

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE BIOETANOL A PARTIR DE MATERIAL  
LIGNOCELULÓSICO DE RESIDUOS DEL MAÍZ AMARILLO (MARLO U  
OLOTE)”**

**Por:**

**EVER ALDO VENTURA IBAÑEZ**

**Modalidad de graduación: INVESTIGACIÓN APLICADA. Presentado a  
consideración de LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”,  
como requisito para optar el grado académico de licenciatura en Ingeniería Química.**

**Octubre 2020**

**TARIJA-BOLIVIA**

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme la oportunidad de vivir y estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente. Por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mi familia porque con sus sabios consejos me enseñaron que con esfuerzo y dedicación se alcanza el éxito, además por que depositaron en mí la confianza, ya que supieron apoyarme incondicionalmente en todas las decisiones que he tenido que tomar a lo largo de mi vida.

A mis docentes por impartir todo el conocimiento, consejos y su siempre acertada colaboración.

A mis tribunales por su paciencia, colaboración, consejos brindados para la conclusión de este trabajo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios en primer lugar por haberme dado toda esa fortaleza para lograr culminar mis estudios.

A la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, por haberme acogido en sus aulas.

A los docentes por brindarme sabiduría y darme esa amistad.

A mi familia que siempre me estuvo apoyando de manera incondicional.

A mis tutores los ingenieros Ernesto Caihuara Alejandro, Pastor Gutiérrez Barea y Patricia Castillo Rocha. Agradecer por su paciencia, motivación, dedicación, criterio y aliento, han hecho parecer fácil en terreno escabroso.

A todos mis compañeros, amigos y hermanos que hice durante todo el periodo de permanencia en la carrera, gracias por compartirme su amistad y confianza.

## **PENSAMIENTO**

“La vida es el examen más difícil. La mayoría fracasa por intentar copiar a los demás, sin darnos cuenta que todos tenemos un examen diferente”

Por: Albert Einstein

ÍNDICE  
INTRODUCCIÓN

	Página
Antecedentes.....	1
Producción de bioetanol a nivel mundial.....	1
Producción de bioetanol en Bolivia.....	3
Objetivos.....	4
Objetivos generales.....	4
Objetivos específicos.....	4
Justificación.....	5
Justificación socioeconómica.....	5
Justificación técnica.....	5
Justificación ambiental.....	5
Justificación personal.....	6

CAPÍTULO I  
MARCO TEÓRICO

1.1 Bioetanol.....	7
1.1.1 Materia prima para la producción de bioetanol.....	7
1.1.2 Clasificación de acuerdo al tipo de materia prima.....	7
1.1.3 Características fisicoquímicas del bioetanol.....	8
1.2 Biocombustibles.....	9
1.3 Características del Maíz ( <i>Zea mays</i> ).....	10
1.3.1 División del maíz ( <i>Zea mays</i> ).....	11
1.3.1.1 Pedúnculo.....	11
1.3.1.2 Brácteas.....	11
1.3.1.3 Marlo (Olote).....	11

1.3.1.4 Granos o carióspsides.....	12
1.4 Composición del maíz ( <i>Zea mays</i> ).....	12
1.5 Composición del material lignocelulósico del marlo (olote) del maíz.....	13
1.5.1 Componentes estructurales.....	13
1.5.1.1 Celulosa.....	14
1.5.1.2 Hemicelulosa.....	14
1.5.1.3 Lignina.....	14
1.5.2 Componentes secundarios.....	14
1.5.2.1 Terpenos.....	15
1.5.2.2 Resinas.....	15
1.5.2.3 Fenoles.....	15
1.6 Obtención de etanol a partir de residuos lignocelulósicos. ....	15
1.7 Proceso para la obtención de etanol.....	17
1.7.1 Pretratamiento.....	17
1.7.1.1 Pretratamiento mecánico.....	18
1.7.1.1.1 Trituración mecánica.....	18
1.7.1.1.2 Ultrasonido.....	18
1.7.1.2 Pretratamiento térmico.....	19
1.7.1.2.1 Explosión por vapor.....	19
1.7.1.2.2 Agua líquida a alta temperatura (LHW).....	19
1.7.1.3 Pretratamiento fisicoquímicos.....	20
1.7.1.3.1 Proceso de explosión de fibra con amoníaco (AFEX).....	20
1.7.1.3.2 Explosión con CO <sub>2</sub> .....	20
1.7.1.4 Pretratamiento químico.....	20
1.7.1.4.1 Oxidación húmeda.....	20
1.7.1.4.2 Tratamientos con ozono.....	20
1.7.1.4.3 Pre hidrólisis con álcalis.....	21
1.7.1.4.4 Tratamiento con solventes orgánicos.....	21
1.7.1.5 Pre tratamientos biológicos.....	21

1.7.1.5.1 Tratamiento con hongos.....	22
1.7.1.5.2 Tratamiento con biosolventes orgánicos.....	22
1.7.2 Hidrólisis.....	22
1.7.2.1 Hidrólisis ácida diluida.....	22
1.7.2.2 Hidrólisis ácida concentrada.....	23
1.7.3 Neutralización.....	24
1.7.4 Fermentación.....	25
1.7.4.1 Sacarificación y Fermentación Simultánea (SFS).....	26
1.7.4.2 Hidrólisis y Fermentación Separada (HFS).....	27
1.7.4.3 Mecanismo de fermentación.....	28
1.7.4.4 Levaduras.....	30
1.7.4.4.1 <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .....	32
1.7.4.4.2 <i>Pichia stipitis</i> .....	32
1.8 Cinética de crecimiento celular.....	32
1.9 Cinética de la fermentación alcohólica.....	34
1.10 Destilación.....	37
1.10.1 Destilación simple.....	38
1.10.2 Destilación simple a presión atmosférica.....	38
1.10.3 Destilación simple a presión reducida.....	39
1.10.4 Destilación fraccionada.....	39
1.11 Granulometría.....	40
1.12 Factores que afectan el desempeño de los microorganismos en la producción de bioetanol.....	41
1.12.1 Inhibición por producto.....	41
1.12.2 Temperatura.....	41
1.12.3 Condiciones de aireación.....	42
1.12.4 pH.....	42
1.13 Selección apropiada del proceso para la planta de etanol a partir del maíz.....	42

CAPÍTULO II  
PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Descripción y análisis de materia prima.....	45
2.1.2 Recolección de la muestra.....	46
2.1.3 Análisis fisicoquímica de la materia prima.....	46
2.2 Descripción del método de investigación.....	47
2.2.1 Pretratamiento mecánico.....	47
2.2.2 Hidrólisis ácida.....	47
2.2.3 Neutralización.....	48
2.2.4 Fermentación y desgasificación.....	49
2.2.5 Destilación.....	50
2.3 Diseño experimental.....	52
2.4 Procedimiento empleado para la obtención de bioetanol.....	54
2.4.1 Selección y recolección de materia prima.....	54
2.4.2 Lavado de materia prima.....	54
2.4.3 Secado.....	55
2.4.4 Reducción de tamaño.....	56
2.4.5 Pesado.....	56
2.4.6 Hidrólisis ácida.....	57
2.4.7 Neutralización.....	60
2.4.8 Fermentación y desgasificación.....	61
2.4.9 Destilación.....	62

CAPÍTULO III  
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados del lavado y secado.....	63
3.1.1 Calculo del % de humedad de la materia prima.....	63
3.2 Resultados de la hidrólisis ácida diluida.....	64



3.2.1 °Brix obtenidos en la hidrólisis ácida diluida.....	64
3.3 Resultado de la neutralización.....	64
3.4 Resultado de los azúcares reductores y azúcares totales.....	65
3.5 Resultado de la fermentación.....	66
3.6 Resultados de la destilación.....	70
3.7 Diseño factorial.....	70
3.7.1 Análisis estadístico del diseño factorial en el proceso de destilación.....	70
3.7.2 Variable respuesta del rendimiento.....	72
3.7.3 Análisis de regresión lineal.....	73
3.8 Calculo del volumen de alcohol.....	75
3.9 Calculo de masa real de etanol.....	75
3.10 Calculo del rendimiento.....	75
3.11 Calculo del modelo cinético de la fermentación alcohólica.....	76
3.12 Balance de materia con reacción química en el proceso de obtención de bioetanol a partir de materia lignocelulósico.....	79
3.12.1 Balance de Materia en el proceso de secado y triturado.....	80
3.12.2 Balance de Materia en el proceso de Hidrolizado y filtrado.....	80
3.12.3 Balance de Materia en el proceso de neutralización.....	83
3.12.4 Balance de Materia en el proceso de fermentación.....	85
3.13 Balance parcial de energía en el proceso de obtención de bioetanol a partir de materia lignocelulósica.....	86
3.13.1 Balance de energía en el proceso de fermentación.....	87
3.13.2 Balance de energía en el proceso de destilación.....	87

## CAPÍTULO IV

### COSTOS

4.1 Costos de materiales.....	89
-------------------------------	----

4.1.2 Costos de los materiales de laboratorio y equipos.....	89
4.1.2 Costos de la materia prima e insumos.....	90
4.1.3 Costos totales del proyecto.....	90

## CAPÍTULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones.....	92
4.2 Recomendaciones.....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Producción global de bioetanol.....	2
Tabla 2 Exportación de alcohol etílico sin desnaturalizar.....	4
Tabla I-1 Parámetros fisicoquímicos del Bioetanol.....	8
Tabla I-2 Tipos de maíz en Bolivia.....	10
Tabla I-3 Composición fisicoquímica del maíz.....	13
Tabla I-4 Características fisicoquímicas del marlo (olote) del maíz.....	15
Tabla I-5 Porcentajes de composición de coronta del maíz.....	23
Tabla I-6 Factores a evaluar para selección del proceso.....	43
Tabla I-7 Matriz de selección de proceso.....	44
Tabla II-1 Composición de la materia prima.....	46
Tabla II-2 Factores y dominios experimentales.....	52
Tabla II-3 Matriz de experimentos.....	53
Tabla II-4 Plan de experimentos.....	53
Tabla II-5 Relación del sustrato y la solución.....	57
Tabla III-1 % de humedad de la materia prima.....	63
Tabla III-2 °Brix obtenidos en la hidrólisis ácida.....	64
Tabla III-3 Neutralización de la solución acida.....	65
Tabla III-4 % de azúcares reductores y totales obtenidos en la hidrólisis.....	65
Tabla III-5 Parámetros medidos de la fermentación.....	66
Tabla III-6 Evolución del °Brix y pH durante la fermentación para las 4 muestras.....	66
Tabla III-7 Producto obtenido para diferentes muestras.....	70
Tabla III-8 Datos para el análisis de varianza.....	71
Tabla III-9 Datos para el análisis de varianza.....	71
Tabla III-10 Análisis de varianza ANOVA (Rendimiento).....	72
Tabla III-11 Variables introducidas/eliminadas.....	73
Tabla III-12 Resumen del modelo <sup>b</sup> .....	73

Tabla III-13 Coeficientes ANOVA <sup>b</sup> .....	74
Tabla III-14 Coeficientes ANOVA <sup>a</sup> .....	74
Tabla III-15 Rendimiento de alcohol (%).....	76
Tabla III-16 Estadísticas del método de tres puntos.....	77
Tabla III-17 Composición masa molar de la materia lignocelulósica.....	82
Tabla IV-1 Costos de material de laboratorio y equipos.....	89
Tabla IV-2 Costos de la materia prima e insumos.....	90
Tabla IV-3 Costos totales del proyecto.....	90

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I-1 Estructura del marlo (olote) de maíz.....	12
Figura I-2 Obtención de etanol a partir de residuos lignocelulósicos.....	16
Figura I-3 fermentación alcohólica.....	29
Figura I-4 Tensiones medioambientales potenciales en la <i>S. cerevisiae</i> durante la fermentación para producción de etanol.....	31
Figura I-5 Fases del crecimiento celular de microorganismos.....	33
Figura I-6 Perfil de consumo de sustrato en una fermentación alcohólica por lotes.....	37
Figura II-1 Evolución de la producción de maíz en Bolivia (2001-2016).....	45
Figura II-2 Proceso de obtención de bioetanol a partir de marlo de maíz.....	51
Figura II-3 Plantaciones de maíz en la zona.....	54
Figura II-4 Marlo u olote de la mazorca.....	55
Figura II-5 Secado de la materia prima.....	55
Figura II-6 Triturado de la materia prima.....	56
Figura II-7 Pesado de la materia prima.....	57
Figura II-8 Efecto de los factores sobre el porcentaje de azúcares reductores.....	58
Figura II-9 Hidrolización de la solución con relación 1:12.5 (p/v).....	59
Figura II-10 Solución hidrolizada.....	60
Figura II-11 Muestras para llevar al CEANID.....	60

Figura II-12 Proceso de fermentación.....	61
Figura II-13 Fermentador casero.....	62
Figura II-14 Destilación del bioetanol.....	62
Figura II-15 Etanol producto final.....	63
Figura III-1 Muestra 1 tiempo vs pH y °Brix.....	67
Figura III-2 Muestra 2 tiempo vs pH y °Brix.....	68
Figura III-3 Muestra 3 tiempo vs pH y °Brix.....	68
Figura III-4 Muestra 4 tiempo vs pH y °Brix.....	69
Figura III-5 Comparación de la 4 muestras tiempo vs °Brix.....	69
Figura III-6 Resultados experimentales de la fermentación en función del tiempo.....	78

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1.....	97
ANEXO 2.....	98
ANEXO 3.....	99
ANEXO 4 Calor específico del agua entre 0 a 100 °C.....	100
ANEXO 5 Resultados parámetros materia prima CEANID.....	101
ANEXO 6 Resultados azúcares reductores y totales muestra 1 CEANID.....	102
ANEXO 7 Resultados azúcares reductores y totales muestra 2 CEANID.....	103
ANEXO 8 Resultados azúcares reductores y totales muestra 3 CEANID.....	104
ANEXO 9 Resultados azúcares reductores y totales muestra 4 CEANID.....	105