

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

OBTENCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DE RESIDUOS
SÓLIDOS VEGETALES

Por:

Rafael Marcelo Villa Vaca

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

Agosto de 2015

TARIJA-BOLIVIA

V°B°

M. Sc. Ing. Ernesto Álvarez Gozalvez

DECANO (a)

M. Sc. Ing. Silvana Paz Ramírez

VICEDECANO (a)

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

ING. JORGE TEJERINA OLLER

ING. CECILIA CALDERÓN

ING. LUIS FERNANDO ZENTENO

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

DEDICATORIA

Dedico este Proyecto de Investigación a Dios y a mis padres. A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento. Depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ellos que soy lo que soy ahora. Los amo con mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizaje, experiencia y sobre todo felicidad.

Le doy gracias a mis padres por apoyarme en todo momento y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida.

A mis hermanos por ser parte de mi vida y representar la unidad familiar, por ser ejemplos de desarrollo profesional a seguir y por llenar mi vida de alegrías y amor cuando más lo he necesitado.

Le agradezco la confianza, apoyo y dedicación de tiempo a mis docentes y tribunales: Ingeniera Elizabeth Sánchez, Ingeniero Ernesto Auad, Ingeniero Jorge Tejerina, Ingeniero Luis Zenteno, Ingeniera Cecilia Calderón, Ingeniero Ignacio Velásquez, Ingeniero Antonio. Por haber compartido conmigo sus conocimientos y sobre todo sus amistad.

Agradecer a todas las personas que han formado parte de mi vida hasta la culminación de mis estudios, por el apoyo y la confianza que me brindaron y por haber creído siempre y en cada momento en mí.

PENSAMIENTO

“No muestres temor cuando estés ante tus enemigos, se valiente y recto. Di la verdad siempre aun cuando esta te conduzca a la muerte. La santidad esta en los buenos hábitos, protege a los indefensos y siempre se justo, así Dios podrá amarte”.

ÍNDICE

	Página
Advertencia.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Pensamiento.....	iv
Resumen.....	v

INTRODUCCIÓN

Antecedentes.....	1
Objetivos.....	6
Objetivo General.....	6
Objetivos Específicos.....	6
Justificación del proyecto de grado.....	7

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Generalidades.....	10
1.2. Bioetanol como biocombustible	11
1.2.1. Condiciones de mercado (perspectiva mundial).....	13
1.2.2. Condiciones de mercado (perspectiva nacional).....	13
1.3. Biomasa.....	16
1.3.1. Residuos Sólidos Urbanos (R.S.U.).....	19

1.3.2. El Problema con los Residuos y su aprovechamiento como biomasa.....	19
1.3.3. Composición de los Residuos Sólidos Urbanos.....	21
1.3.4. Residuos sólidos orgánicos y su clasificación.....	22
1.3.4.1. Clasificación según su fuente de generación.....	23
1.3.4.2. Clasificación según su naturaleza y/o característica física.....	24
1.3.5. Propiedades biológicas de los residuos sólidos orgánicos.....	25
1.3.6. Ventajas de los Restos vegetales.....	26
1.3.7. Restos de verduras, hortalizas y Cascaras de frutas.....	26
1.3.8. Biomasa lignocelulósica.....	29
1.3.8.1. Composición de la biomasa lignocelulósica.....	29
1.3.8.2. Celulosa, hemicelulosa y lignina.....	30
1.4. Tecnología de la Biomasa.....	32
1.4.1. Proceso Biológico (biomasa húmeda).....	33
1.4.1.1. Procesos de fermentación alcohólica.....	33
1.4.2. Proceso de Obtención de Bioetanol a partir de material lignocelulósico.....	34
1.4.2.1. Pre-tratamiento.....	35
1.4.2.2. Hidrólisis.....	37
1.4.2.2.1. Hidrólisis con ácidos concentrados.....	37
1.4.2.2.2. Hidrólisis con ácidos diluidos.....	38
1.4.2.2.3. Hidrólisis enzimática.....	39
1.4.2.3. Fermentación alcohólica.....	40
1.4.2.3.1. Levaduras.....	40
1.4.2.3.2. Crecimiento microbiano.....	41

1.4.2.3.3. Cinética de fermentación.....	42
1.4.2.3.4. Bioquímica de la reacción.....	46
1.4.2.3.5. Limitaciones del proceso de fermentación.....	47
1.4.2.4. Hidrólisis y fermentación alcohólica simultánea (HFS).....	49
1.4.2.5. Destilación.....	50
1.4.2.5.1. Destilación extractiva combinada con efecto salino.....	51

CAPITULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Materia Prima.....	53
2.2. Bienestar Estudiantil.....	53
2.2.1. Comedor Universitario.....	54
2.3. Clasificación y Cuantificación de los Residuos Generados en el Comedor.....	62
2.3.1. Selección y Cuantificación de Subproductos (Norma Boliviana NB 743).....	64
2.3.1.1. Breve Descripción de los Residuos Generados en el Comedor.....	66
2.3.2. Residuos Alimenticios generados en el Comedor.....	66
2.3.2.1. Residuos Sólidos Vegetales.....	67
2.3.3. Eliminación de los Residuos Vegetales del Comedor Universitario.....	69
2.3.4. Análisis Microbiológico de los Residuos Vegetales.....	69
2.4. Caracterización de los Residuos Sólidos Vegetales.....	70
2.4.1. Determinación de los Parámetros Físicos y Químicos de los Residuos Sólidos Vegetales.....	71
2.5. Descripción del Método de Investigación.....	73
2.5.1. Fundamentación General de la Selección del Proceso.....	73

2.5.2. Diseño Factorial.....	74
2.5.2.1. Diseño Factorial (Etapa de Hidrolisis Acida).....	74
2.5.2.2. Diseño Factorial (Etapa de Fermentación Alcohólica).....	75
2.6. Obtención de Bioetanol a Escala de Laboratorio.....	77
2.6.1. Obtención de la Materia Prima.....	78
2.6.2. Selección de la Materia Prima.....	78
2.6.3. Triturado.....	78
2.6.4. Pre-tratamiento con Vaporización a Presión.....	79
2.6.5. Triturado con Licuadora.....	82
2.6.6. Secado.....	83
2.6.7. Molido.....	85
2.6.8. Hidrólisis con Ácidos Diluidos.....	86
2.6.8.1. Determinación del Volumen de la Dilución.....	87
2.6.8.2. Determinación de la Densidad de la Dilución.....	88
2.6.8.3. Determinación de los Grados Brix.....	89
2.6.9. Obtención del Sustrato para la Fermentación.....	90
2.6.10. Filtrado.....	92
2.6.10.1. Determinación de Azúcares Reductores del Sustrato.....	93
2.6.11. Corrección del Sustrato.....	93
2.6.12. Inoculación del Sustrato.....	94
2.6.13. Fermentación Alcohólica.....	95
2.6.13.1. Consumo del Sustrato.....	97
2.6.13.2. Fermentación con levadura activa (crema) de I.A.B.S.A (Industrias Agrícolas de Bermejo Sociedad Anónima).....	98

2.6.14. Obtención del Producto Final.....	102
---	-----

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Resultados Obtenidos de la Selección y Cuantificación de los Residuos.....	105
3.2. Resultados Obtenidos del Análisis Microbiológico de los Residuos.....	106
3.3. Resultados Obtenidos de la Determinación de Humedad.....	107
3.3.1. Determinación de Humedad de MIX restos de (F/V/H).....	107
3.3.2. Determinación de Humedad de Restos de Verduras (V).....	110
3.3.3. Determinación de Humedad de los Restos de Hortalizas (H).....	113
3.4. Resultados de la Determinación de Azúcares Totales y Reductores.....	116
3.5. Resultados Obtenidos de la Parte Experimental del Proyecto de Investigación.....	117
3.5.1. Resultados obtenidos de las Etapas de Triturado, Pre-tratamiento, Triturado con Licuadora, Secado y molido.....	118
3.5.2. Resultados Obtenidos de la Etapa de Hidrolisis Acida.....	120
3.5.2.1. Resultados Obtenidos de la determinación del Volumen de la dilución....	125
3.5.2.2. Resultados Obtenidos de la Determinación de la Densidad de la Dilución.....	126
3.5.3. Resultados de la Obtención del Sustrato para la Fermentación.....	126
3.5.3.1. Resultados de la Hidrolisis en la Obtención del Sustrato.....	128
3.5.3.2. Volumen Obtenido después del Filtrado.....	129
3.5.3.3. Resultados de la Determinación de Azúcares Reductores del Sustrato.....	130
3.5.3.4. Resultados Obtenidos de la Corrección del Sustrato.....	131

3.5.4. Resultados Obtenidos de la Etapa de Fermentación Alcohólica.....	132
3.5.4.1. Resultados Obtenidos de la Fermentación con Crema de I.A.B.S.A.....	134
3.5.4.2. Resultados de la Medición del (°GL) de los Vinos Obtenidos de la fermentación.....	136
3.6. Determinación de Rendimientos.....	138
3.6.1. Determinación de Rendimientos en la Hidrolisis Acida.....	138
3.6.2. Determinación de Rendimientos en la Fermentación Alcohólica.....	140
3.6.2.1. Rendimiento teórico de la fermentación.....	140
3.6.2.2. Rendimiento real de la fermentación.....	141
3.7.2.3. Rendimiento de la Fermentación Alcohólica.....	142
3.7. Determinación de las Condiciones de Operación y los Parámetros Físicos y Químicos involucrados en el Proceso de Fermentación Alcohólica Realizado.....	143
3.7.1. Descripción del Vino, Sustrato, Mezcla, Residuo y Biomasa.....	143
3.7.2. Identificación de las Condiciones de Operación y Parámetros Físicos y químicos de los Restos de Hortalizas (H) involucrados en el Proceso de Fermentación.....	143
3.7.2.1. Identificación en el Pre-tratamiento.....	144
3.7.2.1.1. Identificación en el Triturado.....	144
3.7.2.1.2. Identificación en el Pre-tratamiento con Vapor a Presión.....	144
3.7.2.1.3. Identificación en el Triturado con Licuadora.....	144
3.7.2.1.4. Identificación en el Secado.....	144
3.7.2.1.5. Identificación en el Molido.....	144
3.7.2.2. Identificación en la etapa de Hidrolisis Acida.....	144
3.7.2.3. Identificación en la Etapa de Fermentación Alcohólica.....	145
3.7.2.4. Identificación en la Destilación Simple.....	145

3.8. Análisis Estadístico de la Variables del Proceso.....	146
3.8.1. Análisis Estadístico de la Hidrolisis Acida.....	146
3.8.2. Análisis Estadístico de la Fermentación Alcohólica.....	149

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones.....	152
4.2. Recomendaciones.....	155

BIBLIOGRAFÍA

	Paginas
1. Documentos.....	156
2. Páginas WEB.....	156

Índice de tablas y/o cuadros

	Paginas
Tabla 1. Demanda de los Principales Países Consumidores (En billones de litros).....	3
Tabla 2. Bioetanol: Mayores Productores Mundiales (en billones de litros).....	4
Tabla 3. Indicadores de Costo (Principales Países Productores).....	7
Tabla I-1. Bolivia: Estructura de Matriz Energética 2005.....	14
Tabla I-2. Bolivia: Exportación de Alcohol Desnaturalizado y sin Desnaturalizar....	14
Tabla I-3. Bolivia: Mercados Externos de Alcohol Desnaturalizado y sin Desnaturalizar.....	15
Tabla I-4. Diseño experimental de hidrólisis acida de residuos agroindustriales.....	38

Tabla I-5. Tratamientos experimentales y resultados obtenidos.....	39
Tabla II-1. Hojas de Menú del Comedor Universitario.....	55
Tabla II-2 Clasificación de Subproductos.....	64
Tabla II-3. Generación de Residuos Vegetales del Comedor (turno mañana).....	68
Tabla II-4. Detalles de la Muestra para Análisis Microbiológico.....	69
Tabla II-5. Caracterización de los Residuos Vegetales.....	71
Tabla II-6. Diseño Experimental de la Etapa de Hidrólisis Acida.....	74
Tabla II-7. Combinación de las Variables de la Hidrolisis Acida.....	75
Tabla II-8. Diseño Experimental de la Etapa de Fermentación.....	76
Tabla II-9. Combinación de las Variables de la Fermentación.....	76
Tabla II-10 Cantidad para cada Componentes de las Mezclas Base.....	79
Tabla II-11. Cantidad destinada a la determinación de Humedad.....	80
Tabla II-12. Cantidad destinada al Pre-tratamiento.....	80
Tabla II-13. Cantidad obtenida después del Pre-tratamiento con Vapor.....	81
Tabla II-14. Cantidad Obtenida del Triturado con Licuadora.....	82
Tabla II-15. Cantidades obtenidas del Secado.....	84
Tabla II-16. Cantidades obtenidas de la Molienda.....	85
Tabla II-17. Cantidades destinadas a la Determinación de Azucares.....	86
Tabla II-18. Cantidades destinadas a la Hidrolisis Acida.....	86
Tabla II-19. Experimentaciones de mayor °Brix Obtenidos en la Hidrolisis.....	90
Tabla II-20. Cantidad de materia obtenida de cada etapa de la Mezcla (H).....	91
Tabla II-21. Cantidad de materia obtenida de cada etapa de la Mezcla (F/V/H).....	91
Tabla III-1. Resultados de la Selección y Cuantificación de los Residuo.....	105

Tabla III-2. Resultado del Análisis Microbiológico de los residuos.....	107
Tabla III-3. Determinación de Humedad de los Restos de MIX (F/V/H).....	108
Tabla III-4. Datos Obtenidos de la Determinación de Humedad de MIX (F/V/H)..	110
Tabla III-5. Determinación de Humedad de los restos de Verduras.....	111
Tabla III-6. Datos Obtenidos de la Determinación de Humedad de Restos de (V)..	113
Tabla III-7. Determinación de humedad de los restos de Hortalizas.....	114
Tabla III-8. Datos Obtenidos de la Determinación de Humedad de Restos de (H)..	116
Tabla III-9. Resultado de Laboratorio (Determinación de Azucares).....	117
Tabla III-10. Resultados Obtenidos de cantidad de materia utilizada desde la etapa de Triturado hasta el Molido.....	118
Tabla III-11. Resultados de MIX (F/V/H) en la Etapa de Hidrolisis Acida.....	120
Tabla III-12. Resultados de restos de (V) en la Etapa de Hidrolisis Acida.....	120
Tabla III-13. Resultados de restos de (H) en la Etapa de Hidrolisis Acida.....	121
Tabla III-14. Resultados de la Determinación Del Volumen de la Dilución.....	125
Tabla III-15. Resultados de la Determinación de la densidad de la Dilución.....	126
Tabla III-16. Resultados de la obtención de la masa del Sustrato para la fermentación	127
Tabla III-17. Resultados de la hidrolisis acida en la obtención del Sustrato para la fermentación alcohólica.....	129
Tabla III-18. Volumen del sustrato obtenido después del Filtrado.....	130
Tabla III-19 Cantidad de Sustrato Destinada a la Fermentación.....	130
Tabla III-20. Resultados de la Determinación de Azucares Reductores del Sustrato.....	131
Tabla III-21. Corrección del pH del sustrato.....	131

Tabla III-22. Medición del Consumo del Sustrato (°Brix) en la fermentación	133
Tabla III-23. Medición de la Densidad y del Consumo de Sustrato utilizando la Crema de I.A.B.S.A.....	135
Tabla III-24. Resumen de los Resultados y de la Medición del °GL de los Vinos Obtenidos de la fermentación alcohólica.....	137
Tabla III-25. Determinación de Rendimientos de la Hidrolisis Acida.....	139
Tabla III-26. Determinación de Rendimientos de la Fermentación Alcohólica.....	142
Tabla III-27. Diseño Factorial Hidrolisis Acida.....	146
Tabla III-28. Prueba de efectos inter-sujetos (Hidrolisis Acida).....	147
Tabla III-29- ANOVA (Hidrolisis Acida).....	148
Tabla III-30. ANOVA (Corregido Hidrolisis Acida).....	149
Tabla III-31. Diseño Factorial Fermentación Alcohólica.....	149
Tabla III-32. Prueba de Efectos Inter-sujetos (fermentación Alcohólica).....	150
Tabla III-33. ANOVA (Fermentación Alcohólica).....	150

Índice de figuras

	Paginas
Figura 1.1. Fuentes de biomasa.....	17
Figura 1.2. Ciclo del CO ₂	18
Figura 1.3. Aplicaciones de la biomasa.....	20
Figura 1.4. Clasificación de los residuos orgánicos según su naturaleza.....	25
Figura 1.5. Modelo de moléculas de celulosa unidas por puentes de Hidrógeno.....	30
Figura 1.6. Aldo-pentosas (L – arabinosa, L –arabinopiranososa, L- arabinofuranosa).	31

Figura 1.7. Aldo-hexosas (D -(+) – glucosa, D - (+)- glucopiranososa, D (+) glucopiranososa.....	31
Figura 1.8. Estructura general de la lignina.....	32
Figura 1.9. Clasificación de los procesos de Extracción de Energía de la Biomasa...33	33
Figura 1.10. Esquema conceptual del proceso de fermentación alcohólica.....	34
Figura 1.11. Proceso de obtención de bioetanol.....	35
Figura 1.12. Levaduras saccharomyce cerevisiae.....	41
Figura 1.13. Curva de crecimiento de levaduras.....	42
Figura 1.14. Sistema de fermentación en discontinuo.....	43
Figura 1.15. Diagrama de punto de ebullición de mezclas etanol-agua. Azeotropo...50	50
Figura 2.1. Residuos Sólidos Vegetales.....	53
Figura 2.2. Estructura del Bienestar Estudiantil.....	54
Figura 2.3. Comedor Universitario.....	62
Figura 2.4. Cuarteo de los residuos sólidos del Comedor.....	63
Figura 2.5. Método de Cuarteo.....	63
Figura 2.6. Clasificación y Cuantificación de los Residuos Generados en el Comedor.....	65
Figura 2.7. Clasificación y cuantificación de los Residuos Alimenticios.....	66
Figura 2.8. Residuos Sólidos Vegetales Generados en el Comedor.....	67
Figura 2.9. Toma de Muestra para el Análisis Microbiológico.....	69
Figura 2.10. Muestra.....	70
Figura 2.11. Secador Euroterm.....	72
Figura 2.12. Muestras para la Determinación de Azucare.....	72
Figura 2.13. Proceso de Obtención de Bioetanol.....	73

Figura 2.14 Diagrama de Bloques del Proceso de Obtención de Bioetanol.....	77
Figura 2.15. Selección de Residuos Vegetales.....	78
Figura 2.16. Triturado de los Residuos Vegetales.....	79
Figura 2.17. Pre-tratamiento con vaporización a Presión.....	81
Figura 2.18. Triturado con Licuadora.....	82
Figura 2.19. Capsulas utilizadas para el Secado.....	83
Figura 2.20. Secado en Estufa.....	84
Figura 2.21. Materia seca Molida.....	85
Figura 2.22. Hidrolisis Acida en Agitador Magnético.....	87
Figura 2.23. Determinación del Volumen de la Dilución.....	88
Figura 2.24. Determinación de la Densidad (Peso de 100 ml de ácido sulfúrico 4%).....	88
Figura 2.25. Medición de los Grados Brix.....	89
Figura 2.26. Hidrolisis acida (obtención del sustrato).....	92
Figura 2.27. Filtrado y Eliminación de Partículas del Sustrato.....	93
Figura 2.28. Ajuste del pH.....	94
Figura 2.29. <i>Saccharomyces Cerevisiae</i>	94
Figura 2.30. Activación de la Levadura.....	95
Figura 2.31. Accesorios utilizados en la Fermentación Alcohólica.....	96
Figura 2.32. Fermentación Alcohólica.....	97
Figura 2.33. Destilería I.A.B.S.A (Industrias Agrícolas de Bermejo Sociedad Anónima).....	98
Figura 2.34. Centrifuga de la Destilería.....	99
Figura 2.35. Toma de Muestras de Crema.....	99

Figura 2.36. Conservado de la Crema.....	100
Figura 2.37. Activación de la Crema.....	100
Figura 2.38. Adición de la Crema al Sustrato.....	101
Figura 2.39. Determinación de la densidad del vino.....	102
Figura 2.40. Destilación Simple del Vino.....	103
Figura 2.41. Medición de Grado Gay Lussac (°GL) del vino.....	103
Figura 2.42. Producto Final Obtenido.....	104
Figura 3.1. Resultados de la Selección y Cuantificación de los Residuos.....	106
Figura 3.2. Curva de secado de restos de (F/H/V), (Humedad vs Tiempo).....	109
Figura 3.3. Curva de secado de restos de Verduras (Humedad vs Tiempo).....	112
Figura 3.4. Curva de Secado de restos de Hortalizas (Humedad vs Tiempo).....	115
Figura 3.5. Diagrama en Bloques de cantidades desde el Triturado hasta Molido (gr).....	119
Figura 3.6. Formación de azúcares a partir de MIX de (F/V/H) en 4 horas.....	122
Figura 3.7. Formación de azúcares a partir de MIX de (F/V/H) en 8 horas.....	122
Figura 3.8. Formación de azúcares a partir de Restos de (V) en 4 horas.....	123
Figura 3.9. Formación de azúcares a partir de Restos de (V) en 8 horas.....	123
Figura 3.10. Formación de azúcares a partir de Restos de (H) en 4 horas.....	124
Figura 3.11. Formación de azúcares a partir de Restos de (H) en 8 horas.....	124
Figura 3.12. Diagrama en Bloques de cantidades desde triturado hasta molido en la Obtención de Sustrato (gr).....	128

Figura 3.13. Diagrama en bloques de Cantidades desde la Hidrolisis hasta Corrección del Sustrato.....	132
Figura 3.14. Consumo de Sustrato (H) durante la Fermentación Alcohólica.....	133
Figura 3.15. Consumo de Sustrato (F/V/H) durante la Fermentación Alcohólica...	134
Figura 3.16. Consumo de Sustrato (F/V/H) con Crema de I.A.B.S.A.....	135
Figura 3.17. Variación de la Densidad en la Fermentación con Crema de I.A.B.S.A.....	136
Figura 3.18. Prueba (4) Fermentación Acética.....	138