

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**OBTENCIÓN DE BIOETANOL POR HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA
Y FERMENTACIÓN DEL ALMIDÓN DE MAÍZ**

Por:

MANUEL ALEJANDRO LÓPEZ CARTAGENA

Modalidad de Graduación: Proyecto de Grado presentado a consideración a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Química.

Junio de 2023

TARIJA-BOLIVIA

V°B°

APROBADA POR:

MSc. Ing. Marcelo Segovia Cortez
DECANO

MSc. Lic. Clovis Gustavo Succi Aguirre
VICEDECANO

TRIBUNAL:

ING. PASTOR GUTIÉRREZ BAREA

ING. MARIO YERKO SFARCICH VARAS

ING. JUAN PABLO HERBAS BARRANCOS

ADVERTENCIA

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo estas responsabilidad del autor

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mis padres y hermanos, pilar fundamental en mi vida.

A mis amigos, y todo aquél cercano a mí en cualquier momento de su vida, con su pequeño o gran aporte han contribuido a hacer de mí quien ahora soy y con su confianza puesta en mí han sabido impulsar mi realización profesional.

A ustedes les dedico este logro.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios, mi fortaleza, refugio y quién sustenta mi vida día a día, quien me ha dado la capacidad de alcanzar este hito. Por Él y para Él.

A mis padres y hermanos, siempre han sabido darme las palabras necesarias para ser capaz de sacar lo mejor de mí. Sin su apoyo nada de esto hubiera sido posible.

A mi novia Vanessa Velasquez, a quien debo agradecerle su ayuda en los meses en laboratorio, por escucharme y aconsejarme. Sin ti esto hubiese sido más complicado, gracias por tu ser como eres a pesar de cómo soy.

A mis docentes, en especial al Ing. Gustavo Moreno, Ing. Juan Pablo Herbas, Ing. René Michel, Ing. Ignacio Velasquez, Ing. Miriam Barrero; ustedes marcaron mi vida con sus enseñanzas, tiempo y apoyo no solo en el presente proyecto sino en toda mi carrera, a ustedes debo los ideales del Ingeniero Químico que deseo ser, quedo eternamente agradecido con cada uno de ustedes.

Y por último y no menos importante, a mis amigos, no los menciono por no olvidar a ninguno, pero estoy seguro que cuando lean estas palabras sabrán identificarse con ellas, ustedes que, desde mi niñez, mis años en colegio, mis días en la iglesia, y aún mis años de universidad han estado conmigo, gracias por su fidelidad, su cariño y su apoyo. No se imaginan cuanto los aprecio.

Por lo cual, por amor a Cristo me gozo en las debilidades, en afrentas, en necesidades, en persecuciones, en angustias; porque cuando soy débil, entonces soy fuerte.

2da Corintios 12:10

ÍNDICE

Advertencia	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Pensamiento	iv
Resumen	v

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES	2
1.1.1 El bioetanol	2
1.1.2 Conceptualización de la idea del Proyecto de Grado	3
1.1.3 Descripción del Producto	6
1.1.4 Producción en otros países	8
1.1.5 Aspectos del Mercado Nacional	13
1.1.5.1 Oferta	13
1.1.5.2 Demanda	17
1.1.6 Materias Primas	24
1.1.6.1 El maíz	25
1.2 OBJETIVOS	28
1.2.1 Objetivo General	28
1.2.2 Objetivos Específicos	28
1.3 JUSTIFICACIÓN	28
1.3.1 Económica	28
1.3.2 Científico-Tecnológico	35
1.3.3 Social	36

1.3.4	Ambiental	37
-------	-----------------	----

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1	Bioetanol	40
2.1.1	Procesos de obtención de bioetanol	42
2.1.1.1	Proceso de obtención de bioetanol mediante hidrólisis enzimática y fermentación (Bioquímico)	42
2.1.1.2	Proceso de obtención de etanol mediante gasificación y síntesis (Termoquímico)	54
2.1.1.3	Proceso de obtención de bioetanol mediante gasificación y fermentación	55
2.2	Materias primas	55
2.2.1	Primera generación	56
2.2.2	Segunda generación de bioetanol	59
2.2.3	Tercera generación de bioetanol	61
2.2.4	Cuarta generación de bioetanol	62
2.3	El maíz	62
2.3.1	El maíz en Tarija	64
2.4	El almidón	66

CAPÍTULO III PARTE EXPERIMENTAL

3.1	Selección del Proceso Tecnológico industrial	68
3.2	Descripción conceptual de la metodología de estudio	72
3.3	Caracterización del producto	73
3.4	Diseño del Método experimental seleccionado	74

3.4.1	Prueba preliminar para concentración de almidón y tipo de calentamiento para la hidrólisis	74
3.4.2	Prueba preliminar para la selección de la concentración de masa de enzima para diseño factorial	76
3.5	Diseño Experimental	78
3.6	Reactivos y sustancias empleadas	83
3.7	Materiales empleados	84
3.8	Proceso de hidrólisis.....	85
3.8.1	Preparación de la solución.....	85
3.8.2	Licuefacción	86
3.8.3	Obtención de glucosa	89
3.9	Proceso de fermentación	92
3.9.1	Preparación de las levaduras	94
3.10	Proceso de destilación	96
3.11	Balance de Materia y Energía	98
3.11.1	Balance general de materia para el proceso experimental	99
3.11.2	Balance parcial de materia para el proceso experimental	99
3.11.2.1	Preparación de solución.....	99
3.11.2.2	Licuefacción	100
3.11.2.3	Obtención de glucosa.....	100
3.11.3	Estimación de balance de energía	101
3.11.3.1	Balance para el proceso de hidrólisis	101

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Resultados del proceso de hidrólisis	105
-----	--	-----

4.2	Análisis del proceso de hidrólisis.....	106
4.3	Resultados del proceso de fermentación	109
4.4	Análisis del proceso de fermentación.....	110
4.4.1	Cálculo del rendimiento de conversión de los AR a etanol	112
4.4.2	Cálculo del rendimiento de etanol real y teórico.....	113
4.5	Resultados del proceso de destilación del mosto fermentado	114
4.6	Análisis del proceso de destilación	115
4.6.1	Cálculo del rendimiento de la destilación	115
4.7	Análisis estadístico del diseño factorial	117
4.7.1	Análisis de varianza ANOVA del diseño factorial	117
4.7.2	Regresión lineal del diseño factorial	120

CAPÍTULO V

COSTOS

5.1	Costos de la investigación.....	124
5.1.1	Costos de materiales, análisis y reactivos	124
5.1.2	Costos de insumos.....	125
5.1.3	Costos indirectos	126
5.1.4	Costos totales.....	126

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1	Conclusiones	128
6.2	Recomendaciones.....	129
	BIBLIOGRAFÍA	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Diferencia de los monómeros en el almidón y la celulosa	3
Figura 1-2 Top 10 de las compañías de bebidas alcohólicas en Latinoamérica y el Caribe	9
Figura 1-3 Reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero de determinados	11
Figura 1-4 Volumen vendido de alcohol etílico por °GL en el mercado interno en millones de litros de enero de 2014 a marzo de 2018	19
Figura 1-5 Volumen demandado de alcohol etílico por °GL en el mercado externo en millones de litros	21
Figura 1-6 Producción de alcohol etílico 2019-2022 en millones de litros en Bolivia	23
Figura 1-7 Proyección de 2010 de la cantidad de bioetanol comercializado 2010-2019	29
Figura 1-8 Variación interanual porcentual, tendencia y producción total (en miles de m ³) de biocombustibles líquidos en el mundo	30
Figura 1-9 Regresión polinómica grado 3	33
Figura 1-10 Proyección de demanda 2023-2027	34
Figura 1-11 Ahorro promedio ponderado certificado de emisiones de gases de efecto invernadero en la producción y uso de etanol como combustible en %	38
Figura 2-1 Dionisos, dios griego del vino	40
Figura 2-2 Diagrama de obtención de bioetanol a partir de maíz por molienda en seco	43
Figura 2-3 Estructura de la alfa amilasa	47
Figura 2-4 Representación del efecto de interacción entre los factores de tiempo y temperatura de sacarificación	48
Figura 2-5 Esquema general para la producción de químicos o combustibles por la ruta termoquímica	55
Figura 2-6 Materias primas, biocombustibles y sus principales usos	58

Figura 2-7 Cultivo del maíz	62
Figura 2-8 Partes de la planta de maíz	63
Figura 2-8 Estructura del grano de maíz	66
Figura 3-1 Diagrama de bloques del proceso de obtención de bioetanol por la vía enzimática	71
Figura 3-2 Proceso de hidrólisis enzimática del almidón de maíz.....	72
Figura 3-3 Metodología de estudio	73
Figura 3-4 Ensayos hidrolizados a diferentes concentraciones.....	77
Figura 3-5 Azúcares reductores vs Concentración de enzima	78
Figura 3-6 Almidón pesado y preparado.....	85
Figura 3-7 Medición inicial y pH estabilizado.....	86
Figura 3-9 Adición de alfa amilasa y licuefacción.....	88
Figura 3-10 Hidrólisis de enlaces alfa 1-6	89
Figura 3-12 Trasvasado y envasado	91
Figura 3-12 Muestra tomada y medición de grados Brix.....	91
Figura 3-13 Pesado del almidón de maíz	92
Figura 3-14 Preparación de la solución de almidón.....	93
Figura 3-15 Adición del CaCl ₂ y enzima alfa amilasa.....	93
Figura 3-16 Levaduras, sacarosa y agua	94
Figura 3-17 Inicio y final de levaduras inoculadas	95
Figura 3-18 Biorreactor armado.....	95
Figura 3-19 Mosto fermentado y cargado de reboiler.....	96
Figura 3-20 Torre de destilación	97
Figura 3-21 Recirculación de destilado.....	98
Figura 4-1 Análisis de grados Brix por ensayo.....	106
Figura 4-2 Curvas de fermentación tacho A	111
Figura 4-3 Curva de fermentación tacho B	112
Figura 4-4 Grados Brix medidos vs Valores ajustados al modelo matemático	123
Figura 4-5 Mediciones vs Error	123

ÍNDICE DE CUADROS Y/O TABLAS

Cuadro I-1: Empresas productoras de alcohol etílico para el año 2018.....	14
Cuadro I-2 Uso y destino de cada tipo de alcohol en el mercado interno.....	17
Cuadro I-3: Información nutricional del maíz por 100 gramos	27
Cuadro I-4: Variación del costo de producción de bioetanol de primera generación .	31
Cuadro III-1 Nómina de reactivos y sustancias utilizadas	83
Cuadro III-2 Materiales utilizados y necesarios.....	84
Cuadro IV-1 Análisis de varianza para los resultados	119
Cuadro IV-2 Análisis de varianza con variables significativas	120
Cuadro IV-3 Resultados regresión lineal	121
Cuadro V-1 Costos del proyecto de investigación	124
Cuadro V-2 Consumo eléctrico.....	125
Cuadro V-3 Costos de insumos.....	125
Cuadro V-4 Costos indirectos	126
Cuadro V-5 Suma de costos totales	126
Tabla I-1: Bebidas alcohólicas y grados alcohólicos correspondientes	6
Tabla I-2: Producción anual de bioetanol por país o región (m ³ *10 ⁶).....	12
Tabla I-3 Evolución trimestral del volumen de ventas en el mercado interno en millones de litros.....	18
Tabla I-4 Volumen de ventas de alcohol etílico por departamento en porcentajes	20
Tabla I-5: Volumen de ventas de alcohol etílico en el mercado externo por destino .	22
Tabla I-8 Demanda de etanol 2014 – 2022	32
Tabla I-9 Proyección de demanda al 2027	34
Tabla I-10: Proyección de generación de empleo	37
Tabla III-1: Matriz de selección de proceso.....	70
Tabla III-2: Resultado de análisis para prueba de tipo de calentamiento	75
Tabla III-3: Resultados análisis de muestras.....	77

Tabla III-4: Niveles de las variables para la fermentación	80
Tabla III-5: Combinaciones de variables	81
Tabla III-6: Combinaciones de niveles y variables.....	82
Tabla IV-1: Variable respuesta de cada ensayo	105
Tabla IV-2 Resultados análisis % azúcares reductores (%AR)	107
Tabla IV-3 Resultados medición en fermentación tacho A	109
Tabla IV-4 Resultados de fermentación tacho B	110
Tabla IV-5 Resultados de las destilaciones realizadas.....	115
Tabla IV-6 Diseño factorial y resultados	117

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: FICHA DE SEGURIDAD PARA EL CLORURO DE CALCIO	138
ANEXO 2: FICHA DE SEGURIDAD PARA EL ÁCIDO CLORHÍDRICO.....	144
ANEXO 3: BALANCES PARCIALES DE MATERIA Y ENERGÍA.....	151
ANEXO 4: RESULTADOS DE ANÁLISIS REALIZADOS	157
ANEXO 6: ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS	159
ANEXO 7: PROCEDIMIENTO PARA MEDICIÓN DE GRADOS BRUX	162
ANEXO 8: PROCEDIMIENTO PARA MEDICIÓN DE °GL INICIAL	164
ANEXO 9: TABLA DE CONVERSIÓN DE °Bx A °Be.....	166
ANEXO 10: MECANISMO DE CONVERSIÓN DEL ALMIDÓN A GLUCOSA	169