

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**"OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN PARA LA
OBTENCIÓN DE ETANOL EN EL INGENIO AZUCARERO ROBERTO
BARBERY PAZ UNAGRO"**



Por:

ADRIAN MIGUEL APARICIO ROMERO

**Modalidad de graduación: Optimización Y Modernización De Plantas Industriales
presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL
SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería
Química.**

Abril de 2025

TARIJA-BOLIVIA

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.

A Dios, fuente de toda sabiduría, por iluminar mi camino. A mi padre, quien me enseñó la importancia del esfuerzo. A mi hermano, mi cómplice y confidente. Y especialmente a mi madre, cuyo amor incondicional ha sido mi mayor motivación, mi guía y ejemplo a seguir, dedico este logro. Gracias por creer en mí siempre.

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a Dios, por la sabiduría y la fortaleza concedidas para llevar a cabo este estudio. A mis queridos abuelos, cuyas enseñanzas han sido mi faro en este camino, les dedico este trabajo. A mis amigos, cuya compañía y apoyo han sido invaluable. A mis compañeros de la Universidad por las diferentes situaciones que compartimos. A mis colegas de trabajo, por su comprensión, empatía y enriquecedoras enseñanzas. Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, han contribuido a la realización del presente trabajo.

"Si alguien te dice que no puedes hacer algo, hazlo el doble de rápido y el doble de bien."

Serena Williams

<u>ANTECEDENTES</u>	1
<u>OBJETIVOS</u>	7
<u>Objetivo General</u>	7
<u>Objetivos Específicos</u>	7
<u>JUSTIFICACION DEL PROYECTO</u>	7
<u>Justificación Tecnológica:</u>	7
<u>Justificación Económica:</u>	7
<u>Justificación Social:</u>	8
<u>Justificación Ambiental:</u>	8
<u>Justificación Personal:</u>	8
<u>CAPITULO I</u>	10
<u>DESCRIPCION DE LA PLANTA</u>	10
<u>1.1 DESCRIPCION DE LA PLANTA</u>	11
<u>1.1.1 Definición De La Materia Prima</u>	11
<u>1.1.1.1 Melaza</u>	11
<u>1.1.1.2 Jugo de caña</u>	13
<u>1.1.2 Localización De La Planta</u>	15
<u>1.1.3 Distribución De La Planta</u>	16
<u>1.1.3.1 Área de cultivo y fermentación</u>	16
<u>1.1.3.2 Área de centrifugación</u>	16
<u>1.1.3.3 Área de destilación y rectificación</u>	17
<u>1.1.3.4 Área de adsorción</u>	17
<u>1.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES PROCESOS</u>	18
<u>1.2.1 Fermentación</u>	18
<u>1.2.1.1 Fermentación microbiana</u>	18
• <u>Fermentación alcohólica</u>	18
• <u>Fermentación láctica</u>	18
• <u>Fermentación acética:</u>	19
• <u>Conversión de sustratos:</u>	19
• <u>Generación de energía:</u>	19
• <u>Producción de productos finales característicos:</u>	19
<u>1.2.2 Conversión de azúcar en etanol y sus reacciones químicas involucradas:</u>	19
<u>1.2.2.1 Desdoblamiento de la sacarosa:</u>	19
<u>1.2.2.2 Glucólisis: El corazón de la fermentación:</u>	20
<u>1.2.2.2.1 Ecuaciones de la glucólisis:</u>	20
<u>1.2.2.2.2 Generación de ATP y NADH:</u>	21

1.2.2.2.3	<u>Del piruvato al acetaldehído:</u>	21
1.2.2.2.4	<u>La etapa final: La formación de etanol</u>	21
1.2.2.2.5	<u>Balance general:</u>	21
1.2.2.2.6	<u>Subproductos:</u>	22
1.2.3	<u>Variables principales en la fermentación</u>	23
1.2.3.1	<u>Grados Brix</u>	23
1.2.3.2	<u>PH</u>	23
1.2.3.3	<u>Temperatura</u>	24
1.2.3.4	<u>Oxígeno</u>	24
1.2.3.5	<u>Viabilidad de las levaduras</u>	25
1.2.4	<u>Centrifugación</u>	25
1.2.5	<u>Destilación</u>	26
1.2.5.1	<u>Destilación Fraccionada:</u>	26
1.2.5.2	<u>Rectificación:</u>	26
1.2.5.3	<u>Adsorción:</u>	26
1.2.5.4	<u>Regeneración:</u>	27
1.2.6	<u>Estándares de calidad:</u>	27
1.2.6.1	<u>Normas internacionales:</u>	27
1.2.6.2	<u>Normas bolivianas:</u>	28
1.2.7	<u>Aditivos</u>	28
1.2.7.1	<u>Ácido sulfúrico</u>	28
1.2.7.2	<u>Urea</u>	28
1.2.7.3	<u>Fosfato</u>	29
1.2.7.4	<u>Formol</u>	29
1.2.7.5	<u>Biocida</u>	29
1.2.7.6	<u>Dióxido de cloro</u>	30
1.2.7.7	<u>Antiespumante</u>	30
1.2.7.8	<u>Soda caustica</u>	31
1.2.7.9	<u>Antiincrustante</u>	31
1.2.7.10	<u>Aire</u>	32
1.3	<u>SERVICIOS AUXILIARES</u>	33
1.4	<u>MANEJO DE MATERIALES</u>	34
1.4.1	<u>Levaduras</u>	34
1.5	<u>OPERACIÓN Y CONTROL</u>	35
1.5.1	<u>Área de Cultivo y Fermentación:</u>	35
1.5.2	<u>Área de Centrifugación:</u>	36
1.5.3	<u>Área de Destilación y Rectificación:</u>	36

1.5.4	<u>Área de Adsorción:</u>	37
1.6	<u>CONTROL DE CALIDAD</u>	38
1.7	<u>ELIMINACIÓN DE EFLUENTES</u>	40
1.7.1	<u>Características Fisicoquímicas:</u>	40
1.7.2	<u>Impacto Ambiental:</u>	40
1.7.3	<u>Tratamiento y Disposición:</u>	40
1.7.4	<u>Normativa y Legislación:</u>	41
<u>CAPITULO II</u>		42
<u>2. CONCEPCION DEL PROBLEMA</u>		42
2.1	<u>Identificación Del Problema.</u>	43
2.1.1	<u>Desarrollo de las problemáticas a considerar:</u>	45
2.1.2	<u>Consecuencias directas al proceso productivo</u>	46
2.1.3	<u>Efectos de las problemáticas desarrolladas.</u>	54
2.2	<u>Descripción De Alternativas Técnicas De Solución.</u>	57
2.2.1.1	<u>Enzimas</u>	59
2.2.1.2	<u>Dióxido de cloro</u>	59
2.2.2	<u>Clasificación detallada del estudio</u>	60
2.2.2.1	<u>Tipo de Estudio:</u>	60
2.2.2.2	<u>Diseño de Muestreo:</u>	61
2.2.3	<u>Desarrollo De Las Variables A Estudiar</u>	61
2.2.4	<u>Desarrollo De Estudio De Alternativas</u>	62
2.2.5	<u>Análisis e interpretación de los datos obtenidos</u>	75
2.2.5.1	<u>Effymoll</u>	75
2.2.5.2	<u>Dióxido de cloro</u>	76
<u>Condiciones Operativas</u>		81
2.3	<u>Selección De La Alternativa De Solución Más Apropiaada De Acuerdo A Criterios Apropiaados</u>	82
2.4	<u>Definición de condiciones y capacidad.</u>	84
2.5	<u>Selección del o los equipos necesarios.</u>	84
<u>CAPITULO III</u>		86
<u>3.ESPECIFICACION Y DISEÑO DEL EQUIPO</u>		86
3.1	<u>Diagramas de flujo</u>	87
3.1.1	<u>Diagrama de tanque de dilución con dióxido de cloro</u>	87
3.1.2	<u>Diagrama alimentación a cubas de fermentación con dióxido de cloro</u>	88
3.1.3	<u>Diagrama refrigeración de mosto fermentado</u>	89
3.1.4	<u>Diagrama despacho de mosto fermentado a área de centrifugación</u>	90
3.2	<u>Balance de materia y energía</u>	91

3.2.1	<u>Diagrama balance de masa global en destilería</u>	91
3.2.2	<u>Diagrama balance de masa global de alcoholen destilería</u>	92
3.2.3	<u>Balance de materia de mosto fermentado</u>	93
3.2.4	<u>Calculo Rendimiento Fermentación</u>	97
3.2.5	<u>Balance de energía</u>	99
3.3	<u>Diseño y dimensionamiento de los equipos necesarios</u>	100
3.3.1	<u>Cubas de fermentación</u>	100
3.3.2	<u>Mezclador de melaza</u>	101
3.3.3	<u>Tanque almacenamiento de alcohol</u>	102
3.4	<u>Especificación de los equipos</u>	103
3.4.1	<u>Cubas de fermentación</u>	103
3.4.2	<u>Tanques de almacenamiento de alcohol</u>	103
<u>CAPITULO IV</u>		104
<u>4.EVALUACION ECONOMICA</u>		104
4.1	<u>ESTUDIO ECONÓMICO DE COSTO DE CAPITAL</u>	105
4.1.1	<u>Costos de capacitación</u>	105
4.1.2	<u>Costos de insumos</u>	105
4.2	<u>COSTO EN OPERACIÓN Y APLICACION</u>	105
4.2.1	<u>Costo de aplicación</u>	105
4.3	<u>OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA</u>	107
4.3.1	<u>Aprovechamiento de recursos disponibles</u>	107
4.3.2	<u>Control de costos operativos</u>	107
4.3.3	<u>Análisis de Costos y Beneficios:</u>	108
4.3.4	<u>Reducción de Pérdidas y Desperdicios:</u>	109
4.3.5	<u>Monitoreo y Ajustes Continuos:</u>	109
4.4	<u>ANÁLISIS DE RENTABILIDAD.</u>	109
4.4.1	<u>Cuantificación de cantidad de crema depurada sin el uso de ninguna alternativa</u>	109
4.4.2	<u>Cuantificación de cantidad de crema depurada con el uso de alternativas propuestas</u>	110
4.4.3	<u>Impacto Económico De La Cantidad De Crema Depurada</u>	111
4.5	<u>CONCLUSIONES</u>	118
4.5.1	<u>Análisis de perdidas</u>	118
4.5.2	<u>Selección de la alternativa planteada</u>	122
4.5.3	<u>Cuantificación de la mejora al aplicar la alternativa seleccionada</u>	124
4.6	<u>RECOMENDACIONES</u>	125
4.7	<u>BIBLIOGRAFIA</u>	126

Índice De Ilustraciones

Imágenes 1 – 1,2 Ubicación y vista satelital del Ingenio Azucarero Roberto Barbery Paz UNAGRO.....	14
Diagrama I – 1 Distribución De Planta.....	15
Diagrama I -2 Control De Calidad Sector Destilería IARBP.....	38
Gráfico II – 1;13 promedios de los datos obtenidos.....	64
Diagrama de flujo III - 1 balance de materia mosto fermentado	
Gráfico III – 2 Dimensiones de cubas de fermentación.....	91
Gráfico III – 3 Dimensiones de Mezclador De Melaza.....	98
Gráfico III – 4 Dimensiones de cubas de fermentación.....	99
Gráfico IV- 1 porcentaje de levaduras depuradas en centrifugación.....	100
Gráfico IV – 2 porcentaje de levaduras depuradas en centrifugación.....	108

Índice De Tablas

Tabla I – 1 Cuadro resumido de las etapas más relevantes en la fase de fermentación.....	20
Tabla I- 2 balance de masa.....	32
Tabla II- 1 Tabla De Alternativas De Trabajo Propuestas.....	57
Tabla II – 2 comparativa de alternativas.....	82
Tabla III – 1 descripción de materiales necesarios para tanques de alcohol.....	101
Tabla IV - 1 cálculos cantidad-costos en aplicación de insumos.....	104
Tabla IV - 2 cálculos cantidad-costos en aplicación de insumos por turno.....	104
Tabla IV – 3 diferencias de porcentaje de levaduras depuradas en centrifugación.....	109
Tabla IV – 4 diferencias de porcentaje de levaduras depuradas en centrifugación.....	109
Tabla IV - 5 diferencias de perdida monetaria en levadura depurada.....	110