

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Química y Textil



TESIS

**Producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica de
Smallanthus Sonchifolius (yacón)**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Químico

Elaborado por

Katlyn Annadeli Rojas Valqui

 [0000-0002-3491-8130](https://orcid.org/0000-0002-3491-8130)

Asesor

Dr. Ing. Edgar Waldo Norabuena Meza

 [0000-0003-3921-931X](https://orcid.org/0000-0003-3921-931X)

LIMA - PERÚ

2024

Citar/How to cite	Rojas Valqui [1]
Referencia/Reference	[1] K. Rojas Valqui, " <i>Producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica de Smallanthus Sonchifolius (yacón)</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEE (2020)	

Citar/How to cite	(Rojas, 2024)
Referencia/Reference	Rojas, E. (2024). <i>Producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica de Smallanthus Sonchifolius (yacón)</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*A mis padres, por ser mi principal motivación para ser una profesional. Así mismo a mis
hermanos por el apoyo incondicional.*

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento, en primer lugar, a mi padre, quien ha sido mi mayor fuente de inspiración para llevar a cabo este proyecto. También agradezco a mi madre por su apoyo constante e incondicional. Además, quiero reconocer el aliento que me han dado mis hermanos, que me ha motivado a seguir adelante.

Quiero extender mi gratitud a mi asesor de tesis, el Ingeniero Edgar Norabuena, por su respaldo fundamental y por su valiosa orientación a lo largo de todo el proceso. Igualmente, agradezco a la Ingeniera Magali Vivas por estar siempre dispuesta a ayudarme con los análisis, al Ingeniero Libio Espinoza Meza por su asistencia técnica, y a los técnicos, el Sr. Víctor Rojas y Elmer Ordaya, encargados del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química y Textil (FIQT) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), quienes compartieron su amplia experiencia operativa conmigo. También quiero expresar mi agradecimiento a todos los profesores y compañeros investigadores de la FIQT por su apoyo y por compartir su conocimiento en algún momento del camino.

Resumen

Este estudio se centra en la producción de bioetanol a partir de residuos industriales que contienen yacón como producto final o añadido.

La materia prima se mezcla con agua y se somete a una hidrólisis enzimática mediante el proceso de sacarificación, con el propósito de convertir azúcares complejos en simples.

Posteriormente, se lleva a cabo una etapa de fermentación donde la levadura actúa como catalizador para convertir el azúcar en alcohol, seguido de la filtración para obtener el mosto. El bioetanol se obtiene mediante destilación.

Finalmente, el proyecto culmina con la evaluación técnico económico para verificar su viabilidad.

Palabras clave — Bioetanol, residuo industrial, yacón, hidrólisis enzimática, sacarificación, fermentación, destilación, viabilidad.

Abstract

This study focuses on the production of bioethanol from industrial waste containing yacon as the final or added product. The raw material is mixed with water and subjected to enzymatic hydrolysis through the saccharification process, with the purpose of converting complex sugars into simple ones. Subsequently, a fermentation stage takes place where yeast acts as a catalyst to convert sugar into alcohol, followed by filtration to obtain the wort. Bioethanol is obtained through distillation. Finally, the project concludes with the technical-economic evaluation to verify its feasibility.

Keywords — Bioethanol, residual material, yacon, enzymatic hydrolysis, saccharification, fermentation, distillation, viability.

Tabla de contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xi
Capítulo I. Parte introductoria	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivo del estudio.....	3
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.4. Hipótesis	3
<i>Hipótesis general</i>	3
<i>Hipótesis específica</i>	3
Capítulo II. Marco teórico	4
2.1 Planteamiento de la realidad	4
2.2 Materia prima: yacón.....	8
2.2.1 <i>Taxonomía</i>	8
2.2.2 <i>Composición química</i>	9
2.3 Biomasa lignocelulósica	11
2.3.1 <i>Celulosa</i>	11
2.3.2 <i>Hemicelulosa</i>	11
2.3.3 <i>Pectina</i>	12
2.3.4 <i>Lignina</i>	12
2.4 Proceso de hidrólisis enzimática	12
2.4.1 <i>Amilasas</i>	12
2.4.2 <i>Celulasas</i>	13
2.4.3 <i>Hemicelulasas</i>	13
2.5 Pretratamiento	13
2.6 Gelatinización y licuefacción	14
2.7 Sacarificación y fermentación.....	14
2.8 Variables que influyen en el proceso de fermentación.....	15
2.9 Recuperación de etanol	15
2.10 Biocombustibles	17
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación.....	20
3.1. Estudio de mercado	20
3.1.1 <i>Demanda de etanol – combustible o etanol anhidro</i>	22
3.2. Fase Experimental	23

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados.....	32
4.1 Diseño de Planta	32
Conclusiones	50
Recomendaciones	51
Referencias bibliográficas	52
Anexos.....	55

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Especificaciones técnicas Etanol-NTP 321.126.2009	6
Tabla 2 Especificaciones técnicas del etanol carburante alrededor del mundo, los parámetros que toma cada país son diferentes, dependiendo de las regulaciones que sean establecidas.	7
Tabla 3 NTP (Norma Técnica Peruana) 321.126 etanol-carburante	8
Tabla 4 Composición química promedio de 10 accesiones de yacón en relación a un kilogramo de materia fresca	9
Tabla 5 Composición química de yacón	10
Tabla 6 Contenido de carbohidratos en raíces de yacón	10
Tabla 7 Clasificación de biocombustibles por su generación con respecto a insumos alimentos, residuos orgánicos e insumos vegetales.....	19
Tabla 8 Rendimiento promedio de yacón (Tn/Ha).	21
Tabla 9 Datos de la prueba óptima obtenida	26
Tabla 10 Ficha técnica de lavadora industrial	36
Tabla 11 Ficha técnica de trituradora industrial de alimentos	37
Tabla 12 Ficha técnica de licuadora industrial de alimentos.....	38
Tabla 13 Ficha técnica de filtro prensa de placa y marco.....	41
Tabla 14 Distribución de la Inversión de Capital Total	43
Tabla 15 Balance general proyectado.....	44
Tabla 16 Distribución de costos de producción y gastos generales	45
Tabla 17 Dimensiones del reactor.....	47
Tabla 18 Parámetros para tipos de equipo y determinar su precio.....	48
Tabla 19 Parámetros para determinar el precio del reactor.....	48
Tabla 20 Costo total de los equipos	49

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Producción acumulada de energía eléctrica.....	5
Figura 2 Clasificación de Carbohidratos.....	11
Figura 3 Diagrama de proceso típico para obtención de etanol.....	17
Figura 4 La glicólisis y la fermentación son las rutas metabólicas por las que se sintetiza etanol en la levadura del pan <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	18
Figura 5 Principales destinos de yacón	20
Figura 6 Exportaciones del producto yacón según sus principales presentaciones en el 2017	21
Figura 7 Demanda de gasolinas.....	22
Figura 8 Solución licuada de yacón.....	23
Figura 9 Diagrama de flujo de nuestra parte experimental	25
Figura 10 Tiempo vs °Brix de la prueba óptima obtenida	26
Figura 11 Procedimiento para realizar la reacción enzimática	28
Figura 12 Fermentación anaeróbica	29
Figura 13 Refractómetro digital utilizado.....	30
Figura 14 Columna de destilación utilizado.....	31
Figura 15 Control de temperatura en la columna de destilación	31
Figura 16 Diagrama de flujo de proceso de una planta de bioetanol proyectada	32
Figura 17 Balance de materia y energía	33
Figura 18 Mediciones de turbina.....	39
Figura 19 Correlación número de potencia/número de Reynolds para el diseño de un tanque estándar.	40
Figura 20 Simulación de la columna de destilación	46
Figura 21 Resumen económico del costo de la columna de destilación dado por Aspen Process Economic Analyzer APEA	47

Introducción

El cambio climático y su influencia perjudicial en el entorno han promovido la exploración y fabricación de biocombustibles.

La reducción de las reservas de combustibles no renovables ha instigado la búsqueda y desarrollo de nuevas técnicas para fabricar biocombustibles como una opción más sostenible desde el punto de vista ambiental.

Uno de los recursos biomásicos viables es el yacón, un tubérculo que contiene entre un 40% y un 70% de fructooligosacáridos (FOS), una materia prima utilizada en las instalaciones de producción de bioetanol.

Para convertir los FOS en azúcares más simples, como la glucosa y la fructosa, se realiza un proceso de descomposición mediante hidrólisis, que incluye etapas de licuefacción y sacarificación. En esta etapa se emplean enzimas como la α -amilasa, glucoamilasa y pectinasa. Durante la fermentación, se utiliza la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, donde los azúcares simples se transforman en etanol.

Debido a la ausencia de compuestos químicos, el método de hidrólisis enzimática carece de toxicidad. Además, la inversión requerida para la planta de procesamiento es considerablemente menor debido al bajo consumo de enzimas y energía. También es importante destacar que se genera glucosa de manera continua, y la actividad de estas enzimas permanece estable siempre y cuando se mantengan los parámetros óptimos. Por lo tanto, no es necesario utilizar activadores como sales de calcio o sodio. La α -amilasa es una enzima que descompone los enlaces glucosídicos α 1 \rightarrow 4 presentes en los oligofructanos, mientras que la glucoamilasa se encarga de descomponer los enlaces glucosídicos α 1 \rightarrow 6.

En este estudio, empleamos amilasa y glucoamilasa en la fase de hidrólisis enzimática, y la levadura *Saccharomyces cerevisiae* en el proceso de fermentación.

Capítulo I. Parte introductoria

1.1. Generalidades

En el estudio realizado por (Mera & Cataño, 2005), se logró obtener glucosa a partir del almidón de la yuca mediante hidrólisis. Para ello, se emplearon enzimas comerciales como la alfa-amilasa BAN 480 de *Bacillus amyloliquefaciens* y la amiloglicosidasa AMG 300 L de *Aspergillus Níger*. Las condiciones óptimas de operación fueron un pH de 6 y una temperatura de 70°C, con una concentración de enzima de 0.1% (g enzima/g sustrato) para la alfa-amilasa, un pH de 4.8, una temperatura de 65°C y una concentración de enzima de 0.25% (g enzima/g sustrato) para la glucoamilasa. Se estableció que la velocidad de reacción de cada enzima se ajustaba a un modelo de primer orden, lo que permitió determinar que los tiempos ideales de reacción eran de 2 horas para la dextrinación y 40 horas para la sacarificación. Una vez que se alcanzó la completa hidrólisis del almidón, el jarabe obtenido se sometió a un tratamiento térmico a 85°C durante 5 minutos, seguido por un proceso de cristalización que produjo un producto con un contenido de 90.6% de Dextrosa Equivalente (glucosa) y un rendimiento del 40.72%, debido a limitaciones en la etapa de cristalización.

Por otro lado, en la investigación realizada por (Orizano Acuña & Valdizán Espinoza, 2021) , se logró producir bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos, específicamente del cáliz de aguaymanto y la cáscara de yacón, mediante un proceso que involucró hidrólisis ácida seguida de fermentación. Se examinaron dos variables de proceso: la temperatura de fermentación y el porcentaje de rumen de vaca. Mediante un análisis de regresión de segundo orden (superficie de respuesta), se identificaron los puntos óptimos, siendo de 38 - 38,1 °C y 40 - 40,5% de rumen para la cáscara de yacón, y de 38 - 38,3 °C y 40 - 42% de rumen para el cáliz de aguaymanto. Luego, se realizó un análisis fisicoquímico del producto final, confirmando que las características del

bioetanol obtenido coincidían con las esperadas.

Adicionalmente, en el estudio realizado por (Noborikawa, 2016), se llevó a cabo la extracción de fructooligosacáridos (FOS) a partir de la harina de yacón. Tras llevar a cabo un análisis utilizando un diseño factorial 2k, se concluyó que el factor más importante para la extracción de FOS es la relación entre la materia prima y el solvente. Se encontró que los modelos cinéticos basados en la ley de Fick describen con precisión el proceso de extracción de FOS de la harina de yacón. El producto obtenido se sometió a un proceso de clarificación, en el cual se determinó que los factores más relevantes son el pH y la proporción de carbón activado.

1.2. Justificación

El cultivo de la raíz de yacón ha experimentado un aumento debido a la difusión de diversas propiedades, incluida su capacidad para reducir los niveles de glucosa en la sangre, así como de colesterol (Seminario J, 2003).

En la industria se destaca producto a base de leche de soya y yacón (Jpn. Kokai Tokkyo Koho Patente nº JP2002101859, 2002), jarabe, zumo, mermelada, hojuelas, harina, jarabe de yacón (73 °Brix) (Arturo Ricardo Alejos Yamamoto, 2021). Además, se han desarrollado productos farmacéuticos con el objetivo de reducir la fertilidad sin efectos secundarios (Rep. Korean Kongkae Taeho Kongbo Patente nº KR 2007053429, 2007). Estas plantas de producción generan residuos industriales lignocelulósicos la misma que contiene cantidades significativas de celulosa, hemicelulosa y lignina. Estos residuos pueden ser aprovechados, al someterlos a tratamientos químicos o enzimáticos para la producción biocombustible. Según el documento (Petróleo, 2017), el bioetanol se utiliza como aditivo para gasolinas en diversas proporciones.

En última instancia, este proyecto busca aprovechar los desechos industriales, el cual tendrá un impacto positivo en la disminución de gases de efecto invernadero, a diferencia de los combustibles no renovables derivados del petróleo.

1.3. Objetivo del estudio

1.3.1 Objetivo general

- Optimizar las variables de operación en la producción de bioetanol a partir de yacón (*Smallanthus sonchifolius*), que maximicen el contenido de etanol.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades físico-químicas de yacón.
- Diseñar una planta de producción de bioetanol.
- Caracterizar el bioetanol obtenido, luego de las pruebas de laboratorio.
- Optimizar la extracción de bioetanol, utilizando el rendimiento del proceso como variable respuesta.
- Analizar la rentabilidad de la producción de bioetanol a partir de un estudio técnico-económico de ingeniería, considerando el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

1.4. Hipótesis

Hipótesis general

- Es posible optimizar las variables de operación en la producción de bioetanol mediante el método heurístico.

Hipótesis específica

- El yacón (*Smallanthus sonchifolius*), presenta características adecuadas para la obtención de etanol.
- Es posible diseñar una planta de producción de bioetanol usando diseños de ingeniería.
- El bioetanol obtenido cumple con la normativa técnica peruana 321.126 para su comercialización.
- Es posible usar diseño de experimentos para poder optimizar las variables de operación.
- Es factible la producción de bioetanol a partir de yacón desde un punto de vista de rentabilidad (VAN y TIR).

Capítulo II. Marco teórico

2.1 Planteamiento de la realidad

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que se puso en marcha el 21 de marzo de 1994, y el Protocolo de Kioto, firmado el 11 de diciembre de 1997, tienen como objetivo principal la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, que contribuyen al calentamiento global.

En la legislatura peruana, se ha aprobado la Ley N° 28054-2003 de Promoción del Mercado de Biocombustibles y su reglamento con D.S. N° 021-2007. El propósito de esta ley es estimular la investigación científico-tecnológica relacionada con el desarrollo de biocombustibles, promover la adopción de tecnologías que faciliten su producción, fomentar la participación del sector privado en este ámbito y también impulsar la producción de biocombustibles en áreas selváticas.

Desde 1990, la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) ha centrado sus esfuerzos en la preservación de las raíces y tubérculos andinos (RTA), que abarcan variedades como la achira, la ahípa, la arracacha, la maca, la mauka, la mashua, la oca, el olluco y el yacón. COSUDE ha hecho hincapié en la búsqueda y el desarrollo de mercados para estos cultivos. (Seminario J, 2003)

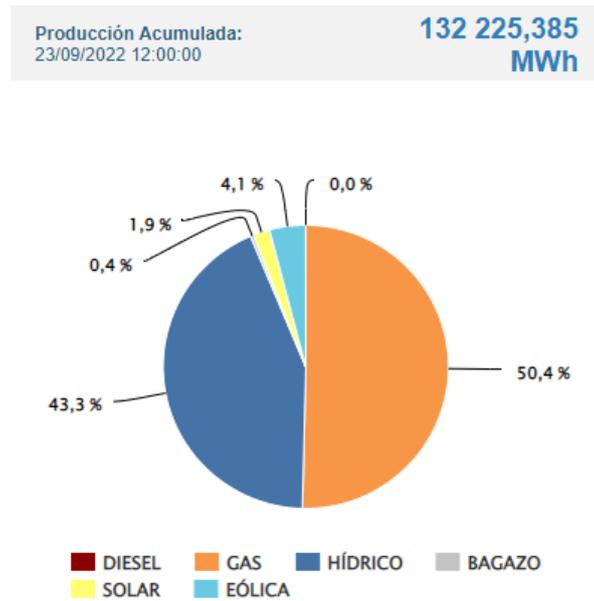
La ordenanza N°027-2008-GRSM/CR y su reglamento, el Decreto Regional N°001-2009-GRSM/PGR, establecen la creación del Programa de Biocombustibles de la región San Martín -PROBIOSAM, con el objetivo de cumplir su función de promotor del desarrollo del mercado agroenergético. Como resultado, el Instituto Nacional de Innovación Agraria – INIA, mediante el Programa Nacional de Innovación Agraria – PNIA y el Programa Nacional de Productos Agroindustriales y de Agroexportación, desarrolló el proyecto Optimización de la producción de Biodiesel a partir de las semillas de piñón blanco (*Jatropha curcas* L.) en la región San Martín. (Ronald G. Echevarría Trujillo, 2019)

En la parte privada tenemos a Caña brava, propiedad del grupo Romero, actualmente es la única Planta de producción de etanol en Perú. (J. Santillana, 2017)

Por otro parte, hay dos empresas que demandan biocombustibles: la empresa estatal Petroperú y la Refinería La Pampilla. Además, actualmente el biocombustible se emplea en la generación eléctrica, representando aproximadamente el 0.5%. (COES, 2022)

Figura 1

Producción acumulada de energía eléctrica



Nota: fuente (COES, 2022)

Según la norma técnica peruana el bioetanol debe cumplir con las características indicadas en la tabla 1.

Tabla 1*Especificaciones técnicas Etanol-NTP 321.126.2009*

Característica	Especificaciones		Métodos de ensayo		
	Min	Max	ASTM	EN	NTP
Etanol anhidro % volumen	95,2	-	D5501	EN 15721	-
Metanol, % volumen	-	0,5	D5501'-	EN 15721	-
Contenido de agua, % peso	-	0,3	E203 E1064	-	-
Contenido de desnaturizante, % volumen	2	3	-	-	-
Goma existente, lavada con solvente mg/100 ml	-	5	D381	-	-
Contenido de cloruros inorgánicos, ppm masa (mg/l)	-	10	D7319 D7328	-	-
Apariencia	Claro y brillante, libre de contaminantes suspendidos o precipitados		Inspección Visual		-
Acidez	-		D1613	-	-
pH	6,5 - 9		D6423	-	-

Nota: fuente (Osinergmin, 2009)

Además, la tabla N°2 presenta las especificaciones que el etanol debe cumplir para su uso comercial.

Tabla 2

Especificaciones técnicas del etanol carburante alrededor del mundo, los parámetros que toma cada país son diferentes, dependiendo de las regulaciones que sean establecidas.

Características	Unidad		Países			
			EE. UU	Brasil	Suiza	Europa
Densidad (20°C)	kg/m ³	Max	-	791,5	792	-
Grado alcohólico a 20°C	°GL/%v/v	Min	-	99,3	-	-
Grado alcohólico a 20°C	°GL/%v/v	Min	92,1	99,6	99,7	98,7
Agua	%v/v	Max	1	-	0,3	0,3
Acidez total	mg/l/%m/m	Max	56	30	56	56
Conductividad eléctrica	µs/m	Max	-	500	500	-
pH	-	-	6,5 - 9	-	6,5 - 9	6,5 - 9
Contenido de cobre	mg/kg	Max	0,1	0,07	0,1	0,1
pH			6,5 - 9		D6423	-
Ion cloruro	mg/kg / (mg/l)	Max	40	-	10	25
Goma existente, lavado con solvente	mg/100 ml	Max	5	-	5	-
Metanol	%v/v	Max	0,5	-	0,5	1
C3 -C5	%v/v	Max	-	-	2	2
Desnaturalizante	%v/v	-	1,96 - 4,76	-	-	-
Contenido de sulfato	mg/kg	Max	-	-	50	10
Contenido de fósforo	mg/l	Max	-	-	-	0,5
Material no volátil	mg/l	Max	-	-	-	100

Nota: fuente (Escalante & Fuentes, 2013)

De igual manera, la norma técnica peruana N° 321.126 especifica los estándares de calidad detallados en la tabla N°3 para el Etanol Combustible Desnaturalizado. Este tipo de etanol se combina con la gasolina para crear Gasohol, el cual se emplea en motores de combustión interna.

Tabla 3*NTP (Norma Técnica Peruana) 321.126 etanol-carburante*

Característica	Especificaciones	
	Mínimo	Máximo
Etanol anhidro, porcentaje en volumen	95,2	
Metanol, porcentaje en volumen		0,5
Contenido de agua, porcentaje en peso		0,3
Contenido desnaturalizante, porcentaje en volumen	2	3
Goma existente, lavada con solvente mg/100MI		5
Contenido de cloruros inorgánicos, ppm (mg/L)		10
Apariencia	Claro, brillante, libre de contaminantes suspendidos o precipitados	
Contenido de cobre, mg/kg		0,1
Contenido de fósforo, mg/L		0,5
Acidez (ácido acético) (mg/L)		0,007
pH	6,5	9
Azufre, ppm		30
Sulfato total, ppm		4

Nota: fuente (Osinergmin, 2009)

2.2 Materia prima: yacón

2.2.1 Taxonomía

El yacón, también llamado *Smallanthus sonchifolius* en términos científicos, es parte de la familia Asteraceae, también conocida como Compositae. Esta planta puede crecer entre 1 y 2.5 metros de altura y tiene raíces fibrosas. Según la clasificación de los pisos ecológicos de Pulgar Vidal, las condiciones ideales para su cultivo se encuentran en las regiones Yunga y Quechua. El yacón no prospera por encima de los 3000 metros sobre el nivel del mar, pero se encuentra en la ceja de selva en regiones como San Martín, Cajamarca y Amazonas. Es importante resaltar que las áreas más destacadas para su producción en el Perú incluyen Huánuco, Ancash, Junín, Cajamarca, Puno y Oxapampa. (Seminario J, 2003)

A continuación, se muestra su clasificación taxonómica: (Puerta, 2011)

Reino: Plantae

División:

Magnoliophyta Clase: Magnoliopsida

Orden: Asterales

Familia: Asteraceae

Subfamilia: Asteroideae

Género: Smallanthus

Especie: sonchifolius

Nombre científico: *S. sonchifolius* (Poepp & Endl) H. Robinson

2.2.2 Composición química

Tabla 4

Composición química promedio de 10 accesiones de yacón en relación a un kilogramo de materia fresca

Componente	Promedio	Rango
Materia seca (g)	115	98 - 136
Carbohidratos totales (g)	106	89 - 127
Fructanos (g)	62	31 - 89
Sacarosa libre (g)	14	10 - 19
Fructosa libre (g)	8,5	3,9 - 21,1
Glucosa libre (g)	3,5	2,3 - 5,9
Proteína (g)	3,7	2,7 - 4,9
Fibra (g)	3,6	3,1 - 4,1
Lípidos (mg)	244	112 - 464
Calcio (mg)	87	56 - 131
Fósforo (mg)	240	182 - 309
Potasio (mg)	2282	1843 - 2946

Nota: fuente (Hermann, Freire, & Pazos, 1999)

Tabla 5*Composición química de yacón*

Fructooligosacáridos (FOS)		40 a 70 %
Carbohidratos (en base seca)	Azúcares libres	* 5 a 15% fructosa * menos 5% glucosa * 5 a 15% sacarosa
Proteínas (en base seca)		2,4 a 4,3%
Lípidos (en base seca)		0,14 a 0,43%
Agua (del peso fresco)		85 a 90%
Minerales (de materia fresca)	Potasio	230 mg/ 100 g
	Calcio, fósforo, magnesio, sodio y hierro	menor cantidad
Polifenoles (en materia fresca)		200 mg/100 g
Almidón		0.4%

Nota: fuente (María Paula Calle, 2012)

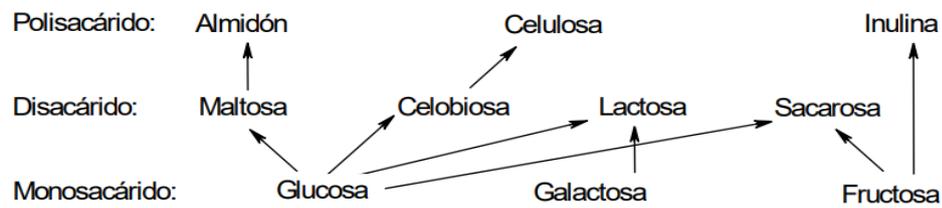
Tabla 6*Contenido de carbohidratos en raíces de yacón*

Carbohidratos	Contenido (mg/g materia seca)
Fructosa	350,1 ± 42,0
Glucosa	158,3 ± 28,6
Sacarosa	74,5 ± 19,0
GF ₂	60,1 ± 12,6
GF ₃	47,4 ± 8,2
GF ₄	33,6 ± 9,3
GF ₅	20,6 ± 5,2
GF ₆	15,8 ± 4,0
GF ₇	12,7 ± 4,0
GF ₈	9,6 ± 7,2
GF ₉	6,6 ± 2,3
Inulina	13,5 ± 0,4

Nota: fuente (Ohyama, y otros, 1990)

Figura 2

Clasificación de Carbohidratos



Nota: fuente (Hajian, 1984)

2.3 Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica es abundante, económica y no comestible, lo que la convierte en un recurso idóneo para la producción de combustibles y compuestos de gran valor añadido. Está mayormente compuesta por celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina, cuyas interacciones crean una estructura de biomasa altamente resistente y difícil de descomponer. (M.J., A., & S, 2014)

2.3.1 Celulosa

La celulosa constituye el principal componente de las paredes celulares. Para hidrolizar la celulosa, se requiere la acción de varias enzimas celulásicas. Las exoglucanasas actúan en los extremos reductores y no reductores, generando residuos celobiosos; las endoglucanasas actúan en los enlaces internos de los polímeros de celulosa, produciendo oligómeros y celobiososa; las β -glucosidasas descomponen la celobiososa en dos moléculas de glucosa; y las enzimas oxidativas facilitan la degradación de la celulosa. (Jr, y otros, 2017)

2.3.2 Hemicelulosa

La hemicelulosa es el segundo polisacárido más abundante en las paredes celulares de las plantas. Los polisacáridos presentes en la hemicelulosa reciben nombres según el tipo de azúcar que conforma la columna vertebral de cada polímero. Por ejemplo, el xilano está compuesto de xilosa, los mananos de manosa, el arabinoxilano y el arabinan de arabinosa, y los xiloglucanos de glucosa. (Jr, y otros,

2017)

2.3.3 Pectina

Se trata de un heteropolisacárido con una estructura compleja, compuesta principalmente por homogalacturonano, ramnogalacturonano y xilogalacturonano. Se encuentra en pequeñas cantidades en el bagazo de caña de azúcar, sorgo y madera, y es más abundante en las cáscaras y frutos de los cítricos. (M.E, 2012)

2.3.4 Lignina

Este componente proporciona soporte estructural y resistencia microbiana. Constituye el último componente principal de la estructura de la lignocelulosa. Debido a su barrera física y química, dificulta el proceso de conversión de la biomasa en sus bioproductos. (N., D., & A., 2015)

Es un polímero altamente complejo de fenilpropanoide, sintetizado a partir de tres mono-precusores méricos: alcohol p-cumarílico, alcohol coniferílico y alcohol sinapílico.

2.4 Proceso de hidrólisis enzimática

Este procedimiento involucra la transformación de carbohidratos en azúcares fermentables, generalmente realizado en dos etapas enzimáticas: la licuefacción con alfa amilasa y la sacarificación mediante la adición de amiloglicosidasa (AMG). Después de la hidrólisis, la glucosa obtenida se fermenta junto con los azúcares solubles libres presentes en el yacón.

2.4.1 Amilasas

Las amilasas son obtenidas de diversos macroorganismos como *Bacillus acidopullulyticus*, *Klebsiella planticola*, *Bacillus deramificans*, entre otros (Henrissat, 1991). En la hidrólisis del almidón se utilizan principalmente dos tipos de amilasas: la α -amilasa (α -1,4-glucano 4-glucanohidrolasa) y glucoamilasa (α -1,4-glucano glucohidrolasa). Según el artículo (Dies & Henrissat, 1995) señala que las α -amilasas dividen los enlaces α -1,4-glucosídicos al azar en el interior de la fracción de amilosa, ya sea por el mecanismo de reacción de retención o inversión; por otro lado (Schuster,

Ehmoser, Gapes, & Lendl, 2000) en indica que las glucoamilasas dividen el exterior de la amilosa y amilopectina en enlaces α -1,3-, α -1,4- y α -1,6- glucosídicos.

2.4.2 Celulasas

La descomposición del almidón por celulasas pasa por los siguientes pasos(1) Fijación de las celulasas al sustrato, (2) identificación de un enlace que pueda ser descompuesto, (3) creación del complejo enzima-sustrato, (4) descomposición de los enlaces β -glucosídicos, (5) liberación de las celulasas del sustrato o repetición de los pasos 2, 3 o 4 si el dominio de unión permanece unido a la cadena, (6) conversión de celobiosa en glucosa por las β -glucosidasas. (Sebastião, Gonçalves, Marques, & Fonseca, 2016). La hidrólisis puede ser modelada por Michaelis–Menten como una reacción homogénea. (Bansal, Hall, J.Realff, H.Lee, & S.Bommarius, 2009)

Las reacciones enzimáticas se ven favorecidas por la relación de Arrhenius; lo que significa que a temperaturas de funcionamiento más elevadas se produce una mayor difusión y termodifusión.

2.4.3 Hemicelulasas

Estas son enzimas que descomponen las hemicelulosas, que representan aproximadamente entre el 20% y el 30% de la lignocelulosa. Las xilanasas son las más comunes entre las hemicelulasas, debido a la presencia abundante del heteropolisacárido xilano. (Ríos-Fránquez, Rojas-Rejón, & Escamilla-Alvarado, 2019)

La generación de pentosas tiene un impacto directo en una mayor conversión del sustrato; por esta razón, las hemicelulosas son de gran relevancia. Además, mantienen una relación colaborativa con las celulasas. (Dhiman, Sharma, & Battan, 2008)

2.5 Pretratamiento

Este proceso involucra el lavado, secado y trituración de la materia prima para poder trabajar con una mayor concentración de azúcares durante la fermentación sin requerir la adición de agua.

En (Lareo, 2013) se hace mención del uso de un secador de convección forzada

para secar camotes, donde se llevaron a cabo dos experimentos: el primero a 55°C durante 28 horas y el segundo a 95°C durante 18 horas. Se concluyó que la variación en la temperatura y el tiempo de secado no tuvo impacto en el contenido de azúcar ni en la eficiencia de la hidrólisis enzimática, que alcanzó valores del 100%. También se observó que la degradación del almidón por las amilasas naturales durante el secado con aire caliente a 65°C durante 7-8 horas incrementó la digestibilidad.

2.6 Gelatinización y licuefacción

En esta fase del proceso se realiza la descomposición parcial del almidón mediante la adición de α -amilasa a temperaturas elevadas. Se lleva una cantidad adecuada de biomasa junto con agua a los tanques de licuefacción, donde se ajusta el pH con cal y ácido sulfúrico para lograr la actividad óptima de la α -amilasa. La mezcla se calienta para la gelatinización y se incorpora la enzima, luego se agita. A medida que la α -amilasa descompone el almidón, la viscosidad disminuye. Aumentar la temperatura resulta en una mejor homogenización del macerado. Durante la gelatinización, las enzimas penetran más fácilmente en las estructuras del almidón, lo que facilita una reacción más efectiva si esta etapa no se llevase a cabo. (Lareo, 2013) afirma que no usó enzimas en la etapa de gelatinización procesada a 90°C y 121°C y la hidrólisis del almidón alcanzó rangos de 47%–61% y 34%–45 % para materia fresca y harina respectivamente. Además, estudió la licuefacción sin la etapa de pregelatinización, donde no se observó una disminución significativa en la concentración de azúcar ni en los porcentajes de hidrólisis del almidón, concluyendo que esta etapa no es necesaria; lo que permitiría una mejor manipulación del material y una menor viscosidad del puré.

2.7 Sacarificación y fermentación

La conversión de almidón incluye la adición de amiloglicosidasa (AMG). La descomposición y la fermentación pueden llevarse a cabo en conjunto o por separado; esta última opción ofrece ventajas significativas en el proceso, ya que reduce la presión osmótica causada por la alta concentración inicial de azúcares disueltos durante la fermentación de etanol en lotes, y también previene la inhibición de la AMG debido a

niveles elevados de glucosa. Sin embargo, en un enfoque simultáneo, las condiciones de temperatura y pH son más propicias para el crecimiento de la levadura que para la actividad de la AMG. En un estudio llevado a cabo por (Cao, 2011), se compararon dos métodos: la sacarificación y fermentación simultáneas (SFS), que se completó en 27 horas, y la hidrólisis y fermentación por separado (HFS), que tomó 33 horas (30 horas para la fermentación y 3 horas para la sacarificación). La concentración de etanol obtenida fue de 128.5 y 128.0 g/L, con una productividad promedio de etanol de 4.8 y 3.9 g/L/h, y una eficiencia de fermentación del 90% con el método SFS; mientras que con el método HFS fue de 93.6 g/L, 2.8 g/L/h, y 67%, respectivamente, con un porcentaje inicial de carbohidratos del 28% (w/v).

2.8 Variables que influyen en el proceso de fermentación

2.8.1 Grados Brix

Es el porcentaje p/v de sacarosa de los sólidos solubles en la solución.

2.8.2 pH

Indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa.

2.8.3 Temperatura

Grado o intensidad de calor presente en una sustancia o cuerpo.

2.8.4 Fermentación anaeróbica

Fermentación que no requiere de oxígeno para convertir la glucosa en alcohol.

2.9 Recuperación de etanol

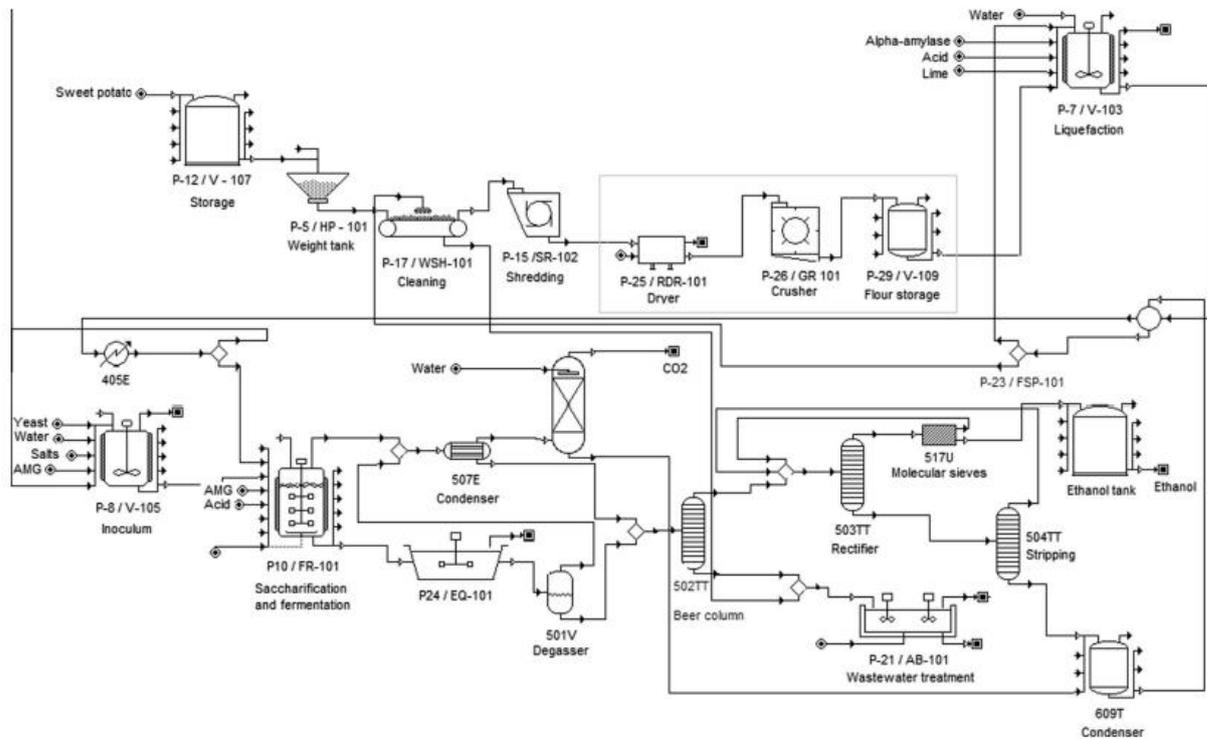
Después de la fermentación, el producto se dirige a un equipo de desgasificación para eliminar todos los vapores, donde el flujo principal consiste en etanol, agua y dióxido de carbono. El etanol y los vapores de agua se condensan y se reintegran a la corriente líquida antes de la destilación, mientras que los vapores no condensables se mezclan con el dióxido de carbono y pasan por un sistema depurador de CO₂ para ser ventilados o recuperados. La corriente que sale en la parte inferior de la columna se dirige al tanque de condensado del proceso. (Ferrari, Guigou, & Lareo, 2013)

Por otro lado, en (Ferrari, Guigou, & Lareo, 2013) se indica que el medio

fermentado se calienta a 80°C en el desgasificador antes de entrar a la columna de destilación. En la fase de purificación o absorción siguiente, se elimina el contenido acuoso del alcohol etílico. En el fondo de la torre, se acumulan sustancias no volátiles (como proteínas, aceites, levaduras y residuos químicos no aprovechados durante la fermentación), junto con una cantidad considerable de agua; estos elementos se recuperan como subproductos. La mayor parte del etanol sale por la parte superior del dispositivo de purificación en forma de destilado. Los vapores generados en la columna de destilación se combinan con las corrientes provenientes de la parte superior de la columna de absorción y los tamices moleculares; estas tres corrientes vuelven a ingresar a la columna para ser purificadas. La corriente que sale por la parte inferior del dispositivo de purificación se dirige hacia una columna de extracción para eliminar el exceso de agua. El destilado obtenido en el proceso contiene principalmente etanol, que alimenta los tamices moleculares; estos atrapan las últimas trazas de agua, logrando un contenido de etanol del 99.2% (v/v). Las moléculas de agua atrapadas en los microporos se regeneran mediante un proceso de calentamiento y luego se añaden a la corriente de condensado para continuar con el proceso. (Ferrari, Guigou, & Lareo, 2013)

Figura 3

Diagrama de proceso típico para obtención de etanol



Nota: fuente (Ferrari, Guigou, & Lareo, 2013)

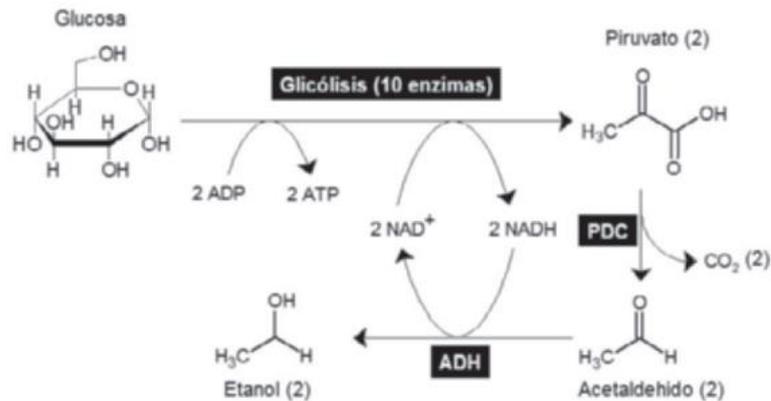
2.10 Biocombustibles

La bio-refinación es una tecnología sostenible donde podemos transformar biomasa en productos para su comercialización. Principalmente en esta biotecnología se usa enzimas microbianas para romper los enlaces de los polisacáridos a azúcares más simples como la glucosa.

Se están explorando diversas alternativas de combustibles de producción en gran escala, con el fin de obtener opciones renovables, en contraste con la gasolina convencional. Una de estas alternativas es el bioetanol, el cual se produce mediante síntesis bioquímica por parte de las levaduras. Este proceso implica la glucólisis y la regeneración anaeróbica de NAD^+ , dando como resultado la formación de bioetanol.

Figura 4

La glicólisis y la fermentación son las rutas metabólicas por las que se sintetiza etanol en la levadura del pan *Saccharomyces cerevisiae*



Nota: fuente (Teresa Zamora-Hernández, 2014)

Los biocombustibles se categorizan según el tipo de materia prima que se utiliza en su producción. Se consideran de primera generación aquellos que se obtienen a partir de polímeros simples como el almidón. En contraste, se conocen como biocombustibles de segunda generación aquellos que provienen de polímeros de carbohidratos más complejos, como la hemicelulosa y la celulosa. (México, 2010) Por otro lado, los biocombustibles de tercera generación se producen a partir de algas mediante diversos métodos, como la fotosíntesis, la absorción de nutrientes orgánicos y la combinación de ambos; todas estas algas siguen un proceso de crecimiento propio de su naturaleza. (Singh, Olsen, & P.S., 2011)

Tabla 7

Clasificación de biocombustibles por su generación con respecto a insumos alimentos, residuos orgánicos e insumos vegetales.

Generación	Materia prima	Producto	Ventaja	Desventaja
Primera	Insumos alimenticios (caña de azúcar, remolacha, granos de maíz).	Etanol, metanol, diésel y biogás.	Facilidad de procesamiento, baja emisión de GEI.	Desvío de recursos alimenticios hacia la producción de bioenergéticos
Segunda	Residuos agrícolas forestales (bagazo de caña, sorgo).	Etanol, metanol diésel e hidrogeno	No existe desviación de alimentos hacia bioenergéticas	Poca disminución de los GEI con respecto a la primera generación
Tercera	Insumos vegetales no alimenticios (algas, verdes, árboles)	Diésel y etanol	Utilización CO ₂ para la producción de insumos	Utilización de tierra de cultivo destinadas para sembrar insumos

Nota: fuente (Perales, 2015)

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1. Estudio de mercado

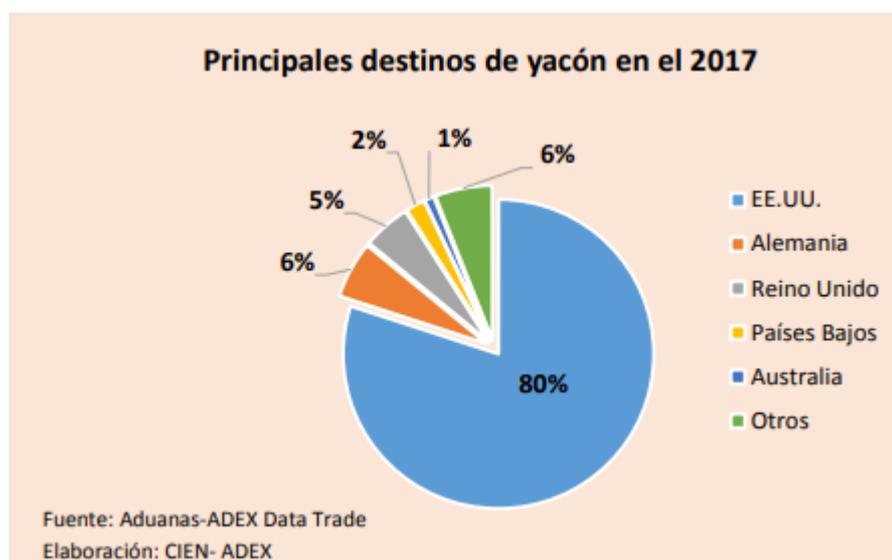
El yacón ha emergido como un artículo de exportación crucial para el Perú, tal como lo indican las cifras de la Asociación de exportadores (ADEX, que muestran que en 2017 las exportaciones alcanzaron la cifra de 1 millón 912 mil dólares, un 22% más que el año anterior.

Estados Unidos encabeza el mercado de importación con 1 millón 533 mil dólares, lo que representa el 80% del total, mientras que otros países como Alemania (\$ 104 mil 092), Reino Unido (\$ 100 mil 202), Países Bajos (\$ 34 mil 077), Australia, Bélgica, Japón y Austria completan el panorama.

Los productos principales incluyen harina, jarabe, extracto, jugo, concentrado, yacón fresco y orgánico.

Figura 5

Principales destinos de yacón

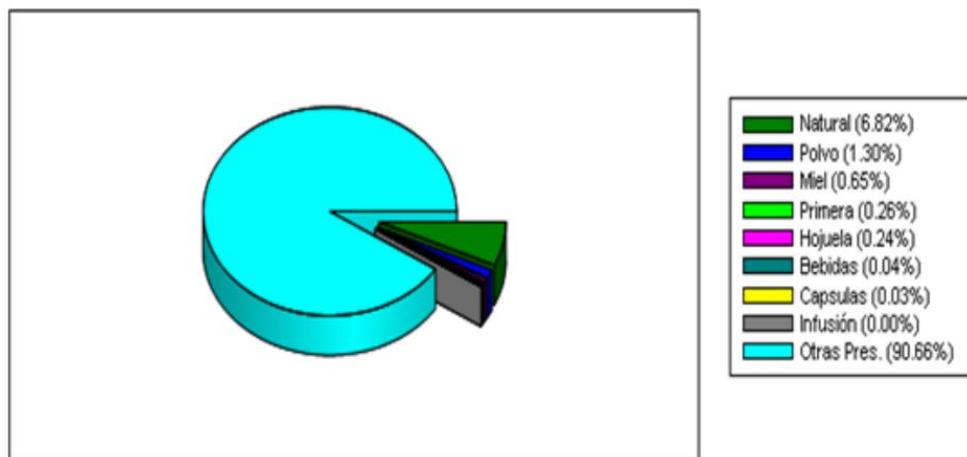


Nota: fuente ((ADEX), 2018)

A continuación, se presenta los principales productos de yacón que se exportan desde 2015 – 2020.

Figura 6

Exportaciones del producto yacón según sus principales presentaciones en el 2017



Nota: fuente (Turismo, s.f.)

Entre los países más representativos de producción de yacón tenemos y en el Perú las regiones que más destacan son Cajamarca y Pasco.

Tabla 8

Rendimiento promedio de yacón (Tn/Ha).

Localidad	Promedio (t/ha)
Los eucaliptos, Cajamarca, Perú	31
Santa Catalina, Quito, Ecuador	29
Baños del Inca, Cajamarca, Perú	39,5
Capão, San Paola, Brasil	100
Ahuabamba, Cusco, Perú	28
Oxapampa, Pasco, Perú	48
Hualqui, Cajamarca, Perú	39
Botucatu, San Paolo, Brasil	43
Ibaraki, Japón	49
Japón	40
Chanju, Corea	28

Nota: fuente (Seminario J, 2003)

En el Perú, se cultivan aproximadamente 600 hectáreas de yacón, con una producción promedio de alrededor de 185.5 toneladas por hectárea, lo que equivale a una producción total de 111,300 toneladas al año.

3.1.1 Demanda de etanol – combustible o etanol anhidro

De acuerdo al Instituto de Estudio de Comercio y Negociaciones Internacionales (ICONE), Brasil y Estados Unidos son los principales productores de etanol como combustible a nivel mundial. En Perú, no se produce este tipo de combustible, pero se implementó la Ley 28054, conocida como la Ley de Promoción de los Biocombustibles.

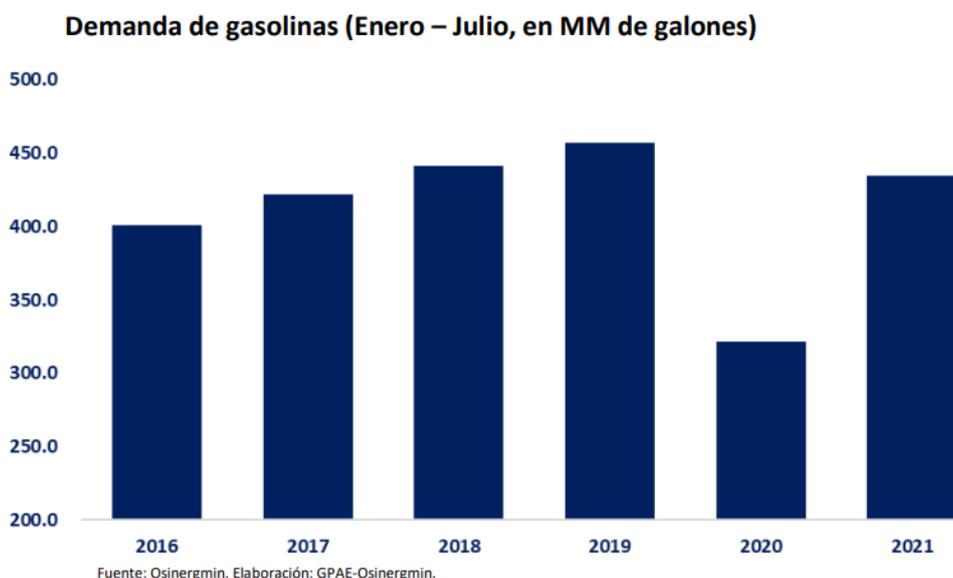
Los objetivos son:

- Diversificar la matriz energética
- Reducción de la contaminación ambiental
- Impulsar el desarrollo agroindustrial

Según el reglamento, a partir de 2010, el alcohol carburante que se comercializa en el país debe tener un contenido de alcohol del 7.8% y un 92.2% de gasolina.

Figura 7

Demanda de gasolinas



Nota: fuente (OSINERGMIN, 2021)

Entre 2016 y 2021, la demanda promedio fue de 406 MM de galones. Si asumimos que el 7.8% de esta demanda fue etanol anhidro, entonces se habría demandado 32 MM de galones al año.

3.2. Fase Experimental

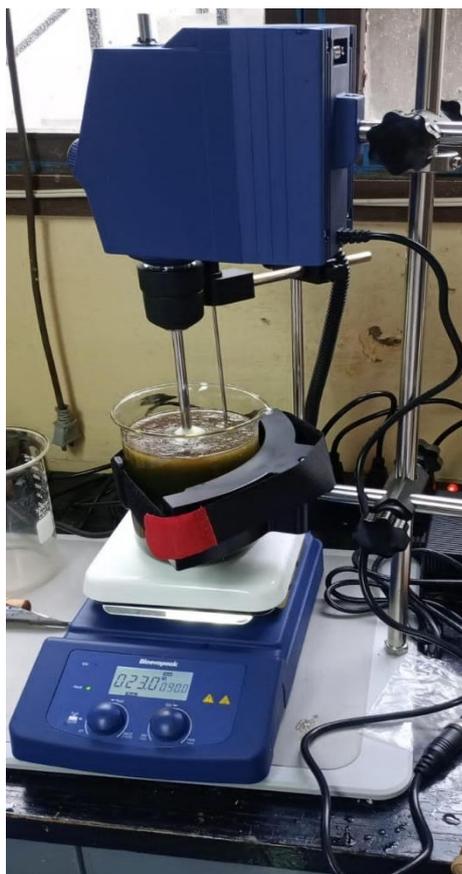
En este proyecto de investigación, nos enfocaremos en la producción de fructooligosacáridos (FOS) mediante síntesis, así como en la fermentación de carbohidratos con el fin de obtener bioetanol.

Materia prima

Las raíces de yacón están compuestas principalmente por fructooligosacáridos (FOS) y carbohidratos como glucosa, fructosa y sacarosa. En la etapa de laboratorio, se tomaron 400 gramos de materia prima. Después de lavarla para eliminar las impurezas adheridas a la cáscara, se trituró y licuó en una proporción de 1:1 con agua (400 ml), obteniendo una solución homogénea, como se presenta a continuación:

Figura 8

Solución licuada de yacón



Nota: elaboración propia

Hidrólisis enzimática

En esta fase se utiliza el α -amilasa y glucoamilasa.

Alfa amilasa

La alfa amilasa se encargará de hidrolizar enlaces glucosídicos proveniente de los fructanos (FOS), uno de los componentes principales en el yacón.

Para este proceso, se empleó la enzima Alpha-Amylase AHA-100T, obtenida del *Bacillus licheniformis*. Según la literatura consultada, esta enzima funciona de manera óptima en un rango de pH que va desde 5,0 hasta 8,0. La temperatura más adecuada para su funcionamiento se sitúa entre los 80°C y 100°C.

Glucamilasa

Las raíces de yacón contienen un 14% de glucosa, para la cual se empleó la Gluco-Amylase GA-260, obtenida mediante la extracción y el refinamiento de la *Aspergillus niger*. Esta enzima presenta una alta actividad enzimática y es capaz de convertir la glucosa eficientemente.

El rango de pH óptimo para su funcionamiento va desde 4,0 hasta 4,4, mientras que la temperatura ideal se sitúa entre los 55°C y 60°C. Es importante tener en cuenta si el líquido sacarificado se hierve a 80°C, la enzima se degradará por completo.

Levaduras

Utilizamos levadura seca activa súper alcohol, compuesta de cepas de levadura de alta calidad específicamente seleccionadas para la producción de alcohol y etanol combustible. Esta levadura se caracteriza por su rápida fermentación, capacidad de reproducción y alta tolerancia a concentraciones elevadas de etanol.

La levadura muestra una tolerancia al etanol de hasta un 23% (v/v), una temperatura óptima de fermentación entre 28°C y 42°C, un rango de pH tolerable de 3.5 a 5.5, y para el ciclo de fermentación por lotes, se necesitan entre 60 y 65 horas, mientras que para la fermentación continua se requieren de 55 a 60 horas.

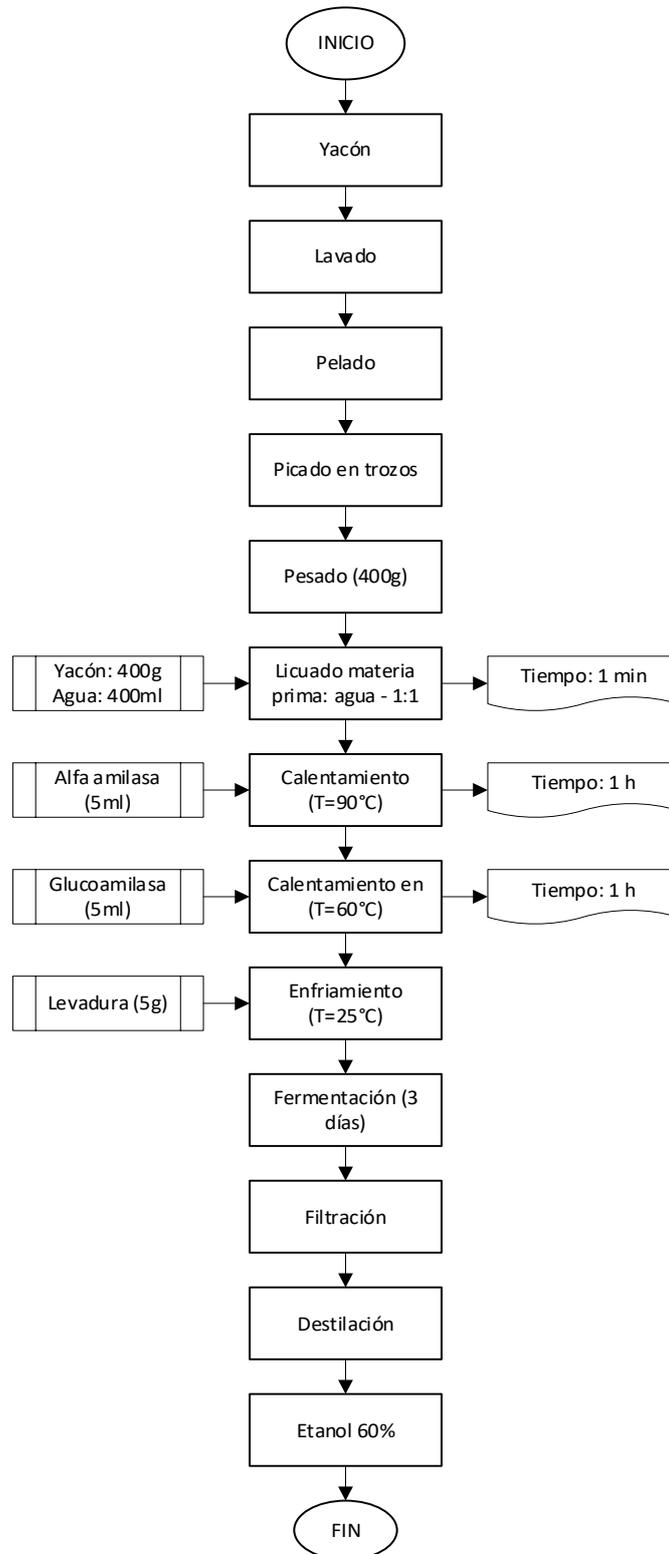
Procedimientos experimentales

En esta fase se presenta la hidrólisis enzimática de los fructanos, seguida de la fermentación para producir bioetanol.

- Diagrama de flujo de la parte experimental.

Figura 9

Diagrama de flujo de nuestra parte experimental



Nota: elaboración propia

- Pruebas de laboratorio y resultados obtenidos.

Se muestran en el anexo 1.

Tabla 9

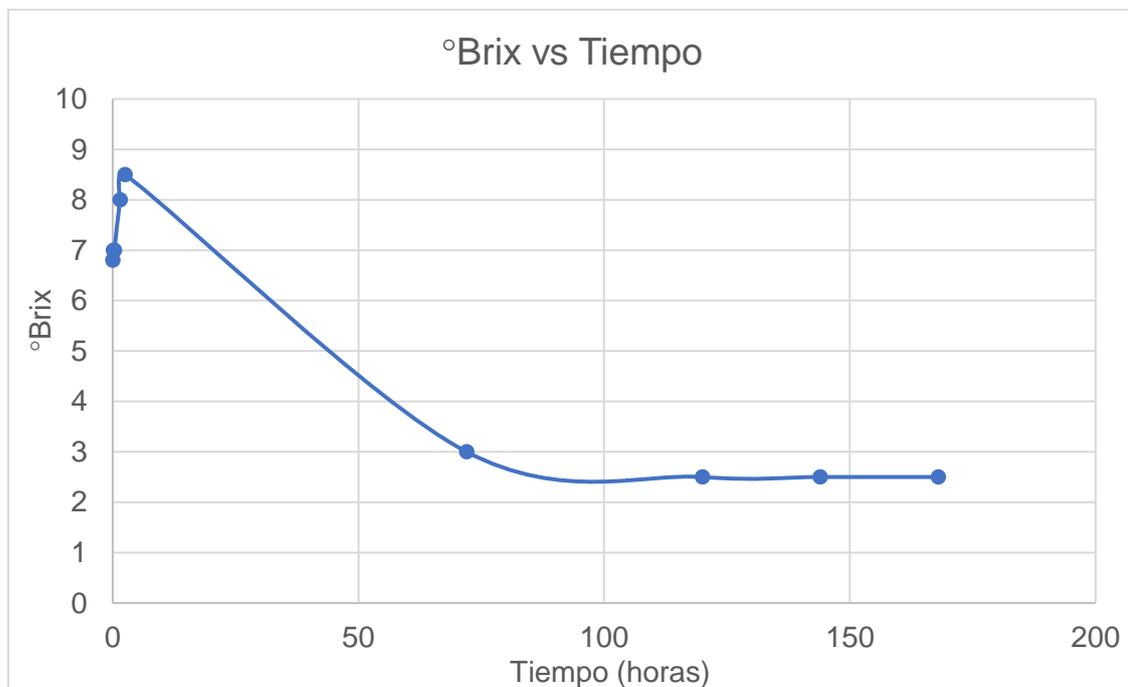
Datos de la prueba óptima obtenida

Tiempo (h)	°Brix
0	6,8
0,2	7
0,3	7
1,5	8
2,5	8,5
72	3
120	2,5
144	2,5
168	2,5

Nota: elaboración propia

Figura 10

Tiempo vs °Brix de la prueba óptima obtenida



Nota: elaboración propia

Sacarificación de los fructanos usando alfa amilasa y glucoamilasa

Esta etapa consiste en convertir los fructanos, que tienen enlaces glucosídicos, en glucosa y fructuosa para su posterior fermentación.

Las pruebas se llevaron a cabo en una plancha de calentamiento con agitación y control de temperatura mediante una termocupla, simulando así las condiciones de un reactor.

La primera enzima empleada fue la alfa amilasa que tiene una densidad de 1.15 g/ml.

Trabajamos con un pH de 6.26 a una temperatura de 90°C, y en una proporción enzima: materia prima de 1:80. La agitación se reguló a 200 rpm. El tiempo de reacción enzimática fue de una hora desde que se estableció la temperatura a 90°C.

También se llevó a cabo la medición de los grados Brix para evaluar los sólidos solubles, y se estableció un período de una hora, ya que los grados Brix alcanzaron un valor de 8 durante ese tiempo, con mediciones realizadas cada 10 minutos. La densidad medida fue de 1.03 g/ml.

La segunda enzima utilizada es la alfa amilasa para convertir la inulina a fructosa.

La glucoamilasa tiene una densidad de 1.2 g/ml. Se fijaron los parámetros operativos con un pH de 6.73, temperatura de 60°C y una velocidad de agitación de 200 rpm. Después de tomar las medidas, el tiempo de actividad enzimática fue de una hora, y el valor de los grados Brix alcanzó 8.5 después de una hora.

Figura 11

Procedimiento para realizar la reacción enzimática



Nota: elaboración propia

Fermentación de los monosacáridos formados en la sacarificación

Se mantuvo un pH de 6.46 al principio, luego se ajustó a 4.93 a partir del segundo día, con una densidad de 1 g/ml después de la filtración. La proporción de levadura a materia prima fue de 1:80, y se dejó fermentando durante 64 horas.

Debido a la presencia de muchos sólidos, se agregó una etapa de filtración al proceso. Después de 3 días de fermentación, se obtuvo bioetanol y CO₂.

Figura 12

Fermentación anaeróbica



Nota: elaboración propia

Destilación

En esta etapa, llevamos a cabo la destilación de 2000 ml de una solución filtrada con un contenido del 8.1% en volumen, a una temperatura que oscilaba entre 81.7°C y 87.6°C, durante un período de 2 horas, incluyendo el tiempo necesario para calentar la resistencia.

La columna utilizada tenía 13 platos, y el reflujo total se mantuvo durante 10 minutos a una temperatura que descendió de 83°C a 81.7°C. Al final del proceso, se obtuvieron 60 ml de destilado.

Para determinar el porcentaje de etanol en volumen, empleamos un refractómetro digital. La solución alimentada a la columna tenía un índice de refracción de 1.3349 (Nd), lo que equivalía al 8.1% v/v de etanol, mientras que el destilado presentaba un índice de refracción de 1.3494 (Nd), correspondiente al 57.8% v/v de etanol.

Se tomaron muestras cada 10 minutos durante un total de 2 horas, y la destilación concluyó cuando la densidad fue inferior a 0.8 g/ml.

Finalmente, determinamos el grado de alcohol del destilado mediante el índice de refracción.

Figura 13

Refractómetro digital utilizado



Nota: elaboración propia

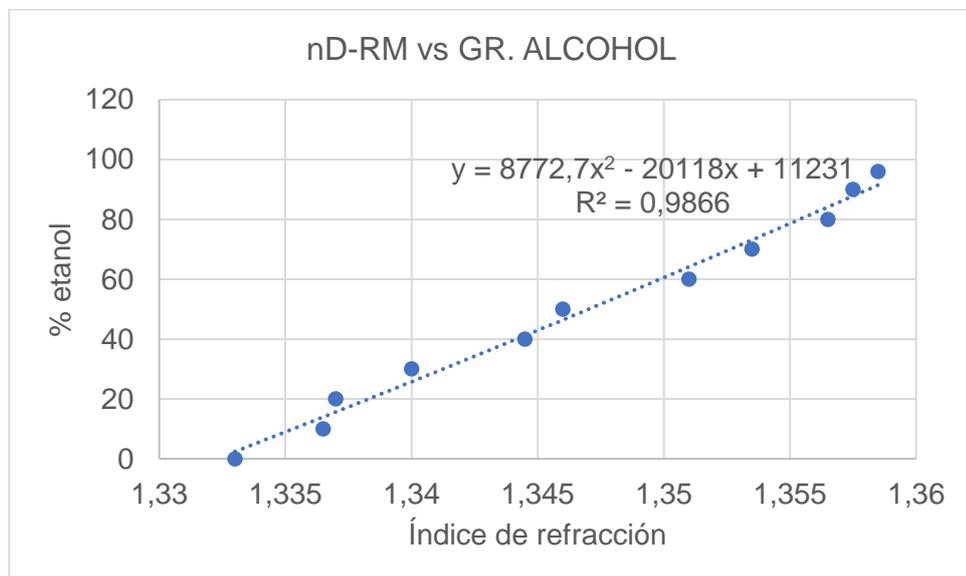
Índice de refracción del mosto (filtrado) = 1.3349

Índice de refracción del destilado = 1.3494

Se calibró y se obtuvo la siguiente gráfica:

Figura 14

Índice de refracción vs % etanol v/v



Nota: elaboración propia

Reemplazando:

% Etanol del mosto = 8.1 %

%Etanol del destilado = 57.8%

Figura 15

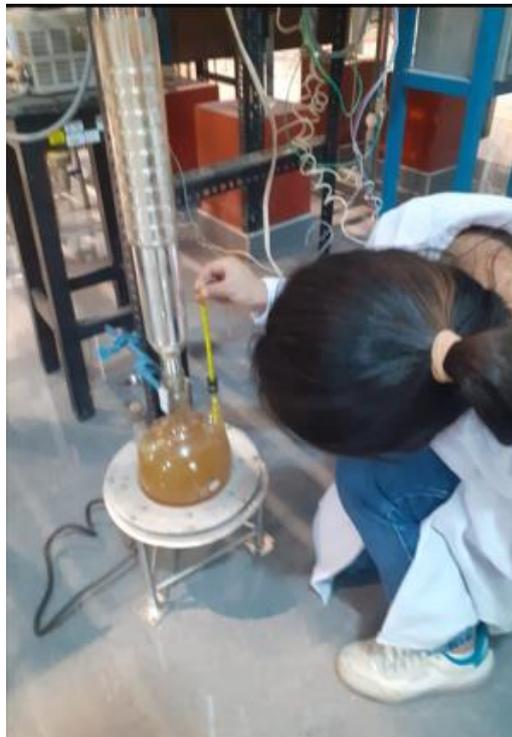
Columna de destilación utilizado



Nota: elaboración propia

Figura 16

Control de temperatura en la columna de destilación



Nota: elaboración propia

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Diseño de Planta

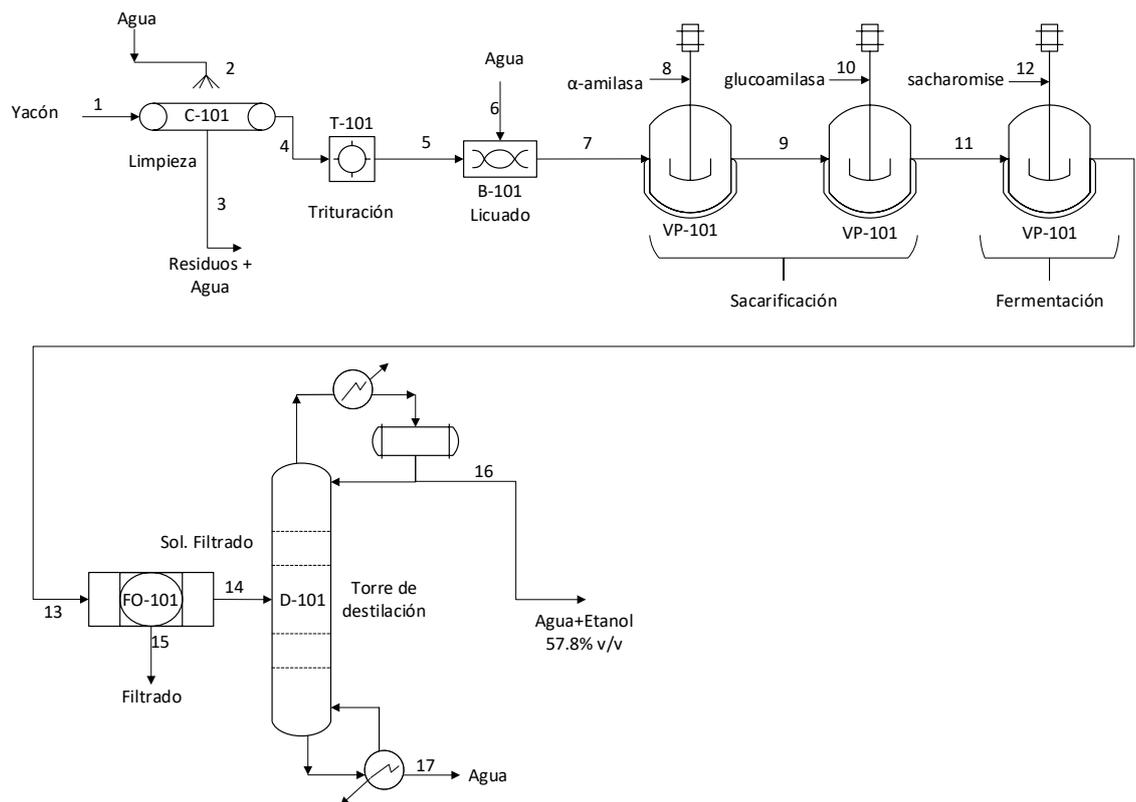
Según las diferentes presentaciones para la comercialización de yacón en Perú se estima que la producción anual es de 111300 toneladas. Se estima que el 4.5% de esta producción se convierte en residuos, lo que significa que nuestra planta procesará 15 toneladas al día.

Además, la planta opera durante 330 días al año, reservando un mes para labores de mantenimiento preventivo.

4.1.1 Diagrama de flujo de proceso de una planta de bioetanol proyectada.

Figura 17

Diagrama de flujo de proceso de una planta de bioetanol proyectada



Nota: elaboración propia

4.1.2 Balance de materia y energía

Figura 18

Balance de materia y energía

Etapa		Pretratamiento				Trituración		Licuado		Hidrólisis y sacarificación				Fermentación		Filtración		Destilación	
Equipo		Lavadora de alimentos				Trituradora		Licuadora		Reactor				Filtro		Columna de destilación			
Enumeración de corriente		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Nombre de corriente de entrada		Ingreso de fruto	Ingreso Agua	Agua residual	Fruto limpio	Fruto en trozos	Ingreso Agua	Salida de licuadora	Alimentación α -amilasa	Salida del reactor 1	Alimentación glucoamilasa	Salida del reactor 2	Alimentación sacharomise	Salida del reactor 3	Filtrado	Solución filtrada	Destilado (Etanol 56% v/v)	Solución Residual	
Flujo másico de entrada	tpd	15,0	2,99	2,99	14,95	14,95	14,95	29,59	0,22	29,81	0,21	30,03	0,19	30,21	2,52	27,69	1,80	25,89	
Temperatura	°C																		
Presión	mbar								1000		1000		1000						
Densidad aparente	ton/m ³		1				1		1,2		1,15				1		0,81		
Masa de vapor	tpd									1,58		0,76				1,72			
Masa de cooling water	tpd													0,83					
Entalpía de vaporización	kJ/kg									2362,5		2321,0		2400,5		2349,50			
Temperatura inicial	K									298,15		363,15		333,15		298,15			
Temperatura final	K									363,15		333,15		298,15		373,15			
Calor específico	J/kg.K									1931,5		1954,5		1893,0		1949,50			

Nota: elaboración propia

La cantidad de agua para lavar las raíces es de 20 % de la cantidad a tratar, se considera una densidad de 1ton/m³

$$\text{Agua para limpiar} = 20\% * 15 = 3 \text{ tpd}$$

Para licuar la materia se usa una proporción 1:1 de agua.

$$\text{Agua para licuar} = 15 \text{ tpd}$$

La cantidad de alfa amilasa utilizada es de 5ml cada 400 g de yacón.

$$\text{Cantidad de alfa amilasa} = \frac{15 \text{ ton} * 5 \text{ ml}}{400 \text{ g}} * 1.2 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} * \frac{10^{-3} \text{ L}}{1 \text{ ml}} * \frac{1 \text{ m}^3}{10^3 \text{ L}} * \frac{10^6 \text{ g}}{1 \text{ ton}} = 0.22 \text{ tpd}$$

La cantidad de alfa amilasa utilizada es de 5ml cada 400 g de yacón.

$$\text{Cantidad de alfa amilasa} = \frac{15 \text{ ton} * 5 \text{ ml}}{400 \text{ g}} * 1.15 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} * \frac{10^{-3} \text{ L}}{1 \text{ ml}} * \frac{1 \text{ m}^3}{10^3 \text{ L}} * \frac{10^6 \text{ g}}{1 \text{ ton}} = 0.21 \text{ tpd}$$

La levadura de sacharomise también se usó en una cantidad de 5g cada 400 g de yacón.

$$\text{Cantidad de levadura} = \frac{15 \text{ ton} * 5 \text{ g}}{400 \text{ g}} = 0.19 \text{ tpd}$$

En la filtración se obtiene 91.65% de mosto de yacón entrante.

$$\text{mosto de yacón} = 91.65\% * 30.21 = 27.69 \text{ tpd}$$

El porcentaje en volumen de alcohol del mosto de yacón fue de 8%.

$$\text{destilado (etanol 57.8\%)} = 8\% * 0.8148 * 27.69 = 1.8 \text{ tpd}$$

El porcentaje en volumen de alcohol del mosto de yacón fue de 57.8%.

$$\text{destilado (etanol 96\%)} = 57.81\% * 0.8148 * 2.21 = 0.33 \text{ tpd}$$

Cálculo de combustible

Reactor

Primera fase

Para iniciar la reacción enzimática, es necesario elevar la temperatura de 25°C a 90°C.

Los datos son obtenidos de la tabla A-9 de (Yunus A. Cengel, 2012) y se sustituyeron en la fórmula siguiente.

$$M_{vap} * \lambda_{vap} = m * C_p * \Delta T$$

$$\lambda_{vap} = \frac{29.81 \text{ ton} * \left(\frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}}\right) * 1931.50 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * (363.15 \text{ K} - 298.15 \text{ K})}{2362.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 1.58 \text{ ton}$$

4.1.3 Diseño de los principales equipos

Equipos de proceso (Capacidad de la Planta: 15 tpd de Ilacón)

- Lavadora industrial de alimentos

Tiene como función lavar los deshechos como tierra o piedrecillas adheridas a la superficie del fruto, evitando así que afecten nuestro proceso al obstruir alguna tubería.

Tabla 10*Ficha técnica de lavadora industrial*

FICHA TÉCNICA DE EQUIPOS		
LAVADORA INDUSTRIAL DE ALIMENTOS		
Realizado por: Katlyn Rojas Valqui	Fecha: 28 de noviembre de 2023	Versión: 1
DESCRIPCIÓN FÍSICA:	Es de acero inoxidable SUS304, la base tiene 1,4 m de largo con 0,95 m de ancho y 1 m de altura	
NOMBRE	LAVADORA INDUSTRIAL DE ALIMENTOS	
MARCA	GRT	
MODELO	GRT - 800	
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Materiales: Acero inoxidable SUS304 Altura: 1 m Largo: 1,4 m Ancho: 0,95 m Potencia: 1,1 kw Longitud del rodillo: 800 mm Capacidad (kg/h) : 800 Presión: 1 atm Temperatura: 323,15 K		
INSTRUCCIONES DE USO		
<ul style="list-style-type: none"> - Realizar limpieza antes de usar - Verificación que el equipo este en buenas condiciones de trabajo - Controlar variables de flujo 		
FUNCIÓN		
<ul style="list-style-type: none"> - Lavar los desechos externos adheridos al fruto 		
MANTENIMIENTO		
<ul style="list-style-type: none"> - Inspección de válvulas de entrada y salida - Inspección del rodillo - Supervisión del PLC 		
CONTROL DURANTE LA OPERACIÓN		
<ul style="list-style-type: none"> - Control de la velocidad de burbujeo 		

Nota: adaptado de https://spanish.alibaba.com/p-detail/High-1600449493803.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.39564cb6VjMEK5&s=p

- Trituradora industrial de alimentos

Tiene como función principal la conminución del fruto.

Tabla 11*Ficha técnica de trituradora industrial de alimentos*

FICHA TÉCNICA DE EQUIPOS		
TRITURADORA INDUSTRIAL DE ALIMENTOS		
Realizado por: Katlyn Rojas Valqui	Fecha: 28 de noviembre de 2023	Versión: 1
DESCRIPCIÓN FÍSICA:	Es de acero inoxidable SUS304, la base tiene 0,9 m de largo con 0,8 m de ancho y 1 ,55 m de altura	
NOMBRE	TRITURADORA INDUSTRIAL DE ALIMENTOS	
MARCA	Jieshun	
MODELO	40B	
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Materiales: Acero inoxidable SUS304 Altura: 1 ,55 m Largo: 0,9 m Ancho: 0,8 m Potencia: 11 kw Velocidad del husillo (R/min): 3400 Presión: 1 atm Temperatura: 323,15 K		
INSTRUCCIONES DE USO		
<ul style="list-style-type: none"> - Realizar limpieza antes de usar - Verificación que el equipo este en buenas condiciones de trabajo - Controlar variables de flujo 		
FUNCIÓN		
<ul style="list-style-type: none"> - Conminución del fruto 		
MANTENIMIENTO		
<ul style="list-style-type: none"> - Inspección de placa de cuchilla trituradora (cortador) - Inspección del usillo - Supervisión del PLC 		
CONTROL DURANTE LA OPERACIÓN		
<ul style="list-style-type: none"> - Control de la velocidad del usillo 		
<p><i>Nota:</i> adaptado de https://spanish.alibaba.com/p-detail/Potato-1600831668475.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.13906af9Dc7N0O&s=p</p>		

- Licuadora industrial de alimentos

Se utiliza este equipo para asegurar que la biomasa a tratar esté uniformemente mezclada, y se combina en una proporción de 1:1 con agua.

Tabla 12*Ficha técnica de licuadora industrial de alimentos*

FICHA TÉCNICA DE EQUIPOS		
LICUADORA INDUSTRIAL DE ALIMENTOS		
Realizado por: Katlyn Rojas Valqui	Fecha: 28 de noviembre de 2023	Versión: 1
DESCRIPCIÓN FÍSICA:	Es de acero inoxidable SUS304, la base tiene 2,5 m de largo con 0,9 m de ancho y 1,26 m de altura	
NOMBRE	LICUADORA INDUSTRIAL DE ALIMENTOS	
MARCA	Liansu-Mconvey	
MODELO	LSGB-1200-4R1	
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Materiales: Acero inoxidable SUS304 Altura: 1,26 m Largo: 0,9 m Ancho: 2,5 m Potencia: 1,1 kw Capacidad (kg/h) : 1500 Aire comprimido: 4 - 6 bar Temperatura: 323,15 K		
INSTRUCCIONES DE USO		
<ul style="list-style-type: none"> - Realizar limpieza antes de usar - Verificación que el equipo este en buenas condiciones de trabajo - Controlar variables de tiempo 		
FUNCIÓN		
<ul style="list-style-type: none"> - Homogenización de la pulpa 		
MANTENIMIENTO		
<ul style="list-style-type: none"> - Verificación del aire comprimido - Inspección de buen estado de las tolvas - Supervisión del PLC 		
CONTROL DURANTE LA OPERACIÓN		
<ul style="list-style-type: none"> - Control del tiempo 		

Nota: adaptado de https://spanish.alibaba.com/p-detail/CE-1600567608175.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_title.3ded2ba3Prf3J3&s=p

- Reactor cinético

En este reactor se llevan a cabo las reacciones químicas de sacarificación e hidrólisis enzimática, así como la fermentación. Se opera a diferentes temperaturas: primero a 90°C, luego a 60°C y finalmente a 25°C. Está diseñado para tener un tiempo de residencia de 140 horas.

Según el balance de masa, en la etapa de fermentación se obtiene el mayor

volumen, que es de 30.15 toneladas por día.

El reactor tiene dimensiones de diámetro y altura iguales, siendo la altura exacta desconocida.

$$\frac{H^3 * \pi}{4} = \frac{30.14 \text{ tn}}{\rho_{\text{fermentación}}}$$

$$\frac{H^3 * \pi}{4} = \frac{30.14 \text{ tn}}{\frac{1.03 \text{ g}}{\text{ml}}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ tn}} * \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}$$

$$H = 3.34 \text{ m}$$

Se establece un margen de seguridad del 15% con respecto a la altura. Por lo tanto, la altura del reactor (H') es un 15% mayor que el valor de H.

$$H' = 1.15 * 3.34 = 3.84 \text{ m}$$

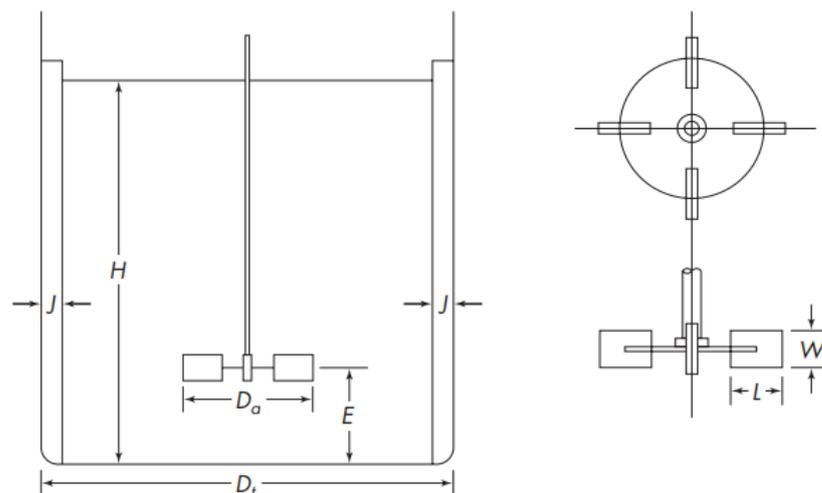
En un diseño estándar de agitador de turbina, las relaciones típicas son:

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{H}{D_t} = 1 \quad \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

Figura 19

Mediciones de turbina



Nota: fuente (Rushton, 1950)

Reemplazando el valor de H en las relaciones anteriores, tenemos los siguientes valores:

$$Dt = 3.34 \text{ m} \quad Da = 1.11 \text{ m} \quad J = 0.28 \text{ m}$$

$$E = 1.11 \text{ m} \quad W = 0.22 \text{ m} \quad L = 0.28 \text{ m}$$

El fluido dentro del reactor con agitador tiene una densidad de 998 kg/m³, viscosidad 1.002x10⁻³ N.s/m². Estos valores fueron extraídos de (Yunus A. Cengel, 2012) de la tabla A-9 del apéndice 1, para una temperatura de 20°C. La turbina gira a una velocidad de 40 rpm.

El número de Reynolds se calcula de la siguiente manera:

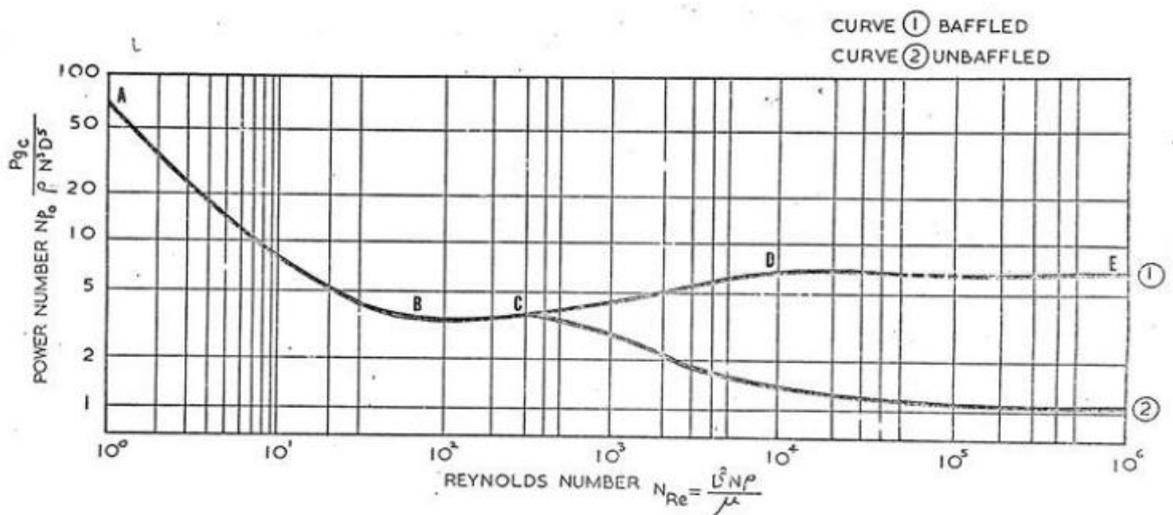
$$Re = \frac{Da^2 n \rho}{\mu}$$

Reemplazados los valores, obtenemos un número de Reynolds de 818120.

Para calcular la potencia, se determinó el número de potencia (NPo) utilizando la siguiente gráfica:

Figura 20

Correlación número de potencia/número de Reynolds para el diseño de un tanque estándar.



Nota: fuente (Hamit Topuz, 2017)

Reemplazando en:

$$Np = \frac{P}{\rho * n^3 * Da^5}$$

De la gráfica tenemos $N_p=7.3$

Calculando $P=3.7$ kW

- Filtro

Para llevar a cabo la destilación, es necesario que el mosto esté libre de sólidos, por lo que se realiza un proceso de filtrado.

Tabla 13

Ficha técnica de filtro prensa de placa y marco

FICHA TÉCNICA DE EQUIPOS		
FILTRO PRENSA DE PLACA Y MARCO		
Realizado por: Katlyn Rojas Valqui	Fecha: 28 de noviembre de 2023	Versión: 1
DESCRIPCIÓN FÍSICA:	Es de acero inoxidable SUS304, la base tiene 4,11 m de largo con 1,4 m de ancho y 1,23 m de altura	
NOMBRE	PRENSA DE FILTRO DE PLACA Y MARCO	
MARCA	Liansu-Mconvey	
MODELO	GR50-80	
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS		
Materiales: Acero inoxidable SUS304		
Altura: 4,11 m		
Largo: 1,4 m		
Ancho: 1,23 m		
Potencia: 15 kw		
Capacidad (kg/h) : 1600		
Área de filtro: 50 m ²		
Presión: 1 atm		
Temperatura: 323,15 K		
INSTRUCCIONES DE USO		
- Realizar limpieza antes de usar		
- Verificación que el equipo este en buenas condiciones de trabajo		
- Controlar variables de flujo		
FUNCIÓN		
- Filtrar el mosto		
MANTENIMIENTO		
- Inspección de buen estado de telas de filtro		
- Inspección de buen estado de los marcos		
- Supervisión del PLC		
CONTROL DURANTE LA OPERACIÓN		
- Control del flujo		

Nota: adaptado de [Prensa De Filtro De Cámara Con Placa De Tracción Automática - Buy Plate And Frame Filter Press,Small Filter Press,Mobile Filter Filter Press Product on Alibaba.com](#)

- Columna de destilación

La tarea principal de este equipo es producir bioetanol a partir de la solución fermentada, utilizando un conjunto de 10 platos.

4.1.4 Análisis económico

Estados financieros y proyectados

- La inversión de capital total

Es la suma del capital fijo y el capital de trabajo

- Inversión de capital fijo

Representa el capital necesario para el equipo de procesamiento instalado con todos los auxiliares necesarios para la operación completa de la Planta. Se subdivide en dos categorías: capital de fabricación (activo fijo) y capital no manufacturero (intangibles).

- Capital de Trabajo

Este capital se refiere a la cantidad de recursos financieros requeridos para iniciar la operación de la planta, y se determina mediante el siguiente cálculo:

$$\text{Capital de trabajo} = \text{Activo circulante} - \text{Pasivo circulante}$$

Tabla 14

Distribución de la Inversión de Capital Total

			Valor típico	
Inversión de capital fijo	Activo Fijo (costos Directos)	Equipos y maquinarias	Todos los equipos enumerados en el diagrama de flujo completo, repuestos, costos de inflación permitido, gastos de flete, impuestos, seguros, aranceles.	23
		Instalación de equipos	Soportes estructurales, aislamientos, pintura.	10
		Instrumentación y control	Compra, instalación, calibración, conexión de PC, computadoras.	3
		Tuberías y accesorios	Tuberías de proceso, perchas, accesorios y válvulas.	8
		Equipos y materiales eléctricos	Equipos eléctricos, interruptores, motores, conductores, cables, accesorios, alimentadores, conexión a tierra.	3
		Edificios y estructuras	Estructuras, plataformas, soportes, escaleras, vías, monocarriles, montacargas, elevadores.	6
		Delimitaciones	Pistas, veredas, áreas de estacionamiento, cerco perimétrico, etc.	3
		Instalaciones de servicio	Servicios públicos, vapor, agua, energía, refrigeración, aire comprimido, combustible, eliminación de residuos.	13
		Terreno	Costo del espacio donde se ubica la planta.	1
		Inversión de capital Total	Intangibles (costos Indirectos)	Ingeniería y supervisión
Gastos de construcción	Construcción, operación y mantenimiento de instalaciones temporales, oficinas, carreteras, estacionamientos, electricidad, tuberías, comunicaciones.			9
Utilidades o honorarios del contratista	Pagos al contratista.			4
Contingencias	Gasto ante cualquier eventualidad no programada.			9
Caja banco				
Capital de trabajo	Activo circulante	Caja mínima		
		Caja para compras		
		Inventarios	Materia prima, materiales, productos terminados, productos en proceso.	
	Pasivo circulante	Cuentas por cobrar		
		Pagos adelantados		
		Cuentas por pagar		
		Cobros adelantados		

Nota: adaptado de (Sosa)

- Estados de ganancias y pérdidas

El proyecto tendrá una vida de 10 años, durante el cual los ingresos serán generados principalmente por las ventas. Los egresos están compuestos por los costos de producción y operativos. Se aplicará un método de depreciación lineal para calcular la depreciación de los equipos a lo largo de su vida útil. Es importante destacar que el proyecto generará utilidades operativas desde el primer año.

- Flujo de caja

El flujo de caja refleja los movimientos de efectivo que ingresan y salen, desarrollados según los resultados financieros y las inversiones. En la evaluación económica, observamos resultados positivos, mientras que, en la evaluación financiera, los saldos positivos se alcanzan a partir del cuarto año.

- Balance general proyectado

Tabla 15

Balance general proyectado

Activo	Pasivo
Caja Banco	Pasivo a Corto Plazo
Inventario de Materia Prima	Cuentas por pagar
Inventario de Materiales	Cobros adelantados
Inventario de productos en proceso	Pago anual de la deuda
Inventario de productos terminados	Dividendos
Cuentas por cobrar	Pasivo a largo plazo
Pagos por adelantado	Deuda
Activo fijo e intangible Neto = Valor del año anterior - Depreciación	Patrimonio
	Capital social
	Utilidades retenidas o pérdidas acumuladas
	Reserva Legal Acumulada
	Ganancia o pérdidas por Inflación acumuladas
Total Activo	Total Pasivo

Nota: fuente (Sosa)

- Evaluación económica

Este paso implica calcular la rentabilidad de la inversión total del proyecto excluyendo los gastos financieros, como los intereses.

- Beneficios

Se tiene en cuenta el ingreso generado por las ventas.

- Costos

Costos relacionados con la inversión y los costos asociados al proceso (costos de operación y de materia prima).

Tabla 16

Distribución de costos de producción y gastos generales

Costos de Producción/ Manufactura	Costos directos	Materia prima	
		Mano de obra directa	
		Supervisión	
		Servicios (vapor, electricidad, agua, combustible, etc.)	
		Mantenimiento	
		Cargas operativas	
		Laboratorio	
	Cargos fijos	Productos químicos (solventes, catalizadores, etc.)	
		Depreciación	
		Impuesto a la propiedad (activos)	
		Cargos de superintendencia	Seguros
			Seguridad y protección
			Costos de servicio médico
			Salario del gerente
Empaque			
Servicio de cafetería			
Almacenamiento			
Gastos Generales	Gastos administrativos	Gastos de superintendencia	
		Laboratorio de control final	
		Salario de ejecutivos	
		Salario de empleados	
		Gastos legales y de ingeniería	
	Oficina de mantenimiento		
	Oficina de informática		
	Comunicaciones		
	Gastos de ventas y distribución	Oficina de ventas	
		Gastos de vendedores	
Publicidad			
Investigación y desarrollo			
Gastos Financieros	Servicio técnico de ventas		

Nota: adaptado de (Sosa)

- Rentabilidad económica

Se calcula mediante la diferencia entre el beneficio y el costo año tras año. Tanto los costos como los beneficios se actualizan al año cero a diferentes tasas de descuento, lo que nos proporciona los valores actuales netos económicos (VAN).

- Evaluación financiera

La evaluación financiera determina la rentabilidad de la inversión realizada mediante recursos propios y financieros, o únicamente financieros. Para calcular el flujo financiero se suma el flujo económico más los gastos financieros.

Se calculan el VAN y la TIR, y se considera rentable si el costo de oportunidad de capital (COC) es menor al TIR.

Asimismo, se ha determinado que la tasa interna de retorno económica (TIR) es del 72%, lo que se considera aceptable ya que el costo de oportunidad de capital (COC) para el sector es de aproximadamente 10%.

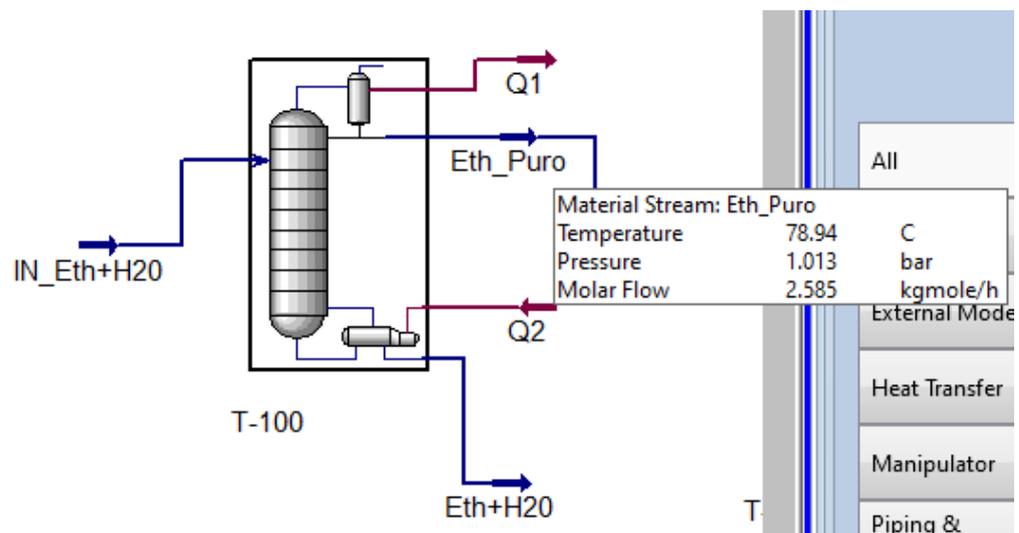
A esta tasa, el VAN es positivo y asciende a \$1,288,601.

- Costos de los equipos principales

Determinación del costo de la columna de destilación.

Figura 21

Simulación de la columna de destilación



Nota: obtenida del simulador Aspen HYSYS V-11

Determinamos el precio de la columna de destilación en Aspen HYSYS V11.

Figura 22

Resumen económico del costo de la columna de destilación dado por Aspen Process Economic Analyzer APEA

The screenshot shows the 'Economic Equipment Data' window in Aspen HYSYS V11. At the top, it displays 'Capital: 2,603,300 USD' and 'Utilities: 91,236 USD/Year' with a green checkmark and a toggle switch. Below this, there's a section 'Enabled by Aspen Process Economic Analyzer (APEA)'. The window has tabs for 'Summary', 'Utilities', 'Unit operation', 'Equipment', and 'Quote', with 'Summary' selected. The summary table is as follows:

Total Capital Cost [USD]	2,603,300
Total Operating Cost [USD/Year]	1,020,730
Total Raw Materials Cost [USD/Year]	0
Total Product Sales [USD/Year]	0
Total Utilities Cost [USD/Year]	91,235.9
Desired Rate of Return [Percent/Year]	20
P.O.Period [Year]	0
Equipment Cost [USD]	82,700
Total Installed Cost [USD]	453,600

Nota: obtenida del simulador Aspen HYSYS V-11 en la opción Aspen Process Economic Analyzer (APEA)

Determinación del precio del reactor

Tabla 17

Dimensiones del reactor

Parámetro	Longitud	
Diámetro	3,34	m
Altura	3,84	m
Espesor	0,01	m
Altura del cono	0,15	m

Nota: elaboración propia

Empleamos la siguiente fórmula:

$$C_e = a + bS^n$$

donde C_e

= costo de compra del equipo según la costa del Golfo de EE.UU, enero 2010 (CEPCI

= 532.9, NF inflación del índice de refinería = 2281.6)

a, b = costos constantes

S = tamaño de parámetro

n = exponente para cada tipo de equipo

Tabla 18

Parámetros para tipos de equipo y determinar su precio

Equipment	Units for Size, S	Slower	Supper	a	b	n	
Compresor	Centrifugal	driver power, Kw	75	30000	580000	20000	0,6
	Reciprocating	driver power, Kw	93	16800	260000	2700	0,75
Pressure vessels	Vertical 304	shell mass, kg	120	250000	17400	79	0,85
	Horizontal 304	shell mass, kg	120	50000	12800	73	0,85
Platos Perforados	diametro, m	0,5	5	130	440	1,8	
Intercambiador de calor	Área, m ²	10	1000	28000	54	1,2	
Horno	duty, MW	30	120	43000	111000	0,8	
Bomba	flujo, L/s	0,2	126	8000	240	0,9	

Nota: Fuente (Gavin Towler, 2013)

Dado la tabla anterior, tenemos los siguientes datos:

Tabla 19

Parámetros para determinar el precio del reactor

Parámetros	Valor	Dimensión
a	17400,00	
b	79	
n	0,85	
Volumen	0,578	m ³
Densidad	7930	kg/m ³
S	4585	kg

Nota: elaboración propia

Reemplazando en la fórmula anterior, tenemos:

Costo del reactor = US\$ 119670.42

Tabla 20*Costo total de los equipos*

Equipo	Cantidades	Precio (US\$)
Lavadora	1	3800,00
Trituradora	1	1300,00
Licuadora	1	13500,00
Reactor	1	119670,42
Filtro prensa	1	2641,15
Columna de destilación	1	82700,00
	Total	223611,57

Nota: elaboración propia

- Actualización de costos

La actualización de costos se realizará desde enero de 1990 (datos obtenidos de la tabla N°5 de (Engineers, 1991)) hasta el año 2023, los índices económicos fueron tomados de (Chemengonline, 2023) .

$$\frac{\text{Costo Agua}_{2023}}{\text{Costo Agua}_{\text{Enero } 1990}} = \frac{IND_{2023}}{IND_{\text{Enero } 1990}} = \frac{598.3}{354.7}$$

$$\text{Costo Agua}_{2023} = 0.41 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3}$$

$$\frac{\text{Costo Combustible (vapor de agua)}_{2023}}{\text{Costo Combustible (vapor de agua)}_{\text{Enero } 1990}} = \frac{IND_{2023}}{IND_{\text{Enero } 1990}} = \frac{598.3}{354.7}$$

$$\text{Costo Combustible (vapor de agua)}_{2023} = 7.93 \frac{\text{US\$}}{\text{t}}$$

$$\frac{\text{Costo Energía eléctrica}_{2023}}{\text{Costo Energía eléctrica}_{\text{Enero } 1990}} = \frac{IND_{2023}}{IND_{\text{Enero } 1990}} = \frac{598.3}{354.7}$$

$$\text{Costo Energía eléctrica}_{2023} = 0.07 \frac{\text{US\$}}{\text{kWh}}$$

Conclusiones

- Se realizó la medición de los grados Brix inicial de la materia prima, el resultado fue de 6.8, con la enzima α -amilasa obtuvimos 8 °Brix y con la glucoamilasa alcanzamos hasta 8.5 °Brix, finalmente para la etapa de fermentación con la levadura *saccharomyces cerevisiae* descendió a 2.5 °Brix.
- El bioetanol obtenido tiene 57.8% v/v de alcohol.
- Desde el punto de vista económico:
- El proyecto es rentable financieramente, con una tasa interna de retorno (TIR) del 72%.
- La instalación de una planta industrial es viable, lo que genera oportunidades de empleo y aprovechamiento de los residuos de yacón.
- El bioetanol producido puede diluirse y comercializarse como una bebida alcohólica con un volumen de alcohol del 40% o 60%.

Recomendaciones

- Para obtener el bioetanol como producto final es recomendable la realización de una destilación fraccionada, o el uso de dos destiladores en serie para llegar a etanol de 96°. Posteriormente, se puede llevar a cabo la deshidratación utilizando tamices moleculares.
- Es importante considerar las condiciones de temperatura y humedad en las que se almacenarán los residuos de yacón, ya que estas condiciones afectan directamente a sus propiedades fisicoquímicas.
- Se recomienda realizar investigaciones para explorar la posibilidad de reutilizar los subproductos generados durante el proceso, como los residuos de filtración y destilación.
- Se propone el uso de la enzima fructanohidrolasa para convertir los fructanos en fructooligosacáridos (FOS), lo que aumentaría la concentración de azúcares fermentables disponibles para la producción de bioetanol.

Referencias bibliográficas

(s.f.).

(ADEX), A. d. (2018). ADEX - boletín semanal. *Perú Exporta*, 5.

Arturo Ricardo Alejos Yamamoto, Z. F. (2021). *Producción y comercialización de jarabe de yacón y semillas de chía "yacón bio"*. Lima.

Bansal, P., Hall, M., J.Realff, M., H.Lee, J., & S.Bommarius, A. (2009). *Modeling cellulase kinetics on lignocellulosic substrates*. New York-USA: School of Chemical and Biomolecular Engineering, Georgia Institute of Technology.

Cao, Y. T. (2011). *Simultaneous saccharification and fermentation of sweet potato powder for the production of ethanol under conditions of very high gravity*. *Front. Chem. Sci. Eng.*

Chemengonline. (2023). Chemical Engineering: Cost estimating: Location factors. *Chemengonline*, 22.

COES, P. (14 de Septiembre de 2022). COES. Obtenido de <https://www.coes.org.pe/portal/>

Dhiman, S., Sharma, J., & Battan, B. (2008). Dhiman, S., Sharma, J., BIndustrial application and future prospects of microbial xylanases. *EISiever*.

Dies, G., & Henrissat, B. (1995). *Structures and mechanisms of glycosyl hydrolases*. Current Biology Ltd ISSN 0969-2126.

Engineers, P. D. (1991). *Max S. Peters, Klaus D. Timmerhaus*. New York: McGraw-Hill, Inc.

Escalante, J., & Fuentes, H. (2013). Estudio experimental de obtención de bioetanol a partir de residuos agrícolas de banano orgánico en Piura., (págs. 31-140). Piura.

Ferrari, M. D., Guigou, M., & Lareo, C. (2013). *Energy consumption evaluation of fuel bioethanol production from sweet potato*. Montevideo-Uruguay: SciVerse ScienceDirect.

Gavin Towler, R. S. (2013). *Chemical Engineering Design - Principle, Practice and Economics of Plant and Process Design*. Oxford, UK: Elsevier.

H., W. (2002). *Jpn. Kokai Tokkyo Koho Patente nº JP2002101859*.

Hajian, H. y. (1984). *Tecnología Química Moderna*. Barcelona, España: Editorial Reverté.

Hamit Topuz, W. W. (2017). Power number correlation agitated immiscible liquid systems. *International Journal of Current Advanced Research*, 5002.

Han K, P. J. (2007). *Rep. Korean Kongkae Taeho Kongbo Patente nº KR 2007053429*.

Henrissat, B. (1991). A classification of glycosyl hydrolases based on amino acid sequence similarities. *The Biochemical Journal*.

Hermann, M., Freire, I., & Pazos, C. (1999). *Compositional diversity of the yacón storage root*. Lima: Impact on changing world: Program report 1997-1998. Centro Internacional de la Papa (CIP).

- J. Santillana, J. S. (2017). *Etanol combustible en el Perú*.
- Jr, J. V., Contesini, F. J., Calzado, F., Rubio, M. V., Zubieta, M. P., Lopes, D. B., & Melo, R. R. (2017). *Agro-Industrial Residues and Microbial Enzymes: An Overview on the Eco-Friendly Bioconversion into High Value-Added Products*. Campinas, São Paulo, Brazil: Elsevier Inc.
- Lareo, C. F.-G. (2013). *Evaluation of sweet potato for fuel bioethanol production: hydrolysis and fermentation*. Springer Plus.
- Lin, G., Houfang, S., & Qian, X. (2007). Complex scheduling strategy for dynamic environment in digitalization-production shop. *School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology*, 1-5.
- M.E, H. (2012). *Biomass conversion: Methods and protocols*. Methods Mol. Biol.
- M.J., C., A., C., & S, I. (2014). *Conversion of biomass platform molecules into fuel additives and liquid hydrocarbon fuels*. Green Chem .
- María Paula Calle, A. C. (2012). *Yacón en Jujuy. Un alimento ancestral*. Jujuy - Argentina: CEDAE.
- Mera, I., & Cataño, J. C. (15 de Febrero de 2005). Obtención de glucosa a partir de almidón *Manihot sculenta*.
- México, G. F. (2010). *Estrategia Intersectorial de los Bioenergéticos*. México: México D.F.
- Ming, J., Hu, N., & Sum, J. (2016). Study on Modeling and Scheduling Optimization Algorithm of Mining-excavation Planning. *9th International Symposium on Computational Intelligence and Design*, (págs. 1-4). Beijing, China.
- Mokhtar S. Bazaraa, J. J. (2010). *Linear Programming and Network Flows*. New Jersey : WILEY.
- N., A., D., G., & A., G. (2015). *Biodegradation cellulose and agricultural waste material. Advances y Biodegradation and Biodegradation and Bioremedation of Industrial Waste*.
- Noborikawa, M. K. (2016). *Optimización de los procesos de extracción de fructooligosacáridos y clarificación del extracto acuoso de yacón (Smallanthus sonchifolius Poepp & Endl.)*. Lima.
- Ohyama, T., Ito, O., Yasuyoshi, S., Ikarashi, T., Minamisawa, K., Kubota, M., . . . Asami, T. (1990). *Composition of storage carbohydrate in tubers of yacon (Polymnia sonchifolia)*. Soil Sci. Plant Nutr.
- Orizano Acuña, V., & Valdizán Espinoza, H. (2021). *Aprovechamiento de cáliz de aguaymanto (Physalis peruviana) y cáscara de yacón (Smallanthus sonchifolius) para la producción de bioetanol*. Huánuco.
- Osinergmin. (2009). Norma Técnica Peruana 321. 126. 2009., (pág. 50).
- OSINERGMIN. (2021). *Análisis del mercado de hidrocarburos*.
- Perales, C. A. (2015). *Obtención de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos sometidos a hidrólisis enzimática*.

- Petróleo, I. M. (2017). *Reporte de inteligencia tecnológica "bioetanol"*. México: Instituto Mexicano del Petróleo.
- Puerta, M. F. (2011). *Caracterización morfológica y molecular de materiales de yacón (Smallanthus sonchifolius Poep. & Endl) H. Robinsón colectados en la eco región eje cafetero de Colombia*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Agropecuarias - coordinación general de posgrados palmira.
- Qing, W., & Han-chao, Z. (2011). Optimization of Task Allocation And Knowledge Workers Scheduling Based-on Particle Swarm Optimization. *School of Management, Tianjin University of Commerce*, 1-5.
- Ríos-Fránquez, F. J., Rojas-Rejón, Ó. A., & Escamilla-Alvarado, C. (2019). Microbial Enzyme Applications in Bioethanol Producing Biorefineries: Overview. *ElSevier*.
- Ronal G. Echevarría Trujillo, T. E. (2019). Manual de producción de biodiésel a partir del aceite de piñón blanco (*Jatropha curcas L.*). *Instuto Nacional de Innovación Agraria - INIA*.
- Rushton, J. C. (1950). *Chemical Engineering Progress*.
- Santiago Zuffiaurre, P. A. (2020). Algorithmic-Mathematical Scheduling Methodology Applied to an Industrial Size Test Case. *Revista Tecnología y Ciencia*.
- Schuster, K., Ehmoser, H., Gapes, J., & Lendl, B. (2000). *On-line FT-Raman spectroscopic monitoring of starch gelatinisation and enzyme catalysed starch hydrolysis*. ElSiever.
- Sebastião, D., Gonçalves, M. S., Marques, S., & Fonseca, C. (2016). Life cycle assessment of advanced bioethanol production from pulp and paper sludge. *Bioresource Technology*.
- Seminario J, V. M. (2003). *El yacón: fundamentos para el aprovechamiento de un recurso promisorio*. Lima: Centro Internacional de la Papa(CIP), Universidad Nacional de Cajamarca, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE).
- Singh, A., Olsen, S., & P.S., N. (2011). *A viable technology to generate thrid-generation biofuel*. *J.Chem.Technol. Biot*.
- Sosa, E. P. (s.f.). Economía de los procesos PI 510. En E. P. Sosa, *Economía de los procesos PI 510*. Lima.
- Teresa Zamora-Hernández, A. P.-F.-T.-F.-C. (2014). *Demostraciones prácticas de los retos y oportunidades de la producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de cultivos tropicales*. México: * Laboratorio de Biotecnología Vegetal, Instituto de Biotecnología. Universidad del Papaloapan, Tuxtepec, Oaxaca, 68301, México.
- Turismo, M. d. (s.f.). *Promperú*. Obtenido de <https://exportemos.pe/inteligencia-para-exportar/productos>
- Yunus A. Cengel, A. J. (2012). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones*. México: Mc Graw Hill.

Anexos

Anexo 1: Resultados de las pruebas obtenidas

Prueba 1: 03/04/2023

Se licuó el yacón y para la fermentación se empleó la levadura *saccharomyce cerevisae*.

$$\text{masa levadura} = 5 \text{ g}$$

$$\text{masa inicial yacón} = 790 \text{ g}$$

$$\text{masa final yacón} = 753.2 \text{ g}$$

$$^{\circ}\text{Brix inicial} = 7$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{t=30\text{min}} = 6.5$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{t=24\text{h}} = 2$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{t=72\text{h}} = 2$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{t=240\text{h}} = 2$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{t=264\text{h}} = 2$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{t=384\text{h}} = 2$$

Prueba 2: 04/04/2023

Se licuó el yacón. Realizamos hidrólisis enzimática con α amilasa y glucoamilasa y para la fermentación se empleó la levadura *saccharomyce cerevisae*.

$$\alpha \text{ amilasa} = 2 \text{ ml } (T = 90^{\circ}\text{C})$$

$$\text{glucoamilasa} = 2 \text{ ml } (T = 60^{\circ}\text{C})$$

$$\text{masa levadura} = 5 \text{ g } (T = 30^{\circ}\text{C})$$

$$\text{masa inicial yacón} = 761.5 \text{ g}$$

$$\text{masa final yacón} = 641.5 \text{ g}$$

$$^{\circ}\text{Brix inicial} = 6.5$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\alpha \text{ amilasa}, t=1\text{h } 30\text{min}, T=90^{\circ}\text{C}} = 7.5$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{glucoamilasa}, t=1h, T=60^{\circ}\text{C}} = 7.5$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}\text{C}, t=48h} = 3$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}\text{C}, t=216h} = 3$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}\text{C}, t=240h} = 3$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}\text{C}, t=312h} = 3$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}\text{C}, t=360h} = 2$$

Prueba 3: 13/04/2023

Se licuó el yacón. Realizamos hidrólisis enzimática con α amilasa y glucoamilasa y para la fermentación se empleó la levadura *saccharomyce cerevisae*.

$$\alpha \text{ amilasa} = 5 \text{ ml } (T = 90^{\circ}\text{C})$$

$$\text{glucoamilasa} = 5 \text{ ml } (T = 90^{\circ}\text{C})$$

$$\text{masa levadura} = 5 \text{ g } (T = 30^{\circ}\text{C})$$

$$\text{masa inicial yacón} = 795.5 \text{ g}$$

$$\text{masa final yacón} = 650.7 \text{ g}$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{inicial}} = 6.5$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\alpha \text{ amilasa}, t=1h \ 30min, T=90^{\circ}\text{C}} = 7.5$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{glucoamilasa}, t=1h, T=60^{\circ}\text{C}} = 8.5$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}\text{C}, t=24h} = 2.5$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}\text{C}, t=96h} = 2.5$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}\text{C}, t=144h} = 2.5$$

Prueba 4: 13/04/2023 (Duplicado)

Se licuó el yacón. Realizamos hidrólisis enzimática con α amilasa y glucoamilasa y para la fermentación se empleó la levadura *saccharomyce cerevisae*.

$$\alpha \text{ amilasa} = 5 \text{ ml } (T = 90^{\circ}\text{C})$$

$$\text{glucoamilasa} = 5 \text{ ml } (T = 90^{\circ}\text{C})$$

$$\text{masa levadura} = 5 \text{ g } (T = 30^{\circ}\text{C})$$

$$\text{masa inicial yacón} = 782 \text{ g}$$

$$\text{masa final}_{\text{yacón}} = 763.9 \text{ g}$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{inicial}} = 6.2$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\alpha \text{ amilasa}, t=1 \text{ h } 30 \text{ min}, T=90^{\circ}\text{C}} = 7.5$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{glucoamilasa}, t=1 \text{ h}, T=60^{\circ}\text{C}} = 8.1$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}\text{C}, t=96 \text{ h}} = 2.5$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}\text{C}, t=144 \text{ h}} = 2.5$$

Prueba 5: 14/04/2023

Se licuó el yacón. Realizamos hidrólisis enzimática con α amilasa y glucoamilasa y para la fermentación se empleó la levadura *saccharomyce cerevisae*.

$$\alpha \text{ amilasa} = 10 \text{ ml } (T = 90^{\circ}\text{C})$$

$$\text{glucoamilasa} = 10 \text{ ml } (T = 90^{\circ}\text{C})$$

$$\text{masa levadura} = 10 \text{ g } (T = 30^{\circ}\text{C})$$

$$\text{masa inicial}_{\text{yacón}} = 1189.6 \text{ g}$$

$$\text{masa final}_{\text{yacón}} = 784.3 \text{ g}$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{inicial}} = 6$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\alpha \text{ amilasa}, t=1 \text{ h } 30 \text{ min}, T=90^{\circ}\text{C}} = 8.5$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{glucoamilasa}, t=1 \text{ h}, T=60^{\circ}\text{C}} = 9$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}\text{C}, t=72 \text{ h}} = 3$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}\text{C}, t=120 \text{ h}} = 2.5$$

Prueba 5: 14/04/2023 (Duplicado)

Se licuó el yacón. Realizamos hidrólisis enzimática con α amilasa y glucoamilasa y para la fermentación se empleó la levadura *saccharomyce cerevisae*.

$$\alpha \text{ amilasa} = 10 \text{ ml } (T = 90^{\circ}\text{C})$$

$$\text{glucoamilasa} = 10 \text{ ml } (T = 90^{\circ}\text{C})$$

$$\text{masa levadura} = 10 \text{ g } (T = 30^{\circ}\text{C})$$

$$\text{masa inicial}_{\text{yacón}} = 804.5 \text{ g}$$

$$\text{masa final}_{\text{yacón}} = 715.3 \text{ g}$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{inicial}} = 7$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\alpha \text{ amilasa}, t=1h \ 30min, T=90^{\circ}C} = 8$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{glucoamilasa}, t=1h, T=60^{\circ}C} = 8$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}C, t=72h} = 3$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}C, t=120h} = 3$$

Prueba 6: 17/04/2023

Se licuó el yacón. Realizamos hidrólisis enzimática con α amilasa y glucoamilasa y para la fermentación se empleó la levadura *saccharomyce cerevisae*.

$$\alpha \text{ amilasa} = 5 \text{ ml } (T = 90^{\circ}C)$$

$$\text{glucoamilasa} = 5 \text{ ml } (T = 60^{\circ}C)$$

$$\text{masa levadura} = 5 \text{ g } (T = 30^{\circ}C)$$

$$\text{masa inicial yacón} = 785.2 \text{ g}$$

$$\text{masa final yacón} = 768.2 \text{ g}$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{inicial}} = 7$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\alpha \text{ amilasa}, t=1h \ 30min, T=90^{\circ}C} = 7.5$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{glucoamilasa}, t=1h, T=60^{\circ}C} = 8$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}C, t=72h} = 3$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}C, t=48h} = 2.5$$

Prueba 7: 18/04/2023

Se licuó el yacón. Para la fermentación se empleó la levadura *saccharomyce cerevisae*.

$$\text{masa levadura} = 7.5 \text{ g } (T = 30^{\circ}C)$$

$$\text{masa inicial yacón} = 780 \text{ g}$$

$$\text{masa final yacón} = 772.6 \text{ g}$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{inicial}} = 6.5$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}C, t=72h} = 3$$

$$^{\circ}\text{Brix}_{\text{levadura}, T=30^{\circ}C, t=24h} = 2$$

Prueba 8: 18/04/2023

Se licuó el yacón. Para la fermentación se empleó la levadura *saccharomyce cerevisae*.

$$\text{masa levadura} = 10 \text{ g } (T = 30^{\circ}\text{C})$$

$$\text{masa inicial yacón} = 730 \text{ g}$$

$$\text{masa final yacón} = 701 \text{ g}$$

$$^{\circ}\text{Brix inicial} = 6.5$$

$$^{\circ}\text{Brix levadura, } T=30^{\circ}\text{C, } t=24\text{h} = 2$$

De todas las pruebas, la siguiente fue la que tuvo el mejor resultado:

Se licuó el yacón. Realizamos hidrólisis enzimática con α amilasa y glucoamilasa y para la fermentación se empleó la levadura *saccharomyce cerevisae*.

$$\alpha \text{ amilasa} = 5 \text{ ml } (T = 90^{\circ}\text{C})$$

$$\text{glucoamilasa} = 5 \text{ ml } (T = 60^{\circ}\text{C})$$

$$\text{masa levadura} = 5 \text{ g } (T = 30^{\circ}\text{C})$$

$$\text{masa inicial yacón} = 785.2 \text{ g}$$

$$\text{masa final yacón} = 768.2 \text{ g}$$

$$^{\circ}\text{Brix inicial} = 7$$

$$^{\circ}\text{Brix } \alpha \text{ amilasa, } t=1\text{h } 30\text{min, } T=90^{\circ}\text{C} = 7.5$$

$$^{\circ}\text{Brix glucoamilasa, } t=1\text{h, } T=60^{\circ}\text{C} = 8$$

$$^{\circ}\text{Brix levadura, } T=30^{\circ}\text{C, } t=72\text{h} = 3$$

$$^{\circ}\text{Brix levadura, } T=30^{\circ}\text{C, } t=48\text{h} = 2.5$$

Anexo 2: Resultados de las pruebas obtenidas

Tabla A

Inversión total

Costos directos	Valor Típico %	US\$
Equipos principales	100	223.611,57
Instalación de equipos	20	44.722,31
Instrumentación y control	7	15.652,81
Tuberías y accesorios	10	22.361,16
Instalaciones eléctricas	7	15.652,81
Obras civiles	5	11.180,58
Mejoras del terreno	30	67.083,47
Servicios auxiliares	4	8.944,46
Total de costos directos		409.209,18
COSTOS INDIRECTOS		
Ingeniería y supervisión	10	22.361,16
Gastos de construcción	15	33.541,74
Total de costos indirectos		55.902,89
Total costos directos e indirectos		465.112,07
Eventuales (10% Costos directos e indirectos)	10	46.511,21
Total de inversión de capital fijo (I.C.F.)		511.623,28
Capital de trabajo		109.542,70
Inversión total		621.165,97

Nota: elaboración propia

Tabla B

Costos de agua

Parámetros	Valor	Unidad
Consumo:	17,94	m ³ /DO ^(*)
Costo:	0,24	US\$/m ³
Costo anual de agua	1.446,66	US\$/año

Nota: elaboración propia

Tabla C

Costos de combustible

Parámetros	Valor	Unidad
Consumo:	4,07	t/día

Costo:	4,7	US\$/t
Costo anual de combustible	6.312,57	Us\$/año

Nota: elaboración propia

Tabla D

Resumen de energía eléctrica

Equipos	HP	Cantidad	HP
Motor de lavadora	1	1	1
Motor de trituradora	15	1	15
Motor de agitador de licuadora	1	1	1
Agitador del reactor químico	5	1	5
Filtro prensa	20	1	20
Total			43

Nota: elaboración propia

Tabla E

Resumen de costos de servicios auxiliares

Descripción	US\$/Año
Agua	1446,66
Combustible	6312,57
Energía eléctrica	17046,92
Total	24806,15

Nota: elaboración propia

Tabla F

Estimación del costo de producción – materia prima

Materia Prima	Valor	Unidad
Yacón	0,10	US\$/kg
Alimentación por hora	625,00	kg/h
Consumo anual de yacón	4.950.000,00	kg/Año
Costo anual de yacón	495.000,00	US\$/Año
Costo de enzimas	103,33	US\$/día
	34.100,00	US\$/Año
Costo de materia prima	529.100,00	US\$/Año

Nota: elaboración propia

Tabla G

Estimación del costo de producción – mano de obra

Mano de obra	Valor	Unidad
Número de obreros	20,00	
Sueldo de cada obrero US\$/MES	300,00	
Sueldos	72.000,00	US\$/Año
Total de mano de obra	72.000,00	US\$/Año
Supervisión directa y trabajos administrativos (10% MO)	7.200,00	US\$/Año

Nota: elaboración propia

Tabla H

Resumen de costos de producción

Parámetros	US\$/Año
Materia prima	529100,00
Mano de obra	72000,00
Supervisión directa y trabajos de administración	7200,00
Total servicios auxiliares	24806,15
Total	633106,15

Nota: elaboración propia

Tabla I

Estimación del costo total de producción

I. Costo de producción	US\$/año
Costos Directos de Producción	
Materia prima	529100,00
Mano de obra	72000,00
Supervisión directa y trabajos de administración	7200,00
Servicios auxiliares	24806,15
Mantenimiento y Reparación (6% de equipos principales)	13416,69
Gastos de laboratorio (5% M.O)	3600,00
Gastos fijos	
Depreciación (10% Inv. Capital Fijo)	51162,33
Impuestos locales (0,5% I.C.F)	2558,12
Seguro (0,7% I.C.F)	3581,36
Gastos Generales de la Planta (3% de M.O, Superv, Manten.)	2778,50
II. Gastos generales	
Gastos de administración (3,5% CTP)	28087,13
Gastos de Distribución y Marketing (3% CTP)	24074,68
Gastos de Investigación y Desarrollo (5% CTP)	40124,47
Costo total de producción (CTP)	802489,44

Nota: elaboración propia

Tabla J

Estimación de costos variables

Costos variables	US\$
Materia prima	529.100,00
Mano de obra	72.000,00
Supervisión directa y trabajos de administración	7.200,00
Servicios auxiliares	24.806,15
Mantenimiento y Reparación	13.416,69
Gastos de laboratorio	3.600,00
Total costos variables	121.022,84

Nota: elaboración propia

Tabla K

Estimación de costos fijos

Costos fijos	US\$
Depreciación	51.162,33
Impuestos locales	2.558,12
Seguro	3.581,36
Gastos Generales - Planta	2.778,50
Total costos fijos	60.080,31

Nota: elaboración propia

Tabla L

Ventas anuales US\$/AÑO

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Producción de etanol, Ton/Año	594	594	594	594	594	594	594	594	594	594
US\$/Ton	1.900	1.900	1.900	1.900	1.900	1.900	1.900	1.900	1.900	1.900
US\$/ Año	1.128.600	1.128.600	1.128.600	1.128.600	1.128.600	1.128.600	1.128.600	1.128.600	1.128.600	1.128.600

Nota: elaboración propia

Tabla M*Capital de Trabajo (US\$ del año 2023)*

Activo Circulante	Unidad	Valor
Inv. Materia Prima yacon (15 DO)	Ton/DO	15,00
	Ton/Año	225,00
	US\$/Ton	100,00
	US\$/Año	22.500,00
Inv. Materia Prima alfa-amilasa (15 DO)	Ton/DO	0,22
	Ton/Año	3,30
	US\$/Ton	0,17
	US\$/Año	0,55
Inv. Materia Prima gluco-amilasa (15 DO)	Ton/DO	0,21
	Ton/Año	3,15
	US\$/Ton	1,17
	US\$/Año	3,68
Inv. Materia Prima S.C. (15 DO)	Ton/DO	0,19
	Ton/Año	1.102,17
	US\$/Ton	1,17
	US\$/Año	1.287,70
Inv. Prod. Terminados (15 DO)	Ton/DO	1,80
	Ton/Año	27,00
	US\$/Ton	1.350,99
	US\$/Año	36.476,79
Cuentas por Cobrar (30 DC)	US\$/DC	3.092,05
	US\$/Año	92.761,64
Act. Circulante (MMUS\$/Año)		153.030,37
Pasivo circulante		
Cuentas por Pagar (30 DC)	US\$/DC	1.449,59
	US\$/Año	43.487,67
Capital de Trabajo	MMUS\$/Año	109.542,70

Nota: elaboración propia

Tabla N

Cuadro económico de pérdidas y ganancias \$/año

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos										
Ventas	1128600									
Egresos										
Materia prima	529100	529100	529100	529100	529100	529100	529100	529100	529100	529100
Costos variables	121023	121023	121023	121023	121023	121023	121023	121023	121023	121023
Costos fijos	60080	60080	60080	60080	60080	60080	60080	60080	60080	60080
Gastos de producción	710203									
Utilidad bruta	418397									
Gastos de adm. y ventas	16929	16929	16929	16929	16929	16929	16929	16929	16929	16929
Utilidad de operación	401468									
Gastos financieros	24597	17738	11371	5467						
Depreciación	51162	51162	51162	51162	51162	51162	51162	51162	51162	51162
Renta neta	325708	332567	338935	344839	350306	350306	350306	350306	350306	350306
Impuesto a la renta (30%)	97712	99770	101680	103452	105092	105092	105092	105092	105092	105092
Utilidad neta	227996	232797	237254	241387	245214	245214	245214	245214	245214	245214
Reserva legal	22800	23280	23725	24139	24521	24521	24521	24521	24521	24521
Utilidad retenida	2280	2328	2373	2414	2452	2452	2452	2452	2452	2452
Dividendos	202916	207189	211156	214835	218240	218240	218240	218240	218240	218240
Pérdidas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: elaboración propia

Tabla O*Capital de trabajo por año*

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Activo circulante										
Inventario de mp (15 DO)	23792	23792	23792	23792	23792	23792	23792	23792	23792	23792
Inventario de pt (15 DO)	36477	36477	36477	36477	36477	36477	36477	36477	36477	36477
Cuentas por cobrar (30 DC)	92762	92762	92762	92762	92762	92762	92762	92762	92762	92762
Activo circulante (US\$/año)	153030	153030	153030	153030	153030	153030	153030	153030	153030	153030
Pasivo circulante										
Cuentas por pagar (dc)	43488	43488	43488	43488	43488	43488	43488	43488	43488	43488
Capital de trabajo (US\$/año)	109543	109543	109543	109543	109543	109543	109543	109543	109543	109543
ΔCapital de trabajo (US\$/año)	109543	0	0	0	0	0	0	0	0	-109543

Nota: elaboración propia

Tabla P*Financiamiento y pago de la deuda*

Financiamiento 50%					
Inversión total del capital	511623,28				
Financiamiento por 4 años					
Interés	0,10				
Inflación	0,04				
Porcentaje de financiamiento	0,50				
Año	0	1	2	3	4
Moneda corriente					
Deuda	255811,6	191858,73	127905,82	63952,91	0,00
Amortización		63952,91	63952,91	63952,91	63952,91
Interés (10% de la deuda final)		25581,16	19185,87	12790,58	6395,29
Pago		281392,80	211044,60	140696,40	70348,20
Año	0	1	2	3	4
Moneda constante					
Amortización		61493,18	59128,06	56853,90	54667,22
Interés		24597,27	17738,42	11370,78	5466,72
Efectos de la inflación		2459,73	4824,85	7099,01	9285,69
Efectos de la inflación acumulada		2459,73	7284,58	14383,58	23669,28

Nota: elaboración propia

Tabla Q*Flujo de Fondos y Financiamiento Financiero*

Año	Financiamiento 50%											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Inversión propia de capital	255.811,6											
Amortización de la deuda		61.493,2	59.128,1	56.853,9	54.667,2							
Capital de trabajo propio		109.542,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	109.542,7
Total inversión	255.811,6	171.035,9	59.128,1	56.853,9	54.667,2	-	-	-	-	-	-	109.542,7
Utilidad neta		227.995,8	232.797,0	237.254,3	241.387,2	245.213,9	245.213,9	245.213,9	245.213,9	245.213,9	245.213,9	245.213,9
Depreciación		51.162,3	51.162,3	51.162,3	51.162,3	51.162,3	51.162,3	51.162,3	51.162,3	51.162,3	51.162,3	51.162,3
Flujo neto de fondos	- 255.811,6	108.122,2	224.831,2	231.562,7	237.882,3	296.376,2	296.376,2	296.376,2	296.376,2	296.376,2	296.376,2	405.918,9
Aportes	255.811,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dividendos		-	202.916,2	207.189,3	211.156,3	214.834,6	218.240,3	218.240,3	218.240,3	218.240,3	218.240,3	218.240,3
Saldo de caja anual		108.122,2	21.915,0	24.373,4	26.725,9	81.541,6	78.135,9	78.135,9	78.135,9	78.135,9	78.135,9	187.678,5
Caja residual		108.122,2	130.037,2	154.410,7	181.136,6	262.678,2	340.814,1	418.949,9	497.085,8	575.221,6	762.900,2	

Nota: elaboración propia

Tabla R

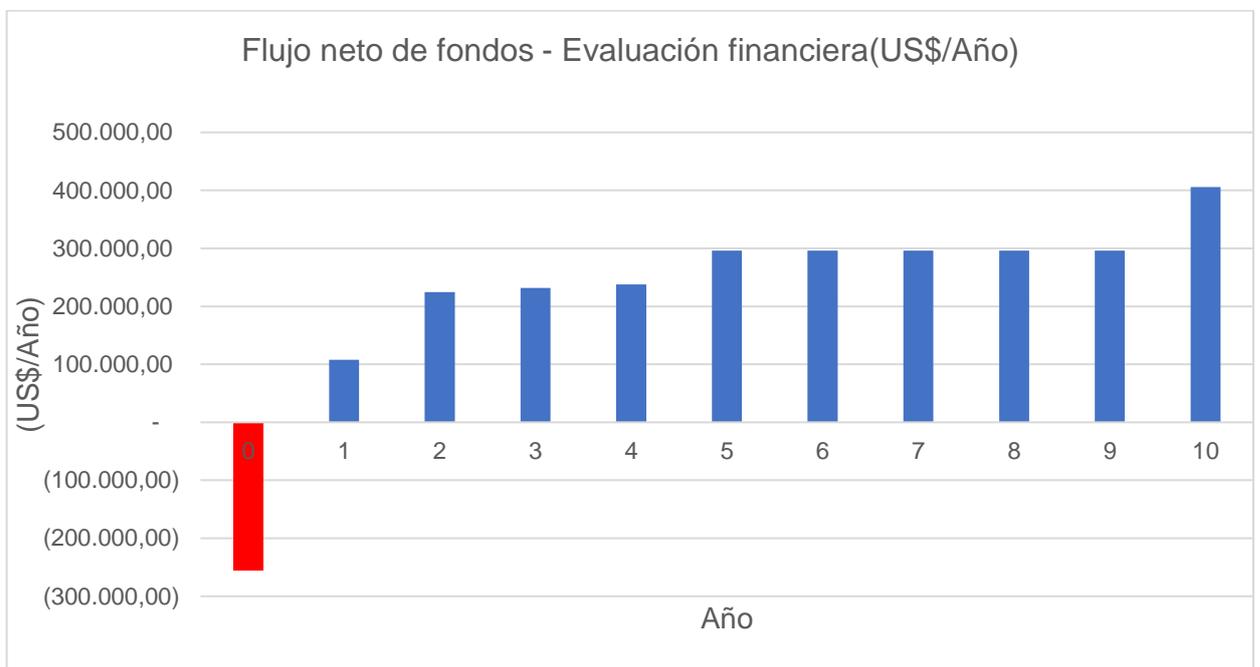
Valor actual neto y Tasa interna de retorno obtenidos

Parámetro	Valor
VAN (US\$)	1.288.609,75
TIR	72%

Nota: elaboración propia

Figura A

Flujo neto de fondos - Evaluación financiera (US\$/Año)



Nota: elaboración propia

Tabla S

Balance General Proyectado Financiero

Activo	Financiamiento 50%										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Caja banco											
Inv de mm pp	0	108122	130037	154411	181137	262678	340814	418950	497086	575222	762900
Inv de prod. Term.		23792	23792	23792	23792	23792	23792	23792	23792	23792	23792
Cuentas por cobrar		36477	36477	36477	36477	36477	36477	36477	36477	36477	36477
		92762	92762	92762	92762	92762	92762	92762	92762	92762	92762
Activo tangible e intangible neto											
Total activo	511623	460461	409299	358136	306974	255812	204649	153487	102325	51162	0
	511623	721614	692366	665577	641141	671520	698494	725467	752441	779414	915931
Pasivo											
Pasivo a corto plazo											
Cuentas por pagar											
Pago anual de la deuda		43488	43488	43488	43488	43488	43488	43488	43488	43488	43488
Dividendos		63953	63953	63953	63953						
Pasivo a largo plazo		0	202916	207189	211156	214835	218240	218240	218240	218240	218240
Deuda											
Patrimonio	255812	191859	127906	63953	0	0	0	0	0	0	0
Capital social											
Utilidad retenida acumulada	255812	255812	255812	255812	255812	255812	255812	255812	255812	255812	255812
Reserva legal acumulada		2328	4656	7028	9442	11894	14347	16799	19251	21703	24155
Pérdidas o ganancias por		22800	46079	69805	93943	118465	142986	167508	192029	216550	241072
Inflación acumulada		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total pasivo	0	2460	7285	14384	23669	23669	23669	23669	23669	23669	23669
	511623	582698	752094	725611	701464	668162	698542	725515	752489	779462	806436
Pérdidas o ganancias por inflación		2460	4825	7099	9286						

Nota: elaboración propia