

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



PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE CASCARILLA DE ARROZ
MEDIANTE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA

Por:

CARMEN PACELLO TEJERINA

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

Octubre de 2023

TARIJA-BOLIVIA

DEDICATORIA

A Dios y la Virgen María, que me guían y me fortalecen en todo momento, y me dieron sabiduría para desarrollar este proyecto.

A mi madre, por darme la vida, por su ejemplo de amor y apoyo constante, que me ha permitido lograr todas mis metas.

A mi padre, por darme el apoyo para salir siempre adelante.

A todos los docentes de la carrera de Ing. Química, que inculcaron en mí el constante crecimiento intelectual.

A mis amigos y compañeros, que fueron parte de mi formación.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, que me ilumina y acompaña en este camino, y me permite terminar este proyecto.

A mi madre, por ser la principal promotora de alcanzar mis sueños, por confiar y creer en mí todos los días.

A mi padre, por su apoyo y palabras para salir adelante sin rendirme.

A mis hermanas que me apoyaron siempre y nunca dudaron de mi capacidad.

*“Cuanto más grande es la
dificultad, más gloria hay en
superarla.”*

Epícuro

ÍNDICE GENERAL

ADVERTENCIAS.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
PENSAMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	v

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES.....	2
OBJETIVOS	5
JUSTIFICACIÓN	6

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Breve reseña del Cultivo del Arroz.....	9
1.2. El Arroz.....	9
1.3. Taxonomía del Arroz	10
1.4. Cascarilla de Arroz.....	11
1.5. Producción y comercialización mundial del Arroz.....	13
1.6. Principales países productores	13
1.7. Producción de Arroz en Bolivia.....	14
1.8. Biomasa Lignocelulósica	15
1.8.1. Celulosa	17
1.8.2. Hemicelulosa	17

1.8.3.	Lignina.....	17
1.9.	Uso de cáscaras de arroz en la industria.....	17
1.10.	Biocombustibles	18
1.10.1.	Biocombustibles de Primera generación	19
1.10.2.	Biocombustibles de Segunda Generación	19
1.11.	Bioetanol	20
1.12.	Usos del Bioetanol.....	21
1.12.1.	Combustible para transporte.....	21
1.12.2.	Energía Eléctrica y cogeneración	22
1.12.3.	Industria Química	22
1.12.4.	Bioplásticos y Materiales Sustentables	22
1.12.5.	Alimentos y Bebidas	22
1.12.6.	Combustible Doméstico y Calefacción	22
1.12.7.	Desinfectante	23
1.13.	Conversión de la Biomasa Lignocelulósica a Bioetanol	23
1.14.	Pretratamiento	23
1.14.1.	Tipos de Pretratamiento.....	24
1.14.1.1.	Pretratamientos mecánicos.	24
1.14.1.1.1.	Trituración Mecánica	24
1.14.1.1.2.	Ultrasonido.....	25
1.14.1.2.	Pretratamientos Térmicos	25
1.14.1.2.1.	Explosión de vapor.....	25
1.14.1.2.2.	Agua Caliente líquida presurizada	25
1.14.1.3.	Pretratamientos químicos.....	25

1.14.1.3.1.	Pretratamientos en medio alcalino	25
1.14.1.3.2.	Pretratamientos con ácido diluido.....	26
1.14.1.3.3.	Pretratamiento por Oxidación Húmeda.....	26
1.14.1.4.	Pretratamientos biológicos.....	26
1.14.1.4.1.	Tratamiento con hongos	26
1.14.1.4.2.	Tratamiento con bio-solventes orgánicos.....	27
1.14.2.	Ventajas y desventajas de los pretratamientos	27
1.15.	Hidrólisis	30
1.15.1.	Tipos de hidrólisis	30
1.15.1.1.	Hidrólisis ácida	30
1.15.1.2.	Hidrólisis alcalina	30
1.15.1.3.	Hidrólisis enzimática	31
1.15.2.	Ventajas y desventajas de los tipos de Hidrólisis.....	32
1.16.	Fermentación	32
1.16.1.	Parámetros a controlar en el proceso de fermentación.....	33
1.16.1.1.	Temperatura	33
1.16.1.2.	Aireación.....	34
1.16.1.3.	pH.....	34
1.16.1.4.	Nutrientes.....	35
1.17.	Levaduras	35
1.17.1.	Saccharomyces cerevisiae	35
1.17.1.1.	Morfología de la levadura.....	36
1.17.1.1.1.	Forma y tamaño.....	36
1.17.1.1.2.	Estructura celular	36

1.17.1.2.	Fisiología de las levaduras	37
1.17.1.2.1.	Requerimientos nutricionales.....	37
1.18.	Enzimas	37
1.19.	Destilación.....	38
1.19.1.	Destilación Simple	38
1.19.2.	Destilación Fraccionada	38
1.20.	Normativa para el Bioetanol en Bolivia.....	39
1.20.1.	Bioetanol como Aditivo de Origen Vegetal.....	39
1.20.2.	Bioetanol como desinfectante	39

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2.1.	Descripción de la materia prima	42
2.1.1.	Análisis Físico-químico de la materia prima.....	42
2.2.	Selección del proceso a emplear para el proceso de Producción de Bioetanol a partir de Cascarilla de Arroz	43
2.2.1.	Selección de la etapa de pretratamiento	45
2.2.2.	Selección de la Hidrólisis a utilizar en la obtención de Bioetanol a partir de Cascarilla de Arroz.....	46
2.3.	Proceso seleccionado a emplear en la Producción de Bioetanol a partir de Cascarilla de Arroz.....	48
2.4.	Diseño Experimental para el proceso de obtención de bioetanol	49
2.4.1.	Diseño factorial para la etapa de Hidrólisis Enzimática.....	49
2.5.	Obtención de Bioetanol a escala laboratorio.....	51

2.5.1.	Acondicionamiento de la materia prima.....	52
2.5.1.1.	Lavado	52
2.5.1.2.	Secado.....	52
2.5.1.3.	Molienda.....	52
2.5.1.4.	Tamizado	53
2.5.2.	Pretratamiento Alcalino.....	54
2.5.2.1.	Filtrado, lavado y secado	56
2.5.3.	Hidrólisis Enzimática	58
2.5.4.	Obtención del sustrato para Fermentación	60
2.5.5.	Fermentación Alcohólica	61
2.5.6.	Filtrado	64
2.5.7.	Destilación.....	65

CAPÍTULO III

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1.	Resultados obtenidos en la Materia Prima.....	69
3.1.1.	Análisis proximal de la Cascarilla de Arroz.....	69
3.1.2.	Análisis Granulométrico.....	69
3.2.	Resultados obtenidos en el Pretratamiento Alcalino.....	70
3.2.1.	Resultados del Secado posterior al Pretratamiento	71
3.3.	Resultados del proceso de hidrólisis enzimática.....	74
3.4.	Diseño Factorial	76

3.4.1. Análisis estadístico del diseño factorial en el proceso de hidrólisis enzimática	77
3.4.2. Análisis de regresión lineal en la etapa de hidrólisis enzimática	78
3.5. Resultados obtenidos en la elaboración del sustrato para fermentación	81
3.5.1. Resultados en la obtención del sustrato seco.....	81
3.5.2. Resultados de la hidrólisis enzimática en la obtención del sustrato para fermentación.....	82
3.6. Resultados del proceso de fermentación alcohólica.....	82
3.6.1. Cinética de Fermentación.....	86
3.7. Resultados de la destilación	89
3.7.1. Resultados de los análisis realizados al bioetanol obtenido	89
3.8. Balance de Materia para la obtención de bioetanol de cascarilla de arroz.....	90
3.8.1. Balance de materia en el acondicionamiento de la materia prima	92
3.8.1.1. Balance de materia en la etapa de lavado	93
3.8.1.2. Balance de materia en la etapa de secado	94
3.8.1.3. Balance de materia en la etapa de molienda	95
3.8.1.4. Balance de materia en la etapa de tamizado	95
3.8.2. Resumen general de balance de materia en el proceso de acondicionamiento de la materia prima.....	96
3.8.3. Balance de materia en la etapa de pretratamiento alcalino.....	97
3.8.3.1. Balance de materia en la etapa de pretratamiento alcalino.....	99
3.8.3.2. Balance de materia en la etapa de filtrado	100
3.8.3.3. Balance de materia en la etapa de Lavado	101
3.8.3.4. Balance de materia en la etapa de secado	101
3.8.4. Resumen general balance de materia en la etapa de pretratamiento	102

3.8.5.	Balance de materia en la etapa de hidrólisis enzimática	103
3.8.6.	Resumen general de balance de materia en la etapa de hidrólisis enzimática	105
3.8.7.	Balance de materia en la etapa de fermentación alcohólica	106
3.8.7.1.	Balance de materia en la etapa de preparación del mosto para fermentación.....	107
3.8.7.2.	Balance de materia en la etapa de fermentación.....	108
3.8.7.2.1.	Cantidad de dióxido de carbono desprendido en el proceso de fermentación.....	109
3.8.7.3.	Balance de materia en la etapa de filtración	110
3.8.8.	Resumen general de balance de materia en la etapa de fermentación alcohólica.....	111
3.8.9.	Balance de materia en la etapa de destilación	111
3.8.10.	Resumen general de balance de materia en la etapa de destilación	114
3.9.	Resultados del balance de materia en la obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz.....	114
3.10.	Balance de Energía para la obtención de bioetanol de cascarilla de arroz .	116
3.10.1.	Balance de energía en la etapa de secado de la cascarilla de arroz	117
3.10.1.1.	Calor sensible.....	117
3.10.1.2.	Calor latente.....	117
3.10.1.3.	Calculo del calor total	118
3.10.2.	Cálculo de balance de energía en la etapa de destilación.....	118
3.10.2.1.	Calor sensible.....	118
3.10.2.2.	Calor latente de vaporización	120
3.10.2.3.	Calor absorbido por el condensador	120

3.10.2.4. Calor total	121
-----------------------------	-----

CAPÍTULO IV

COSTOS DEL PROYECTO

4.1. Evaluación de costos	123
4.2. Costo de producción.....	127

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones	130
5.2. Recomendaciones.....	132

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA	133
--------------------	-----

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I-1: Composición del grano de arroz y sus fracciones	10
Tabla I-2. Clasificación taxonómica del arroz	11
Tabla I-3: Valores de los principales constituyentes de la cascarilla de arroz.....	12
Tabla I-4: Producción, comercio y consumo mundial de cereales en millones de toneladas (MMt) y porcentaje (%) en 2019	13
Tabla I-5: Producción, comercio y consumo de arroz blanco por región, en millones de toneladas (MMt) y porcentaje (%) en la temporada 2018/19.	14
Tabla I-6: Producción de Arroz (TM).....	15
Tabla I-7: Propiedades físicas y termodinámicas del etanol.....	20
Tabla I-8: Clasificación Taxonómica de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	36
Tabla I-9: Características Técnicas de calidad del Etanol Anhidro	39
Tabla I-10: Características de bioetanol como desinfectante.....	40
Tabla II-1: Factores a evaluar en la selección del pretratamiento a utilizar.....	45
Tabla II-2: Escala de puntaje a emplear	45
Tabla II-3: Cuadro de selección del pretratamiento a utilizar.....	46
Tabla II-4: Factores a evaluar en la selección de la hidrólisis a utilizar	47
Tabla II-5: Escala de puntaje a emplear	47
Tabla II-6: Selección de Hidrólisis a emplear en el proceso de obtención de Bioetanol	47
Tabla II-7: Niveles de variación de los factores en la hidrólisis enzimática.....	49
Tabla II-8: Matriz de diseño experimental para el proceso de Hidrólisis Enzimática	50
Tabla III-1: Análisis Proximal de la Cascarilla de Arroz.....	69
Tabla III-2: Análisis Granulométrico.....	70

Tabla III-3: Relación entre Cascarilla de arroz e Hidróxido de Sodio.....	70
Tabla III-4: Masa que se retira en el pretratamiento alcalino	71
Tabla III-5: Datos de la curva de secado.....	72
Tabla III-6: Datos de la Humedad de la cascarilla de arroz pretratada.....	73
Tabla III-7: Resultados de la Concentración de Sólidos Solubles (°Brix) del proceso de hidrólisis enzimática.....	75
Tabla III-8: Resultados del porcentaje de azúcares reductores del proceso de hidrólisis enzimática	76
Tabla III-9: Matriz de diseño experimental en la etapa de hidrólisis enzimática	77
Tabla III-10: Análisis de Varianza ANOVA en la etapa de hidrólisis enzimática	78
Tabla III-11: ANOVA Datos y Resultados Obtenidos Aplicando Regresión Lineal en la Hidrólisis Enzimática	79
Tabla III-12: Coeficiente del Modelo	79
Tabla III-13: Coeficiente del Modelo Modificado.....	80
Tabla III-14: Resultados de la obtención del sustrato seco.....	81
Tabla III-15: Resultados de la hidrólisis enzimática en la obtención del sustrato para fermentación.....	82
Tabla III-16: Medición de los °Brix y pH en la fermentación	83
Tabla III-17: Estadísticas de la Cinética de Fermentación.....	87
Tabla III-18: Cantidad y grado alcohólico del bioetanol recogido en la etapa de destilación	89
Tabla III-19: Resultado del rendimiento del alcohol obtenido	89
Tabla III-20: Resultados de los análisis realizados al bioetanol obtenido	90
Tabla IV-1: Detalle de costos de insumos y materia prima utilizados en la parte experimental del proceso de obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz... ..	123

Tabla IV-2: Detalle de costos de materiales adquiridos en la parte experimental del proceso de obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz.....	124
Tabla IV-3: Detalle de los costos de análisis fisicoquímicos.....	125
Tabla IV-4: Detalle de costos de material de apoyo	125
Tabla IV-5: Detalle de costos de energía en los equipos utilizados.....	126
Tabla IV-6: Detalle de costos totales del estudio.....	126
Tabla IV-7: Detalle de costos de materia prima.....	127
Tabla IV-8: Detalle costos de energía de los equipos utilizados	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: El Arroz	10
Figura 1-2: Cascarilla de Arroz.....	12
Figura 1-3: Estructura de la Biomasa Lignocelulósica.	16
Figura 1-4: Representación del efecto del pretratamiento sobre el material vegetal ..	24
Figura 1-5: Ruta Metabólica de la Fermentación Alcohólica	33
Figura 2-1: Recolección de la Cascarilla de Arroz.	42
Figura 2-2: Muestra de cascarilla de arroz.....	43
Figura 2-3: Alternativas a seleccionar en el Proceso de Obtención de Bioetanol	44
Figura 2-4: Cascarilla de arroz en etapa de secado	52
Figura 2-5: Molido de cascarilla de arroz	53
Figura 2-6: Rotap vibratorio eléctrico.....	54
Figura 2-7: Muestra seleccionada	54
Figura 2-8: Cascarilla de arroz en hidróxido de sodio	55
Figura 2-9: Muestras dispuestas al interior del Autoclave.....	56
Figura 2-10: Filtrado al vacío después del pretratamiento.....	57
Figura 2-11: Secado de la muestra lavada.....	57
Figura 2-12: Cascarilla de arroz pretrada y secada	57
Figura 2-13: Ajuste del pH de las soluciones.....	59
Figura 2-14: Hidrólisis enzimática desarrollándose en un termostato.	59
Figura 2-15: Medición de los °Brix obtenidos en la hidrólisis enzimática.	60
Figura 2-16: Toma de muestra para posterior análisis.....	60
Figura 2-17: Sustrato para fermentación.....	61

Figura 2-18: Activación de la levadura <i>Sascharomyce cerevisiae</i>	62
Figura 2-19: Fermentación Alcohólica en baño María	63
Figura 2-20: Toma de muestra y medición de pH.	63
Figura 2-21: Fermentado obtenido del proceso.	64
Figura 2-22: Fermentado ya filtrado.	64
Figura 2-23: Columna de destilación.	66
Figura 2-24: Medición del grado alcohólico.	67
Figura 2-25: Bioetanol obtenido de la destilación.	67
Figura 3-1: Curva de Secado.....	73
Figura 3-2: Porcentaje de Humedad cascarilla de arroz pretratada.....	74
Figura 3-3: Modelo Lineal	81
Figura 3-4: Prueba 1, tiempo vs °Brix, pH.	84
Figura 3-5: Prueba 2, tiempo vs °Brix, pH.	85
Figura 3-6: Lineación para determinar la cinética de fermentación alcohólica.	88
Figura 3-7: Diagrama de balance de materia general para la obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz	91
Figura 3-8: Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de acondicionamiento de la materia prima	92
Figura 3-9: Balance de materia en la etapa de lavado.....	93
Figura 3-10: Balance de materia en la etapa de secado	94
Figura 3-11: Balance de materia en la etapa de molienda	95
Figura 3-12: Balance de materia en la etapa de tamizado.....	96
Figura 3-13: Resumen general balance de materia en la etapa de acondicionamiento de materia.....	97

Figura 3-14: Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de pretratamiento alcalino	98
Figura 3-15: Balance de materia en la etapa de pretratamiento	99
Figura 3-16: Balance de materia en la etapa de filtrado.....	100
Figura 3-17: Balance de materia en la etapa de lavado.....	101
Figura 3-18: Balance de materia en la etapa de filtrado.....	102
Figura 3-19: Resumen general balance de materia en la etapa de pretratamiento alcalino	103
Figura 3-20: Diagrama de flujo del balance de materia en la etapa de hidrólisis enzimática	104
Figura 3-21: Balance de materia en la etapa de Hidrólisis enzimática	104
Figura 3-22: Resumen general de balance de materia en la etapa de hidrólisis enzimática	105
Figura 3-23: Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de pretratamiento alcalino	106
Figura 3-24: Balance de materia en la etapa de preparación del mosto para fermentación	107
Figura 3-25: Balance de materia en la etapa de fermentación	108
Figura 3-26: Balance de materia en la etapa de filtración.....	110
Figura 3-27: Resumen general de balance de materia en la etapa de fermentación alcohólica	111
Figura 3-28: Diagrama de flujo del balance de materia en la etapa de destilación...	112
Figura 3-29: Balance de materia en el proceso de destilación	113
Figura 3-30: Resumen general del balance de materia en la etapa de destilación para obtener bioetanol.....	114

Figura 3-31: Resumen general del balance de materia en la obtención de bioetanol a partir de cascarilla de arroz 115