



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR



INSTITUTO DE
INGENIERÍA
QUÍMICA

Purificación de ácido láctico

Autores:

Silvina Arias Pandolfo – Ingeniería Química
María Agustina Bandaroff Martínez – Ingeniería Química
María Clara Olascoaga Chiappara – Ingeniería en Alimentos
Mathias Francisco Pereira Martelotti – Ingeniería Química
Valeria Rodríguez Costa – Ingeniería Química

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniero Químico y de Ingeniero de Alimentos.

Tutores:

Soledad Gutiérrez
Roberto Kreimerman

Montevideo, Uruguay
Junio 2023

Índice

Índice de abreviaturas.....	8
Resumen Ejecutivo.....	8
1. Introducción.....	9
1.1. Objetivo.....	10
1.2. Relevancia del tema.....	10
1.3. Alcance.....	10
1.4. Definición del problema a resolver.....	10
1.5. Definiciones.....	10
2. Comercialización.....	11
2.1. Introducción.....	11
2.2. Estudio de mercado.....	12
2.2.1. Proyecciones de mercado.....	12
2.2.1.1. Análisis por regiones.....	12
2.2.2. Demanda.....	14
2.2.2.1. Demanda a nivel mundial.....	14
2.2.2.2. Demanda a nivel regional.....	14
2.2.3. AL en la industria.....	15
2.2.3.1. AL en la industria alimentaria.....	16
2.2.3.1.1. Caracterización del AL en la industria alimenticia.....	16
2.2.3.2. AL en la industria farmacéutica.....	16
2.2.3.3. AL en la industria de polímeros.....	17
2.2.4. Oferta a nivel mundial.....	17
2.2.4.1. Oferta a nivel regional.....	18
2.3. Análisis de la situación.....	18
2.3.1. Análisis Porter.....	18
2.3.2. Análisis FODA.....	20
2.4. Definición de variables estratégicas.....	21
2.4.1. Definición del producto.....	21
2.4.2. Estrategia de valor.....	21
2.4.3. Envases.....	21
2.4.4. Precio.....	22
2.4.5. Canales de distribución.....	24
2.4.6. Marketing.....	24
3. Tamaño.....	25
3.1. Introducción.....	25
3.2. Producción proyectada.....	25
3.3. Demanda de materias primas e insumos.....	26
3.4. Disponibilidad de lactosuero a nivel nacional.....	26
3.5. Cronograma de operación de la planta.....	26
3.6. Capacidad de producción.....	26
4. Localización.....	27
4.1. Factores que inciden en la localización.....	27

4.1.1. Proveedores de lactosuero.....	27
4.1.2. Costos de transporte de materia prima y producto terminado.....	27
4.1.2.1. Materia prima.....	27
4.1.2.2. Producto.....	28
4.1.3. Acceso a rutas y puertos nacionales.....	28
4.1.4. Disponibilidad de insumos.....	28
4.1.4.1. Agua para proceso.....	28
4.1.5. Disponibilidad de servicios.....	29
4.1.5.1. Energía eléctrica.....	29
4.1.5.2. Red.....	29
4.1.5.3. Disponibilidad de mano de obra.....	30
4.1.5.4. Disposición de residuos.....	30
4.1.5.5. Nivel de urbanización.....	31
4.1.5.6. Capacidad y potencial de expansión.....	31
4.2. Análisis Macro de Localización.....	31
4.3. Análisis Micro de Localización.....	32
4.3.1 Estimación de superficie requerida.....	32
4.3.2. Alternativas de localización.....	32
4.3.3. Transporte de materia prima.....	33
4.3.4. Disponibilidad de mano de obra.....	33
4.3.5. Disponibilidad de agua para proceso.....	33
4.3.6. Servicios de retiro de residuos sólidos.....	33
4.3.7. Disposición de efluentes.....	33
4.3.8. Nivel de urbanización.....	33
4.3.9. Cercanía a puertos.....	33
4.3.10. Comparativa de alternativas.....	34
5. Ingeniería.....	35
5.1. Introducción.....	35
5.2. Diagrama de flujo preliminar del proceso.....	35
5.2.1. Descripción del proceso.....	35
5.3. Balance de masa.....	36
5.3.1. Flujos de entrada.....	36
5.3.2. Flujos de salida.....	36
5.4. Técnicas de purificación.....	36
5.5. Selección de técnicas de purificación.....	37
5.5.1. Condiciones aguas arriba.....	37
5.5.1.1. Caudal de alimentación al sistema de purificación.....	37
5.5.1.2. Composición y condiciones de la corriente de entrada.....	37
5.5.2. Alternativas de purificación de ácido láctico.....	37
5.5.2.1. Alternativa 1: Purificación vía destilación reactiva a partir de lactosuero (Asla Vázquez et al., 2020).....	37
5.5.2.2. Alternativa 2: Purificación vía filtración con membranas a partir mucílago de café (Katrin Neu et al., 2016).....	38
5.5.2.3. Alternativa 3: Purificación vía destilación molecular a partir de la fermentación de azúcares (Van Gansberghe et al., 1997).....	39

5.5.2.4. Alternativa 4: Purificación vía extracción líquido-líquido a partir de fermentación de azúcares (De León Mendoza., 2021).....	39
5.6. Preselección entre alternativas disponibles.....	40
5.6.1. Purificación vía filtración con membranas (Katrin Neu et al., 2016).....	40
5.6.2. Purificación vía destilación molecular (Van Gansberghe et al., 1997).....	41
5.7. Selección entre las alternativas preseleccionadas.....	41
5.7.1. Factores a considerar en la evaluación económica de las alternativas.....	41
5.7.1.1. Costo capital total, costos operativos y costo de equipos instalados.....	41
5.7.1.2. Energía eléctrica.....	41
5.7.1.3. Vapor.....	41
5.7.1.4. Reactivos, solventes y catalizadores.....	41
5.7.1.5. Agua Potable.....	41
5.7.2. Alternativa 1 - Destilación Reactiva.....	42
5.7.3. Alternativa 2 - Extracción Líquido-Líquido.....	46
5.7.3.1. Extracción Líquido-Líquido.....	47
5.7.3.2. Primer etapa de destilación.....	48
5.7.3.3. Segunda etapa de destilación.....	50
5.7.4. Comparativa de Alternativas de purificación.....	51
5.7.4.1 Comparación inicial.....	51
5.7.4.2 Recirculación de solvente en Alternativa 2.....	52
5.8. Optimización local del proceso de purificación seleccionado.....	54
5.8.1. Extracción líquido - líquido.....	54
5.8.1.1. Variables manipulables.....	54
5.8.1.1.1. Solvente.....	54
5.8.1.1.3. Presión.....	55
5.8.1.1.4. Número de etapas.....	56
5.8.1.2. Elección de condiciones de operación.....	56
5.8.1.3. Resultados simulación.....	56
5.8.1.4. Evaluación tecno-económica.....	59
5.8.2. Destilación fraccionada.....	60
5.8.2.1. Variables a evaluar.....	60
5.8.2.2. Selección de torre de destilación fraccionada.....	62
5.8.2.3. Condiciones de operación.....	63
5.8.2.3.1. Presión de operación.....	63
5.8.2.3.2. Calor en Reboiler.....	64
5.8.2.3.3. Costos asociados al Condensador.....	64
5.8.2.3.4. Temperatura corrientes de salida.....	65
5.8.2.3.6. Solvente.....	66
5.8.3. Disposición de efluentes.....	67
5.8.4. Cañerías y aislantes.....	67
5.8.5. Selección de bombas.....	69
5.8.6. Diagrama de flujo del proceso optimizado localmente.....	70
5.9. Sistemas de automatismo y control de procesos.....	71
5.10. Depósitos necesarios para proceso.....	72
5.10.1. Materia prima e insumos.....	72

5.10.1.1. Acetato de Etilo.....	72
5.10.1.2. Envases.....	72
5.10.2. Producto intermedios.....	72
5.10.2.1. Ácido láctico terminado listo para envasar.....	72
5.10.3. Producto final.....	72
5.10.3.1. Bidones de 20 L y tambores de 200 L de AL 98,5%.....	72
5.11. Envasado.....	72
5.12. Organización.....	74
5.13. Análisis de riesgo y Diagrama de Gantt.....	75
5.14. Sistema de Gestión de Calidad, Ambiental y Salud Ocupacional.....	75
5.14.1. Gestión de Calidad.....	75
5.14.1.1. Análisis e inspecciones en las distintas etapas del proceso.....	75
5.14.1.1.1. Acetato de etilo.....	75
5.14.1.1.2. Ácido Láctico.....	75
5.14.2. Gestión ambiental.....	76
5.14.3. Seguridad y Salud Ocupacional.....	76
5.15. Obra civil.....	77
5.15.1. Características del predio.....	77
5.16. Diagramas.....	78
6. Inversiones y Evaluación Económica.....	79
6.1. Introducción.....	79
6.2. Inversiones.....	79
6.2.1. Inversiones no amortizables.....	79
6.2.1.1. Capital de trabajo.....	79
6.2.1.2. Terreno.....	80
6.2.2. Inversiones amortizables.....	80
6.2.2.1. Tangibles.....	80
6.2.2.2. Intangibles.....	84
6.2.3. Resumen de inversiones.....	85
6.3. Estudio económico financiero - Capital propio.....	87
6.3.1. Estructura de ingresos y costos.....	87
6.3.1.1. Ventas.....	87
6.3.1.2. Costos.....	87
6.3.1.2.1. Costos de producción.....	87
6.3.1.2.2. Costos de Comercialización y Administración.....	89
6.3.1.2.3. Costos fiscales.....	90
6.3.2. Amortizaciones.....	90
6.4. Análisis de la viabilidad económica con capital propio.....	91
6.4.1. Costos fijos.....	91
6.4.2. Costos variables.....	92
6.4.3. Punto de equilibrio.....	93
6.4.4. Análisis de sensibilidad con capital propio.....	95
6.4.5. Viabilidad financiera - capital propio.....	95
6.4.5.1. Fuentes y uso de fondos.....	95

6.4.6. VAN y TIR.....	96
6.5. Estudio económico y financiero - Capital mixto.....	96
6.5.1. Viabilidad económica - capital mixto.....	97
6.5.1.1. Amortizaciones.....	97
6.5.1.2. Ventas.....	97
6.5.1.3. Costos.....	98
6.5.2. Análisis viabilidad económica - capital mixto.....	99
6.5.2.1. Punto de equilibrio.....	99
6.5.2.2. Análisis de sensibilidad - Capital mixto.....	101
6.5.3. Viabilidad financiera - Capital mixto.....	101
6.5.4. Valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR).....	103
6.6. Conclusiones.....	103
7. Evaluación del proyecto.....	104
7.1 Evaluación desde el punto de vista del empresario.....	104
7.1.1 Rentabilidad.....	104
7.1.2 Seguridad.....	104
7.1.2.1 Análisis de sensibilidad.....	104
7.1.2.2 Punto de equilibrio.....	105
7.1.2.3 Disponibilidad de materia prima.....	105
7.1.2.4 Disponibilidad de mano de obra.....	105
7.1.2.5 Tipo de producto y competencia.....	105
7.2 Evaluación desde el punto de vista de la institución financiera.....	105
7.2.1 Endeudamiento.....	105
7.2.2 Plazo del préstamo.....	106
7.2.3 Garantía.....	106
7.3. Evaluación desde el punto de vista nacional.....	106
7.3.1. Producción.....	106
7.3.2. Ocupación.....	107
7.3.3. Divisas.....	107
7.3.4. Desempeño ambiental.....	107
7.3.4. Conclusiones.....	108
7.4. Conclusiones generales y recomendaciones.....	108
Bibliografía.....	109
Anexo A - Diagrama de funcionamiento de equipo de extracción líquido-líquido multietapas.	116
Anexo B - Ficha técnica de equipo de enfriamiento tipo Chiller - Proveedor Lauda.....	120
Anexo C - Catálogo de equipo - Bomba de vacío de proveedor Busch.....	122
Anexo D - Equipo de ósmosis inversa.....	124
Apéndices.....	125
Apéndice A - Comercialización, Tamaño y Localización.....	125
Apéndice B - Ingeniería.....	131
Apéndice B.1 Técnicas de purificación.....	131
Apéndice B.2 - Análisis económico de alternativas 1 y 2.....	132

Apéndice B.2.1.....	132
Apéndice B.2.2 - Cálculo de relación molar destilado alimentación (D/F) inicial en alternativa 2.....	134
Apéndice B.3 - Optimización local del proceso seleccionado.....	135
B.3.1 - Selección de solvente y condiciones de operación para la extracción L-L.....	135
B.3.1.1. Acetato de etilo.....	135
B.3.1.2. Alcohol isoamílico.....	136
B.3.1.3. Etanol.....	137
B.3.1.4. Éter dietílico.....	137
B.3.1.5. Butanol.....	138
B.3.1.6. Octanol.....	139
B.3.2 - Análisis económico de selección de etapas.....	140
B.3.2.1. Acetato de Etilo.....	140
B.3.2.2 Éter dietílico.....	140
B. 3.2.3. Octanol.....	140
B.3.3 - Resumen costos extracción líquido-líquido.....	140
B.3.4 - Optimización de parámetros de Torre de Destilación.....	141
B.3.4.1. Condiciones iniciales.....	141
B.3.4.2. Condiciones de corriente de entrada.....	141
B.3.4.3. Temperatura de alimentación.....	141
B.3.4.4. Reflujo.....	142
B.3.4.5. Número de etapas teóricas/plato de alimentación.....	142
B.3.4.6 Destilado/alimentación.....	143
B.3.4.7. Presión.....	143
B.3.4.8. Cálculo de Número de etapas mínimo.....	144
B.3.4.9. Costos asociados al reboiler.....	145
B.3.4.10. Cálculos costos asociados al condensador.....	147
B.3.5. Cálculo de los intercambiadores de calor.....	149
B.4 - Diagrama de Gantt y Análisis de riesgo.....	152
B.4.1. Diagrama de Gantt.....	152
B.4.2. HAZOP.....	153
B.5. Diagramas.....	156
B.5.1. Plano de ubicación de la planta.....	156
B.5.2. Plano de la planta de purificación con los depósitos.....	156
B.5.3. PID de la instalación.....	156
Apéndice C. Resumen de indicadores.....	161

Índice de abreviaturas

AL: Ácido láctico

AE: Acetato de Etilo

ME: Metanol

CAGR: Tasa de Crecimiento Anual Compuesta

PLA: Ácido Poliláctico

SAP: Software Aspen Plus

IC: Intercambiador de Calor

PE: Punto de Ebullición

Resumen Ejecutivo

El presente proyecto tiene como objetivo estudiar la viabilidad técnico-económica de la etapa de purificación del ácido láctico obtenido por vía fermentativa a partir del lactosuero. El ácido láctico es un producto de demanda mundial en los mercados alimenticio, farmacéutico, cosmético y de polímeros.

El análisis se realiza para una producción anual de 10 mil toneladas de ácido láctico grado farmacéutico, con una proyección de venta a un precio estimado de 3,0 dólares por kilogramo, considerando a Estados Unidos y América Latina como los principales destinos de exportación, satisfaciendo así la demanda total a nivel regional.

La planta se ubicará estratégicamente en el departamento de San José, en la cuenca lechera del país, junto a los principales productores de la materia prima. La superficie requerida será de 3,65 hectáreas y se instalará en un predio donde ya se cuenta con una planta de producción de caldo de fermentación.

El alcance del proyecto comprende la etapa de purificación, así como la obtención del producto final envasado, listo para su posterior comercialización. En cuanto a las etapas de producción del caldo de fermentación, se toma como referencia el trabajo de fin de grado “Producción de ácido láctico por vía fermentativa a partir de lactosuero residual” (Asla Vázquez et al., 2020).

Se realiza además una recopilación de diversas técnicas disponibles en la actualidad y se evalúa su viabilidad para implementarlas a nivel industrial. A partir de esto, se preseleccionan cuatro alternativas, cuyos principios de operación son: destilación reactiva, filtración con membranas, destilación molecular simple y extracción líquido-líquido. De las cuales se descarta la filtración con membranas y la destilación molecular simple en base a criterios cualitativos. Las alternativas restantes, se evalúan técnico-económicamente utilizando el software de simulación de procesos Aspen Plus. Como resultado, se concluye que la alternativa que incorpora la extracción líquido-líquido como etapa principal de purificación presenta una mayor rentabilidad y se exploran posibles mejoras en sus condiciones operativas para aumentar su rendimiento económico.

En el estudio económico y financiero, se evalúan dos situaciones: una inversión completa con capital propio y otra inversión considerando un préstamo bancario (capital mixto). El objetivo final es determinar el monto máximo que se puede ofrecer por la corriente de caldo fermentativo, asegurando la viabilidad económica y financiera del proyecto. Los resultados indican que la opción de capital mixto se muestra como la más conveniente desde el punto de vista económico, proporcionando el 40% de la inversión total con una tasa de interés de 8%. Para una producción anual de 9.800 toneladas, el proyecto podría ser viable económicamente, siempre y cuando sea posible adquirir el caldo a un precio menor a 458 dólares la tonelada.