedo (UFRO, 2023), la producción efectiva de harina funcional de bagazo no superaría las 1.000 toneladas anuales, distribuidas principalmente en aplicaciones experimentales o proyectos de innovación.

Este panorama revela una oportunidad estratégica para nuevos proyectos industriales. La harina de bagazo de cerveza no solo contribuiría a diversificar el mercado de harinas funcionales, sino que también se alinearía con las tendencias globales de sostenibilidad, economía circular y alimentación consciente.

5.4. Oferta de harinas funcionales en Chile

La industria molinera en Chile se ha concentrado históricamente en la producción de harina de trigo, en sus distintas clasificaciones: primera, especial e integral. Según datos de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), en el año 2023 se produjeron en el país 1.306.366 toneladas de harina de trigo de primera, y 49.446 toneladas de harinas especiales, estas últimas incluyendo aquellas derivadas de granos alternativos como avena, arroz, centeno y legumbres. Estas cifras indican que las harinas funcionales representan solo un 3,6 % del total de producción nacional, pero su presencia ha crecido en la última década impulsada por el auge de la alimentación saludable y las dietas especiales (ODEPA, 2024).

A pesar de su menor volumen, el mercado de harinas especiales en Chile ha ampliado su alcance, especialmente en canales alternativos como tiendas saludables, ferias orgánicas y plataformas de e-commerce. Productos elaborados a partir de quinoa, arroz, avena, lentejas o almendras han ganado protagonismo por sus características funcionales, tales como alto contenido de fibra, ausencia de gluten, índice glicémico bajo o proteínas vegetales.

En cuanto a los precios, los datos disponibles permiten diferenciar entre harinas tradicionales y harinas especiales. Para la harina de trigo, ODEPA reporta que el precio promedio mayorista en junio de 2024 fue de \$540 CLP/kg en planta molinera (ODEPA, 2024). En el mercado minorista, los valores varían según el formato y la marca, oscilando entre \$800 y \$1.100 CLP/kg en supermercados y plataformas de venta en línea.

En el caso de harinas especiales, la información oficial es limitada. Por lo tanto, se utiliza precios públicos disponibles en plataformas de venta directa y supermercados para estimar el rango de mercado actual (ver Tabla 2).

Tabla 2. Precios de venta de harinas especiales.

Tipo de harina	Precio estimado [CLP]	Formato de venta [kg]	Referencia de venta directa
Avena	\$2.000	1	(Dulce Frut, 2025)
Arroz	\$2.350-\$3800	1	(ARADOS, 2025)
Quinoa	\$16.990	2	(Cosecha Justa, 2025)
Lentejas	\$1.345	0,5	(Vitaminas Chile, 2025)
Almendras	\$15.990	1	(MercadoSilvestre, 2025)

Los canales de comercialización para estas harinas incluyen:

- Supermercados (Jumbo, Líder, Unimarc).
- Tiendas saludables y emporios (La Veguita, Emporio Natural, Nutraline).

- E-commerce directo (cornershop, La Vega Delivery, Mercado Libre).
- Ferias ecológicas y cooperativas de consumo responsable.

En este contexto, la harina de bagazo cervecero si bien aún no se encuentra disponible en el mercado masivo, podría posicionarse en el segmento de harinas funcionales, compartiendo características como su alto contenido de fibra dietaria, proteínas vegetales, ausencia de aditivos y origen natural. Su diferenciación estaría principalmente en su origen circular, ya que proviene de la valorización de un subproducto de la industria cervecera, lo que le otorga un atributo adicional de sostenibilidad. Su comercialización podría aprovechar tanto los canales tradicionales ya establecidos para otras harinas especiales como también vincularse a programas de economía circular, innovación alimentaria o sostenibilidad, apuntando a un público consciente que valore tanto lo funcional como lo ambiental.

5.5. Importaciones y comercio exterior

Este apartado analiza la situación de las importaciones y exportaciones de harinas en Chile utilizando los datos disponibles más recientes, correspondientes al año 2024. Se consideran las categorías arancelarias de harina de trigo y harinas de otros cereales (avena, maíz, centeno, cebada, sorgo, quinoa, entre otros), ya que actualmente no existe una clasificación específica ni estadísticas oficiales para la harina de bagazo cervecero. Por lo tanto, el análisis se basa en los productos más cercanos tanto funcional como comercialmente, para proyectar el posible comportamiento de mercado del producto propuesto. Chile participa activamente en el comercio exterior de harinas, tanto en calidad de importador como exportador. Esta dinámica se distribuye principalmente en las dos categorías ya mencionadas, harina de trigo y harinas de otros cereales, permitiendo visualizar el contexto en que podrían insertarse nuevos productos como la harina bagazo cervecero.

5.5.1. Importaciones de harina de trigo (1101)

Durante el año 2024, Chile importó un total de 22.718 [ton] de harina de trigo, por un valor de 8,87 millones de USD, con un precio promedio de 391 [USD/ton]. En la Tabla 3 se presentan las importaciones de harina de trigo desglosadas por país exportador.

Tabla 3. Importaciones de harina de trigo 2024 (ITC, 2025).

País exportador	Toneladas	Valor [miles USD]	[USD/ton]
Zona franca	12.204	3.779	310
Argentina	8.267	3.441	416
Turquía	1.076	523	486
Italia	903	911	1.009
Paraguay	137	70	511
Estados Unidos	130	149	1.146

Se puede observar que las zonas francas y Argentina concentraron más del 90 % de las importaciones de harina de trigo hacia Chile. Cabe señalar que la categoría “zonas francas” corresponde a reexportaciones desde plataformas logísticas o depósitos bajo régimen aduanero especial, sin que se identifique necesariamente el país productor original.

5.5.2. Importaciones de harinas de otros cereales (código 1102)

Chile también importó 22.473 toneladas de harinas de otros cereales en 2024, por un valor de 17,5 millones de USD, con un precio promedio de 779 [USD/ton]. Harinas de otros cereales comprende productos derivados de avena, maíz, arroz, cebada, centeno, sorgo, trigo sarraceno, quinoa, mijo y amaranto, entre otros, excluyendo la harina de trigo. En la Tabla 4 se presentan las importaciones de harina de otros cereales desglosadas por país exportador.

Tabla 4. Importaciones de harinas de otros cereales, 2024 (ITC, 2025).

País exportador	Toneladas	Valor [miles USD]	[USD/ton]
Colombia	17.541	12.975	740
México	3.369	3.283	974
Argentina	1.096	591	539
Perú	155	69	445
Italia	127	197	1.551
Estados Unidos	61	147	2.410

Colombia y México concentraron más del 93 % de las importaciones chilenas de esta categoría.

5.5.3. Exportaciones de harina desde Chile

Aunque en menor volumen que las importaciones, Chile también exporta harinas:

- Harina de trigo: Se exportaron 52 toneladas en 2024, principalmente a Perú (40 [ton]), con un precio promedio de 1.788 [USD/ton].
- Harinas de otros cereales: Se exportaron 11.986 [ton], dirigidas mayoritariamente a los siguientes países (ver Tabla 5).

Tabla 5. Exportaciones de harina desde Chile, 2024 (ITC, 2025).

Destino	Toneladas	Precio unitario [USD/ton]
Estados Unidos	3.966	990
Colombia	3.255	665
México	911	973
República Dominicana	970	667

Estas cifras reflejan que Chile cuenta con los canales sanitarios, logísticos y comerciales para insertar harinas diferenciadas en mercados de América Latina y Norteamérica.

5.6. Proyección de la demanda

La proyección de la demanda para la harina funcional de bagazo cervecero considera tanto el comportamiento histórico de las importaciones y exportaciones de harinas de otros cereales en Chile (código arancelario 1102) como la capacidad instalada de producción del proyecto.

5.6.1. Demanda aparente de harinas de otros cereales en Chile

En base a los datos disponibles más recientes de comercio exterior entre 2020 y 2024, se ha estimado la demanda aparente (importaciones menos exportaciones) de harinas de otros cereales, observándose los siguientes volúmenes expuestos en la Tabla 6.

Tabla 6. Importaciones, exportaciones y demandas aparentes anuales (ITC, 2025).

Año	Importaciones [ton]	Exportaciones [ton]	Demanda aparente [ton]
2019	14.698	6.848	7.850
2020	15.886	6.972	8.914
2021	16.805	5.536	11.269
2022	20.105	9.341	10.764
2023	19.663	10.773	8.890
2024	22.473	11.986	10.487

En este estudio se utiliza la demanda aparente como referencia, dado que Chile no registra una producción industrial significativa de harinas de otros cereales, siendo el comercio exterior (importaciones y exportaciones) el principal indicador disponible para aproximar el consumo interno.

5.6.2. Proyección de la demanda

Para estimar el comportamiento futuro de la demanda de harinas de otros cereales en Chile, se utilizó como base el período 2019–2024, dado que en estos años el país presenta de manera consistente un saldo importador positivo, lo cual refleja de mejor forma la situación actual del mercado.

La proyección se realizó mediante el cálculo de la tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR), utilizando la siguiente expresión (ver Ec.1) (Fernando, 2024).

$$CAGR = \left(\left(\frac{EV}{BV} \right)^{\frac{1}{n_{años}}} - 1 \right) \cdot 100 \text{ (Ec. 1)}$$

El cálculo entregó un valor de 5,96 % anual, el cual fue utilizado como supuesto para proyectar la demanda hasta 2035. La Tabla X presenta los resultados de la proyección.

Tabla 7. Proyección de la demanda 2025-2035.

Año	Demanda proyectada[ton]
2025	11.112
2026	11.775
2027	12.477
2028	13.221
2029	14.009
2030	14.845
2031	15.730
2032	16.668
2033	17.662
2034	18.716
2035	19.832

5.6.3. Capacidad de producción proyectada del proyecto

La planta contempla inicialmente la recepción de 100 toneladas de bagazo húmedo al mes, lo que permite obtener: 27 toneladas de harina seca mensuales y 324 toneladas de harina seca anuales. Esta capacidad inicial se encuentra limitada por la disponibilidad confirmada de materia prima. No obstante, el proyecto considera escenarios de crecimiento progresivo en la medida que se establezcan nuevas alianzas con cervecerías y se expanda la red de recolección de bagazo cervecero. En función del crecimiento del abastecimiento de materia prima, se consideran escenarios de aumento de capacidad (ver Tabla 8).

Tabla 8. Escenarios de abastecimiento de materia prima.

Escenario	Materia prima disponible [ton/mes]	Producción anual de harina seca [ton]
Conservador	100	324
Base	150	486
Optimista	200	648

5.6.4. Participación proyectada en el mercado

Se estima la participación del proyecto en el mercado nacional de harinas de otros cereales bajo los tres escenarios de producción expuestos la Tabla 8. La Tabla 9 muestra la participación relativa proyectada entre 2025 y 2035, considerando la demanda estimada para cada año.

Tabla 9. Participación proyectada en el mercado nacional de harinas especiales 2025-2035.

Año	Demanda proyectada [ton]	Conservador (324 [ton])	Base (486 [ton])	Optimista (648 [ton])
2025	11.112	2,92%	4,37%	5,83%
2026	11.775	2,75%	4,13%	5,50%
2027	12.477	2,60%	3,90%	5,19%
2028	13.221	2,45%	3,68%	4,90%
2029	14.009	2,31%	3,47%	4,63%
2030	14.845	2,18%	3,27%	4,37%
2031	15.730	2,06%	3,09%	4,12%
2032	16.668	1,94%	2,92%	3,89%
2033	17.662	1,83%	2,75%	3,67%
2034	18.716	1,73%	2,60%	3,46%
2035	19.832	1,63%	2,45%	3,27%

Los resultados indican que la harina funcional de bagazo cervecero podría capturar inicialmente entre un 2,9 % y un 5,8 % del mercado nacional de harinas de otros cereales en el año 2025, dependiendo del escenario considerado. Durante los primeros años de operación (2025–2027), la participación proyectada se mantendría en un rango de 2,6 % a 5,2 %. A medida que la demanda total aumenta hacia 2035, la participación relativa tiende a disminuir.

Este nivel de participación sigue siendo relevante considerando que se trata de un producto nuevo, basado en la valorización de residuos cerveceros. En una primera etapa, la producción estará limitada por la disponibilidad confirmada de materia prima; sin embargo, la expansión mediante alianzas con nuevas cervecías y el incremento en la demanda de ingredientes funcionales permitirán sostener y fortalecer la participación en el mercado en el largo plazo.

5.7. Oportunidades y desafíos

La introducción de harina funcional a partir de bagazo de cerveza en el mercado chileno de harinas especiales presenta una serie de oportunidades y desafíos estratégicos que deben ser considerados para su adecuada inserción y crecimiento sostenible.

5.7.1. Barreras de entrada

Una de las principales barreras de entrada corresponde al desconocimiento del consumidor. Actualmente, el público promedio no está familiarizado con la harina de bagazo cervecero como ingrediente alimentario, lo que puede generar reticencia inicial a su adopción. Esto implica la necesidad de desarrollar estrategias de educación y marketing que destaquen sus beneficios funcionales y ambientales para facilitar su aceptación.

A esta dificultad se suman aspectos regulatorios. La harina de bagazo cervecero no cuenta con una clasificación específica dentro de los códigos arancelarios vigentes ni está

explícitamente normada en los reglamentos alimentarios nacionales. Por esta razón, será indispensable avanzar en su validación en cuanto a inocuidad, estandarización de procesos y cumplimiento de requisitos de etiquetado, de modo de garantizar su incorporación al mercado.

Finalmente, la dependencia de la disponibilidad de bagazo fresco constituye otra limitación relevante. Al tratarse de un subproducto cuya generación está vinculada directamente a la producción de cerveza, su oferta es variable y estacional, lo que impone restricciones a la escala productiva inicial. Para superar este obstáculo, será fundamental establecer alianzas estratégicas con múltiples cervecerías que aseguren un suministro estable y suficiente de materia prima.

5.7.2. Factores favorables

La valorización del bagazo cervecero se inserta en la tendencia actual hacia la economía circular, donde los subproductos agroindustriales dejan de considerarse residuos y pasan a ser materias primas útiles. En este contexto, tanto las políticas públicas como las estrategias de sostenibilidad de las empresas favorecen el aprovechamiento de estos recursos, lo que genera un entorno más favorable para la aceptación de la harina de bagazo en el mercado.

Desde la perspectiva de producto, la harina de bagazo ofrece un perfil nutricional atractivo gracias a su alto contenido de fibra y proteínas de origen vegetal, lo que permite diferenciarla dentro de la categoría de harinas funcionales y posicionarla en un segmento asociado a alimentos saludables, naturales y sostenibles.

El mercado de harinas especiales también constituye un factor favorable. La expansión de alternativas a base de avena, quinoa, arroz y legumbres demuestra una apertura creciente de los consumidores hacia nuevas fuentes de harina no tradicionales, lo que crea un entorno receptivo para la introducción de la harina de bagazo.

Finalmente, la creciente conciencia ambiental refuerza la preferencia por productos con menor huella ecológica. Por lo tanto, la harina de bagazo puede ser percibida como una solución que reduce desperdicios minimiza el uso de recursos y contribuye a la conformación de cadenas de valor más sostenibles.

5.7.3. Riesgos comerciales

El proyecto enfrenta riesgos comerciales asociados a la competencia y a la percepción del producto. Por un lado, ya existe competencia directa en Chile con empresas que elaboran harina a partir de bagazo cervecero, así como competencia indirecta proveniente de harinas funcionales alternativas como avena, quinoa, arroz y legumbres, que cuentan con mayor posicionamiento en el segmento de alimentos saludables. Esta situación podría dificultar la inserción inicial del producto y exigir mayores estrategias diferenciadoras.

Otro riesgo importante corresponde a la sensibilidad del mercado a los precios. Las harinas funcionales suelen presentar valores superiores a los de las harinas tradicionales, lo que puede limitar su penetración en segmentos de consumidores con mayor restricción presupuestaria y condicionar el crecimiento de la demanda.

Por último, la percepción del origen del producto representa un desafío adicional. El vínculo de la harina con un residuo puede generar resistencia en algunos consumidores si no se comunica de manera adecuada el proceso de transformación y el valor agregado asociado. En este sentido, la educación y la transparencia en la comunicación serán claves para superar estas barreras y lograr la aceptación en el mercado.

5.7.4. Ventajas competitivas de la propuesta

La principal ventaja competitiva del proyecto radica en su capacidad de transformar un residuo abundante de la industria cervecera en un producto con valor agregado, alineado con los principios de economía circular y sostenibilidad. El bajo costo relativo de la materia prima, junto con su perfil nutricional diferenciado por el alto contenido de fibra y proteínas, permiten posicionar la harina de bagazo como un ingrediente funcional atractivo frente a alternativas tradicionales y emergentes. A esto se suma un potencial de escalabilidad asociado a la posibilidad de establecer alianzas con múltiples cervecerías, lo que refuerza su viabilidad a largo plazo.

6. Estudio Técnico

6.1. Descripción del proceso productivo

El proceso productivo para la elaboración de harina a partir de bagazo cervecero contempla una serie de operaciones que transforman este subproducto en un ingrediente seco, estable y funcional, apto para aplicaciones alimentarias o de alimentación animal. Este flujo de producción se inicia con la recepción del bagazo fresco desde las cervecerías y continúa con su acondicionamiento, deshidratación, molienda, clasificación y envasado.

Debido a la alta humedad del bagazo en su estado original (aproximadamente 75–85%), una de las etapas clave del proceso es la reducción de contenido de agua. Para esto, se consideran tres alternativas tecnológicas de secado que serán evaluadas comparativamente en los siguientes incisos. Las tres alternativas son: un secador rotatorio de contacto directo, un secador de bandejas tipo batch o un secador tipo flash.

6.1.1. Recepción y manipulación del bagazo

El bagazo cervecero es recibido desde plantas cerveceras cercanas en estado húmedo, con alta actividad microbiológica y riesgo de deterioro. Por esta razón, debe ser transportado en condiciones adecuadas y procesado dentro de un plazo inferior a 24 horas desde su generación (Karlović, y otros, 2020). En planta, el material es descargado en una tolva de

recepción y trasladado mediante un transportador mecánico hacia la zona de acondicionamiento inicial.

Como medidas operativas, se registran trazabilidad del lote (origen y hora de generación/recepción), control rápido (temperatura, humedad, inspección visual/olor) y limpieza de superficies en la zona de descarga y transporte. Si no es posible procesar de inmediato, puede aplicarse refrigeración/congelación de contención a corto plazo. Sin embargo, para almacenamiento prolongado se debe tener un bagazo de cerveza con la humedad objetivo del proceso (10%) lo que vendría siendo post etapa de secado.

6.1.2. Pretratamiento mecánico

Se incorpora un pretratamiento mecánico (prensa o centrífuga) para reducir la humedad del bagazo al rango 55–65 % previo al secado. Esto disminuye el tiempo de residencia y el consumo energético. Para el pretratamiento existen opciones como, prensa de tornillo, decantador/centrífuga o filtro-prensa de membrana, seleccionándose según caudal, limpieza requerida y operación aguas abajo.

La conveniencia del desaguado previo depende del secador elegido.

- Bandejas: imprescindible un pretratamiento para reducir la cantidad de agua libre para así evitar tiempos de residencia altos y consumo energético elevado.
- Rotatorio: puede admitir pulpas más húmedas; aun así, el desaguado reduce directamente el combustible por tonelada de producto seco.
- Flash: requiere alimentación desaglomerada y homogénea; se recomienda reducir la cantidad de agua libre y acondicionar tamaño de partícula para asegurar una buena dispersión en el contacto gas-sólido.

6.1.3. Secado

La etapa de secado reduce la humedad del bagazo hasta $\leq 10\%$ para su conservación y posterior molienda. Se consideran las siguientes configuraciones:

- Secador rotatorio (continuo): apto para manejar material húmedo; operación robusta y estable a caudal constante.
- Secador de bandejas (por lotes): operación discontinua con mayor tiempo de residencia; ofrece control fino de producto, especialmente tras el pretratamiento mecánico.
- Secador flash (continuo): contacto gas-sólido de alta intensidad y tiempos muy cortos; requiere alimentación desaguada (55–65%) y bien desaglomerada.

6.1.4. Molienda

Una vez seco ($\leq 10\%$ de humedad), el bagazo se somete a reducción de tamaño para obtener una harina apta para formulaciones alimentarias. Se emplea molienda mecánica con equipos

de impacto o de corte, dependiendo de la granulometría objetivo y las características físicas del material.

Para asegurar un proceso estable, se alimenta el molino con material desaglomerado, caudal regular y humedad compatible con molienda (producto seco). La operación puede ser en circuito cerrado, con clasificación posterior y recirculación del sobre tamaño al molino hasta cumplir la especificación de tamaño. Se incorpora captación de polvo y se conduce el producto directamente a tamizado y acondicionamiento

6.1.5. Tamizado y almacenamiento

La harina obtenida en la etapa de molienda es sometida a un proceso de clasificación por tamaño de partícula mediante tamizado mecánico, utilizando zarandas vibratorias o equipos equivalentes. Esto permite eliminar partículas demasiado gruesas o finas, obteniendo un producto con granulometría homogénea.

El almacenamiento se realiza en recipientes cerrados o en bolsas bien selladas, ubicados en un lugar seco y limpio, protegido de la humedad y del calor directo. Cada lote se rotula con fecha y se organiza. Si el almacenamiento se prolonga, se recomienda revisar periódicamente la humedad y el estado del producto antes de su despacho o uso.

6.2. Diagrama de flujo

El proceso general de producción de harina de bagazo de cerveza se representa en los diagramas de flujo que se muestran a continuación. Todas las alternativas comparten las mismas operaciones básicas desde la recepción de la materia prima hasta el envasado del producto final, diferenciándose únicamente en la tecnología empleada en la etapa de secado.

6.2.1. Opción A: Secador rotatorio

En esta alternativa el bagazo es introducido en un tambor rotatorio con corriente de aire caliente, obteniéndose un secado continuo. Si bien la oferta comercial no incluye pretratamiento mecánico, en el flujo se considera esta etapa para reducir la carga térmica y favorecer la eficiencia del proceso (ver Figura 1).

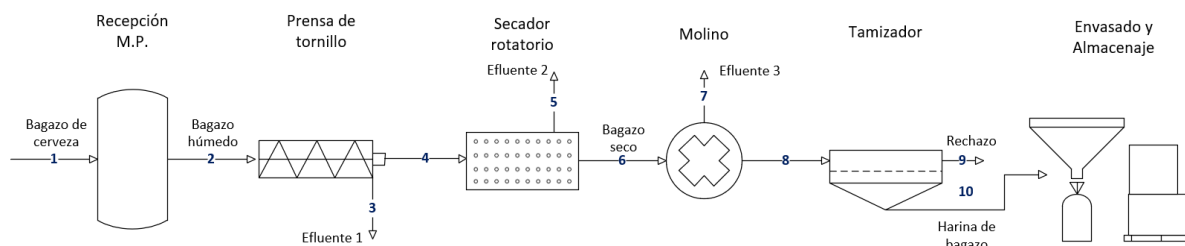


Figura 1. Diagrama opción A.

6.2.2. Opción B: Secador de bandejas

En este caso el secado se realiza por lotes en hornos de convección forzada, donde el bagazo se distribuye en bandejas de acero inoxidable y se somete a aire caliente hasta alcanzar la humedad deseada (ver Figura 2).

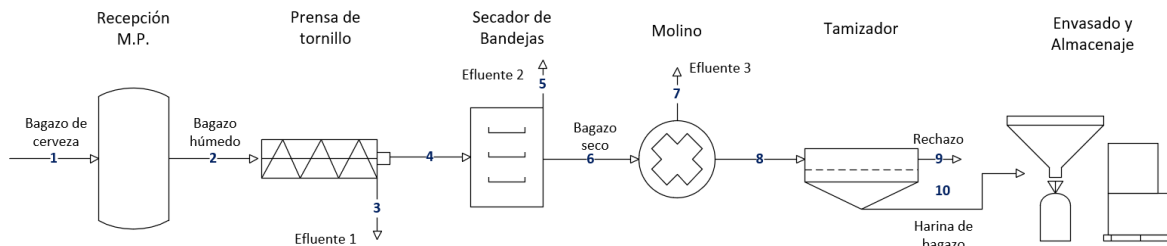


Figura 2. Diagrama opción B

6.2.3. Opción C: Secador flash

La tercera alternativa contempla un secador flash, en el cual el bagazo previamente desaguado se pone en contacto con una corriente de aire caliente a alta velocidad, lo que permite un secado casi instantáneo y la obtención de una harina de granulometría fina (ver Figura 3).

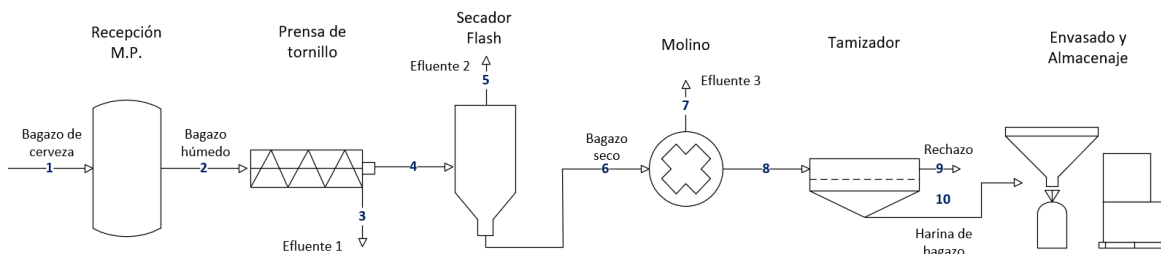


Figura 3. Diagrama opción C.

El detalle de las corrientes de proceso, incluyendo sus composiciones y caudales, se presenta en el Anexo B. Cabe señalar que el Efluente 1 corresponde al agua extraída mecánicamente en la etapa de prensado, el Efluente 2 es la corriente gaseosa compuesta por aire de secado y vapor de agua generado en la etapa de secado, el Efluente 3 se asocia a las pérdidas en forma de polvos y finos generados durante la molienda; y la corriente denominada Rechazo corresponde a la fracción de sobre tamaño en el tamiz. Las eficiencias y pérdidas típicas que también se pueden observar en el Anexo B se han considerado de acuerdo con literatura (Perry & Green, 2008) (Richardson & Coulson, 2002).

6.3. Selección de Equipos

En este apartado se presentan los equipos no críticos del proceso, cuya selección se fundamentó principalmente en cotizaciones realizadas y en criterios de operación y factibilidad técnica. Estos equipos son comunes a todas las configuraciones de secado,

diferenciándose solo en algunos casos por las especificaciones particulares de cada proveedor.

6.3.1. Selección de pretratamiento mecánico

Debido al elevado contenido de humedad del bagazo cervecero (75–80 % en base húmeda), se hace necesaria la incorporación de una etapa de desaguado mecánico que reduzca esta humedad a valores intermedios (≈ 60 –65 %).

Entre las alternativas tecnológicas evaluadas se consideraron las centrifugas y las prensas de tornillo. La centrifugación presenta la ventaja de una alta capacidad de separación y de operación continua, aunque con un mayor grado de complejidad y costos de inversión. La prensa de tornillo, en cambio, corresponde a un equipo más robusto, de fácil operación y mantenimiento, ampliamente utilizado en la industria de alimentos y subproductos fibrosos para reducir humedad en corrientes sólidas. De acuerdo con la literatura técnica, la prensa de tornillo se ha consolidado en los últimos años como una alternativa competitiva frente a centrifugadoras y filtros prensa, destacando por su menor consumo energético y simplicidad operativa (Kabouris, Shanley, Peters, & Gillette, 2008).

El funcionamiento de la prensa de tornillo se puede observar en la Figura 4. El bagazo húmedo es alimentado a una tolva que conduce a la cámara de entrada del equipo, donde comienza su desplazamiento a lo largo de un tornillo helicoidal. La reducción progresiva del paso del tornillo genera una compresión del material contra una carcasa perforada, a través de la cual se expulsa el agua libre como Efluente 1. El sólido retenido avanza hasta la descarga final, alcanzando humedades de 60–65 % en base húmeda, adecuadas para su posterior secado térmico. El diseño de placas fijas y móviles permite la autolimpieza continua del sistema, garantizando una operación estable y de bajo consumo energético (MIVALT s.r.o., 2008).

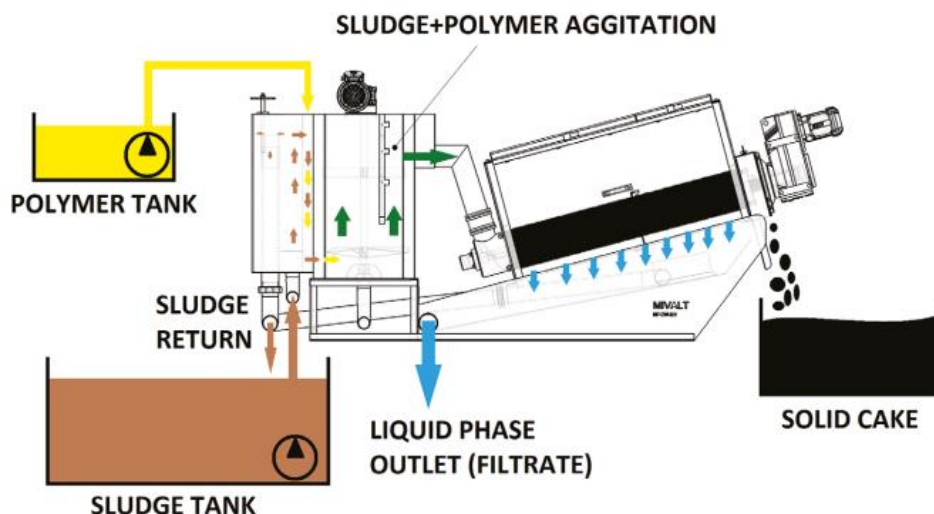


Figura 4. Diagrama de funcionamiento de prensa tornillo (MIVALT s.r.o., 2008).

Tomando en cuenta lo anterior y las cotizaciones recibidas de proveedores, se seleccionó la prensa de tornillo como equipo base para el pretratamiento mecánico en este proyecto. En la Tabla 10 se presentan las características técnicas de referencia de las prensas de tornillo consideradas, obtenidas a partir de cotizaciones comerciales de proveedores internacionales.

Tabla 10. Prensas de tornillo cotizadas

Equipo	Modelo/Proveedor	Capacidad	Potencia [kW]	Material
Prensa de tornillo	SC-CTYZ-300/ShouChuang	5 – 7 [m ³ /h]	15	Acero inoxidable
Prensa de tornillo	Screw Press/Changzhou	300 [kg/h]	3	SUS304

6.3.2. Selección de Molino

El bagazo cervecero seco requiere una etapa de reducción de tamaño para transformarse en harina apta para consumo animal o humano. El objetivo de esta operación es lograr una granulometría fina y homogénea.

Entre las alternativas tecnológicas evaluadas se encuentran los molinos de martillos y los molinos de cuchillas. Los primeros ofrecen gran robustez y versatilidad para una amplia gama de materiales, aunque presentan como desventajas una mayor generación de finos, un consumo energético relativamente alto y una distribución granulométrica menos uniforme. Los molinos de cuchillas, en cambio, operan principalmente por corte y cizallamiento, lo que permite obtener granulometrías más controladas con menor generación de calor, resultandos adecuados para productos fibrosos como el bagazo seco. Este tipo de molinos se emplea en la industria alimentaria para la reducción de tamaño de granos y vegetales destinados a la elaboración de harinas y polvos. (Fellows, 2009).

El funcionamiento del molino de cuchillas (ver Figura 5) se basa en la alimentación del bagazo seco a una cámara de molienda donde un rotor equipado con cuchillas giratorias lo impulsa contra cuchillas fijas y una criba perforada. La reducción de tamaño ocurre por la acción combinada de corte y cizallamiento, fragmentando las partículas hasta alcanzar dimensiones menores que las aberturas de la criba. Solo aquellas que cumplen este criterio atraviesan la malla y son descargadas, mientras que las de mayor tamaño permanecen en la cámara para continuar el proceso. Este principio de operación permite obtener granulometrías controladas, en rangos inferiores a 1 mm, adecuadas para la elaboración de harinas vegetales a partir de bagazo cervecero (Song, Pei, Wang, & Tao, 2015).

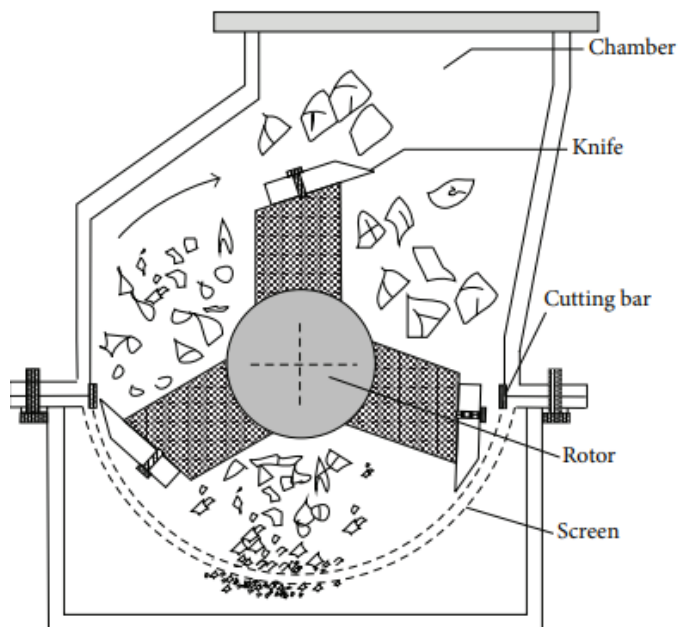


Figura 5. Ilustración de un molino de cuchillas (Song, Pei, Wang, & Tao, 2015).

Por lo anterior, y considerando tanto las referencias técnicas como las cotizaciones comerciales analizadas, se selecciona el molino de cuchillas como equipo de reducción de tamaño en el presente proyecto. Esta elección se justifica en su capacidad de lograr granulometrías controladas y adecuadas para la elaboración de harina de bagazo, en su operación simple y compatibles con los requerimientos de la industria alimentaria. En la Tabla 11 se presentan las características técnicas de referencia de los molinos de cuchillas considerados, obtenidas a partir de cotizaciones comerciales de proveedores internacionales.

Tabla 11. Molino de cuchillas cotizados.

Equipo	Modelo/Proveedor	Capacidad [kg/h]	Potencia [kW]	Material
Molino de cuchillas	30B/Changzhou	100 – 120	5,5	Acero inoxidable
Molino de cuchillas	YM40B/ShouChuang	500	12,5	Acero inoxidable

6.3.3. Selección de Tamiz

Posterior a la molienda, se requiere una etapa de tamizado con el fin de asegurar la homogeneidad granulométrica de la harina de bagazo.

Entre las alternativas tecnológicas evaluadas se encuentran los tamices vibratorios y los tamices rotativos. Los primeros destacan por su diseño compacto, operación continua y menor tendencia a la obstrucción de las mallas, alcanzando altas eficiencias de clasificación en la industria alimentaria para harinas y polvos vegetales (Fellows, 2009). Los tamices

rotativos, en cambio, ofrecen mayor superficie de separación y capacidad, pero requieren equipos más voluminosos y resultan menos habituales en procesos de molienda fina (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

El Funcionamiento del tamiz vibratorio se puede apreciar en la Figura 6. El tamiz vibratorio opera mediante una malla tensada que vibra a alta frecuencia y baja amplitud gracias a un sistema excéntrico o electromagnético. Las partículas con tamaño inferior al de la abertura de la malla atraviesan el tamiz y se descargan como producto conforme, mientras que las de mayor tamaño permanecen en la superficie hasta ser evacuadas como rechazo. Este principio de operación mejora la eficiencia de clasificación al reducir la obstrucción de las mallas y permite una separación precisa de fracciones granulométricas (McCabe, Smith, & Harriott, 2007).

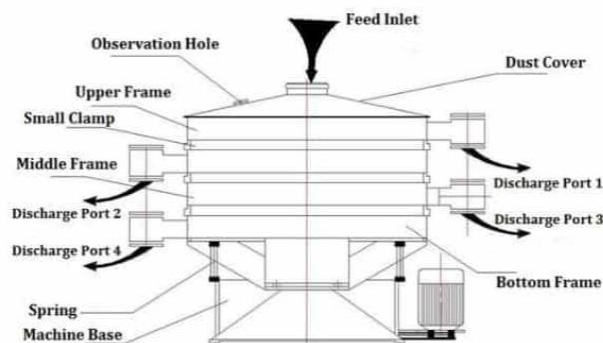


Figura 6. Esquema de tamiz vibratorio.

Por lo anterior, se selecciona el tamiz vibratorio como equipo de clasificación para el proyecto, debido a su alta eficiencia de separación, simplicidad operativa y disponibilidad comercial en configuraciones aptas para la industria alimentaria. En la Tabla 12 se presentan las características técnicas de los tamices vibratorios considerados, obtenidas a partir de cotizaciones.

Tabla 12. Tamices vibratorios cotizados.

Equipo	Modelo/Proveedor	Capacidad [kg/h]	Nº de mallas	Potencia [kW]	Material
Tamiz vibratorio	ZS-350/Changzhou	100 – 500	1 – 3	0,55	Acero inoxidable
Tamiz vibratorio	ShouChuang	300 – 800	1 – 3	0,75	Acero inoxidable

6.3.4. Selección de Envasado

Finalmente, se contempla una etapa de envasado y almacenamiento con el fin de acondicionar la harina de bagazo antes de su distribución. En este estudio, dicha etapa no constituye el foco principal, ya que el énfasis se encuentra en el diseño y evaluación de la línea de producción. Sin embargo, se incluyó una referencia comercial para completar el flujo de proceso. A continuación, el equipo cotizado para esta operación (ver Tabla 13).

Tabla 13. Envasadora cotizada.

Equipo	Modelo/Proveedor	Capacidad [sacos/h]	Capacidad de sacos [kg]	Potencia [kW]	Material
Envasadora semiautomática	PL-1/Hongji	10 – 30	10 – 50	3	Acero inoxidable

6.4. Diseño de secador conceptual (Equipo crítico)

Dado que el secado del bagazo cervecero representa la etapa más intensiva en consumo energético del proceso, se desarrolló un modelo de diseño conceptual de un secador rotatorio en flujo continuo. Este modelo permite estimar los parámetros operacionales y de diseño necesarios para comparar con equipos comerciales cotizados, y así apoyar la decisión de inversión.

El diseño considera una alimentación de bagazo con 65% de humedad en base húmeda, con un objetivo de reducción al 10% de humedad en base húmeda, e incluye el cálculo de requerimientos energéticos, volumen del tambor, caudal de aire de secado y análisis de recirculación térmica. Esta condición de alimentación supone la existencia de un pretratamiento mecánico previo al secado, orientado a disminuir la humedad desde valores cercanos al 80 % hasta aproximadamente 65 % cabe destacar que la cotización comercial recibida por parte del secador rotatorio fue entregada sin considerar dicho pretratamiento, lo que implica mayor demanda energética. No obstante, la inclusión de esta etapa se justifica al reducir significativamente la carga de evaporación en el secador y, por tanto, el consumo térmico total del proceso.

6.4.1. Fundamentación del diseño

El diseño conceptual del secador se fundamenta en la necesidad de evaluar la etapa más crítica del proceso: el secado del bagazo cervecero. Esta operación concentra el mayor requerimiento energético del sistema y tiene impacto tanto en la eficiencia global como en la calidad del producto final.

Para caracterizar el comportamiento del bagazo durante el secado, se recurrió a modelos cinéticos validados de forma experimental, específicamente el modelo empírico de Page y el modelo difusional basado en la segunda ley de Fick. Ambos modelos permiten describir el comportamiento de la humedad en función del tiempo y son ampliamente utilizados en el

estudio del secado de bagazo cervecero. En este trabajo no se estimaron los parámetros directamente a partir de experimentación propia, sino que se utilizaron valores reportados en estudios. El modelo de Page ha demostrado un alto grado de ajuste en materiales fibrosos como el bagazo, superando en precisión a modelos más simples como Newton o Logarítmico (Gomez Delgado, Medina Jaramillo, & Lopez Cordoba, 2023). Por su parte, el modelo de Fick permite estimar el tiempo de secado a partir de la difusividad efectiva del agua en el sólido, cuyos valores típicos para bagazo cervecero se encuentran en el rango de 10^{-9} a 10^{-8} [m²/s] los cuales se pueden observar en el Anexo C (Arranz & Miranda, 2018).

El diseño conceptual incorpora, además, un balance de energía para estimar el calor necesario para evaporar el agua del bagazo. Este balance considera el calor sensible requerido para elevar la temperatura del sólido y del aire de secado, así como el calor latente para la evaporación del agua. Se analizaron distintos escenarios operacionales, incluyendo estrategias con y sin recirculación de aire, y se evaluó la influencia de variables como la temperatura del aire de secado, la humedad relativa, y el caudal másico de aire seco.

Este enfoque metodológico es consistente con estudios previos que emplean modelos analíticos simplificados para evaluar procesos de secado en etapas de prefactibilidad técnica, especialmente cuando se busca estimar consumos energéticos, dimensionamiento de equipos y oportunidades de recuperación de calor (Weineisen & Stenstrom, 2008) (Golman & Julklang, 2014). La aplicación de balances de masa y energía, junto con modelos cinéticos comprobados, permite obtener una base técnica sólida para la comparación con alternativas comerciales y para la toma de decisiones en el diseño del proceso.

6.4.2. Balance de masa del proceso de secado

El flujo de alimentación corresponde a bagazo cervecero con una humedad del 80 %, el cual es sometido a un prensado mecánico que reduce su contenido de humedad al 65 %. Posteriormente, este bagazo parcialmente deshidratado es ingresado al secador, donde se reduce su humedad final al 10 %. La humedad en base húmeda se definió según la Ecuación 2.

$$\text{Humedad} = \frac{\dot{m}_{\text{agua}}}{\dot{m}_{\text{agua}} + \dot{m}_{\text{sólido}}} \quad (\text{Ec. 2})$$

A partir de esta relación, se dedujo la masa de sólidos secos en cada etapa, considerando que esta fracción permanece constante durante el proceso. Con ello, fue posible determinar la masa total de bagazo, el contenido de agua, y la cantidad de agua a evaporar. En la Tabla 14, se puede observar el resumen del balance de masa en la etapa de secado.

Tabla 14. Balance de masa en la etapa de secado.

Etapa	Humedad [%]	Masa total [kg/h]	Agua [kg/h]	Sólidos secos [kg/h]
Bagazo prensado	65	148,81	111,61	37,20
Bagazo seco	10	57,87	5,87	52,00

Como se observa, la masa de agua que debe ser evaporada para alcanzar la humedad deseada es de $90,94 \left[\frac{kg}{h} \right]$. Este valor constituye la base para estimar el requerimiento energético mínimo del proceso. A partir de esta cantidad de agua, se calculó la energía teórica necesaria para su evaporación utilizando la entalpía de vaporización del agua a $100 [^{\circ}C]$, cuyo valor es de $2260 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$ (Perry & Green, 2008). La energía ideal se estimó mediante la Ecuación 3.

$$Q_{ideal} = \dot{m}_{agua} \cdot \lambda \text{ (Ec. 3)}$$

$$Q_{ideal} = 90,94 \cdot 2260 = 205,52 \left[\frac{kJ}{h} \right] \approx 57,1 [kW]$$

Este valor representa el mínimo teórico requerido por el proceso, sin considerar pérdidas térmicas, eficiencia del equipo ni condiciones reales de operación.

6.4.3. Análisis energético del secado

Para estimar el caudal másico de aire seco necesario para llevar a cabo el proceso de secado, se partió del requerimiento energético ideal para evaporar la cantidad de agua deseada en el bagazo, calculado previamente en $57,10 \text{ kW}$. Este valor considera exclusivamente el calor latente de vaporización del agua a $100 ^{\circ}C$, sin contemplar pérdidas térmicas ni calores sensibles adicionales. El flujo másico de aire seco necesario se estimó mediante la Ecuación 4 aplicando un balance de energía simple, considerando únicamente el aporte de calor sensible desde el aire al sólido.

$$\dot{m}_{aire\ seco} = \frac{Q_{ideal}}{C_p \cdot \Delta T} \text{ (Ec. 4)}$$

Se adoptaron diferencias térmicas variables para la temperatura de salida del secador (entre 20 y $45 ^{\circ}C$) en función de la temperatura de entrada del aire. Esta elección se basó en criterios técnicos y coherencia física, considerando que, a mayores temperaturas de entrada, se incrementa también la temperatura de salida debido a una mayor eficiencia de transferencia térmica (FEECO International, Inc., 2016). A partir de los valores de ΔT , se calculó el flujo másico de aire seco. Los resultados se presentan en la siguiente tabla (ver Tabla 15).

Tabla 15. Cálculo flujo masico de aire necesario.

Temperatura de entrada [°C]	Temperatura de salida [°C]	ΔT [°C]	$\dot{m}_{\text{aire seco}}$ [ton/h]
50	30	20	10225
60	35	25	8180
70	40	30	6817
80	45	35	5843
90	55	35	5843
105	60	45	4544

Como se observa, a medida que se incrementa la temperatura de entrada del aire, el diferencial térmico disponible también aumenta en la mayoría de los casos, lo que permite reducir el flujo de aire necesario para suministrar la energía requerida. Esta relación inversa entre temperatura de entrada y flujo de aire constituye un insumo clave para el diseño energético del secador.

6.4.4. Estimación del tiempo de secado

El tiempo de residencia del bagazo cervecero dentro del secador fue estimado a partir de la aplicación del modelo empírico de Page, ampliamente utilizado para describir la cinética de secado en materiales porosos y fibrosos. Este modelo permite relacionar la humedad relativa del sólido con el tiempo de secado mediante la siguiente ecuación (Ec. 5).

$$MR = \exp(-kt^n) \text{ (Ec. 5)}$$

Los valores de “k” y “n” fueron obtenidos de experimentos realizados en otro estudio en cuestión sobre el bagazo cervecero (Gomez Delgado, Medina Jaramillo, & Lopez Cordoba, 2023). El cual entrega datos ajustados del modelo de Page para distintas temperaturas entre 50 y 105 °C. En este trabajo se utilizaron dichos parámetros, pero ajustando el valor de MR a las condiciones propias del presente diseño, donde se busca reducir la humedad del bagazo desde un 65% hasta un 10%. Este ajuste permitió obtener estimaciones de tiempo de secado en función de las condiciones de operación específicas del proceso propuesto. En la siguiente tabla se pueden observar los resultados obtenidos para cada temperatura, incluyendo los parámetros del modelo y el tiempo de secado (Tabla 16).

Tabla 16. Estimación de tiempo de secado mediante parámetros de modelo Page.

T [°C]	k [1/min]	n [-]	t [min]
50	0,0038	1,2024	173
60	0,0033	1,3462	111
70	0,0046	1,3870	76
80	0,0042	1,4586	65
90	0,0049	1,5158	51
105	0,0063	1,5728	37

Como se observa, el tiempo de secado disminuye significativamente con el aumento de la temperatura de operación, efecto que se atribuye a la mayor energía disponible para la evaporación de agua en el medio. La tendencia decreciente del tiempo de secado con la variación de temperatura puede observarse con mayor claridad en el gráfico incluido en los anexos (ver Anexo D).

6.4.5. Cálculo del volumen requerido del tambor

El volumen del tambor secador es un parámetro para dimensionar el equipo conceptual, ya que condiciona directamente la geometría del secador, el tiempo de residencia del material y su capacidad de procesamiento. Para estimarlo, se parte del flujo másico de bagazo seco a procesar y el tiempo requerido para completar el secado, calculado previamente mediante el modelo empírico de Page. El volumen efectivo del tambor corresponde al espacio que debe ocupar el material dentro del secador para lograr el tiempo de residencia necesario en condiciones ideales. Este volumen se calculó para cada temperatura de secado empleando la siguiente ecuación (ver Ecuación 6).

$$V_{efectivo} = \frac{\dot{m}_{bagazo\ seco} \cdot t}{\rho_{aparente}} \quad (Ec. 6)$$

Se consideró un flujo másico de 57,87 [kg/h] obtenido desde el balance de masa y una densidad aparente de 190 [kg/m³] (Ferrari, 2017). Los volúmenes resultantes para cada temperatura evaluada se resumen en la siguiente tabla (Tabla 17).

Tabla 17. Estimación de volumen efectivo.

T [°C]	t [h]	Volumen efectivo [m ³]
50	2,89	0,88
60	1,85	0,56
70	1,27	0,39
80	1,09	0,33
90	0,84	0,26
105	0,62	0,19

El volumen calculado en esta sección representa el volumen efectivo ocupado por el material dentro del secador, es decir, el espacio que requiere físicamente el bagazo seco durante su tránsito por el tambor.

6.4.6. Diseño geométrico del secador

Con el volumen efectivo de bagazo seco requerido para cada temperatura de secado ya estimado, se procedió a dimensionar el secador conceptual. Para ello, se adoptó una geometría cilíndrica horizontal, correspondiente a un secador rotatorio de flujo directo. El

diseño se basó en dos criterios principales: cumplir con el tiempo de residencia deseado del material, y asegurar que el volumen del tambor fuese al menos suficiente para alojar el sólido bajo un nivel de carga definido. Primero, se estimó el volumen mínimo (ver Ecuación 7) requerido del tambor para cada caso, dividiendo el volumen efectivo de bagazo por un nivel de carga del 10%, valor situado dentro del rango típico de 5% a 15% sugerido para secadores rotatorios industriales (FEECO International, Inc., 2016).

$$V_{\min} = \frac{V_{\text{efectivo}}}{0,1} \text{ (Ec. 7)}$$

Este volumen representa el espacio mínimo que debe tener el tambor para garantizar que el sólido se mantenga dentro del equipo el tiempo necesario sin sobrellenarlo. Posteriormente, se diseñó el tambor propiamente tal, calculando sus dimensiones en función del caudal volumétrico del aire y la velocidad del aire adoptada. En este estudio se seleccionó una velocidad de aire de 1,5 [m/s], por entregar resultados razonables desde el punto de vista constructivo y encontrarse dentro del rango industrial habitual. Las demás velocidades evaluadas fueron incluidas en Anexo E.

El caudal volumétrico de aire fue calculado a partir de la masa de aire necesaria para realizar el secado y sus condiciones de operación (temperatura y presión), y luego se utilizó la siguiente relación (ver Ecuación 7) para obtener el área transversal del tambor.

$$Q = A \cdot v \text{ (Ec. 7)}$$

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$$

Conocido el diámetro, y considerando que el material se desplaza a lo largo del tambor, se estimó la longitud necesaria del equipo a partir de la velocidad axial del aire y el tiempo de residencia mediante la Ecuación 8.

$$L = v \cdot t \text{ (Ec. 8)}$$

Conocido el diámetro, y considerando que el material se desplaza a lo largo del tambor arrastrado por gravedad, se estimó la longitud necesaria del equipo a partir de la velocidad axial del aire y el tiempo de residencia mediante la Ecuación 9.

$$V_{\text{tambor}} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot L \text{ (Ec. 9)}$$

Este volumen se comparó con el volumen mínimo. En la mayoría de los casos evaluados, el volumen real del tambor diseñado fue superior al mínimo requerido, lo que valida su

factibilidad en términos de capacidad. A continuación, se presentan las dimensiones obtenidas, para el caso de velocidad seleccionado (1,5 [m/s]) y las distintas temperaturas (ver Tabla 18).

Tabla 18. Dimensiones según temperatura para una velocidad determinada.

T [°C]	Caudal [m ³ /s]	Área [m ²]	Diámetro [m]	Largo [m]	Volumen tambor [m ³]	Volumen requerido [m ³]
50	2,60	1,73	1,49	8,92	15,46	8,81
60	2,13	1,42	1,34	8,07	11,45	5,64
70	1,82	1,21	1,24	7,46	9,07	3,86
80	1,62	1,08	1,17	7,04	7,62	3,32
90	1,67	1,11	1,19	7,14	7,94	2,56
105	1,35	0,90	1,07	6,43	5,79	1,90

Como puede observarse, en todos los casos el volumen total del tambor diseñado supera el volumen mínimo requerido para cargar el bagazo con un nivel de carga del 10 %. Esta diferencia se explica porque el diseño geométrico del equipo no estuvo condicionado únicamente por el volumen del sólido, sino también por el caudal volumétrico del aire y la necesidad de mantener una velocidad de flujo adecuada para el secado. Al trabajar con velocidades moderadas (1,5 m/s) y caudales de aire elevados, se requieren áreas transversales amplias para permitir el paso del flujo, lo que incrementa el diámetro del tambor. Como resultado, el volumen del equipo se ve aumentado, especialmente en los casos con mayores tiempos de residencia (temperaturas más bajas).

6.4.7. Materialidad del secador

Debido a que el secador manipula un subproducto alimentario, es necesario que los materiales de construcción cumplan con normativas de inocuidad y presenten resistencia a la corrosión. En este contexto, se recomienda el uso de aceros inoxidables de la serie 300, principalmente AISI 304 (SUS 304) y AISI 316L, ampliamente utilizados en la industria de alimentos por su facilidad de limpieza y durabilidad (Davis, 1994). En particular, el AISI 304 resulta adecuado para el secado de bagazo cervecero, mientras que el AISI 316L se considera en zonas críticas con mayor humedad, debido a su resistencia superior a la corrosión por picadura.

6.4.8. Análisis de recirculación térmica

Con el objetivo de evaluar el efecto de recircular una fracción del gas de salida en el secador rotatorio, se realizó un análisis de recirculación térmica. Este procedimiento permite estimar la reducción en la demanda de energía del calentador mediante la reutilización parcial del aire caliente, verificando al mismo tiempo que no se alcancen condiciones de saturación en la corriente de salida.

El análisis se desarrolló bajo los supuestos de régimen estacionario, mezcla adiabática de corrientes antes del calentador y aporte exclusivo de calor sensible. El caudal de aire seco se fijó en función del balance de evaporación previamente determinado. Para caracterizar el aire húmedo se aplicaron modelos psicrométricos de uso estándar en la literatura (ASHRAE, 2017). La presión de saturación se obtuvo mediante correlaciones empíricas consolidadas, en particular la ecuación de Magnus mejorada (Alduchov & Eskridge, 1996).

La razón de humedad del aire fresco se calculó a partir de la temperatura ambiente, la humedad relativa y la presión atmosférica, según la Ecuación 9 (ASHRAE, 2017).

$$Y_f = 0.622 * \frac{(HR_{amb} * P_{sat}(T_{amb}))}{(P_{atm} - HR_{amb} * P_{sat}(T_{amb}))} \quad (Ec. 9)$$

La presión de saturación del vapor de agua se determinó utilizando la correlación de Magnus mejorada, representada en la Ecuación 10 (Buck, 1981).

$$P_{sat}(T) = 0,61078 \exp\left(\frac{17,2694 T}{T + 237,29}\right) \quad (Ec. 10)$$

La variación de humedad que debe transportar el gas en el secador se expresa como un balance directo (ver Ecuación 11).

$$\Delta Y = \frac{\dot{m}_{agua}}{\dot{m}_{aire}} \quad (Ec. 11)$$

Este valor es independiente de la recirculación aplicada. La fracción efectiva de recirculación, considerando un factor de purga P, se definió mediante la Ecuación 12.

$$R_{real} = R \cdot (1 - P) \quad (Ec. 12)$$

Con esto, los caudales que se mezclan son masa de aire recirculado ($\dot{m}_r$) y masa de aire fresco ($\dot{m}_f$) a partir de la Ecuación 13 y 14.

$$\dot{m}_r = R_{real} \cdot \dot{m}_{aire} \quad (Ec. 13)$$

$$\dot{m}_f = \dot{m}_{aire} - \dot{m}_r \quad (Ec. 14)$$

El balance de agua en el secador permite obtener la humedad de salida, la cual se determinó con la Ecuación 15.

$$Y_{out} = Y_f + \frac{\Delta Y}{(1 - R_{real})} \quad (Ec. 15)$$

Y por consecuencia la humedad de la mezcla que reingresara al secador (Y_{mix}) se obtuvo mediante la Ecuación 16.

$$Y_{mix} = Y_{out} - \Delta Y \quad (Ec. 16)$$

La entalpía del aire húmedo por kg de aire seco (base 0 [°C]) se calcula mediante la Ecuación 17 (Perry & Green, 2008).

$$h(T, Y) = 1,005T + Y(2501 + 1,88T) \quad (Ec. 17)$$

De acá se obtiene $h_f = h(T_{amb}, Y_f)$ y $h_{out} = h(T_{out}, Y_{out})$. La mezcla adiabática antes del calentador cumple con la Ecuación 18.

$$h_{mix} = \frac{m_f h_f + m_r h_{out}}{m_{aire}} \quad (Ec. 18)$$

Y su temperatura se obtiene mediante $h(T, Y)$, quedando:

$$T_{mix} = \frac{h_{mix} - Y_{mix} \cdot 2501}{1,005 + 1,88 Y_{mix}} \quad (Ec. 19)$$

El requerimiento energético del calentador, en [kW], se estimó con las Ecuaciones 20 y 21.

$$Q_{sin\ recirculación} = \frac{m_{aire} [h(T_{in}, Y_f) - h_f]}{3600} \quad (Ec. 20)$$

$$Q_{con\ recirculación} = \frac{m_{aire} [h(T_{in}, Y_{mix}) - h_{mix}]}{3600} \quad (Ec. 21)$$

El ahorro relativo asociado a la recirculación se expresó como una eficiencia térmica aparente (Ecuación 22).

$$\eta_{rec} = 1 - \frac{Q_{con\ recirculación}}{Q_{sin\ recirculación}} \quad (Ec. 22)$$

Finalmente, se evaluó la condición de no saturación en la corriente de salida, imponiendo que la humedad relativa a T_{out} se mantuviera bajo el 95%. Esta condición se verifica con la Ecuación 23.

$$\phi_{out} = \frac{Y_{out} \cdot P_{atm}}{P_{sat}(T_{out}) \cdot (Y_{out} + 0,622)} < 0,95 \quad (Ec. 23)$$

De esta forma, el modelo permite estimar la reducción del consumo energético por recirculación de aire, así como establecer un límite operativo seguro para evitar la condensación en la corriente de salida.

Con el fin de evaluar el impacto de la recirculación en diferentes condiciones operativas, se realizaron simulaciones para seis temperaturas de entrada del aire de secado (105, 90, 80, 70, 60 y 50 [°C]). En cada caso se consideraron tres valores de purga (0,2; 0,3 y 0,4), que representan la fracción del caudal total que se descarga al ambiente y que, por lo tanto, no reingresa al sistema. Estos valores se seleccionaron porque permiten explorar un rango de operación realista: una purga demasiado baja podría provocar acumulación excesiva de

humedad en el circuito, mientras que una purga muy alta mermaría los beneficios energéticos de la recirculación.

Los resultados muestran que, en todos los escenarios, el aumento de la fracción de recirculación conduce a una disminución progresiva del requerimiento energético del calentador, aunque esta mejora se ve limitada por el incremento simultáneo de la humedad relativa en la corriente de salida. De este modo, existe un compromiso entre la magnitud del ahorro energético alcanzado y las restricciones operativas impuestas por la humedad.

Para facilitar la interpretación, en esta sección se presentan únicamente dos escenarios representativos: 105 [°C], como caso de alta temperatura y máxima demanda energética; 70 [°C], como condición intermedia dentro del rango evaluado. El resto de los resultados (90, 80, 60 y 50 [°C]) se incluyen en los Anexos, dado que muestran una tendencia análoga.

En el caso de 105 °C, se observó una tendencia lineal de incremento en el ahorro energético conforme aumentó la fracción de recirculación, alcanzando un valor máximo cercano al 29 % para una purga de 0,2. En condiciones más conservadoras, con purgas de 0,3 y 0,4, los ahorros se situaron en torno al 26 % y 23 %, respectivamente (ver Figura 7), confirmando que incluso bajo escenarios restrictivos se mantiene una mejora significativa en la eficiencia del proceso. La humedad relativa de salida varió entre un 18 % inicial y un máximo de 53 % en el escenario más exigente (ver Figura 8), sin sobrepasar el límite de seguridad fijado en 95 %, lo que valida la factibilidad de implementar recirculación en este rango de operación.

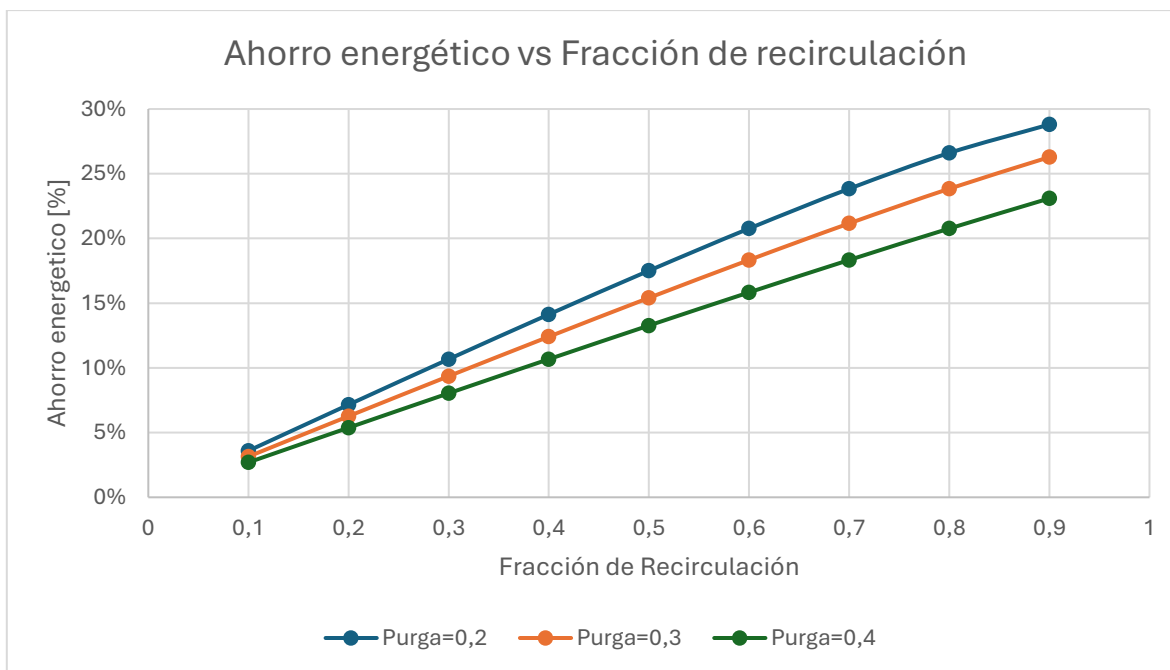


Figura 7. Gráfico de ahorro vs recirculación, caso 105 [°C].

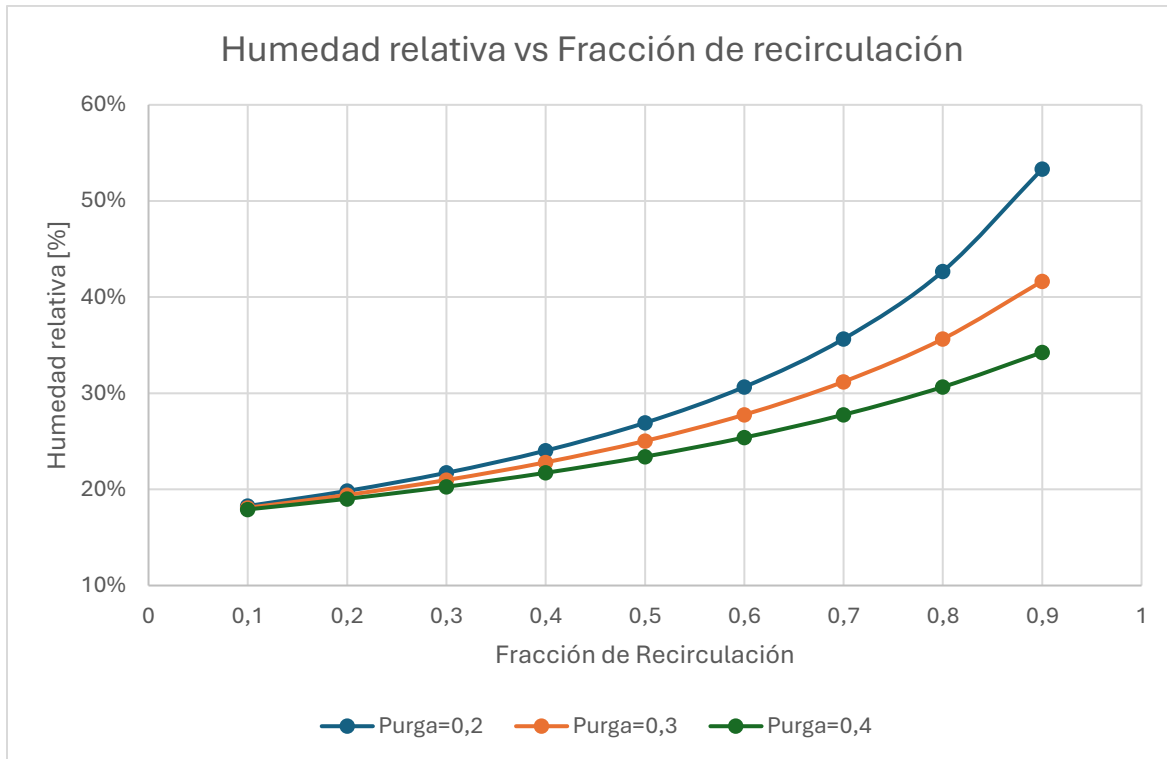


Figura 8. Gráfico humedad vs recirculación, caso 105 [°C].

Por otro lado, para la condición intermedia de 70 °C, los resultados mostraron ahorros máximos en torno al 25 % con purga 0,2, descendiendo a valores de 23 % y 20 % para purgas de 0,3 y 0,4, respectivamente (ver Figura 9). Sin embargo, la humedad relativa alcanzó niveles más elevados, partiendo en 34 % y llegando hasta 100 % (ver Figura 10) en los escenarios de mayor recirculación. Este comportamiento evidencia que, aunque la eficiencia térmica sigue siendo positiva, existe un riesgo de operar próximo al límite de saturación, lo que justifica privilegiar estrategias de purga intermedia.

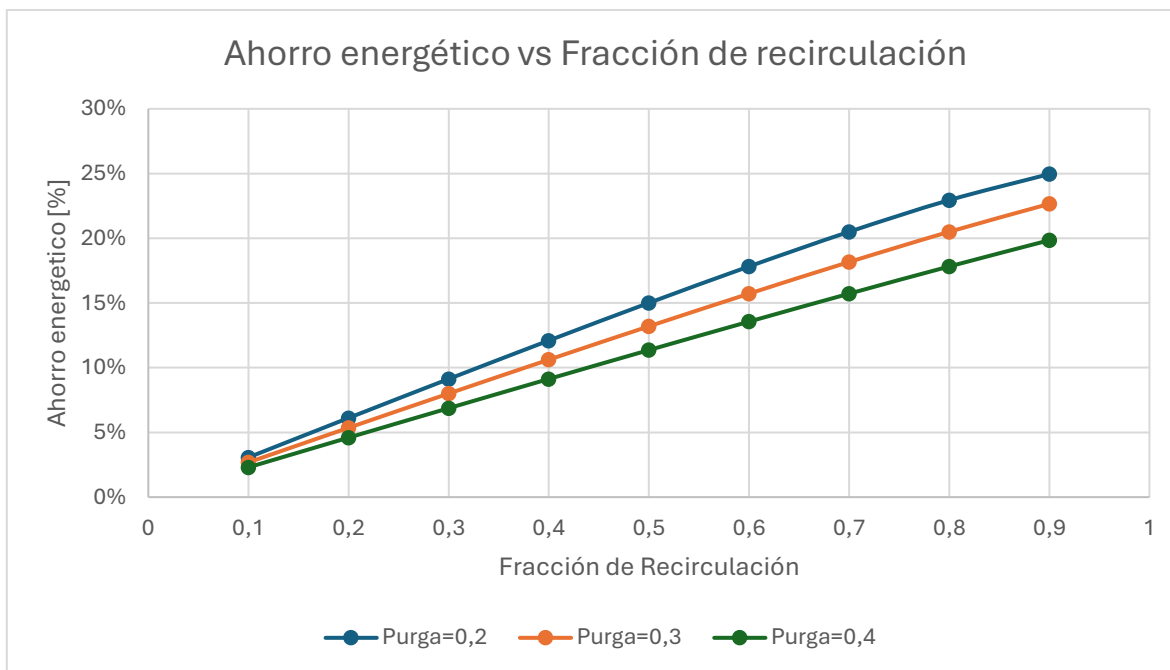


Figura 9. Gráfico ahorro vs recirculación, caso 70 [°C].

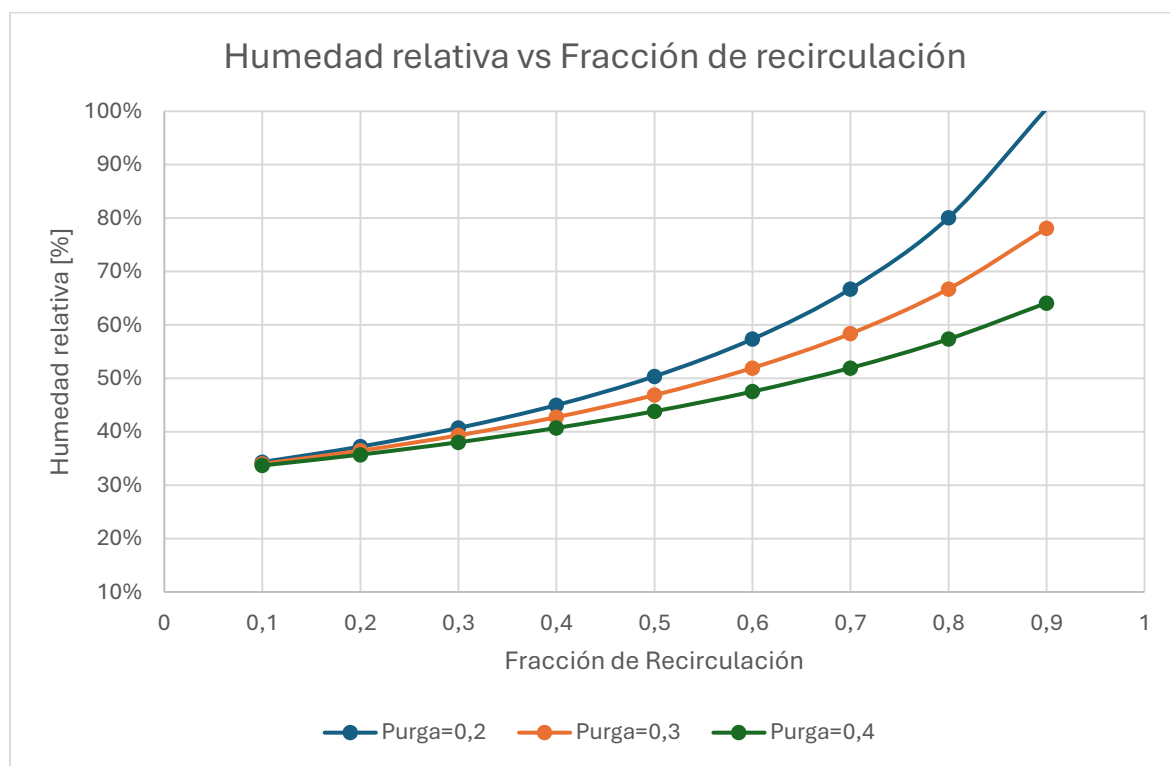


Figura 10. Gráfico humedad vs recirculación, caso 70 [°C].

En este inciso se han presentado únicamente los casos de 105 °C y 70 °C, para representar escenarios de alta e intermedia temperatura. En el Anexo F se incluye la tabla resumen comparativa para todas las condiciones (105, 90, 80, 70, 60 y 50 °C), y en el Anexo G se

encuentran las gráficas de ahorro energético y humedad relativa correspondientes al resto de temperaturas que no se encuentran en este inciso. Esta información complementaria permite confirmar que las tendencias observadas se repiten de manera consistente en todo el rango de temperaturas evaluadas, reforzando la validez del análisis y aportando un respaldo cuantitativo integral al estudio.

6.4.9. Comparación con alternativas comerciales cotizadas

Con el fin de validar el diseño conceptual del secador rotatorio y situarlo en un contexto industrial, se realizó una comparación con tres alternativas comerciales cotizadas: un secador rotatorio, un secador de bandejas y un secador flash. El detalle de las cotizaciones puede ser encontrado en Anexo H.

El criterio principal de análisis corresponde al consumo energético térmico específico, expresado en función de la cantidad de agua evaporada. Esto permite relacionar directamente la magnitud de las demandas de energía con la eficiencia de cada opción tecnológica, utilizando la Ecuación 24.

$$e = \frac{Q_{term}}{\dot{m}_{agua}} \quad (Ec. 24)$$

En el diseño conceptual, para una evaporación de 90,94 [kg/h] de agua, se obtuvieron consumos térmicos sin recirculación en el rango de 0,94–1,26 [kWh/kg H₂O], dependiendo de la temperatura de entrada del aire de secado (ver Anexo I). Estos valores constituyen la línea de referencia frente a la cual se comparan los equipos comerciales.

En el caso del secador rotatorio, la cotización indica un tambor de diámetro 1,5 [m] y largo 7,5 [m], con un horno de 2,5–3,0×10⁵ [kcal/h] y un consumo de 25 [kg/h] de LPG (con un supuesto de capacidad de calor específico de 11 000 [kcal/kg]). Si bien no se declara la capacidad de evaporación, al ajustarla a la base de comparación del diseño conceptual (90,94 kg/h), se obtiene un consumo térmico específico de 3,52 [kWh/kg H₂O] a partir del consumo de combustible. Los valores geométricos de la cotización son superiores a los del diseño conceptual, pero logran la validación del orden de magnitud geométrico del dimensionamiento (diámetro y longitud del tambor).

El horno de bandejas opera en modo batch, con una capacidad de 1 [ton/lote] y ciclos de 2–3 [h] a temperaturas de 60–90 [°C]. La oferta detalla un consumo de 10–13 [m³/h] de LPG. Considerando una reducción de humedad desde 65 [%] a 10 [%], se estima una eliminación de 611 [kg] de agua por lote, equivalente a 244 [kg/h] en un ciclo medio de 2,5 h. Con estos valores, el consumo térmico específico se encuentra en el rango de 1,05–1,25 [kWh/kg H₂O].

Finalmente, la cotización del secador flash, reporta un horno a gas de 200 000 kcal/h, con una capacidad de remoción total de 200 [kg/h], de los cuales [140 kg/h] se eliminan en la

prensa y 60 [kg/h] en el secador. Considerando únicamente el secador, se obtiene un consumo térmico específico de 3,87 [kWh/kg H₂O].

Es importante destacar que la cotización comercial de secador rotatorio fue entregada considerando la alimentación del bagazo sin pretratamiento, es decir, con un contenido de humedad cercano a 80 %, dado que este equipo en particular puede generar este secado sin problemas. En contraste, el diseño conceptual propuesto en este estudio incluye un pretratamiento que reduce la humedad inicial hasta 65 %, lo que disminuye drásticamente la carga de evaporación requerida. Para establecer una comparación justa entre alternativas, se utilizó el consumo energético específico, el cual permite normalizar los resultados en función de la cantidad de agua evaporada, independientemente del contenido inicial de humedad.

A continuación, se presenta una tabla comparativa (ver Tabla 19) con las opciones cotizadas y la opción conceptual. En esta última, se muestran únicamente los resultados obtenidos a las temperaturas más altas (90 y 105 °C).

Tabla 19. Tabla comparativa de energía térmica específica.

Alternativa	Agua extraída [kg/h]	e [kWh/kg agua]
Conceptual (105 °C)	90,94	1,19
Conceptual (90 °C)	90,94	1,26
Secador rotatorio	90,94	3,51
Secador de bandejas	244	1,05 - 1,25
Secador flash	60	3,87

Para comparar de forma más clara la eficiencia de cada opción, se calculó un rendimiento relativo en función del consumo energético específico, tomando como referencia el caso más exigente del diseño conceptual (90 [°C]) cuyo valor fue de 1,26 kWh/kg H₂O. El rendimiento se definió según la siguiente expresión (ver Ecuación 25).

$$R = \frac{e_{ref}}{e_{opcion}} \cdot 100 \text{ (Ec. 25)}$$

En la Tabla 20, se pueden observar los resultados obtenidos respecto al rendimiento.

Tabla 20. Rendimiento en función del consumo energético.

Alternativa	e [kWh/kg agua]	R [%]
Secador rotatorio	3,51	36
Secador de bandejas	1,05 - 1,25	120 - 101
Secador flash	3,87	33

Los resultados de la Tabla 20 indican que el secador rotatorio presenta un rendimiento relativo cercano al 36 %, el secador flash un 33 % y el horno de bandejas entre 101 y 120 %. El menor desempeño de las dos primeras tecnologías se explica por la inclusión de pérdidas térmicas reales en los valores de consumo reportados, que consideran ineficiencias inevitables en hornos, ductos e intercambiadores, además de pérdidas de calor al ambiente. La eficiencia de un secador se ve reducida precisamente por estos efectos, ya que solo una fracción de la energía suministrada se destina directamente a la evaporación del agua, mientras que el resto se pierde en forma de calor sensible en el aire y en los sólidos o se disipa hacia el entorno (McCabe, Smith, & Harriott, 2007). En el caso del horno de bandejas, los rendimientos relativos se explican porque el secado por lotes de gran volumen permite distribuir las pérdidas térmicas inevitables sobre una mayor cantidad de producto procesado, lo que reduce el consumo específico. Los secadores de bandejas presentan eficiencias térmicas en el rango de 20 a 50 %, dependiendo de la escala y de las condiciones de operación (Perry & Green, 2008), por lo que trabajar con cargas mayores favorece un mejor aprovechamiento energético relativo, aunque a costa de una menor continuidad en la operación.

6.5. Listado de equipos

Los equipos necesarios para llevar a cabo el proceso, así como la función que cumplen, se presentan en la Tabla 21. Cabe destacar que la diferencia principal entre las alternativas de cotización radica en el tipo de secador ofrecido por cada proveedor.

Tabla 21. Equipos con sus respectivas funciones.

Equipo	Función	Variación según alternativa
Prensa de tornillo	Reducir el contenido de humedad inicial del bagazo cervecero mediante prensado mecánico.	Presente en Opción C y Opción B; no incluida en Opción A
Tolva de alimentación	Acumular y dosificar el bagazo hacia los equipos de transporte y secado.	Presente en Opción A; integrada en otros equipos en las demás opciones.
Transportadores de tornillo / cintas transportadoras	Transportar el bagazo entre operaciones de prensado, secado, molienda y envasado.	Presentes en Opción C y Opción A; no especificados en Opción B
Secador	Eliminar la mayor parte del contenido de humedad hasta alcanzar especificación de mercado.	Opción C / Opción A / Opción B.

Horno o quemador (LPG)	Generar aire caliente a partir de gas licuado de petróleo para el proceso de secado.	Presente en todas las opciones.
Ciclón / filtro de mangas	Recuperar partículas arrastradas en la corriente de aire de secado.	Presente en Opción C y Opción A; no incluido en Opción B.
Molino	Reducir el tamaño de partícula del bagazo seco para obtener harina homogénea.	Presente en Opción C, Opción A y Opción B.
Tamiz vibratorio	Asegurar la granulometría adecuada del producto final.	Equipo independiente en Opción C; integrado en el molino en Opción A y B
Máquina de elevación	Facilitar la descarga y transporte del producto seco hacia molienda o almacenamiento.	Presente en Opción A, no incluida en las demás opciones.
Tablero de control	Supervisar y controlar parámetros de operación como temperatura, tiempo y seguridad.	Presente en Opción C y Opción A; no especificado en opción secador rotatorio.

6.6. Especificaciones de equipos y servicios

Este proceso utiliza energía eléctrica para el accionamiento de equipos auxiliares (prensa de tornillo, ventiladores, transportadores, molino, tableros) y GLP como combustible para generar el aire caliente del secador. El balance energético del proceso arrojó un requerimiento mínimo teórico de 54 [kW] asociado únicamente a la evaporación del agua. Los consumos instalados informados por proveedores son mayores, pues incluyen el calentamiento sensible del sólido, del agua y del aire, además de pérdidas térmicas e ineficiencias propias del sistema.

Los consumos anuales se calcularon con 4608 [h/año]. Las Tablas 22, 23 y 24 presentan los consumos por equipo para cada alternativa de secador.

Tabla 22. Detalle consumo energético Opción A.

Equipo	Tipo de servicio	Uso al año	Unidad de servicio
Secador Rotatorio	Electricidad	25344	kWh
Horno de aire caliente	Electricidad	25344	kWh
Quemador GLP	GLP	207360	kg
Tolva de alimentación	Electricidad	3456	kWh
Tornillo alimentador	Electricidad	5069	kWh

Tornillo descarga	Electricidad	13824	kWh
Válvula rotativa	Electricidad	3456	kWh
Ciclón con válvula	Electricidad	13594	kWh
Molino	Electricidad	25344	kWh
Tamiz vibratorio	Electricidad	783	kWh
Total electricidad anual		116214	kWh

Tabla 23. Detalle consumo energético Opción B.

Equipo	Tipo de servicio	Uso al año	Unidad de servicio
Prensa de tornillo	Electricidad	69120	kWh
Horno de Bandejas - Ventilador	Electricidad	59904	kWh
Horno de Bandejas - Calor LPG	GLP	110592	kg
Elevador	Electricidad	1705	kWh
Molino	Electricidad	57600	kWh
Tablero de control	Electricidad	4608	kWh
Total electricidad anual		192937	kWh

Tabla 24. Detalle consumo energético Opción C.

Equipo	Tipo de servicio	Uso al año	Unidad de servicio
Prensa de tornillo	Electricidad	13824	kWh
Transportador sinfin (VFD)	Electricidad	6912	kWh
Ventilador principal	Electricidad	10138	kWh
Extractor de gases	Electricidad	34560	kWh
Válvula rotativa	Electricidad	2534	kWh
Secador flash – calor GLP	GLP	83782	kg
Transportador horizontal	Electricidad	5069	kWh
Transportador sinfin	Electricidad	6912	kWh
Molino	Electricidad	25344	kWh
Tamiz vibratorio	Electricidad	783	kWh
Tablero de control	Electricidad	2304	kWh
Total electricidad anual		108308	kWh

También, en las Tablas 25, 26 y 27 se encuentra el detalle de las capacidades que posee cada equipo utilizado en el proceso.

Tabla 25. Detalle de capacidad de Opción A.

Equipo	Capacidad	Unidad
Secador rotatorio	260	[kg/h]
Tornillo alimentador	150-400	[kg/h]

Tornillo de descarga	150-400	[kg/h]
Ciclón (aire)	300-500	[m ³ /h]
Molino	80-100	[kg/h]
Tamiz vibratorio	100	[kg/h]

Tabla 26. Detalle de capacidad de Opción B.

Equipo	Capacidad	Unidad
Prensa de tornillo	500-700	[kg/h]
Secador de bandejas	1000	[kg/batch]
Molino	160-800	[kg/h]

El secador de bandejas opera de forma discontinua con una capacidad de 1000 [kg] por lote. Considerando tiempos de secado de 2–3 [h], se obtiene una capacidad equivalente en régimen continuo de aproximadamente 333–500 [kg/h].

Tabla 27. Detalle de capacidad de Opción C.

Equipo	Capacidad	Unidad
Prensa tornillo	300	[kg/h]
Transportador sinfín (Hopper)	300	[kg/h]
Transportador sinfín (Horizontal)	300	[kg/h]
Secador flash	120	[kg/h]
Molino	80-100	[kg/h]
Tamiz vibratorio	100	[kg/h]

6.7. Razones técnicas

En la Tabla 28 se resumen las razones técnicas del proceso para producir harina de bagazo cervecero, expresadas por tonelada de producto final. Los valores se obtuvieron del balance de masa (100 [ton/mes] de bagazo al 80 % H; 20,91 [ton/mes] de producto al 10 % H), equivalente a 251 [ton/año] aproximadamente con una operación de 4608 [h/año]. Las razones energéticas provienen de los consumos anuales de cada alternativa y se normalizan por la producción anual. Para el secador rotatorio se adopta un consumo nominal de GLP de 25 kg/h, consistente con la potencia del horno especificada por el proveedor.

Tabla 28. Razones técnicas del proceso.

Razones técnicas	Rotatorio (Opción A)	Bandejas (Opción B)	Flash (Opción C)	Unidad
Bagazo cervecero húmedo	4,78	4,78	4,78	[ton/ton producto]
Consumo eléctrico	463	769	432	[kWh/ton producto]

Consumo de GLP	459	441	334	[kg/ton producto]
Producción anual	251	251	251	[ton/año]

6.8. Ubicación de la planta

La localización de la planta constituye un factor estratégico dentro del proyecto, dado que el bagazo cervecero es un subproducto perecible, cuya vida útil en estado fresco no supera las 24 horas sin tratamiento. En consecuencia, la cercanía entre el proveedor de materia prima y la planta de procesamiento resulta fundamental para minimizar costos logísticos, reducir pérdidas por deterioro y garantizar un suministro continuo.

Para este estudio se definió como un potencial proveedor a Cervecería CODA, ubicada en la comuna de Casablanca, Región de Valparaíso. CODA fue seleccionada por su escala productiva y ubicación estratégica, en un punto intermedio entre la Región Metropolitana y la costa de Valparaíso. Esta localización permite acceder de forma eficiente a la materia prima fresca y, al mismo tiempo, se encuentra bien conectada con las principales vías de transporte hacia potenciales mercados de distribución.

En la Figura 7 se presenta una vista satelital obtenida, donde se indica el área proyectada del posible emplazamiento de la planta mediante un recuadro de referencia (zona amarilla). Este espacio fue seleccionado por su cercanía inmediata a la cervecería y por disponer de terreno suficiente para la instalación de la línea productiva, considerando además áreas auxiliares para almacenamiento y logística.

De acuerdo con las cotizaciones de equipos, la línea de secado y molienda requiere un espacio mínimo cercano a 120 [m²] exclusivamente para equipos principales. Sin embargo, para efectos prácticos se considera necesario proyectar una superficie mayor, que contemple también áreas de logística (transporte, bodegas de insumos, almacenamiento de producto terminado). Por ello, el emplazamiento deberá poseer como mínimo 400 m² de superficie total disponible, lo que asegura la operación continua de la planta y permite flexibilidad frente a futuras ampliaciones o incorporación de nuevas tecnologías.



Figura 11. Emplazamiento del proyecto en planta CODA, Casablanca.

6.9. Layout de la planta

Con el fin de evaluar la factibilidad espacial de cada una de las tecnologías analizadas, se elaboraron esquemas de layout para los tres sistemas de secado considerados: secador de bandejas, secador rotatorio y secador flash.

En el caso del secador de bandejas, se contó con un plano de disposición oficial proporcionado por el proveedor (ver Figura 9). Este documento permitió identificar de manera directa el espacio requerido para la línea operacional. Para las demás alternativas, secador rotatorio y secador flash, no se disponía de planos formales de instalación, por lo que se generaron layouts representativos a partir de las dimensiones reportadas en las cotizaciones (ver Figuras 8 y 10). En estos diagramas se esquematizaron los equipos principales, distribuidos de acuerdo con el flujo del proceso y manteniendo las proporciones reportadas en la información técnica entregada por los proveedores.

También mencionar que, para el caso del secador rotatorio, el proveedor entrega un diagrama de instrumentación (P&ID) (ver Anexo J).

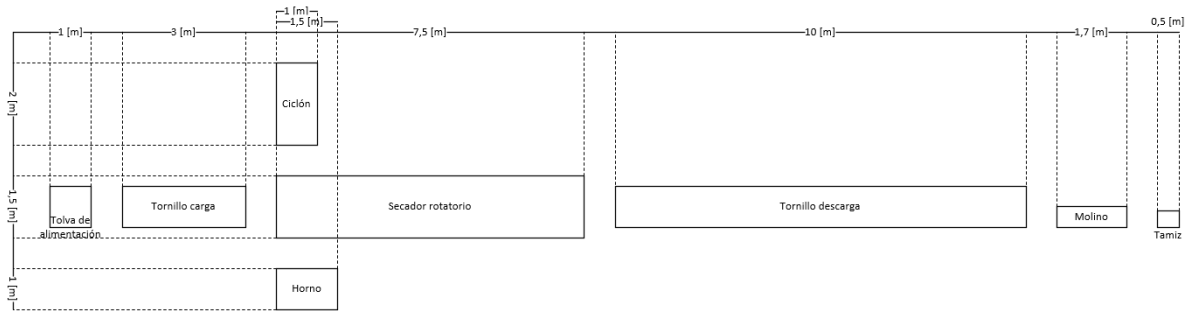


Figura 12. Layout representativo de opción secador rotatorio .

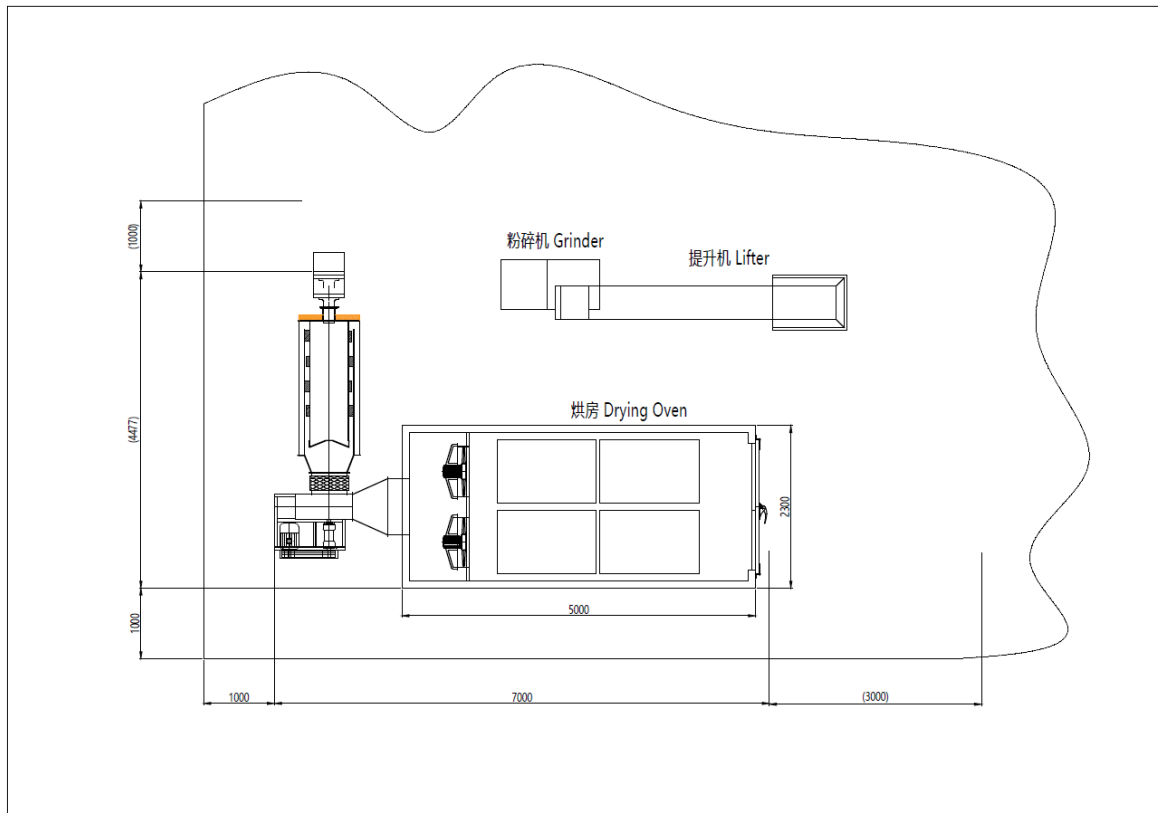


Figura 13. Layout de opción secador de bandejas (Shouchuang).

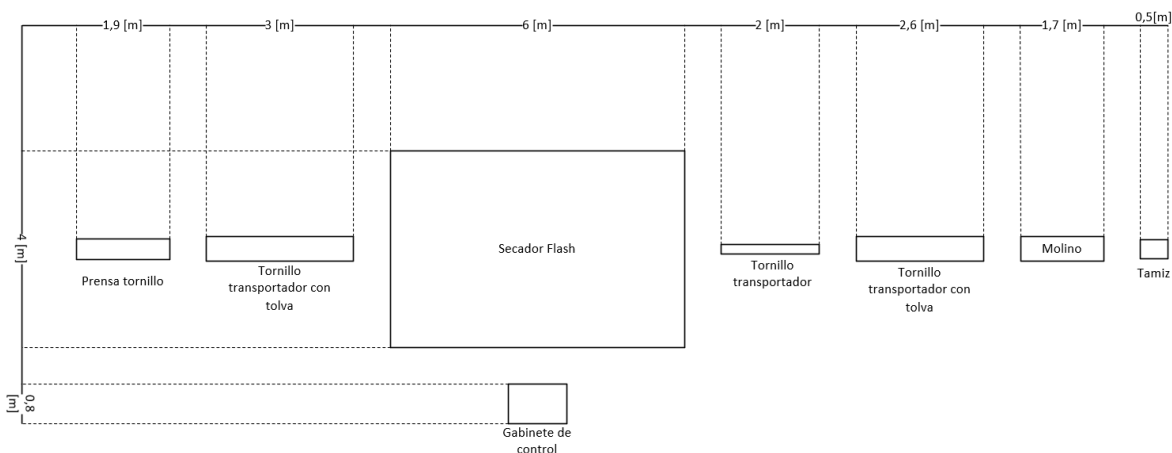


Figura 14. Layout representativo de opción secador flash.

6.10. Logística del proceso

Materia prima:

- Bagazo cervecero: Se transporta desde Cervecería CODA (Casablanca) hasta la planta, en camiones tolva o contenedores, con una frecuencia adecuada a la generación de bagazo del proveedor.

Producto:

- Harina de bagazo cervecero: Se ensaca en formatos que se estimen convenientes para la producción estudiada y se almacena en bodega seca y ventilada (condiciones óptimas). Posteriormente se distribuye vía terrestre a clientes o distribuidores locales.

Desechos:

- Aguas del prensado: Ricas en compuestos solubles, se canalizan a un sistema de tratamiento o disposición controlada.
- Polvo de ciclón/filtro de mangas: Se acumula y gestiona como residuo sólido no peligroso, con posibilidad de valorización futura.

6.11. Aspectos ambientales

La implementación del as para la obtención de harina a partir de bagazo cervecero genera impactos ambientales de bajo impacto, los cuales deben ser considerados y gestionados para asegurar la sostenibilidad del proyecto y el cumplimiento del marco normativo vigente en Chile. A nivel general, el proceso no genera residuos peligrosos ni emisiones líquidas o gaseosas contaminantes, pero sí se identifican residuos sólidos no peligrosos provenientes de las operaciones unitarias: secado, molienda, tamizado y envasado. Residuos que pueden ser controlados o valorizados mediante una adecuada gestión interna. (Ver Tabla 29)

Tabla 29. Residuos generados en las etapas correspondientes.

Etapas	Tipo de residuo/emisión	Clasificación e impacto ambiental potencial
Secado	Aire húmedo (vapor de agua)	Emisión inofensiva; no requiere tratamiento
Molienda	Polvo fino suspendido en el aire	Residuo industrial no peligroso (RINP); controlable con filtros
Tamizado	Fracción de rechazo (gruesos)	RIPN; reutilizable como forraje o compost
Envasado	Embalajes y restos plásticos	Residuos asimilables a domiciliarios; reciclables

El polvo fino generado durante la etapa de molienda y los rechazos del tamiz se clasifican como residuos industriales no peligrosos (RINP), al no presentar características de toxicidad ni contener sustancias químicas peligrosas (Ministerio de Salud, 2003). En particular, los rechazos del tamiz pueden ser recirculados hacia la etapa de molienda, para volver a reincorporarse al proceso o ser recolectados y valorizados como materia prima secundaria en alimentación animal, compostaje o generación de biomasa energética, en concordancia con principios de economía circular.

En el caso de los desechos de embalaje generados en la etapa de envasado, como restos de sacos, etiquetas o plásticos, estos se consideran residuos asimilables a domiciliarios, ya que presentan características similares a los residuos sólidos comunes generados en viviendas o comercios. Estos residuos pueden ser gestionados junto al sistema municipal de recolección o mediante programas internos de reciclaje, sin requerimientos especiales para su tratamiento (Ministerio de Salud, 2003).

Respecto a las emisiones gaseosas, el proceso no contempla combustión directa de materiales ni uso de reactivos volátiles. El único vapor liberado corresponde a agua evaporada durante el secado, sin carga contaminante.

No se generan efluentes líquidos industriales, dado que el agua contenida en el bagazo es removida en forma de vapor. En caso de implementarse un sistema de recuperación, esta podría ser reutilizada para fines no potables dentro de la planta (ej. riego o limpieza).

La legislación ambiental vigente en Chile establece que los proyectos de inversión deben ser evaluados ambientalmente cuando generen impactos significativos, en conformidad con la Ley N.º 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Ministerio Secretaría General De La Presidencia, 2004). Según lo dispuesto en el artículo 10 de dicha ley y su reglamento, este proyecto no requiere ser ingresado al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), ya que:

- No genera residuos peligrosos ni emisiones contaminantes relevantes.
- No se emplaza en zonas protegidas ni afecta cuerpos de agua o suelos sensibles.
- No implica reasentamiento de personas ni interviene áreas patrimoniales.

No obstante, si el proyecto se escalara a mayor escala o se emplazara en zonas reguladas por Planes de Descontaminación o Normas de Emisión específicas, podría ser evaluado mediante una Declaración de Impacto Ambiental (DIA), conforme al artículo 11 de la Ley N.º 19.300 (Ministerio Secretaría General De La Presidencia , 2004).

6.12. Normativa aplicable en Chile

El presente proyecto se enmarca en el desarrollo de un proceso de elaboración de harina a partir de bagazo cervecero, destinado al consumo humano. Dado esto, deben cumplirse diversas normativas chilenas en materias sanitarias, ambientales, laborales e industriales, que regulan desde la producción de alimentos hasta el manejo de residuos y la operación de plantas industriales.

6.12.1. Normativa sanitaria

El proceso debe cumplir con el Reglamento Sanitario de los Alimentos (RSA), establecido en el Decreto Supremo N.º 977/1996 del Ministerio de Salud (Ministerio de Salud, 1996), el cual define los requisitos sanitarios y de higiene que deben cumplir los establecimientos elaboradores de alimentos, incluyendo harinas. Este reglamento exige la implementación de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM), así como el cumplimiento de condiciones adecuadas de infraestructura, manipulación, personal capacitado, y control de materias primas.

Asimismo, el RSA regula la rotulación nutricional y comercial de alimentos. Según los artículos 107 al 113, todo producto destinado a consumo humano y envasado debe presentar información clara y verificable sobre su composición, fecha de elaboración y vencimiento, valor nutricional, y advertencias si corresponde.

6.12.2. Normativa ambiental

En materia de normativa ambiental, el proyecto se rige por la Ley N.º 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, promulgada en 1994 y vigente a través de sus actualizaciones (Ministerio Secretaría General De La Presidencia , 2004). Esta ley establece el marco regulatorio para la gestión ambiental de proyectos productivos, y determina que ciertos proyectos deben ser evaluados ambientalmente a través del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

Por otra parte, el manejo de los residuos generados debe realizarse conforme al Decreto Supremo N.º 148/2003 del Ministerio de Salud, el cual establece el Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos (Ministerio de Salud, 2003). Según esta norma, los residuos sólidos generados en este proyecto, como el polvo de molienda, el rechazo del tamiz

o los residuos de embalaje. Se clasifican como residuos industriales no peligrosos (RINP) o asimilables a domiciliarios, y deben ser almacenados, transportados y dispuestos según lo indicado en dicho reglamento.

6.12.3. Normativa laboral y de seguridad industrial

En cuanto a aspectos laborales, el proyecto debe cumplir con lo dispuesto en la Ley N.º 16.744 sobre Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales (Ministerio del Trabajo y Previsión Social, 2022), la cual obliga al empleador a proteger la salud y seguridad de los trabajadores, implementar medidas preventivas, capacitar al personal, y entregar los elementos de protección personal (EPP) necesarios para el correcto desarrollo de las tareas.

Adicionalmente, el proyecto debe respetar las condiciones mínimas de higiene, ventilación, control de polvo, iluminación y bienestar laboral, conforme al Decreto Supremo N.º 594/1999 del Ministerio de Salud (Ministerio de Salud, 2019), el cual regula las condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo en Chile.

7. Estudio Económico

7.1. Base para evaluación económica

La evaluación económica de un proyecto industrial tiene por objetivo determinar su viabilidad financiera a partir de un análisis de los ingresos esperados, costos asociados e inversiones requeridas durante la vida útil del proyecto. Para ello, se deben establecer una serie de supuestos técnicos, económicos y financieros que permitan construir un flujo de caja proyectado en el tiempo.

En este caso, el proyecto corresponde a la implementación de una planta piloto para la producción de harina funcional a partir de bagazo cervecero, subproducto abundante de la industria cervecera. El análisis considera las condiciones actuales del mercado, proyecciones de precios, estimaciones técnicas de producción y consumo energético, además de antecedentes referenciales de inversión obtenidos a través de cotizaciones con proveedores nacionales e internacionales.

Los elementos que sustentan esta evaluación incluyen:

- Definición de la capacidad de producción mensual esperada.
- Precio estimado de venta del producto en base al análisis de mercado nacional.
- Costos operacionales estimados: mano de obra, energía, materias primas, insumos y mantención.
- Supuestos financieros: tasa de descuento, vida útil del proyecto, tasa de impuestos, criterios de depreciación.
- Inversión inicial estimada, considerando equipamiento principal, obras civiles y capital de trabajo.

A partir de estos antecedentes, se estructura el análisis económico del proyecto bajo un horizonte temporal de evaluación y con una moneda base definida, permitiendo calcular indicadores financieros relevantes tales como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación del Capital (PRC).

7.1.1. Mercado Global y objetivo

A nivel mundial, los alimentos funcionales se proyectan como una de las categorías de mayor crecimiento, alcanzando USD 386,2 mil millones en 2033, con una tasa de crecimiento del 5,45% anual (IMARC Group, 2024).

En Chile, se comercializan harinas alternativas como las de avena, quinoa y arroz, cuyos precios varían según el tipo y el canal de venta. En 2024, el precio de importación de harina de avena fue de 5,62 USD/kg; a nivel global, la harina de quinoa se comercializó entre 2,20 y 6,50 USD/kg, y la harina de arroz entre 0,78 y 5,68 USD/kg (TRIDGE, 2024).

El bagazo cervecero, subproducto generado durante la producción de cerveza, representa aproximadamente el 85% de los residuos sólidos del proceso cervecero (Mussatto & Dragone, 2006). En Chile, este subproducto es clasificado como residuo industrial no peligroso y reutilizable (Ministerio de Salud, 2003).

Actualmente, empresas como R-Food producen harina a partir de bagazo cervecero en Chile, orientándola a aplicaciones alimentarias funcionales, lo que demuestra su viabilidad técnica y comercial en Chile (R-Food, 2025). Sin embargo, la oferta en este segmento sigue siendo limitada, abriendo espacio para propuestas con distinto enfoque tecnológico y de escala.

El mercado objetivo del presente proyecto corresponde al segmento de harinas funcionales para consumo humano, enfocado en consumidores conscientes del valor nutricional y ambiental de sus alimentos. Este estudio económico se realiza considerando una planta piloto con capacidad de producción aproximada de 21 toneladas mensuales de harina funcional, con el objetivo de captar entre un 2,6% y 5,9% del mercado nacional de harinas especiales.

7.1.2. Precio del producto

Dado que actualmente no existe una estructura de precios consolidada en Chile para la harina elaborada a partir de bagazo cervecero, el valor de venta del producto se definió por comparación con harinas funcionales de características similares, tanto a nivel nacional como internacional. Para ello, se utilizó un rango de precios referenciales entre 2,70 y 3,60 [USD/kg], correspondiente a productos sustitutos como harinas de garbanzo, maracuyá y plátano verde (Colpo & Rasquin Rabenschlag, 2022).

En el presente análisis económico se establecieron tres escenarios para el precio de venta, expresados en USD por tonelada (Ver Tabla X).

Tabla 30. Escenarios precio de venta de producto.

Escenario	Precio [USD/ton]
Conservador	2.700
Realista	3.000
Optimista	5.000

Para la construcción del flujo de caja se seleccionó el escenario conservador, con el fin de evaluar la viabilidad económica del proyecto bajo condiciones de ingreso menos favorables. Este valor se considera prudente dentro del rango observado para harinas funcionales con propiedades similares, permitiendo estimar los ingresos sin sobrestimar la rentabilidad del proyecto.

7.1.3. Materias primas, servicios e insumos

El proyecto considera como materia prima principal el bagazo cervecero húmedo. La planta está diseñada para procesar 100 toneladas mensuales de este residuo. Según información obtenida desde la empresa UpFoods, el costo de adquisición del bagazo puede variar entre \$50 y \$200 CLP por kilogramo, dependiendo de la disponibilidad y acuerdo con los productores. Para fines del análisis económico, se utilizará un valor conservador de \$200 [CLP/kg].

En cuanto a los insumos generales requeridos para la operación de la planta, se estimó un costo anual de \$25.000.000 CLP. Este valor contempla la adquisición de sacos o envases para el envasado del producto final, lubricantes para el mantenimiento de maquinaria, repuestos menores, agua para limpieza, elementos de protección personal (EPP) y productos de limpieza general. La estimación se realizó con base en prácticas observadas en procesos industriales comparables de secado y molienda de materias primas de origen agrícola, considerando además una proporción del costo de operación directa y el tamaño de planta proyectado para este estudio (Peters, Timmerhaus, & West, 2011).

Respecto a los servicios de energía, se estiman los siguientes consumos anuales según la alternativa de secado evaluada:

- Secador rotatorio: 116.214 [kWh] de energía eléctrica y 209.454 [L/año] de LPG.
- Secador de bandejas: 192.937 [kWh] de energía eléctrica y 201.076 [L/año] de LPG.
- Secador flash: 108.380 [kWh] de energía eléctrica y 152.330 [L/año] de gas licuado (LPG).

7.1.4. Moneda utilizada en el proyecto

Para el desarrollo del análisis técnico-económico del presente proyecto se ha utilizado como unidad monetaria el peso chileno (CLP). Todas las estimaciones de costos, ingresos, inversiones, egresos operacionales y cálculos financieros han sido expresadas en esta

moneda, con valores nominales y sin considerar inflación futura explícita, salvo en los escenarios donde se indique lo contrario.

La elección del peso chileno se fundamenta en que el proyecto está destinado a ejecutarse y operar dentro del territorio nacional, con la mayoría de sus costos (materias primas, insumos, energía, mano de obra y arriendo) expresados y pagados en moneda local. Asimismo, los eventuales ingresos generados por la venta del producto final (harina de bagazo cervecero) estarán denominados en CLP, al estar dirigidos principalmente al mercado nacional.

En los casos donde se recibió información técnica o cotizaciones en moneda extranjera (principalmente dólares estadounidenses, USD), se procedió a su conversión a pesos chilenos utilizando el tipo de cambio vigente al momento de la evaluación. El valor de referencia utilizado para esta conversión fue de \$965,01 [CLP/USD] en concordancia con el tipo de cambio observado publicado (Banco Central de Chile, 2025).

7.1.5. Antecedentes financieros

Para desarrollar la evaluación económica se requieren algunos datos financieros relevantes, como los impuestos aplicables, las opciones de financiamiento y la tasa de descuento utilizada. Según el Servicio de Impuestos Internos (SII), para este proyecto en particular, al tratarse de una empresa industrial acogida al régimen propyme general, se aplica la tasa de impuesto de Primera Categoría, la cual corresponde al 25% de las utilidades percibidas (SII, 2025).

Existen diversas alternativas de financiamiento para el proyecto, tales como financiamiento propio, fondos concursables y créditos bancarios. En este estudio se considerarán las posibilidades de financiamiento propio, con el fin de simplificar el análisis y enfocarse en el desempeño técnico-económico del proceso.

En cuanto a la tasa de descuento, se ha considerado un valor del 12%, determinado en función del riesgo del proyecto, el costo de oportunidad del capital y las condiciones actuales del mercado financiero nacional. Este valor se compone de una tasa base de referencia, correspondiente a la tasa de política monetaria vigente más una prima de riesgo que refleja las características del proyecto y su sector (Banco Central de Chile, 2025).

7.1.6. Horizonte de evaluación del proyecto

El horizonte de evaluación del proyecto se ha definido en 10 años. Este período permite reflejar de forma adecuada la recuperación de la inversión y la generación de beneficios durante todo el ciclo operativo del proyecto.

7.1.7. Criterios de depreciación

La depreciación de los equipos del proyecto se ha calculado mediante método lineal, asumiendo un valor residual nulo al término de su vida útil. Este método consiste en distribuir

el costo de adquisición de cada equipo en partes iguales durante su vida útil, reflejando así un cargo uniforme por depreciación en cada año.

La vida útil considerada para los equipos principales es de 15 años, en concordancia con sus características técnicas y las prácticas habituales para plantas industriales de este tipo. En el caso de equipos con distinta vida útil, se ha aplicado la depreciación de forma proporcional al período correspondiente. La vida útil de los equipos se ha determinado de acuerdo con lo establecido por el Servicio de Impuestos Internos (SII) (SII, 2025). Se puede observar en el Anexo K los listados detallados por caso de los años útiles de los equipos correspondientes.

7.1.8. Listado de inversiones

Los equipos para el proceso son la principal inversión del proyecto. Las cotizaciones fueron obtenidas desde empresas extranjeras proveedoras de maquinaria industrial, y los valores se expresan en dólares estadounidenses (USD), para posteriormente ser convertidos a pesos chilenos (CLP) utilizando el tipo de cambio vigente al momento de la evaluación. A continuación, se presentan los listados de equipos requeridos para cada línea de proceso, junto con su precio unitario y total (Tablas 31, 32 y 33).

Tabla 31. Listado de equipos para caso A (secador rotatorio)

Equipos	Cantidad	Precio [USD]	Precio [CLP]
Tolva de alimentación	1	\$ 2.650	\$ 2.557.276,50
Tornillo transportador (carga)	1	\$ 1.760	\$ 1.698.417,60
Secador rotatorio	1	\$ 22.000	\$ 21.230.220,00
Válvula rotativa	1	\$ 1.350	\$ 1.302.763,50
Horno de aire caliente	1	\$ 3.670	\$ 3.541.586,70
Quemador de GLP	1	\$ 3.250	\$ 3.136.282,50
Ciclón colector de polvo	1	\$ 1.700	\$ 1.640.517,00
Tornillo transportador (descarga)	1	\$ 4.400	\$ 4.246.044,00
Molino	1	\$ 2.150	\$ 2.074.771,50
Tamiz vibratorio	1	\$ 650	\$ 627.256,50
Total	-	\$ 43.580	\$ 42.055.136

Tabla 32 Listado de equipos para caso B (secador de bandejas)

Equipos	Cantidad	Precio [USD]	Precio [CLP]
Prensa de tornillo	1	\$ 14.925	\$ 14.402.774
Secador de bandejas	1	\$ 16.857	\$ 16.267.174
Máquina de elevación	1	\$ 3.443	\$ 3.322.529
Molino	1	\$ 7.571	\$ 7.306.090
Total	-	\$ 42.796	\$ 41.298.568

Tabla 33. Listado de equipos para caso C (secador flash)

Equipos	Cantidad	Precio [USD]	Precio [CLP]
Prensa de tornillo	1	\$ 9.550	\$ 9.215.845,50
Tornillo transportador con tolva	1	\$ 2.400	\$ 2.316.024,00
Secador flash	1	\$ 20.950	\$ 20.216.959,50
Tornillo transportador	1	\$ 1.850	\$ 1.785.268,50
Tornillo transportador con tolva	1	\$ 2.200	\$ 2.123.022,00
Molino	1	\$ 2.150	\$ 2.074.771,50
Tamiz vibratorio	1	\$ 650	\$ 627.256,50
Gabinete de control integrado	1	\$ 3.350	\$ 3.232.783,50
Total	-	\$ 43.100	\$ 41.591.931

Además, en las Tablas 34, 35 y 36 se presenta el listado de costos directos, indirectos y capital de trabajo considerados, los cuales fueron calculados mediante el uso de los factores de Lang modificados por Peters y Timmerhaus. En el Anexo L se encuentra el detalle de los factores aplicados. Para este proyecto se ha considerado un proceso de tipo sólido, dado que la etapa principal corresponde al secado y molienda del bagazo cervecero para la obtención de harina.

Tabla 34. Listado de costos para caso A (secador rotatorio)

Costos Directos (A)		
Variable	Factor	Costo [CLP]
Equipos	100%	\$ 42.055.136
Instalación de equipos	45%	\$ 18.924.811
instrumentación y control	9%	\$ 3.784.962
Tuberías	16%	\$ 6.728.822
Eléctricos	10%	\$ 4.205.514
Edificios y servicios	25%	\$ 10.513.784
Mejoras de terreno	13%	\$ 5.467.168
Servicios auxiliares	40%	\$ 16.822.054
Total costos Directos	258%	\$ 108.502.250
Costos Indirectos (B)		
Ingeniería de supervisión	33%	\$ 13.878.195
Gastos de construcción	39%	\$ 16.401.503
Contingentes	34%	\$ 14.298.746
Total costos Indirectos	106%	\$ 44.578.444
Capital fijo (A+B)	364%	\$ 153.080.694
Capital de trabajo (C)	68%	\$ 28.597.492
Inversión total (A+B+C)	432%	\$ 181.678.187

Tabla 35. Listado de costos para caso B (secador de bandejas)

Costos Directos (A)		
Variable	Factor	Costo [CLP]
Equipos	100%	\$ 41.298.568
Instalación de equipos	45%	\$ 18.584.356
Instrumentación y control	9%	\$ 3.716.871
Tuberías	16%	\$ 6.607.771
Eléctricos	10%	\$ 4.129.857
Edificios y servicios	25%	\$ 10.324.642
Mejoras de terreno	13%	\$ 5.368.814
Servicios auxiliares	40%	\$ 16.519.427
Total costos Directos	258%	\$ 106.550.305
Costos Indirectos (B)		
Ingeniería de supervisión	33%	\$ 13.628.527
Gastos de construcción	39%	\$ 16.106.442
Contingentes	34%	\$ 14.041.513
Total costos Indirectos	106%	\$ 43.776.482
Capital fijo (A+B)	364%	\$ 150.326.787
Capital de trabajo (C)	68%	\$ 28.083.026
Inversión total (A+B+C)	432%	\$ 178.409.814

Tabla 36. Listado de costos para caso C (secador flash)

Costos Directos (A)		
Variable	Factor	Costo [CLP]
Equipos	100%	\$ 41.591.931
Instalación de equipos	45%	\$ 18.716.369
Instrumentación y control	9%	\$ 3.743.274
Tuberías	16%	\$ 6.654.709
Eléctricos	10%	\$ 4.159.193
Edificios y servicios	25%	\$ 10.397.983
Mejoras de terreno	13%	\$ 5.406.951
Servicios auxiliares	40%	\$ 16.636.772
Total costos Directos	258%	\$ 107.307.182
Costos Indirectos (B)		
Ingeniería de supervisión	33%	\$ 13.725.337
Gastos de construcción	39%	\$ 16.220.853
Contingentes	34%	\$ 14.141.257
Total costos Indirectos	106%	\$ 44.087.447
Capital fijo (A+B)	364%	\$ 151.394.629
Capital de trabajo (C)	68%	\$ 28.282.513
Inversión total (A+B+C)	432%	\$ 179.677.142

7.1.9. Detalle de costos

Los costos fijos del proyecto corresponden a aquellos gastos que se mantienen constantes e independientes del volumen de producción de la planta. Estos incluyen el costo anual del personal, considerando las cargas legales y beneficios asociados, el arriendo del terreno y la depreciación de los equipos principales. El mantenimiento de los equipos se encuentra incorporado dentro del costo de personal. La distribución de estos costos fijos se presenta en las Figuras 11, 12 y 13 para cada caso correspondiente.

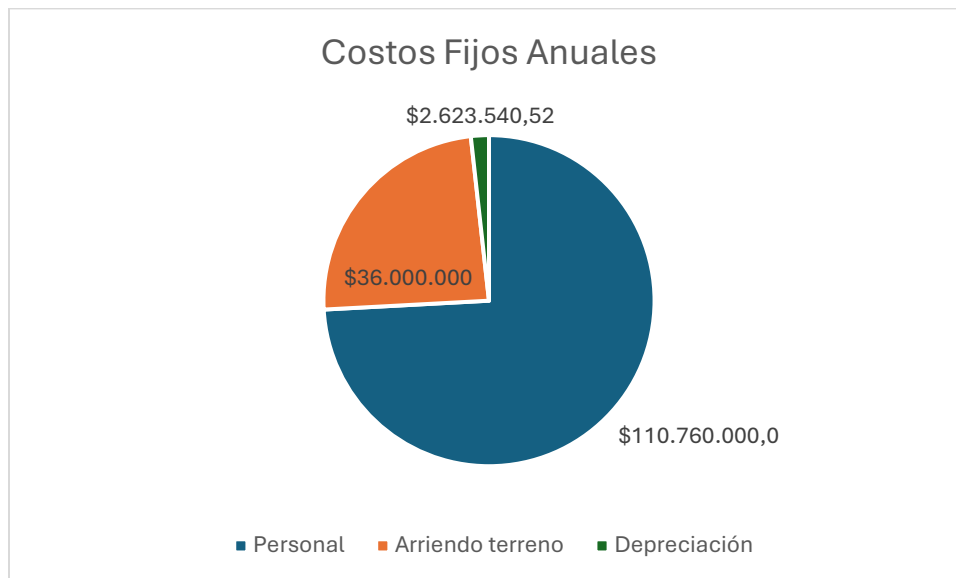


Figura 15. Costos fijos caso A (secador rotatorio).

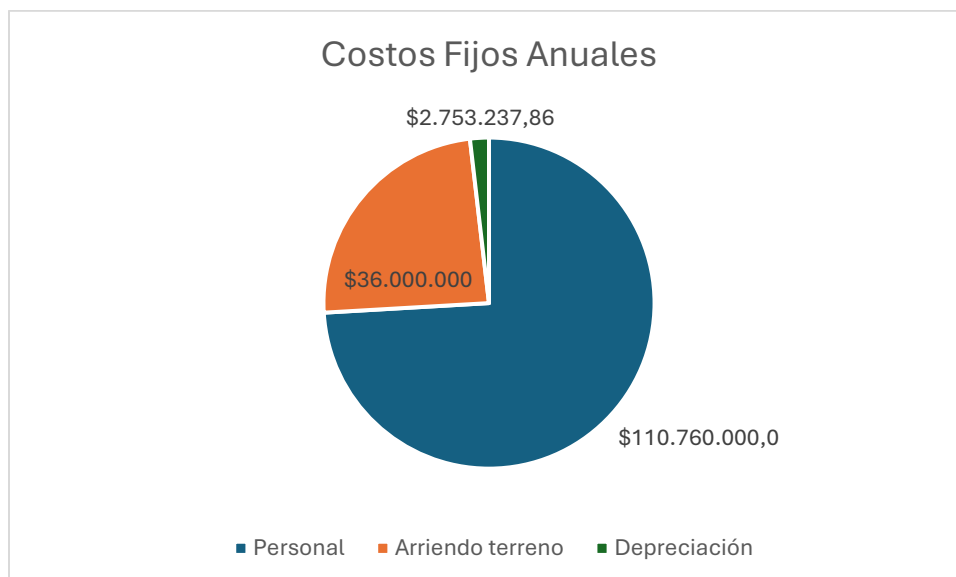


Figura 16. Costos fijos caso B (secador de bandejas).

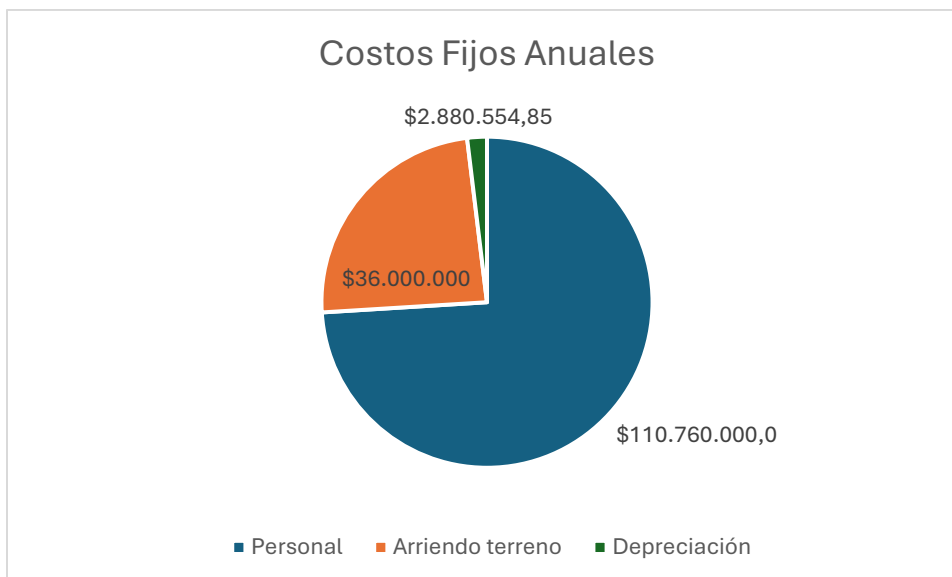


Figura 17. Costos fijos caso C (secador flash).

Por otro lado, los costos variables corresponden a aquellos que varían en función de la cantidad de producción y del nivel de actividad de la planta. Estos incluyen el costo de la materia prima (bagazo húmedo), el consumo de energía eléctrica, combustible y los insumos. Además, se consideran los costos asociados al canal de venta. La distribución de estos costos variables se presenta en las Figuras 14, 15 y 16 para cada caso correspondiente.

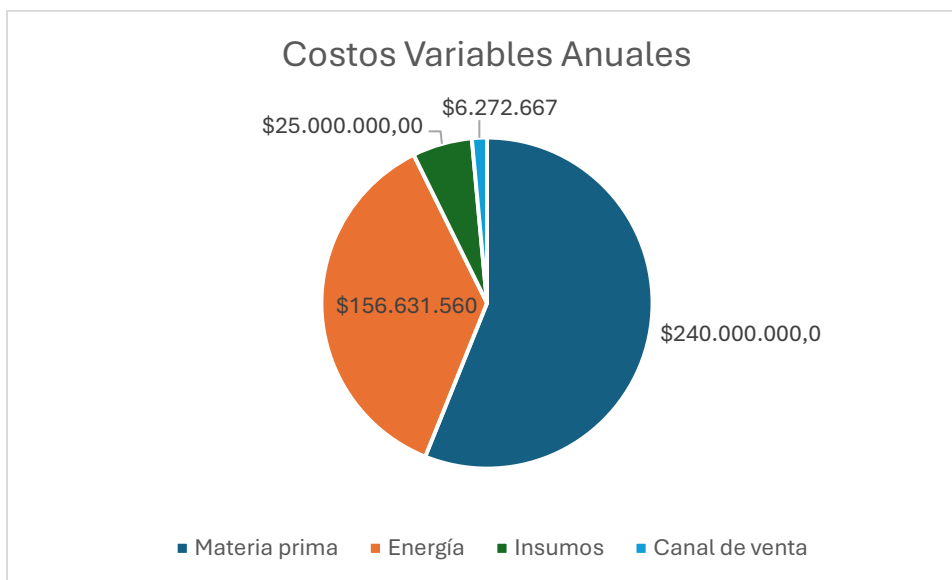


Figura 18. Costos variables caso A (secador rotatorio).

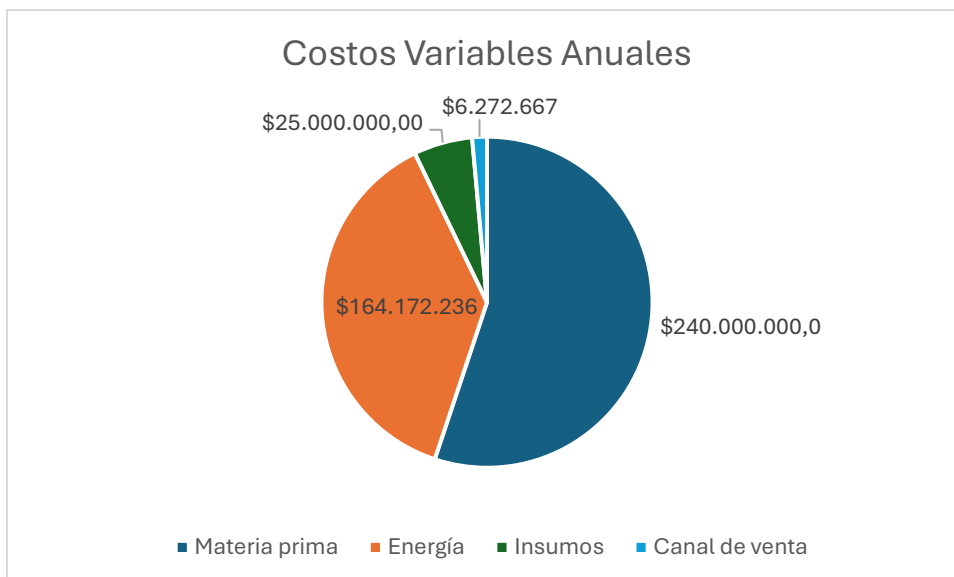


Figura 19. Costos variables caso B (secador de bandejas).

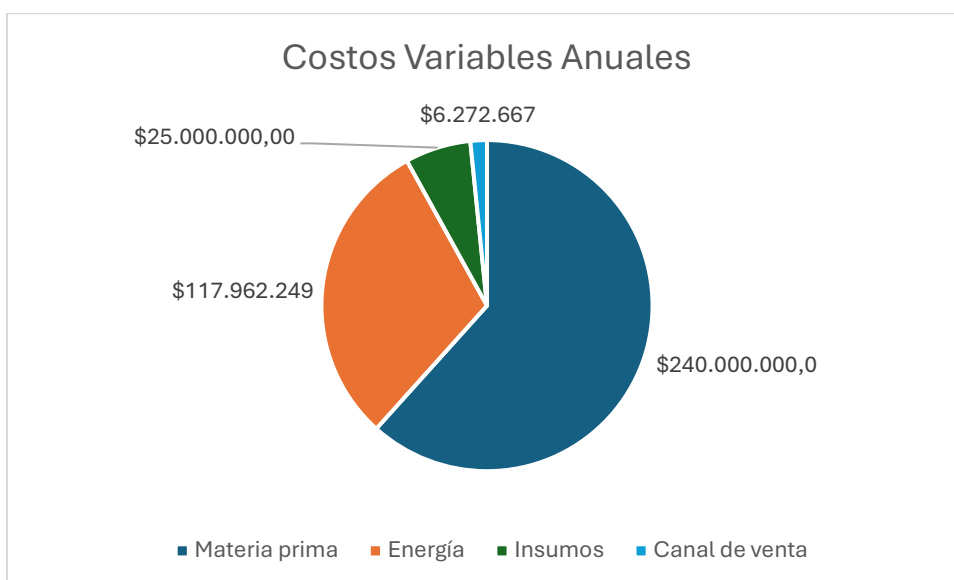


Figura 20. Costos variables caso C (secador flash).

7.2. Evaluación económica

La evaluación económica tiene como objetivo determinar la viabilidad financiera de la implementación de la planta para la producción de harina a partir de bagazo cervecero. Para ello, se analizan los costos de inversión, los costos de operación y los ingresos proyectados durante el período de vida útil del proyecto, con el propósito de establecer su rentabilidad y sostenibilidad. En los siguientes incisos se detallarán los criterios utilizados para la evaluación, el flujo de caja proyectado, los indicadores de rentabilidad obtenidos, los principales criterios económicos considerados, un análisis de sensibilidad frente a variables críticas y un resumen de los resultados generales.

7.2.1. Criterios de Evaluación del Proyecto

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto se han considerado criterios utilizados en estudios de inversión industrial, que permiten analizar su rentabilidad y capacidad para generar valor. En particular, se utilizan el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación de Capital (PRC).

El VAN permite medir el valor presente de los beneficios netos que el proyecto generará durante su vida útil, descontados a la tasa de descuento definida, la cual refleja el costo de oportunidad del capital y el nivel de riesgo asociado al proyecto. La TIR corresponde a la tasa de rendimiento que iguala el valor presente de los ingresos y egresos del proyecto, es decir, la tasa que hace que el VAN sea igual a cero. El PRC o Payback indica el tiempo necesario para recuperar el capital invertido mediante los flujos netos de caja.

Estos indicadores se calculan en base al flujo de caja proyectado, considerando los costos de inversión, costos de operación, ingresos esperados y los supuestos financieros previamente definidos.

Además, se consideró un capital de trabajo inicial equivalente al 50 % de los costos operacionales anuales, lo que corresponde a aproximadamente seis meses de operación. Este valor permite cubrir el desfase inicial entre los egresos y los primeros ingresos por ventas, incluyendo costos asociados a materia prima, mano de obra, energía, arriendo, insumos y canal de venta.

7.2.2. Flujo de Caja

A continuación, se presenta el flujo de caja asociado a cada caso correspondiente (ver Figuras 17, 18 y 19).

Flujo de caja											
[CLP]	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Ingresos operacionales	\$ 653.744.094	\$ 666.818.976	\$ 680.155.356	\$ 693.758.463	\$ 707.633.632	\$ 721.786.305	\$ 736.222.031	\$ 750.946.472	\$ 765.965.401	\$ 781.284.709	
Ingresos no operacionales	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Egresos operacionales	\$(574.664.227)	\$(574.664.227)	\$(574.664.227)	\$(574.664.227)	\$(574.664.227)	\$(574.664.227)	\$(574.664.227)	\$(574.664.227)	\$(574.664.227)	\$(574.664.227)	\$(574.664.227)
Egresos no operacionales	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
EBITDA	\$ 79.079.867	\$ 92.154.749	\$ 105.491.129	\$ 119.094.236	\$ 132.969.405	\$ 147.122.078	\$ 161.557.804	\$ 176.282.245	\$ 191.301.174	\$ 206.620.482	
Valor libro	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Depreciación	\$ (2.623.541)	\$ (2.623.541)	\$ (2.623.541)	\$ (2.623.541)	\$ (2.623.541)	\$ (2.623.541)	\$ (2.623.541)	\$ (2.623.541)	\$ (2.623.541)	\$ (2.623.541)	\$ (2.623.541)
Pérdidas del ejercicio anterior	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
UAI	\$ 81.703.408	\$ 94.778.290	\$ 108.114.669	\$ 121.717.777	\$ 135.592.946	\$ 149.745.618	\$ 164.181.345	\$ 178.905.785	\$ 193.924.715	\$ 209.244.023	
Impuesto	\$ (20.425.852)	\$ (23.694.572)	\$ (27.028.667)	\$ (30.429.444)	\$ (33.896.236)	\$ (37.436.405)	\$ (41.045.336)	\$ (44.726.446)	\$ (48.481.179)	\$ (52.311.006)	
UDI	\$ 61.277.556	\$ 71.083.717	\$ 81.086.002	\$ 91.288.332	\$ 101.694.709	\$ 112.309.214	\$ 123.136.008	\$ 134.179.339	\$ 145.443.536	\$ 156.933.017	
Depreciación	\$ 2.623.541	\$ 2.623.541	\$ 2.623.541	\$ 2.623.541	\$ 2.623.541	\$ 2.623.541	\$ 2.623.541	\$ 2.623.541	\$ 2.623.541	\$ 2.623.541	
Valor libro	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Inversión en activos fijos	\$ (153.080.694)										
Inversión en activos intangibles											
Capital de trabajo	\$ (287.332.113)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Recuperación capital trabajo											
Valor desecho proyecto											
Flujo de caja neto	\$ (440.412.808)	\$ 63.901.097	\$ 73.707.258	\$ 83.709.543	\$ 93.911.873	\$ 104.318.250	\$ 114.932.754	\$ 125.759.549	\$ 136.802.879	\$ 148.067.076	\$ 159.556.557
Payback	\$ (440.412.808)	\$(376.511.711)	\$(302.804.453)	\$(219.094.911)	\$(125.183.038)	\$ (20.864.788)	\$ 94.067.966	\$ 219.827.515	\$ 356.630.395	\$ 504.697.471	\$ 664.254.029
Van	\$ 115.173.867										
TIR	18%										

Figura 21. Flujo de caja de opción A (Secador rotatorio).

[CLP]	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Ingresos operacionales		\$ 653.744.094	\$ 666.818.976	\$ 680.155.356	\$ 693.758.463	\$ 707.633.632	\$ 721.786.305	\$ 736.222.031	\$ 750.946.472	\$ 765.965.401	\$ 781.284.709
Ingresos no operacionales		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Egresos operacionales		\$(582.204.903)	\$(582.204.903)	\$(582.204.903)	\$(582.204.903)	\$(582.204.903)	\$(582.204.903)	\$(582.204.903)	\$(582.204.903)	\$(582.204.903)	\$(582.204.903)
Egresos no operacionales		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
EBITDA		\$ 71.539.192	\$ 84.614.074	\$ 97.950.453	\$ 111.553.560	\$ 125.428.730	\$ 139.581.402	\$ 154.017.128	\$ 168.741.569	\$ 183.760.498	\$ 199.079.806
Valor libro		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Depreciación		\$ (2.753.238)	\$ (2.753.238)	\$ (2.753.238)	\$ (2.753.238)	\$ (2.753.238)	\$ (2.753.238)	\$ (2.753.238)	\$ (2.753.238)	\$ (2.753.238)	\$ (2.753.238)
Pérdidas del ejercicio anterior		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
UAI		\$ 74.292.430	\$ 87.367.312	\$ 100.703.691	\$ 114.306.798	\$ 128.181.968	\$ 142.334.640	\$ 156.770.366	\$ 171.494.807	\$ 186.513.736	\$ 201.833.044
Impuesto		\$ (18.573.107)	\$ (21.841.828)	\$ (25.175.923)	\$ (28.576.700)	\$ (32.045.492)	\$ (35.583.660)	\$ (39.192.592)	\$ (42.873.702)	\$ (46.628.434)	\$ (50.458.261)
UDI		\$ 55.719.322	\$ 65.525.484	\$ 75.527.768	\$ 85.730.099	\$ 96.136.476	\$ 106.750.980	\$ 117.577.775	\$ 128.621.105	\$ 139.885.302	\$ 151.374.783
Depreciación		\$ 2.753.238	\$ 2.753.238	\$ 2.753.238	\$ 2.753.238	\$ 2.753.238	\$ 2.753.238	\$ 2.753.238	\$ 2.753.238	\$ 2.753.238	\$ 2.753.238
Valor libro		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Inversión en activos fijos		\$ (150.326.787)									
Inversión en activos intangibles											
Capital de trabajo		\$ (291.102.451)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Recuperación capital trabajo											
Valor desecho proyecto											
Flujo de caja neto		\$ (441.429.239)	\$ 58.472.560	\$ 68.278.722	\$ 78.281.006	\$ 88.483.337	\$ 98.889.714	\$ 109.504.218	\$ 120.331.013	\$ 131.374.343	\$ 142.638.540
Payback		\$ (441.429.239)	\$(382.956.679)	\$(314.677.957)	\$(236.396.951)	\$(147.913.614)	\$ (49.023.901)	\$ 60.480.317	\$ 180.811.330	\$ 312.185.673	\$ 454.824.213
Van		\$ 86.880.232									
TIR		16%									

Figura 22. Flujo de caja de opción B (Secador de bandejas).

[CLP]	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Ingresos operacionales		\$ 653.744.094	\$ 666.818.976	\$ 680.155.356	\$ 693.758.463	\$ 707.633.632	\$ 721.786.305	\$ 736.222.031	\$ 750.946.472	\$ 765.965.401	\$ 781.284.709
Ingresos no operacionales		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Egresos operacionales		\$(535.994.916)	\$(535.994.916)	\$(535.994.916)	\$(535.994.916)	\$(535.994.916)	\$(535.994.916)	\$(535.994.916)	\$(535.994.916)	\$(535.994.916)	\$(535.994.916)
Egresos no operacionales		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
EBITDA		\$ 117.749.179	\$ 130.824.061	\$ 144.160.440	\$ 157.763.547	\$ 171.638.717	\$ 185.791.389	\$ 200.227.115	\$ 214.951.556	\$ 229.970.485	\$ 245.289.793
Valor libro		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Depreciación		\$ (2.880.555)	\$ (2.880.555)	\$ (2.880.555)	\$ (2.880.555)	\$ (2.880.555)	\$ (2.880.555)	\$ (2.880.555)	\$ (2.880.555)	\$ (2.880.555)	\$ (2.880.555)
Pérdidas del ejercicio anterior		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
UAI		\$ 120.629.734	\$ 133.704.615	\$ 147.040.995	\$ 160.644.102	\$ 174.519.271	\$ 188.671.944	\$ 203.107.670	\$ 217.832.111	\$ 232.851.040	\$ 248.170.348
Impuesto		\$ (30.157.433)	\$ (33.426.154)	\$ (36.760.249)	\$ (40.161.026)	\$ (43.629.818)	\$ (47.167.986)	\$ (50.776.918)	\$ (54.458.028)	\$ (58.212.760)	\$ (62.042.587)
UDI		\$ 90.472.300	\$ 100.278.462	\$ 110.280.746	\$ 120.483.077	\$ 130.889.454	\$ 141.503.958	\$ 152.330.753	\$ 163.374.083	\$ 174.638.280	\$ 186.127.761
Depreciación		\$ 2.880.555	\$ 2.880.555	\$ 2.880.555	\$ 2.880.555	\$ 2.880.555	\$ 2.880.555	\$ 2.880.555	\$ 2.880.555	\$ 2.880.555	\$ 2.880.555
Valor libro		\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Inversión en activos fijos		\$ (151.394.629)									
Inversión en activos intangibles											
Capital de trabajo		\$ (267.997.458)	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Recuperación capital trabajo											
Valor desecho proyecto											
Flujo de caja neto		\$ (419.392.087)	\$ 93.352.855	\$ 103.159.016	\$ 113.161.301	\$ 123.363.631	\$ 133.770.008	\$ 144.384.513	\$ 155.211.307	\$ 166.254.638	\$ 177.518.835
Payback		\$ (419.392.087)	\$(326.039.232)	\$(222.880.215)	\$(109.718.914)	\$ 13.644.717	\$ 147.414.726	\$ 291.799.238	\$ 447.010.546	\$ 613.265.184	\$ 790.784.019
Van		\$ 282.521.836									
TIR		26%									

Figura 23. Flujo de caja de opción C (Secador flash).

7.2.3. Evaluación de indicadores de Rentabilidad

Como se observa, las tres opciones presentan VAN positivos y TIR superiores a la tasa de descuento definida, lo que confirma la factibilidad económica del proyecto.

- Secador rotatorio: obtiene un VAN de \$115,2 millones CLP y una TIR de 18%, logrando payback en el año 2031. Aunque su rentabilidad base es menor a la del secador flash, mantiene un desempeño sólido y competitivo.
- Secador de bandejas: presenta un VAN de \$86,8 millones CLP y una TIR de 16%. El período de recuperación de la inversión (payback) se alcanza hacia el año 2031, mostrando un desempeño económico positivo, aunque con márgenes más acotados frente a las demás alternativas.
- Secador flash: alcanza los mejores resultados en la condición base, con un VAN de \$282,5 millones CLP y una TIR de 26%. La recuperación de la inversión ocurre alrededor del año 2030–2031, siendo esta la opción de retorno más rápido bajo los supuestos evaluados.

En las Figuras 20, 21 y 22 se presentan las curvas de evolución del payback para cada alternativa, donde se aprecia que todas alcanzan la recuperación de la inversión dentro del horizonte de evaluación. El secador flash muestra la recuperación más temprana en la condición base, mientras que las otras opciones convergen a partir del mismo año, con diferencias principalmente de VAN.

Si bien los indicadores financieros entregan una primera aproximación al desempeño económico de cada caso, la selección final del secador más adecuado no debe basarse únicamente en estos valores, sino también en factores técnicos, operacionales, de mantenimiento y estratégicos, que en conjunto determinarán la alternativa más conveniente para el proyecto.

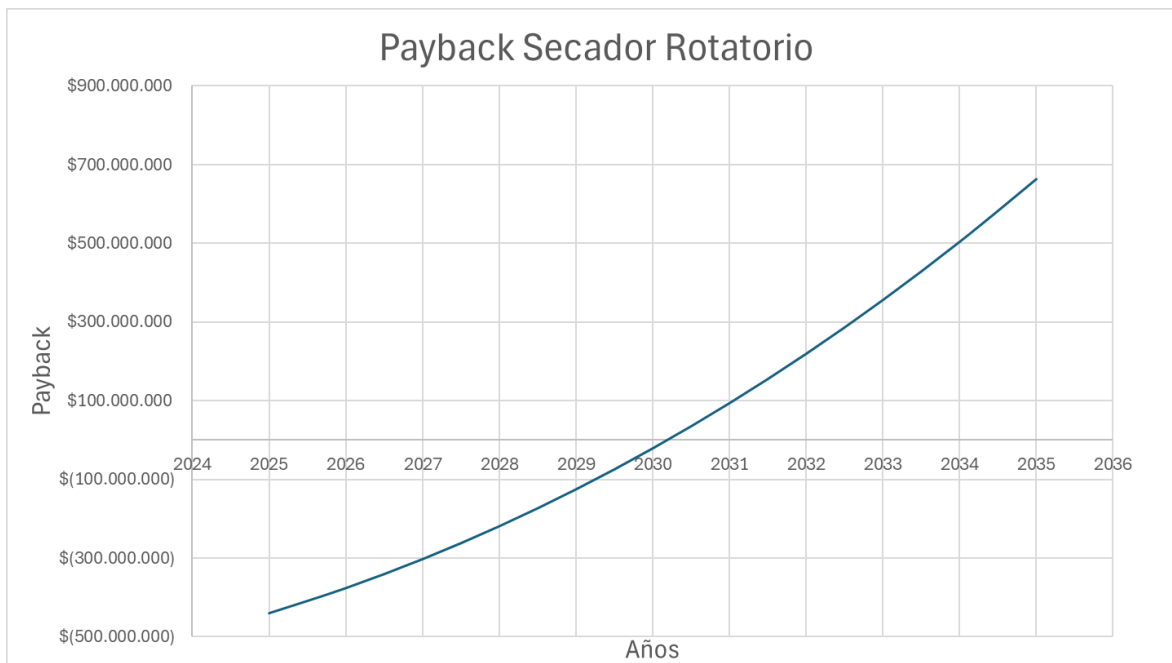


Figura 24. Curva de payback para caso A.

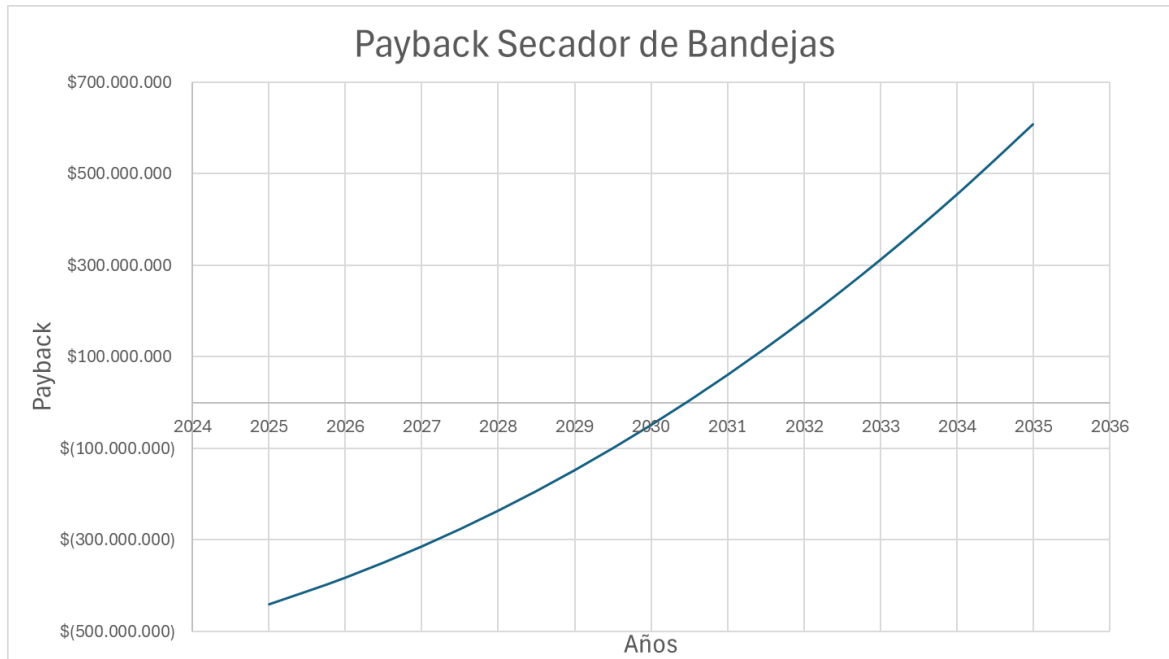


Figura 25. Curva de payback para caso B.

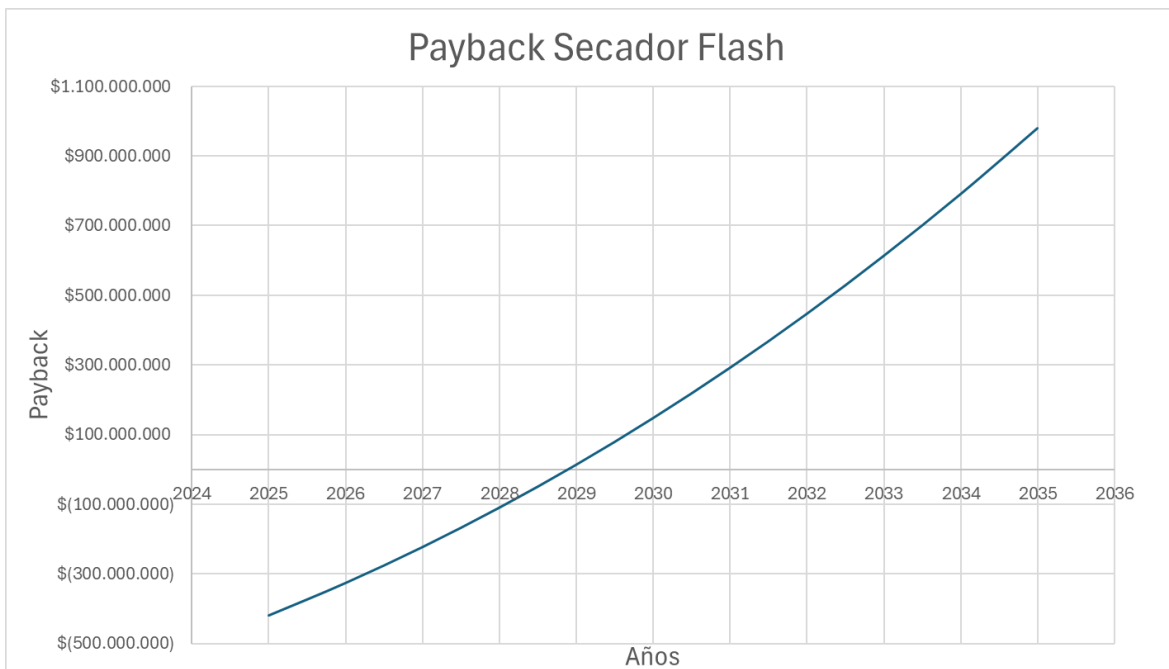


Figura 26. Curva de payback para caso C.

7.2.4. Análisis de sensibilidad

Con el objetivo de evaluar la robustez de los resultados económicos, se efectuó un análisis de sensibilidad considerando variaciones en las variables más críticas del modelo: el precio de adquisición del bagazo húmedo y el precio de venta de la harina de bagazo. Para ello se analizaron escenarios en torno a los valores base (200 [CLP/kg] y 2,7 [USD/kg],

respectivamente), modificándolos en rangos acotados tanto al alza como a la baja. Las Tablas 37, 38 y 39 muestran los resultados obtenidos para cada alternativa tecnológica.

Tabla 37. Análisis de sensibilidad de caso A (secador rotatorio).

Variable	Escenario	VAN [CLP]	TIR [%]	Payback [año]
Precio Bagazo	240	-\$87.869.016	8%	2033
	220	\$13.652.426	13%	2032
	Base (200 [CLP/kg])	\$115.173.867	18%	2031
	180 [CLP/kg]	\$216.695.309	23%	2030
	160 [CLP/kg]	\$318.216.750	28%	2029
Precio Harina	2,5	-\$81.830.236	8%	2033
	2,6	\$16.671.816	13%	2032
	Base (2,7 [USD/kg])	\$115.173.867	18%	2031
	2,8 [USD/kg]	\$213.675.919	22%	2030
	2,9 [USD/kg]	\$312.177.971	27%	2029

Tabla 38. Análisis de sensibilidad de caso B (secador de bandejas).

Variable	Escenario	VAN [CLP]	TIR [%]	Payback [año]
Precio Bagazo	240	-\$116.162.652	6%	2033
	220	-\$14.641.210	11%	2032
	Base (200 [CLP/kg])	\$86.880.232	16%	2031
	180 [CLP/kg]	\$188.401.673	21%	2030
	160 [CLP/kg]	\$289.923.115	26%	2029
Precio Harina	2,5	-\$110.123.872	6%	2033
	2,6	-\$11.621.820	11%	2032
	Base (2,7 [USD/kg])	\$86.880.232	16%	2031
	2,8 [USD/kg]	\$185.382.283	21%	2030
	2,9 [USD/kg]	\$283.884.335	25%	2029

Tabla 39. Análisis de sensibilidad de caso C (secador flash).

Variable	Escenario	VAN [CLP]	TIR [%]	Payback [año]
Precio Bagazo	240	\$79.478.953	16%	2031
	220	\$181.000.395	21%	2030
	Base (200 [CLP/kg])	\$282.521.836	26%	2029
	180 [CLP/kg]	\$384.043.278	31%	2029
	160 [CLP/kg]	\$485.564.719	37%	2028
Precio Harina	2,5	\$85.517.733	16%	2031
	2,6	\$184.019.784	21%	2030
	Base (2,7 [USD/kg])	\$282.521.836	26%	2029
	2,8 [USD/kg]	\$381.023.888	31%	2029
	2,9 [USD/kg]	\$479.525.940	35%	2028

Se observa que, ante pequeñas modificaciones en el costo de la materia prima o en el precio de venta del producto, los indicadores económicos (VAN, TIR y Payback) experimentan variaciones significativas. En algunos escenarios se alcanzan valores negativos de VAN y TIR por debajo de la tasa de descuento, mientras que en otros se observan incrementos notables en la rentabilidad. Por lo tanto, el proyecto presenta una alta sensibilidad a cambios en estas dos variables de mercado, por lo que cualquier variación en las condiciones de abastecimiento de bagazo o en la valorización de la harina incide de manera directa y relevante en la rentabilidad de la inversión.

Si bien los tres casos de secadores siguen mostrando factibilidad en el escenario base, este ejercicio evidencia que la estabilidad de los resultados depende fuertemente de asegurar precios competitivos de materia prima y de consolidar un valor de venta del producto dentro del rango proyectado.

7.2.5. Análisis de resultados

El análisis económico, permitió comparar los distintos escenarios de abastecimiento y las alternativas tecnológicas de secado. En todos los casos evaluados, los indicadores (VAN, TIR y período de recuperación) mostraron resultados positivos, lo que confirma la viabilidad preliminar del proyecto. Se observó que la rentabilidad está fuertemente influenciada por el precio de venta de la harina funcional y, en menor medida, por el costo de adquisición del bagazo.

El análisis de sensibilidad evidenció que pequeñas variaciones en el valor de la materia prima o del producto final generan impactos significativos en la rentabilidad, reflejando la alta sensibilidad del proyecto a estos parámetros. Sin embargo, los resultados obtenidos permiten concluir que, bajo condiciones de mercado realistas, el proyecto mantiene márgenes aceptables de factibilidad económica.

Finalmente, es importante señalar que los consumos energéticos específicos más elevados de las alternativas comerciales, en comparación con el diseño conceptual, se traducen en mayores costos operativos. Sin embargo, estas diferencias resultan manejables dentro de los escenarios financieros analizados.

7.3. Recomendaciones de inversión

El análisis comparativo de alternativas de secado mostró diferencias en términos de eficiencia energética y características operacionales. El secador de bandejas presentó un consumo específico favorable gracias a su operación por lotes de gran volumen, lo que diluye parte de las pérdidas térmicas. Sin embargo, esta ventaja energética se ve contrarrestada por su naturaleza discontinua, mayor requerimiento de mano de obra y dificultades para integrarse

a una línea productiva continua, aspectos poco compatibles con un modelo industrial escalable.

El secador flash, por su parte, si bien ofrece tiempos de secado muy reducidos, presenta el mayor consumo energético reportado en las cotizaciones y una alta exigencia en cuanto a pretratamiento y acondicionamiento del material. La naturaleza fibrosa y heterogénea del bagazo cervecero limita su desempeño en este tipo de tecnología, dado que requiere partículas desaglomeradas y uniformes para evitar problemas de transporte neumático y calidad del producto. Por esta razón esta opción se vuelve menos competitiva para el caso de estudio.

El secador rotatorio por otro lado constituye la alternativa más robusta y balanceada para este proyecto. Se trata de una tecnología ampliamente utilizada en la industria, con operación continua, gran tolerancia a variaciones en la humedad de alimentación y bajos requerimientos de supervisión. Los resultados de tu diseño conceptual validan su factibilidad geométrica y operativa, y además muestran que, bajo estrategias de recirculación de aire, es posible acercar su consumo energético al rango teórico. A esto se suma que la configuración rotatoria se integra con el pretratamiento mecánico, la molienda y el tamizado, conformando una línea de proceso estable, escalable y alineada con la lógica de producción continua.

Por estas razones, se recomienda priorizar la inversión en un secador rotatorio, incorporando medidas de eficiencia como recirculación de gases y aislamiento térmico, con el objetivo de reducir el consumo real respecto de las cifras de cotización. El secador de bandejas puede considerarse como alternativa modular de menor escala en escenarios de validación inicial o entrada gradual al mercado, mientras que el secador flash queda menos competitiva frente a las otras opciones, debido a sus limitaciones técnicas y energéticas para procesar bagazo cervecero.

8. Conclusiones

El desarrollo de este estudio permitió analizar la valorización del bagazo cervecero mediante su transformación en harina funcional, considerando aspectos técnicos, económicos y de mercado.

En primer lugar, los antecedentes de mercado confirmaron el potencial del bagazo como ingrediente funcional, gracias a su composición con elevado contenido de fibra, vitamina y proteína. Estas propiedades, junto con la creciente demanda de alimentos saludables y sostenibles, refuerzan la idea de explorar su incorporación en la industria alimentaria chilena y permiten visualizar sus aplicaciones, que se alinean con las tendencias globales actuales.

La caracterización del proceso productivo permitió estructurar una base compuesta por operaciones de pretratamiento mecánico, secado, molienda, tamizado y envasado. Dentro de ellas, la etapa de secado se identificó como la etapa crítica, tanto por su incidencia energética como por su relevancia en la calidad final del producto. Por ello, se desarrolló un diseño conceptual de secador rotatorio, aplicando modelos de transferencia de masa y energía (Fick y Page) para estimar tiempos de secado y condiciones operativas. El modelo incluyó balances máxicos y energéticos con y sin recirculación de aire, lo que permitió analizar la influencia de esta estrategia en la reducción del consumo térmico.

El análisis de recirculación térmica en seis escenarios de temperatura (105–50 [°C]) mostró reducciones de hasta 29 % en la demanda de energía, con mayor holgura de operación en altas temperaturas y mayores restricciones en condiciones intermedias y bajas debido al riesgo de alcanzar la saturación. Estos resultados validan la factibilidad de incorporar recirculación como estrategia de ahorro energético, privilegiando configuraciones con purgas intermedias.

La comparación con alternativas comerciales cotizadas mostró que el secador de bandejas presentó los consumos energéticos más bajos (1,05–1,25 [kWh/kg H₂O]), aunque su carácter batch y mayor requerimiento de manipulación limitan su aplicabilidad a nivel industrial. El secador flash, en tanto, reportó los consumos más altos (3,87 [kWh/kg H₂O]) y presentó limitaciones técnicas importantes debido a la naturaleza fibrosa y heterogénea del bagazo, que dificulta su transporte neumático y la obtención de un producto homogéneo. El secador rotatorio, si bien mostró consumos superiores a los del diseño conceptual, se concluyó como la alternativa más robusta y escalable, por su operación continua, su tolerancia a variaciones de humedad en la alimentación y su facilidad de integración con las etapas de molienda y tamizado.

Desde el punto de vista económico, la evaluación de escenarios de abastecimiento (100–200 [ton/mes] de bagazo húmedo) y producción de harina (324–648 [ton/año]) arrojó resultados positivos en términos de VAN, TIR y payback, lo que respalda la factibilidad del proyecto. El análisis de sensibilidad evidenció que la rentabilidad depende fuertemente del precio de

venta de la harina y del costo de adquisición del bagazo, lo que subraya la importancia de asegurar contratos de suministro estables y estrategias comerciales sólidas para sostener el negocio.

A nivel estratégico, este proyecto demuestra que la valorización del bagazo cervecero no solo contribuye a disminuir la presión ambiental asociada a la disposición de este residuo, sino que también abre la posibilidad de generar un nuevo ingrediente con valor agregado y potencial de diferenciación en el mercado. La propuesta se alinea con principios de economía circular, innovación sostenible y diversificación de la industria alimentaria.

Los resultados obtenidos permiten concluir que la transformación de bagazo cervecero en harina funcional es técnicamente viable, económicamente factible y ambientalmente beneficiosa.

9. Recomendaciones

A partir de los resultados de este estudio, se recomienda avanzar hacia la validación experimental del proceso a través de pruebas piloto en un secador rotatorio a escala semiindustrial. Estas pruebas permitirán contrastar los consumos energéticos estimados con valores reales de operación y evaluar la efectividad de la recirculación de aire en condiciones prácticas, determinando su impacto tanto en la eficiencia térmica como en la calidad final de la harina.

Asimismo, evaluar de manera detallada la calidad del producto obtenido, considerando aspectos físico-químicos, nutricionales, funcionales y sensoriales que permitan determinar sus aplicaciones más adecuadas en la industria alimentaria. A esto debe sumarse el análisis de condiciones de almacenamiento y envasado que aseguren la estabilidad microbiológica y la mantención de sus propiedades.

Desde la perspectiva de mercado, se recomienda realizar estudios de aceptación de la harina de bagazo en empresas de panificación, pastas y alimentos saludables, validando la disposición a pagar y los niveles de incorporación en distintas formulaciones. Al mismo tiempo, la generación de alianzas estratégicas con cervecerías locales lo cual asegura un suministro continuo de materia prima, mientras que la vinculación con empresas alimentarias facilitará la introducción del producto al mercado.

10. Referencias

- Arias Lafargue, T., & López Ríos, L. (2015). *Propuesta tecnológica para el aprovechamiento energético del bagazo de cebada malteada de la cervecería Hatuey*.
- ACECHI. (28 de Junio de 2024). *Consumo de cerveza en Chile 2023*. Obtenido de Chile país cervecero: <https://acechi.cl/index.php/2024/06/28/consumo-de-cerveza-en-chile-2023>
- Alduchov, O. A., & Eskridge, R. E. (1996). Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology*, 691-609.
- Aliyu, S., & Bala, M. (2010). Brewer's spent grain: A review of its potentials and applications. *African Journal of Biotechnology*, 324-331.
- ARADOS. (2025). *Harina de Arroz*. Obtenido de ARADOS: <https://arados.cl/producto/harina-1kg-arroz/>
- Arranz, J. I., & Miranda, M. T. (2018). *Analysis of Drying of Brewers' Spent Grain*.
- ASHRAE. (2017). *ASHRAE Handbook – Fundamentals*.
- Banco Central de Chile. (Junio de 2025). *Comunicado Reunión de Política Monetaria*. Obtenido de <https://www.bcentral.cl/contenido/-/details/comunicado-rpm-junio-2025>
- Banco Central de Chile. (27 de agosto de 2025). *Dólar observado*. Obtenido de Banco Central de Chile: https://si3.bcentral.cl/Siete/ES/Siete/Cuadro/CAP_TIPO_CAMBIO/MN_TIPO_CAMBIO4/DOLAR_OBS_ADO
- Bartolomé, B., & Gómez-Cordovés, C. (1999). Barley spent grain: release of hydroxycinnamic acids (ferulic and p-coumaric acids) by commercial enzyme preparations. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79, 435–439.
- Buck, A. L. (1981). New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *Journal of Applied Meteorology*, 1527-1532.
- Chamorro Gonzáles, D. (2012). *ELABORACIÓN DE UN PLAN DE NEGOCIOS PARA LA PRODUCCIÓN DE CERVEZA ARTESANAL*. Puerto Montt.
- Chetrariu, A., & Dabija, A. (2020). *Brewer's Spent Grains: Possibilities of Valorization, a Review*. Suceava: applied sciences.
- Colpo, I., & Rasquin Rabenschlag, D. (2022). Economic and financial feasibility of a biorefinery for conversion of brewers' spent grain into a special flour. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-14.

- Cosecha Justa. (2025). *Harina de Quinoa*. Obtenido de <https://www.cosechajusta.cl/harina-de-quinoa-1>
- Davis, J. R. (1994). *ASM Specialty Handbook: Stainless Steels*. ASM International.
- Díaz Nufio, E. (2021). *Desarrollo y caracterización de harina de bagazo de cerveza*.
- Dulce Frut. (2025). *Harina de avena*. Obtenido de Dulce Frut: <https://dulcefrut.cl/producto/harina-de-avena/>
- Espinoza Escobar, F. F. (2011). Caracterización de subproductos cerveceros para alimentación animal. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia*, 23-31.
- Euromonitor International . (2022). *Análisis del mercado cervecero chileno*. Euromonitor International.
- FAO. (1995). *Brewing industry by-products and their utilization*. FAO Animal Production and Health Paper.
- FAO. (2018). *The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050*. Roma: FAO.
- FEECO International, Inc. (2016). *The FEECO Rotary Dryer Handbook*. FEECO International, Inc.
- Fellows, P. J. (2009). *Food processing technology. Principles and practice*. WoodHead Publishing Limited.
- Fernando, J. (12 de Noviembre de 2024). *Compound Annual Growth Rate (CAGR) Formula and Calculation*. Obtenido de Investopedia: <https://www.investopedia.com/terms/c/cagr.asp>
- Ferrari, J. L. (2017). *Reutilización de bagazo de cebada cervecera por secado y pelletización como suplemento forrajero*. Bariloche: INTA EEA.
- Golman, B., & Julklang, W. (2014). *Analysis of heat recovery from a spray dryer by recirculation*. ELSEVIER.
- Gomez Delgado, E., Medina Jaramillo, C., & Lopez Cordoba, A. (2023). *Analysis of drying kinetic of brewer's spent grains: effect of the temperature on the physical properties and the content of bioactive compounds*. Vitae.
- González Farfán, C. (14 de Febrero de 2025). Bagán!: el primer paté vegetal en Chile hecho con bagazo de cerveza. *PAÍS CIRCULAR*. Obtenido de <https://www.paiscircular.cl/economia-circular/bagazo/>

- Gupta, M., & Abu-Ghannam, N. (2010). Barley for Brewing: Characteristic Changes during Malting, Brewing and Applications of its By-Products. *Journal of Food Science and Technology*, 240-257.
- Hernández, A., & Rodríguez, J. (1999). Caracterización química y funcional del afrecho de malta. *Alimentaria*, 105-107.
- Huaman Llontop, M. (2024). *Estudio de prefactibilidad de una planta de producción de harina a partir de bagazo de la industria cervecera*. Chiclayo.
- IMARC Group. (31 de Diciembre de 2024). *IMARC*. Obtenido de Global Functional Food Market to Reach USD 386.2 Billion by 2033, Propelled by the Increasing Number of Health-Conscious Individuals: <https://www.imarcgroup.com/global-functional-food-market>
- ITC. (2025). *Lista de los mercados importadores para un producto exportado por Chile en 2024. Producto: 1102 Harina de otros cereales (exc. trigo y morcajo "tranquillón")*. Obtenido de TRADE MAP: https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry.aspx?nvpm=3%7c152%7c%7c%7c%7c1102%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c1
- ITC. (2025). *Lista de los mercados proveedores para un producto importado por Chile en 2024. Producto: 1102 Harina de otros cereales (exc. trigo y morcajo "tranquillón")*. Obtenido de TRADE MAP: https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry.aspx?nvpm=3%7c152%7c%7c%7c%7c1102%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c1%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c1
- ITC. (2025). *Lista de los mercados proveedores para un producto importado por Chile. Producto: 1101 Harina de trigo y de morcajo "tranquillón"*. Obtenido de TRADE MAP: https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry_TS.aspx?nvpm=3%7c152%7c%7c%7c%7c1101%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c1%7c2%7c1%7c2%7c3%7c1%7c1
- Kabouris, J., Shanley, R., Peters, E., & Gillette, B. (2008). Screw Press: An alternative to conventional dewatering technologies. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 542-543.
- Kanauchi, O., Mitsuyama, K., & Araki, Y. (2001). *Development of a Functional Germinated Barley Foodstuff from Brewer's Spent Grain for the Treatment of Ulcertive Colitis*. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*.
- Karlović, A., Jurić, A., Ćorić, N., Habschied, K., Krstanović, V., & Mastanjević, K. (2020). By-Products in the Malting and Brewing Industries—Re-Usage Possibilities. (MDPI, Ed.) *Fermentation*, 6(3), 1-17.

- Kirin Holdings. (Diciembre de 2024). *Global Beer Consumption by Country in 2023*.
Obtenido de Kirin : https://www.kirinholdings-com.translate.goog/en/newsroom/release/2024/1219_01.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- Mallen, E., & Najdanovic-Visak, V. (2018). Brewers' spent grains: Drying kinetics and biodiesel production. *Bioresource Technology Reports*.
- Martinez, J. (2020). *Producción de Harina de Bagazo a partir de un residuo de la industria cervecera*.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. México: McGraw-Hill.
- MercadoSilvestre. (2025). *Harina de Almendras Sin Piel*. Obtenido de <https://mercadosilvestre.cl/products/harina-de-almendras-sin-piel-1kg>
- Ministerio de Salud. (1996). *Decreto 977. Aprueba Reglamento Sanitario De Los Alimentos*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=71271>
- Ministerio de Salud. (2003). *Decreto Supremo N°. 148/2003. Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=226458>
- Ministerio de Salud. (2019). *Decreto 594. Aprueba Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Basicas en los Lugares de Trabajo*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=167766>
- Ministerio del Medio Ambiente . (2016). *Ley N.º 20.920*. Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1089342>
- Ministerio del Trabajo y Previsión Social. (2022). *Ley 16744. Establece Normas Sobre Accidentes del Trabajo y Enfermedades Profesionales* . Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile : <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=28650>
- Ministerio Secretaría General De La Presidencia . (2004). *Ley 19300. Ley Sobre Bases Generales Del Medio Ambiente* . Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>
- MIVALT s.r.o. (2008). *MP-DW Dewatering Screw Press Catalogue*. MIVALT.
- Mussatto, S. I. (2014). Brewer's spent grain: a valuable feedstock for industrial applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(7), 1264-1275.

- Mussatto, S., & Dragone, G. (2006). *Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications*. Lorena: ELSEVIER.
- Naciones Unidas. (s.f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de Naciones Unidas: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- ODEPA. (2021). *Boletín de Cereales*.
- ODEPA. (2024). *Boletín de Cereales*.
- Pérez-Alva, A., & Martín-del-Campo, S. (2025). Brewer's spent grain (BSG) as an ingredient for leavened bread making: challenges and opportunities. *Journal of Cereal Science*, 104223.
- Perry, R. H., & Green, D. (2008). *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2011). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. New York: McGraw-Hill Education.
- R-Food. (2025). *R-Food*. Obtenido de Harina de bagazo de cerveza: <https://r-food.cl>
- Richardson, J. F., & Coulson, J. M. (2002). *Chemical Engineering, Volume 2: Particle Technology and Separation Processes*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Russ, W., Mörtel, H., & Meyer-Pittroff, R. (2005). Application of spent grains to increase porosity in bricks. *Construction and Building Materials*, 19, 117–126.
- Saberian, H., Pouya, A., Nejatian, M., Bazsefidpar, N., Mohammadian, A., Rahmati, M., . . . Jafari, S. (2024). Brewers' spent grain as a functional ingredient in bakery, pasta, and cereal-based products. *Future Foods*, 10, 100479.
- Santos, M., Jiménez, J., Bartolomé, B., Gómez-Cordovés, C., & del Nozal, M. (2003). *Variability of brewer's spent grain within a brewery*. Madrid: ELSEVIER.
- SII. (2025). *NUEVA TABLA DE VIDA ÚTIL DE LOS BIENES FÍSICOS DEL ACTIVO INMOVILIZADO*. Obtenido de https://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm
- SII. (2025). *Tasas de Impuesto de Primera Categoría*. Obtenido de Servicios de Impuestos Internos: https://www.sii.cl/preguntas_frecuentes/renta/001_002_4708.htm
- Song, B., Pei, Z. J., Wang, D., & Tao, J. (2015). Effects of screen size on biochemical conversion of big bluestem biomass for biofuel production. *Bioresource Technology*, 185, 206-213.
- TRIDGE. (2024). *TRIDGE*. Obtenido de Price for Oat Flour in Chile: <https://dir.tridge.com/prices/oat-flour/CL>

TRIDGE. (2024). *TRIDGE*. Obtenido de Global Quinoa Flour price:
<https://dir.tridge.com/prices/quinoa-flour>

TRIDGE. (2024). *TRIDGE*. Obtenido de Global Rice Flour price:
<https://dir.tridge.com/prices/rice-flour>

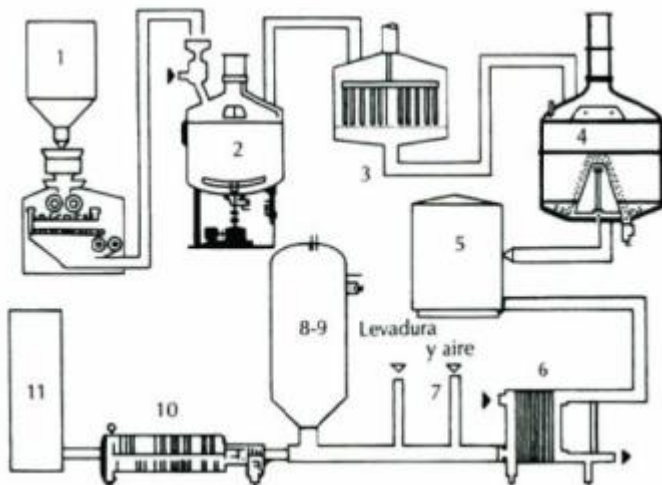
UFRO. (2023). *UFRO apuesta por transformar el residuo cervecero en ingredientes para la producción de alimentos proteicos y ricos en fibra*. Obtenido de VRIP UFRO:
<https://vrip.ufro.cl/vrip/ufro-apuesta-por-transformar-el-residuo-cervezero-en-ingredientes-para-la-produccion-de-alimentos-proteicos-y-ricos-en-fibra>

Vitaminas Chile. (2025). *Harina de Lentejas - Huerto Emporio*. Obtenido de
<https://www.vitaminaschile.cl/tienda/harina-de-mixtura-positiv/>

Weineisen, H., & Stenstrom, S. (2008). *Modeling Drying and Energy Performance of Industrial Through-Dryers*. Taylor & Francis.

11. Anexos

11.1. Anexo A. Diagrama de la producción de cerveza



PROCESO	EQUIPO
1 Molienda	Molino
2 Maceración	Ollas de maceración
3 Filtración del mosto	Filtro
4 Ebullición del mosto	Olla de ebullición
5 Separación de los precipitados	Whirlpool
6 Enfriamiento	Enfriador de placas
7 Inoculación de levadura	Tuberías
8 Fermentación	Tanques de fermentación
9 Maduración	Tanques de maduración
10 Filtración	Filtro de cerveza
11 Envasado	Línea de envasado

11.2. Anexo B. Supuestos de humedad y Balance de masa

Prensado		Secado		Molienda		Tamizado	
Humedad In.	Humedad Fin.	Humedad In.	Humedad Fin.	Perdidas típicas	Supuesto	Eficiencia Típica	Supuesto
80%	65%	65%	10%	2-5%	3%	95-98%	97%

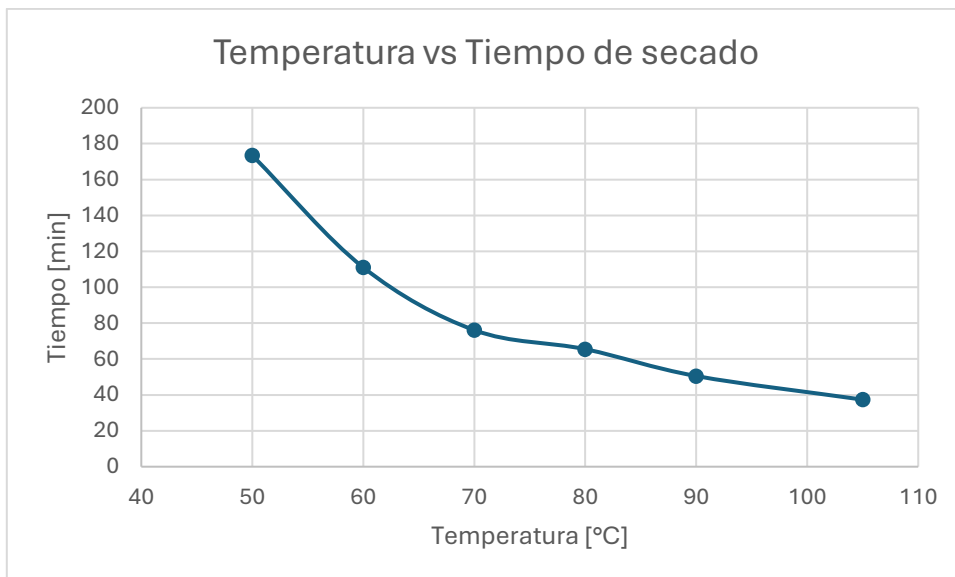
Corrientes										
Número	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nombre	Materia prima	Bagazo húmedo	Efluente 1	Bagazo sin agua libre	Efluente 2	Bagazo seco	Efluente 3	Bagazo molido	Fracción de rechazo	Harina de bagazo
Flujo [kg/h]	260,42	260,42	111,61	148,81	90,94	57,87	1,74	56,13	1,68	54,45
Flujo [ton/mes]	100	100	42,86	57,14	34,92	22,22	0,67	21,56	0,65	20,91

11.3. Anexo C. Coeficientes de difusividad efectiva

Table 1. Effective diffusivity at different temperatures and constant pressure (101.325 kPa)

Temperature (°C)	50	60	70	80	90	105
Effective diffusivity (m ² /s)	5.23x10 ⁻¹⁰	8.22x10 ⁻¹⁰	1.29x10 ⁻⁰⁹	1.39x10 ⁻⁰⁹	1.91x10 ⁻⁰⁹	2.49x10 ⁻⁰⁹

11.4. Anexo D. Gráfico de temperatura vs tiempo de secado



11.5. Anexo E. Velocidades evaluadas para estimación de volumen

Caso 1 [m/s]

T [°C]	Caudal [m ³ /s]	Área [m ²]	Diámetro [m]	Largo [m]	Volumen tambor [m ³]	Volumen requerido [m ³]
50	2,60	2,60	1,82	10,92	28,40	8,81
60	2,13	2,13	1,65	9,88	21,04	5,64
70	1,82	1,82	1,52	9,14	16,66	3,86
80	1,62	1,62	1,44	8,63	14,00	3,32
90	1,67	1,67	1,46	8,74	14,59	2,56
105	1,35	1,35	1,31	7,87	10,64	1,90

Caso 2 [m/s]

T [°C]	Caudal [m ³ /s]	Área [m ²]	Diámetro [m]	Largo [m]	Volumen tambor [m ³]	Volumen requerido [m ³]
50	2,60	1,30	1,29	7,72	10,04	8,81
60	2,13	1,06	1,16	6,99	7,44	5,64
70	1,82	0,91	1,08	6,46	5,89	3,86

80	1,62	0,81	1,02	6,10	4,95	3,32
90	1,67	0,83	1,03	6,18	5,16	2,56
105	1,35	0,68	0,93	5,57	3,76	1,90

Caso 2,5 [m/s]

T [°C]	Caudal [m³/s]	Área [m²]	Diámetro [m]	Largo [m]	Volumen tambor [m³]	Volumen requerido [m³]
50	2,60	1,04	1,15	6,91	7,18	8,81
60	2,13	0,85	1,04	6,25	5,32	5,64
70	1,82	0,73	0,96	5,78	4,21	3,86
80	1,62	0,65	0,91	5,46	3,54	3,32
90	1,67	0,67	0,92	5,53	3,69	2,56
105	1,35	0,54	0,83	4,98	2,69	1,90

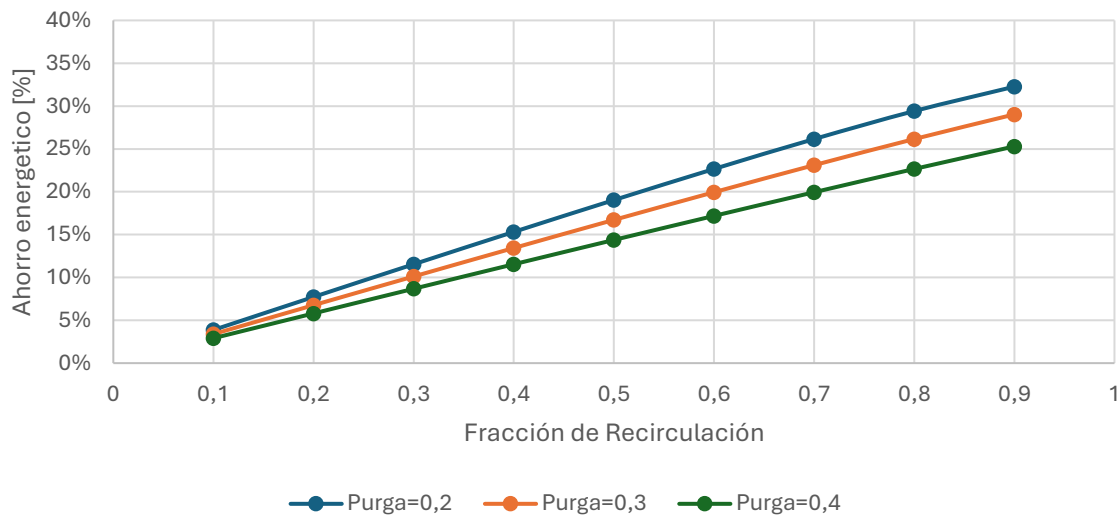
11.6. Anexo F. Tabla resumen con los valores representativos de ahorro y humedad relativa para cada caso

T_{in} [°C]	Purga	Ahorro máximo [%]	HR máximo [%]
105	0,2	29%	53%
105	0,3	26%	42%
105	0,4	23%	34%
90	0,2	32%	54%
90	0,3	29%	42%
90	0,4	25%	35%
80	0,2	26%	89%
80	0,3	29%	42%
80	0,4	25%	35%
70	0,2	25%	100%
70	0,3	20%	78%
70	0,4	20%	64%
60	0,2	24%	112%
60	0,3	21%	87%
60	0,4	19%	71%
50	0,2	21%	121%
50	0,3	19%	94%
50	0,4	17%	77%

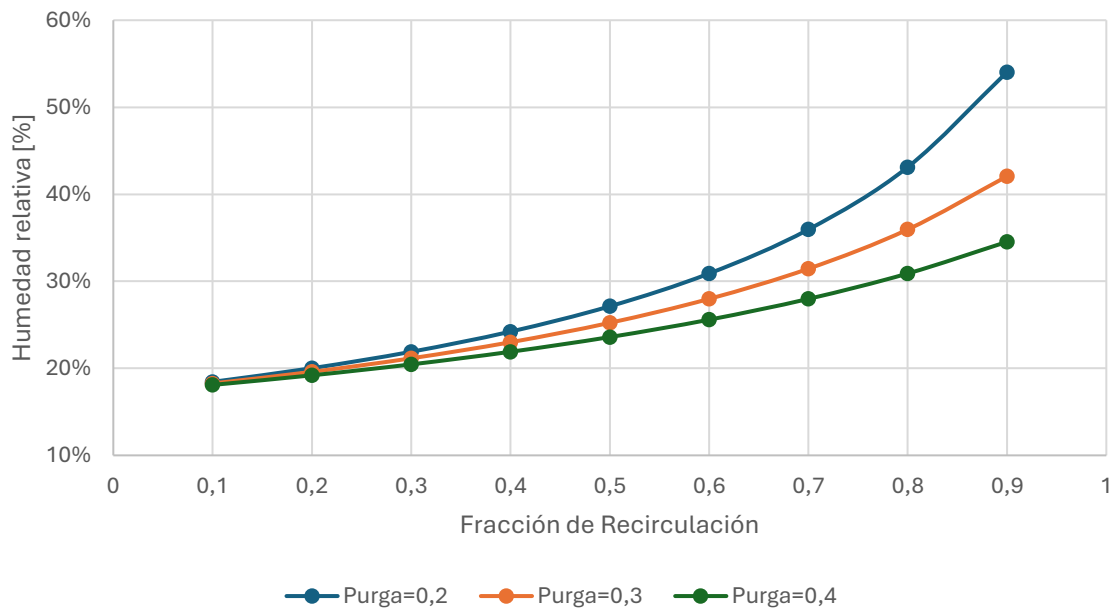
11.7. Anexo G. Gráficos de Ahorro energético y de Humedad relativa vs Fracción recirculada de aire

Caso 90 [°C]

Ahorro energético vs Fracción de recirculación / Caso 90
[°C]

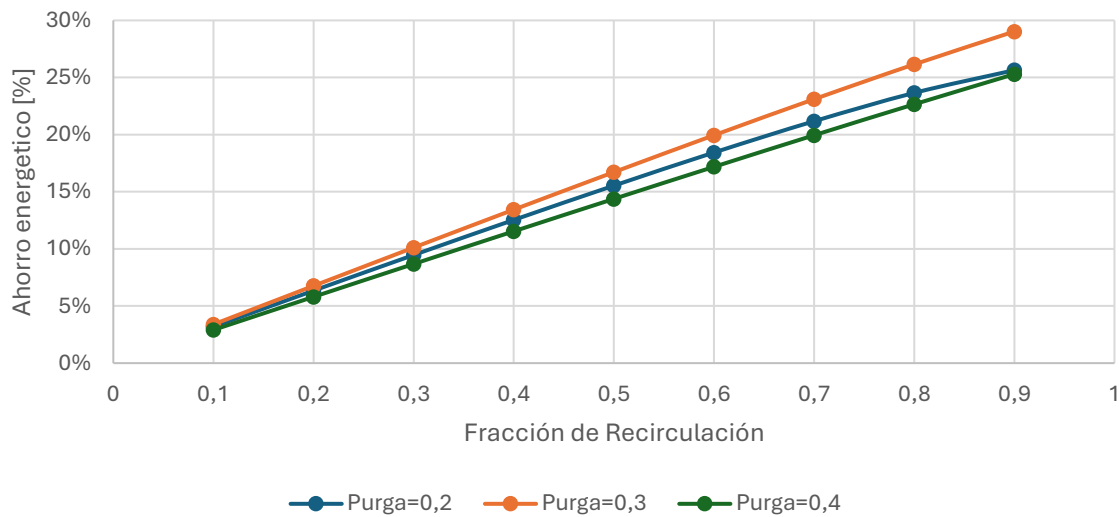


Humedad relativa vs Fracción de recirculación / Caso 90
[°C]

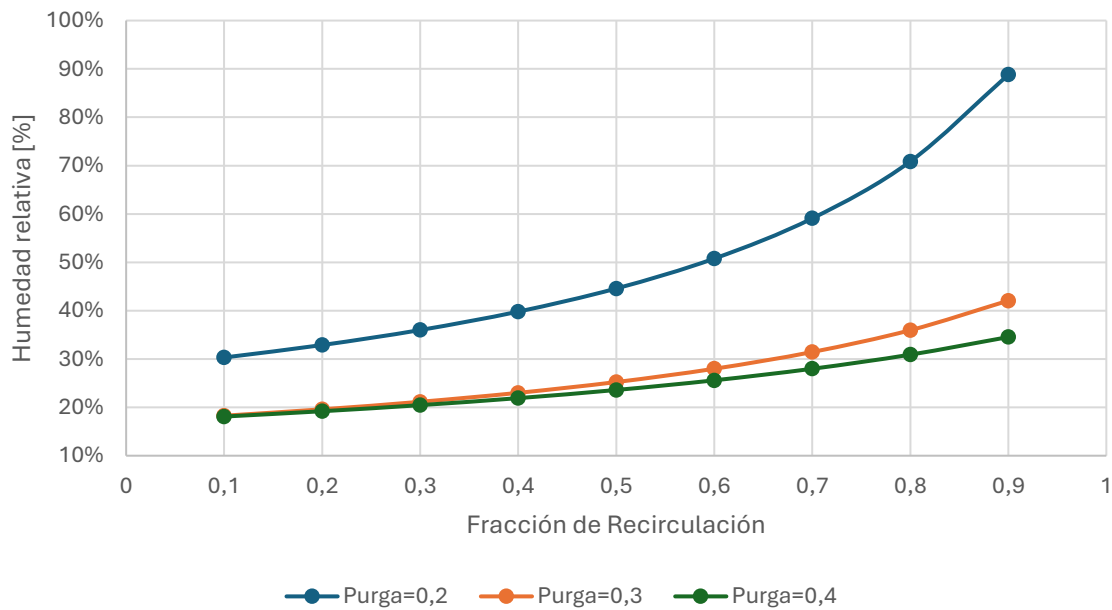


Caso 80 [°C]

Ahorro energético vs Fracción de recirculación / Caso 80
[°C]

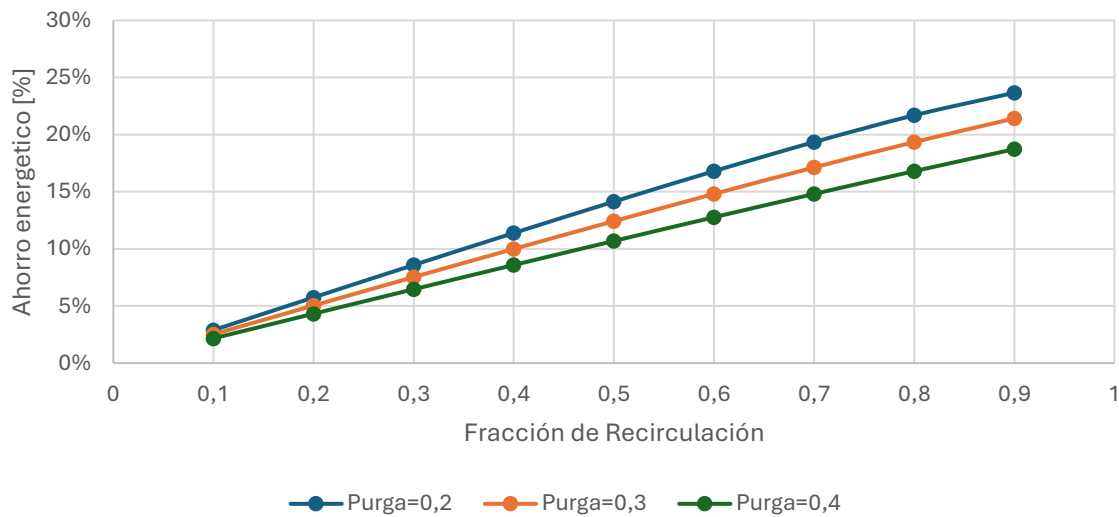


Humedad relativa vs Fracción de recirculación / Caso 80
[°C]

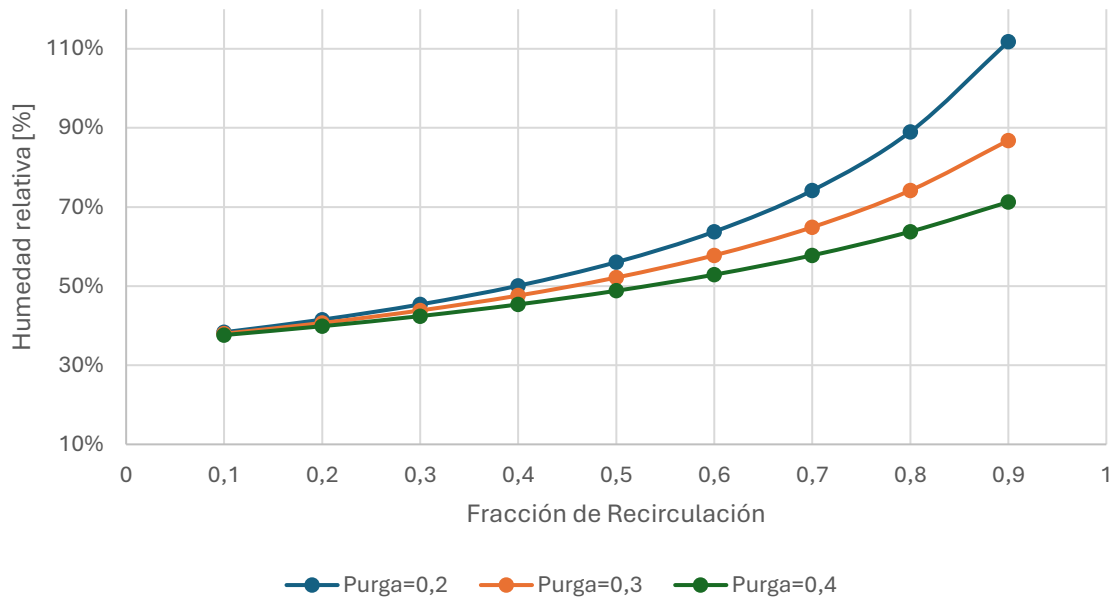


Caso 60 [°C]

Ahorro energético vs Fracción de recirculación / Caso 60
[°C]

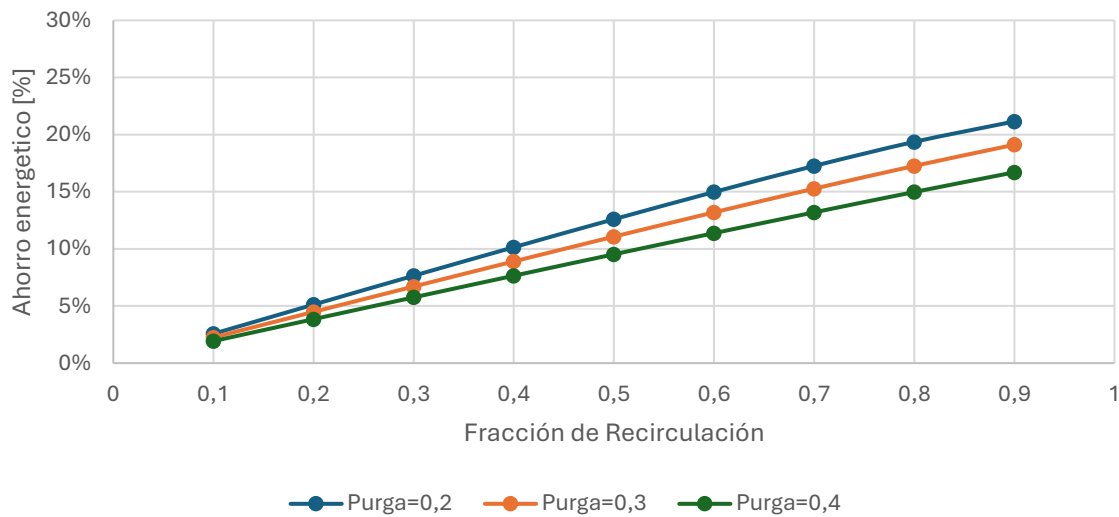


Humedad relativa vs Fracción de recirculación / Caso 60
[°C]

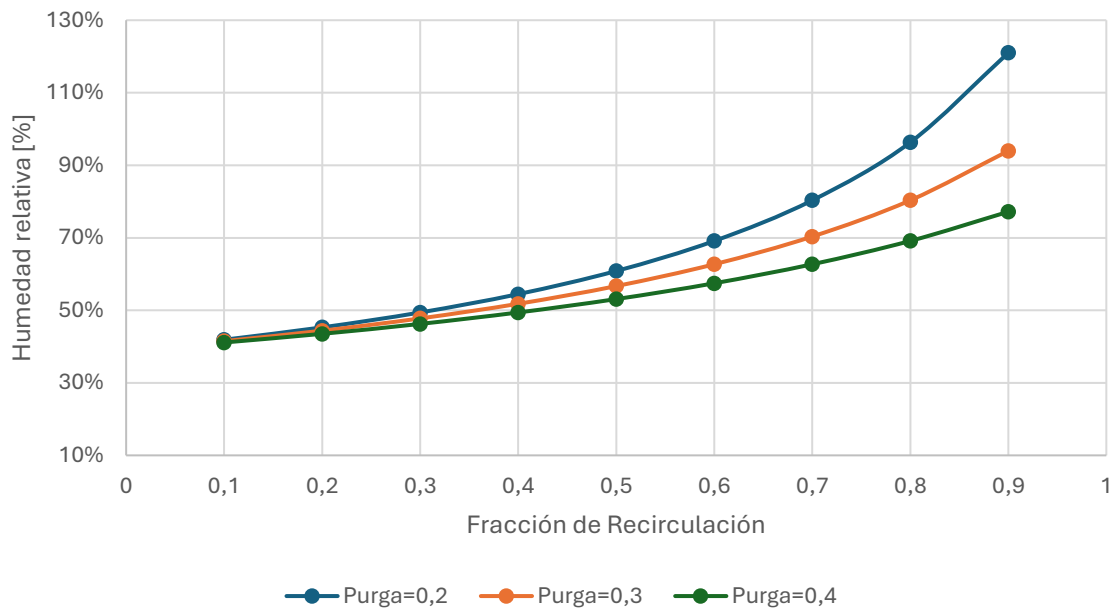


Caso 50 [°C]

Ahorro energético vs Fracción de recirculación / Caso 50
[°C]



Humedad relativa vs Fracción de recirculación / Caso 50
[°C]



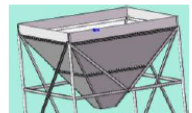
11.8. Anexo H. Detalle de cotizaciones

Caso A. Secador rotatorio

I- Design information

- ✚ **Raw material: Brewer's Spent Grain (BSG)**
- ✚ **Calcination Material size: fines after**
- ✚ **Capacity: 100 tons input capacity per month, 16 working hours per day**
- ✚ **Fuel: LPG**

II- Quotation List

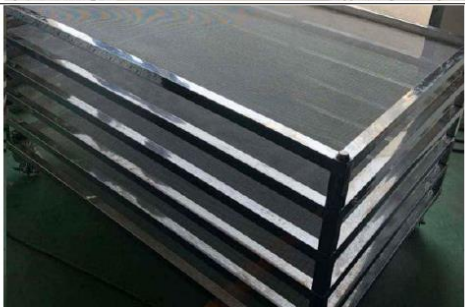
No.	Name	Specification	Qty.	Power (KW)	EXW Price (USD)	Picture
01	Feeding Hopper	✓ 1000×1000×1000mm ✓ Contact surface lined with SS304 ✓ With SS304 screw discharger, motor 0.75KW ✓ Screw gate at bottom with contact SS304	1	0.75	2,650	
02	Screw Conveyor	✓ WLS-160×3000mm ✓ Transportation length: 3000mm ✓ Capacity: 0.15-0.4t/h ✓ Contact surface material: SS304 ✓ Working temperature: 150-200°C ✓ Motor power: 1.1KW with VFD and individual fan	1	1.1	1,760	
03	Rotary Dryer	✓ Ø1.5×7.5m ✓ Sleeve diameter: 1500mm ✓ Sleeve length: 6000mm ✓ Cylinder length 7500mm ✓ Thermo insulation thickness: 150mm ✓ Support: 2 sets ✓ Rotation speed: 0.3-3.0r/min ✓ Slope: 1.5% ✓ Capacity: 0.07tph ✓ Drying temperature: 250-300°C ✓ Drying duration: >0.5h ✓ Cylinder contact material: SS304 ✓ Driven motor: 5.5kw with VFD ✓ adjusted speed, 100-1000rpm	1	5.5	22,000	

No.	Name	Specification	Qty.	Power (KW)	EXW Price (USD)	Picture
04	Rotor discharger	✓ 200×200mm ✓ Discharging capacity: 0.5-1.5m³/h ✓ Rotation speed: 24r/min ✓ Contact material: SS304 ✓ Driven motor: 0.75KW with VFD	1	0.75	1,350	
05	Hot air furnace	✓ Capacity: 2.5-3.0×10⁵ Kcal/h ✓ Applicable fuel: LPG ✓ Fuel consumption: 25kg/h ✓ Hot air temperature: 500-600°C, adjustable ✓ With thermo-couple and adjusting valves ✓ Waste gas draft fan air volume: 3500m³/h ✓ Waste gas draft fan air pressure: 4000Pa ✓ Waste gas draft fan motor: 5.5KW with individual cooling fan	1	5.5	3,670	
06	LPG burner	✓ YYM25 ✓ Applicable fuel: LPG ✓ Capacity: 15-45kg/h ✓ Automatic ignition	1	0.45	3,250	
07	Cyclone dust collector	✓ XF300 ✓ Air volume: 300-500m³/h ✓ Draft fan air pressure: 4000Pa ✓ Draft fan power: 2.2KW ✓ Rotor discharging valve: 0.75KW ✓ Rotor discharging working temperature: <100°C	1	2.95	1,700	
08	Screw Conveyor	✓ WLS-160×10000mm ✓ Transportation length: 12000mm ✓ Capacity: 0.15-0.4t/h ✓ Contact surface material: SS304 ✓ Working temperature: <100°C ✓ Motor power: 3KW with VFD and individual fan	1	3	4,400	

No.	Name	Specification	Qty.	Power (KW)	EXW Price (USD)	Picture
08	Packing Machine	✓ PL-1 ✓ Packing capacity: 10-30bags/h ✓ Bag capacity: 10-50kg/bag ✓ Motor power: 3KW ✓ Contact material: SS304 ✓ Sealing: semi-auto	1	3	8,250	

Caso B. Secador de bandejas

2. Processing Material: Brewer's Spent Grains	
3. Capacity: 1Ton Per Batch	
4. Drying Batches/16hours: 4-5 Batches	
5. Drying Cycle: 2-3h Per Batch	
6. Drying Temperature: 60°C to 90°C	
7. Heat Source: LPG	
8. Total USD Price: 42,796.00 USD (EXW Nanchong)	
9. Installation Power: 40.87Kw	
10. Container Required: About 1*20GP Container	
11. Lead Time: 30 Days	
	Name: Sichuan Nanchong Shouchuang Technology Development Co., Ltd. Address: Qinglian Town, Gaoping District, Nanchong City P.R. China.

Batch Trays Drying System		
Item	Parameter	Remark
Drying Oven	-Model:5HFJZ80Q	
	-Drying capacity:1Ton/batch	
	-Size:L7000*W4000*H3000mm	
	-Drying area:75 m²	
	-Drying temperature:60-90 °C	
	-Drying time:2-3h/Batch	
	-Power:13Kw	
Trolley and Tray	-Trolley size:1460*1000mm	
	-Trolley material:stainless steel	
	-Trolley number:4units	
	-Tray size:1400*900mm	
	-Tray material:stainless steel	
	-Tray number:60units	

Control Cabinet	-Model:HZG7D -Size:7 inches touch screen+PLC (software copyright) +Low voltage device (general configuration)	
Heat Source	-Model: RS5 -Heat Source: LPG -Energy consumption: 10-12m³/H	
Pre-treatment Machine(Before Drying)		
Screw Press Dewater Machine	-Model:SC-CTYZ-300 -Capacity: 5-7m³/H -Size:4069*890*1946mm -Power: 15Kw -Material: stainless steel+carbon steel EXW Price: 14,925.00 USD	

Post-treatment Machine(After Drying)		
Lifting Machine	-Model: TS2000 -Size: 1800*800*1750mm -Power: 0.37Kw -Material: Stainless steel EXW Price: 3,443.00 USD	
Grinding Machine	-Model: YM40B -Capacity: 160-800kg/h -Mesh size: 60~120 mesh -Machine size: 1400*700*1700 mm -Material: stainless steel -Power: 12.5Kw (Particle size classification, multiple specifications sieve mesh can be equipped) EXW Price: 7,571.00 USD	

Caso C. Secador Flash

No.	Item	Data
1	Product Name	BSG
2	Processing Capacity	260KG/H (100Ton/Month, 4Weeks/Month, 6Days/Week, 16Hours/Day)
3	Initial Moisture Content	75-80%
4	Moisture Content After Screw Press	60-65%
5	Water Removing Amount from Screw Press	~140KG/H
6	Left Processing Capacity After Screw Press	~120KG/H
7	Moisture Content After Dryer	5-8%
8	Output Capacity of Dried Product	~60KG/H
9	Total Water Removing Amount	~200KG/H
10	Heating Resource	LP Gas
11	Purpose of Final Product	Human Consumption
12	Occupied Space of Whole Line	12*10*5m (L*W*H)

No.	Item	Specification	Price (USD)
1	Screw Press Machine 	Processing Capacity: 300KG/H Power of Motor: 3KW Dimension: 1900*420*700mm (L*W*H) Weight: 500kg Diameter of Screw: 120mm Rotating Speed: 30RPM Construction Material: SUS304	9550
2	Hopper Screw Conveyor (VFD Control)	Transport Capacity: 300KG/H Power of Motor: 1.5KW Diameter of Conveyor Shell: 89mm Conveying Angle: 30 Degree Length of Conveyor: 3000mm Equipped with 150L Feeding Hopper	2400

Changzhou Welldone Machinery Technology Co., Ltd

		Power of Feeding Hopper Breaker: 1.5KW Equipped with Framework Made of SUS304 Dimension: 3000*500*1800mm (L*W*H)	
3	Flash Dryer 	Processing Capacity: 120KG/H Diameter of Pulsing Chamber: 250mm Diameter of Drying Chamber: 200mm Heat Output of Gas Furnace: 200,000Kcal/H Drying Temperature: 120-200℃ (Adjustable) Power of Blower: 2.2KW Power of Exhausting Fan: 7.5KW Power of Rotary Valve: 0.55KW Equipped with Cyclone Separator Equipped with Bag Filter Construction Material: Contact part SUS304 Dimension: 6000*4000*4000mm (L*W*H)	20950
4	Horizontal Screw Conveyor 	Transport Capacity: 300KG/H Power of Motor: 1.1KW Diameter of Conveyor Shell: 89mm Conveying Angle: 0 Degree Length of Conveyor: 1500mm Made of SUS304 Dimension: 2000*200*300mm (L*W*H)	1850
5	Hopper Screw Conveyor (VFD Control) 	Transport Capacity: 300KG/H Power of Motor: 1.5KW Diameter of Conveyor Shell: 89mm Conveying Angle: 30 Degree Length of Conveyor: 2600mm Equipped with 150L Feeding Hopper Feeding Hopper equipped with pneumatic hammer Equipped with Framework Made of SUS304 Dimension: 2600*500*1800mm (L*W*H)	2200
6	Mill	Model: 30B Power of Motor: 5.5KW Mesh Size after Milling: 100-120mesh Processing Capacity: 80-100KG/H Equipped with 25L Feeding Hopper, all closed	2150

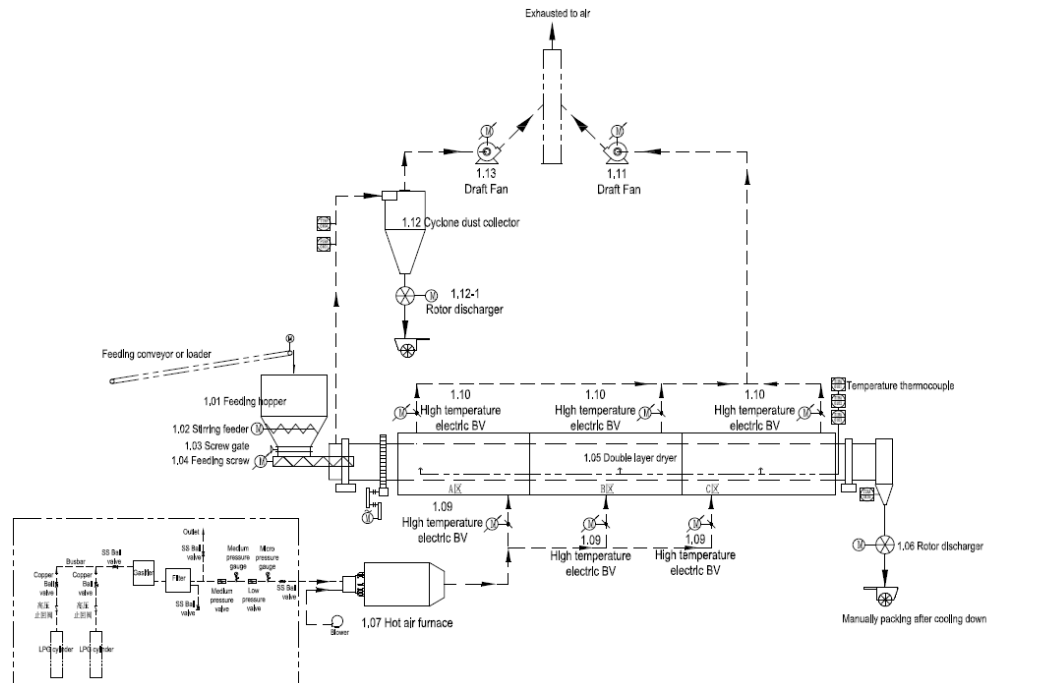
Changzhou Welldone Machinery Technology Co., Ltd

		type Construction Material: Contact part SUS304 Dimension: 1700*600*500mm (L*W*H)	
7	Vibration Sifter 	Model: ZS-350 Power of Vibration Motor: 0.17KW Diameter of Vibration Sieve: 350mm Qty of Sieve: 2Layers Qty of Unloading Port: 3PCS Construction Material: Contact part SUS304 Dimension: 550*400*600mm (L*W*H)	650
8	Integrated Control Cabinet 	Independent Control Cabinet PLC + Touch Screen Control Major electrical components are Siemens brand PLC is Siemens brand Touch Screen is 10Inches colorful screen, MCGS brand Equipped with E-Stop button Temperature monitoring, safety monitoring etc Cabinet is made of powder coating material Dimension: 1200*800*1800mm (L*W*H)	3350

11.9. Anexo I. Consumos energéticos específicos del diseño conceptual

$T_{in} [^{\circ}C]$	$T_{out} [^{\circ}C]$	$Q_{term} [kWh]$	$e \left[\frac{kWh}{kg \text{ agua}} \right]$
105	60	108,13	1,19
90	55	114,49	1,26
80	45	98,13	1,08
70	40	95,41	1,05
60	35	91,59	1,01
50	30	85,86	0,94

11.10. Anexo J. Diagrama de instrumentación de secador rotatorio



11.11. Anexo K. Vida útil de los equipos

Caso Secador Rotatorio

Equipo	Vida útil [año]
Tolva de alimentación	15
Tornillo transportador (carga)	15
Secador rotatorio	15
Válvula rotativa	15
Horno de aire caliente	15
Quemador de GLP	15
Ciclón colector de polvo	15
Tornillo transportador (descarga)	15
Molino	15
Tamiz vibratorio	15

Caso Secador Bandejas

Equipo	Vida útil [año]
Prensa de tornillo	15
Secador de bandejas	15

Máquina de elevación	15
Molino	15

Caso Secador Flash

Equipo	Vida útil [año]
Prensa de tornillo	15
Tornillo transportador con tolva (1)	15
Secador flash	15
Tornillo transportador	15
Tornillo transportador con tolva (2)	15
Molino	15
Tamiz vibratorio	15
Gabinete de control integrado	10

11.12. Anexo L. Factores de Lang

Factores de Lang, modificados por Peters y Timmerhaus
(expresados en % del valor del equipo)

Ítem	Tipos de proceso		
	Sólidos	Semifluidos	Fluidos
A. Costo directo			
A.1 Equipo comprado	100	100	100
A.2 Instalación de equipo	45	39	47
A.3 Instrumentos y control (instalados)	9	13	18
A.4 Tuberías (instalados)	16	31	66
A.5 Eléctricos (instalados)	10	10	11
A.6 Edificios (incluye servicios)	25	29	18
A.7 Mejoras del terreno	13	10	10
A.8 Servicios auxiliares (instalados)	40	55	70
A.9 Terreno	6	6	6
Total directos	264	293	346
B. Costo indirecto			
B.1 Ingeniería de supervisión	33	32	33
B.2 Gastos de construcción	39	34	41
B.3 Contratista	17	18	21
B.4 Contingentes	34	36	42
Total indirectos	123	120	137
Capital fijo para la inversión (A+B)	387	413	483
C. Capital de trabajo	68	74	86
Inversión total (A+B+C)	455	487	569