

**UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE SAN  
FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA**

**VICERRECTORADO**

**CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**



**MODELADO Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE  
ÁCIDO LÁCTICO JUNTO CON EL ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO Y  
MICROBIOLÓGICO DEL LACTOSUERO COMO MATERIA PRIMA**

**TRABAJO EN OPCIÓN A DIPLOMADO EN BROMATOLOGÍA**

**LUIS ALVARO BARRIENTOS CARVAJAL**

**SUCRE – BOLIVIA  
2024**

## **CESIÓN DE DERECHOS**

Al presentar este trabajo como requisito previo a la obtención del Diploma en Bromatología de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, autorizo al Centro de Estudios de Posgrado e Investigación o a la Biblioteca de la Universidad, para que se haga de este trabajo un documento disponible para su lectura, según normas de la Universidad.

También cedo a la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, los derechos de publicación de este trabajo o parte de él, manteniendo mis derechos de autor hasta un periodo de 30 meses posterior a su aprobación.

**LUIS ALVARO BARRIENTOS CARVAJAL**

Sucre, Octubre de 2024

## DEDICATORIA

*En primer lugar, doy gracias a Dios por ser mi luz y mi fortaleza en cada paso de este trayecto. Su guía constante me ha permitido enfrentar los desafíos con determinación y alcanzar el logro de culminar esta carrera, un sueño hecho realidad y testimonio de mi esfuerzo y superación personal.*

*A mis padres, Alicia Ruth Carvajal Castro y Gregorio Barrientos Lutino, quienes con su amor incondicional, esfuerzo y dedicación han sido mi guía en cada paso de este camino. Este proyecto es un reflejo de los valores y enseñanzas que me han transmitido.*

*A mis queridos abuelos, Santusa Castro Calle y Luis Quiroga Mamani, por su amor entrañable, su apoyo inquebrantable y sus valiosos consejos, que han sido una fuente constante de inspiración y fortaleza a lo largo de mi vida.*

*A mi hermano, Brayan Barrientos Carvajal, por ser mi compañero de vida, por su aliento constante y por demostrarme que juntos podemos superar cualquier obstáculo.*

*Este proyecto es un homenaje a su amor, paciencia y fe en mí. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios, por concederme la vida, la salud y la fortaleza necesarias para superar los momentos de dificultad y debilidad. Su guía constante me ha permitido seguir adelante y alcanzar esta importante meta en mi vida.*

*A mi querida madre, Alicia Ruth Carvajal Castro, por ser la figura más importante en mi vida. Tu amor incondicional, paciencia, esfuerzo y valentía han sido mi mayor inspiración. Gracias por creer en mí y darme la oportunidad de vivir esta experiencia única.*

*A mi padre, Gregorio Barrientos Lutino, por ser el pilar fundamental de mi educación. Tu apoyo incondicional y tus enseñanzas han sido esenciales a lo largo de toda mi formación.*

*A la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, especialmente a la Facultad de Ciencias y Tecnología, por brindarme la oportunidad de ser parte de esta prestigiosa institución. Agradezco a todos los docentes de la Carrera de Industria de Alimentos, cuyos conocimientos y enseñanzas rigurosas han sido clave para la culminación de este trabajo.*

*Finalmente, a mis amigos, por los momentos compartidos de risas y desafíos a lo largo de esta carrera. Su compañía y apoyo han sido una parte invaluable de este viaje.*

## RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo modelar y simular el proceso de producción de ácido láctico utilizando lactosuero como materia prima, con un enfoque en la evaluación físico-química y microbiológica del lactosuero. Para ello, se seleccionó un proceso basado en la esterificación del ácido láctico con metanol, seguido de etapas de separación y purificación. Se desarrollaron modelos cinéticos para describir el crecimiento de biomasa, el consumo de sustrato y la producción de ácido láctico en un biorreactor, y se simuló las etapas del proceso en Aspen Hysys utilizando parámetros optimizados.

Los resultados de la simulación indicaron que es posible obtener ácido láctico en concentraciones del 99% tras las etapas de purificación, destacando la importancia de variables operativas como la temperatura y el flujo de metanol para la eficiencia del proceso. A nivel de materias primas, se evaluaron dos tipos de lactosuero, el Lactosuero A y el Lactosuero B, desde una perspectiva físico-química y microbiológica. Ambos resultaron viables para la producción de ácido láctico; sin embargo, el Lactosuero B, con mayor contenido de lactosa, sólidos totales y nutrientes esenciales, cumple con las normas vigentes, lo que permite mejorar el rendimiento de la fermentación, llegando a ser la opción más prometedora.

Desde el punto de vista económico, el proceso muestra viabilidad financiera, proyectando ingresos anuales y una rápida recuperación de la inversión. Además, el uso de lactosuero no solo reduce los costos de materia prima y mejora la sostenibilidad ambiental del proceso, sino que también ofrece una solución a la problemática de los residuos en la industria láctea.

Este proyecto establece las bases para una producción industrial eficiente y sustentable de ácido láctico, promoviendo el aprovechamiento de recursos locales y la reducción del impacto ambiental, alineándose con las tendencias actuales de la economía circular en la industria.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

## CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1.	ANTECEDENTES.....	1
1.2.	OBJETIVOS.....	3
1.2.1.	Objetivo General.....	3
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	3
1.3.	JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4.	METODOLOGÍA.....	4
1.4.1.	Tipo de Investigación.....	4
1.4.2.	Métodos y Técnicas.....	5
1.4.3.	Diseño Experimental.....	5
1.4.4.	Población y Muestra.....	6
1.4.5.	Criterios de Inclusión y Exclusión.....	6
1.4.6.	Instrumentos de Investigación.....	6

## CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1.	MARCO CONCEPTUAL.....	7
2.1.1.	Lactosuero.....	7
2.1.1.1.	Definición.....	7
2.1.1.2.	Tipos de Lactosuero.....	8
2.1.1.3.	Obtención del Suero por medio de Coagulación Enzimática.....	8
2.1.1.4.	Especificaciones Fisicoquímicas y Microbiológicas.....	9
2.1.1.5.	Composición Química del Lactosuero.....	10
2.1.2.	Ácido Láctico.....	12
2.1.2.1.	Propiedades Físicas y Químicas del Ácido Láctico.....	13
2.1.2.2.	Producción de Ácido Láctico.....	14
2.1.2.3.	Ventajas y Desventajas de Métodos de Producción de Ácido Láctico.....	15

2.1.3.	Producción Biotecnológica de Ácido Láctico.....	15
2.1.3.1.	Fermentación Láctica.....	16
2.1.3.2.	Bacterias Ácido Lácticas. ....	17
2.1.3.3.	Bacterias Utilizadas en la Producción de Ácido Láctico.....	21
2.1.4.	Los Microorganismos Productores de Ácido Láctico. ....	23
2.1.4.1.	Lactobacillus.....	26
2.1.4.2.	Streptococcus.....	28
2.1.5.	Parámetros Importantes durante la Fermentación. ....	28
2.1.6.	Producción de Ácido Láctico con Sustratos Agroindustriales. ....	30
2.1.7.	Separación y Purificación del Ácido Láctico.....	32
2.1.7.1.	Métodos de Separación y/o Purificación. ....	33
2.1.7.1.1.	Precipitación. ....	33
2.1.7.1.2.	Extracción con Solvente o Extracción Líquido - Líquido. ....	35
2.1.7.1.3.	Separación con Membranas. ....	37
2.1.7.1.4.	Destilación Reactiva. ....	39
2.1.8.	Usos Actuales y Aplicaciones del Ácido Láctico. ....	40
2.1.9.	Modelos de Simulación. ....	43
2.1.9.1.	Crecimiento Microbiano (X).....	44
2.1.9.2.	Formación de Producto (P). ....	45
2.1.9.3.	Consumo de Glucosa (S).....	45
2.1.10.	Simulación del Proceso de Producción.....	46
2.1.10.1.	Simuladores Comerciales.....	47
2.1.10.1.1.	Tipos de Simuladores.....	47
2.1.10.1.2.	Logos de los Diferentes Simuladores.....	47
2.1.10.3.	Simulador Aspen Hysys. ....	48
2.1.10.3.1.	Características Generales. ....	48
2.1.10.3.2.	Ventajas y Desventajas. ....	48
2.2.	MARCO CONTEXTUAL. ....	50
2.2.1.	Instituto de Tecnología de Alimentos ITA.....	50

2.2.2.	Datos Históricos. ....	50
2.2.3.	Misión. ....	50
2.2.4.	Visión. ....	51
2.2.5.	Objetivos Institucionales. ....	51
2.2.6.	Objetivos Estratégicos. ....	52
2.2.7.	Generalidades de la Unidad Receptora. ....	53
2.2.8.	Ubicación. ....	53
2.2.9.	Organización General de la Unidad Receptora. ....	55
2.2.10.	Identificación y Descripción del Departamento y/o Sección en que se realizó las Pruebas Experimentales. ....	56
2.2.10.1.	Área de laboratorio de Química de Alimentos, Nutrientes y Toxicología. ....	56
2.2.10.2.	Análisis de Parámetros. ....	57

### **CAPÍTULO III**

#### **DESARROLLO**

3.1.	DEFINICIÓN DEL PRODUCTO ESPECÍFICO. ....	59
3.1.1.	Ácido Láctico. ....	59
3.1.1.1.	Propiedades del Ácido Láctico. ....	59
3.2.	CARACTERIZACIÓN ESPECÍFICA DE LAS MATERIAS PRIMAS. ....	61
3.2.1.	Lactosuero. ....	61
3.2.2.	Ácido Láctico Crudo. ....	61
3.2.3.	Metanol. ....	62
3.2.4.	Agua. ....	62
3.3.	PROCESO DE ELABORACIÓN DEL PRODUCTO ESPECÍFICO. ....	63
3.3.1.	Síntesis Química. ....	63
3.3.2.	Fermentación Microbiana. ....	63
3.3.3.	Proceso de Producción Industrial de Ácido Láctico. ....	65
3.3.3.1.	Producción de Ácido Láctico Crudo. ....	65
3.3.3.2.	Esterificación con Metanol. ....	65
3.3.3.3.	Purificación del Lactato de Metilo: ....	65

3.3.3.4.	Hidrólisis del Lactato de Metilo.....	66
3.3.3.5.	Refinamiento del Ácido Láctico.....	66
3.3.3.6.	Control de Calidad. ....	66
3.4.	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO. ....	67
3.4.1	Descripción del Proceso por Etapas.....	68
3.4.1.1.	Modelado del Biorreactor.....	68
3.4.1.1.1.	Modelo Básico de Crecimiento Exponencial.....	68
3.4.1.1.2.	Modelo de Crecimiento Logístico.....	69
3.4.1.1.3.	Modelo de Crecimiento Logístico en su Forma Integrada. ....	72
3.4.1.1.4.	Modelo para la Formación de Producto.....	72
3.4.1.1.5.	Modelo de Consumo de Sustrato (Glucosa).....	75
3.4.1.2.	Modelado del Biorreactor en MATLAB.....	77
3.4.1.2.1.	Código en MATLAB para el Crecimiento Logístico. ....	77
3.4.1.2.2.	Código de MATLAB para la Formación de Producto.....	78
3.4.1.2.3.	Código de MATLAB para el Consumo de Sustrato. ....	79
3.4.1.3.	Caracterización de Equipos.....	83
3.4.1.3.1.	Consideraciones utilizadas por Aspen Hysys.....	83
3.4.1.3.2.	Entorno de Simulación. ....	83
3.4.1.3.3.	Reactor CSTR.....	83
3.4.1.3.4.	Separador Flash (Separator).....	84
3.4.1.3.5.	Enfriadores y Calentadores (Cooler / Heater).....	85
3.4.1.3.6.	Bloque de Ajuste (Adjuster).....	85
3.4.1.3.7.	Columna de Destilación. ....	86
3.4.1.3.7.1.	Parámetros Básicos de Columna. ....	87
3.4.1.3.8.	Columna de Destilación Reactiva. ....	87
3.4.1.3.8.1.	Parámetros Básicos de la Columna de Destilación Reactiva. ....	88
3.5.	CONTROL DE CALIDAD.....	89
3.5.1.	Materias Primas.....	89
3.5.1.1.	Análisis Físico-Químico.....	90

3.5.1.2.	Análisis Microbiológico. ....	90
3.5.1.3.	Técnicas para la Determinación de los diferentes Parámetros y Pruebas. ....	91
3.5.1.3.1.	Proceso de Determinación de Acidez como Ácido Láctico. ....	91
3.5.1.3.2.	Proceso de Determinación de pH. ....	91
3.5.1.3.3.	Proceso de Determinación de Densidad relativa a 20 °C. ....	92
3.5.1.3.4.	Proceso de Determinación de Sólidos Totales – Humedad. ....	92
3.5.1.3.5.	Proceso de Determinación de Grasas. ....	93
3.5.1.3.6.	Proceso de Determinación de Proteínas. ....	94
3.5.1.3.7.	Proceso de Determinación de Cenizas. ....	96
3.5.1.3.8.	Proceso de Determinación de Minerales. ....	97
3.5.1.3.9.	Proceso de Determinación de Fosforo. ....	97
3.5.1.3.10.	Proceso de Determinación de Cloruros. ....	99
3.5.2.	Productos en Proceso. ....	100
3.5.3.	Producto Final. ....	101
3.6.	PRUEBAS EXPERIMENTALES. ....	102
3.6.1.	Tablas. ....	102
3.6.2.	Figuras. ....	105
3.6.3.	Cálculos. ....	108
3.6.3.1.	Cálculo de la Lactosa. ....	108
3.6.3.2.	Cálculo del Fosforo (P). ....	109
3.7.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y REFERENCIAS. ....	111
3.7.1.	Interpretación de Resultados de la Simulación en Aspen Hysys. ....	111
3.7.1.1.	Temperatura (°C). ....	111
3.7.1.2.	Presión (Atm). ....	112
3.7.1.3.	Flujo Másico (kg/h). ....	112
3.7.1.4.	Flujo Molar (kmol/h). ....	112
3.7.1.5.	Fracción Molar – Agua. ....	113
3.7.1.6.	Fracción Molar - Ácido Láctico. ....	113
3.7.1.7.	Fracción Molar - Lactato de Metilo. ....	113

3.7.1.8.	Fracción Molar – Metanol.....	114
3.7.2.	Interpretación General del Proceso. ....	114
3.7.3.	Interpretación de la Viabilidad Económica del Proceso. ....	115
3.7.3.1.	Consumo de Recursos.....	115
3.7.3.2.	Indicadores Económicos.....	115
3.7.3.3.	Utilidades (US\$/Año). ....	116
3.7.3.4.	Valor Presente Neto (VPN) (US\$).....	116
3.7.3.5.	Recuperación del Costo de Capital. ....	117
3.7.4.	Interpretación de Resultados del Análisis Bromatológico y Microbiológico.....	117
3.7.4.1.	Acidez Expresada como Ácido Láctico (%). ....	117
3.7.4.2.	pH. 118	
3.7.4.3.	Densidad (g/mL). ....	118
3.7.4.4.	Sólidos Totales.....	118
3.7.4.5.	Cenizas. ....	119
3.7.4.6.	Lactosa.....	119
3.7.4.7.	Grasa.....	119
3.7.4.8.	Proteína.....	120
3.7.4.9.	Calcio.....	120
3.7.4.10.	Fósforo.....	120
3.7.4.11.	Cloruros.....	121
3.7.4.12.	Microbiología. ....	121
3.7.5.	Interpretación de Parámetros Físico-Químicos y Microbiológicos del Lactosuero con Normas en Vigencia.....	122
3.7.5.1.	Acidez Expresada como Ácido Láctico (%). ....	122
3.7.5.2.	pH. 122	
3.7.5.3.	Densidad (g/mL). ....	123
3.7.5.4.	Sólidos Totales (g/L).....	123
3.7.5.5.	Cenizas (%). ....	123
3.7.5.6.	Lactosa (g/L).....	124

3.7.5.7.	Grasa (g/L).....	124
3.7.5.8.	Proteína (g/L).....	124
3.7.5.9.	Calcio (mg/L). ....	125
3.7.5.10.	Fósforo (mg/L). ....	125
3.7.5.11.	Cloruros (g/L).....	125
3.7.5.12.	Aerobios Mesófilos Totales (UFC/mL).....	126
3.7.5.13.	Coliformes Totales (UFC/mL).....	126
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>127</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>127</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>128</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>130</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b>	Propiedades Fisicoquímicas y Microbiológicas del Lactosuero Pasteurizado .....	10
<b>Tabla 2:</b>	Composición Química y Nutricional del Lactosuero .....	10
<b>Tabla 3:</b>	Propiedades Físicas y Químicas del Ácido Láctico.....	13
<b>Tabla 4:</b>	Ventajas y Desventajas de los distintos Métodos de Producción de Ácido Láctico..	15
<b>Tabla 5:</b>	Principales Enzimas y Mecanismos Metabólicos durante la Fermentación Láctica.	20
<b>Tabla 6:</b>	Microorganismos utilizados para Investigaciones Recientes de la Producción Biotecnológica de Ácido Láctico.....	22
<b>Tabla 7:</b>	Algunos Sustratos diferentes a la Lactosa para la Producción de Ácido Láctico.....	31
<b>Tabla 8:</b>	Ventajas y Desventajas de diversos métodos utilizados para la Separación y Recuperación de AL del Caldo Fermentado .....	32
<b>Tabla 9:</b>	Especificaciones de Calidad del Ácido Láctico .....	43
<b>Tabla 10:</b>	Simuladores más Utilizados en la Actualidad .....	47
<b>Tabla 11:</b>	Datos del Instituto Tecnológico de Alimentos .....	53
<b>Tabla 12:</b>	Propiedades del Ácido Láctico .....	59
<b>Tabla 13:</b>	BALANCE DE MATERIA DE LAS CORRIENTES.....	81

<b>Tabla 14:</b> BALANCE DE ENERGÍA Y UTILITIES .....	82
<b>Tabla 15:</b> Parámetros Experimentales de las Muestras de Lactosuero .....	102
<b>Tabla 16:</b> Datos de la Curva de Calibración para el Fosforo (P).....	103
<b>Tabla 17:</b> Indicadores Económicos.....	103
<b>Tabla 18:</b> Parámetros Fisicoquímicos y Microbiológicos del Lactosuero con Normas en Vigencia .....	104

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Estructura Química del Ácido Láctico .....	12
<b>Figura 2:</b> Estereofomas del Ácido Láctico.....	12
<b>Figura 3:</b> Álbum Filogenético de Bacterias Ácido Lácticas (LAB) y Bacterias Relacionadas.....	23
<b>Figura 4:</b> Rutas Metabólicas en LAB para obtener Ácido Láctico. Homofermentación (A), Heterofermentación (B), Fermentación Ácida Mezclada (C), P = Fosfato, BP = Bifosfato, LDH = Lactato Deshidrogenasa, PFL = Liasa Piruvato Formato.....	25
<b>Figura 5:</b> Diagrama de Usos y Aplicaciones Comerciales del Ácido Láctico .....	41
<b>Figura 6:</b> Ubicación del ITA.....	53
<b>Figura 7:</b> Vista General del ITA .....	54
<b>Figura 8:</b> Vista Principal del ITA.....	54
<b>Figura 9:</b> Organización General del ITA .....	55
<b>Figura 10:</b> Laboratorio de Bromatología.....	57
<b>Figura 11:</b> Estéreoformas del Ácido Láctico.....	60
<b>Figura 12:</b> Reactor CSTR.....	83
<b>Figura 13:</b> Separador Flash (Separator) .....	84
<b>Figura 14:</b> Enfriadores y Calentadores (Cooler / Heater) .....	85
<b>Figura 15:</b> Bloque de Ajuste (Adjuster) .....	85
<b>Figura 16:</b> Columna de Destilación.....	86
<b>Figura 17:</b> Columna de Destilación Reactiva.....	88
<b>Figura 18:</b> Gráfica en MATLAB para el Crecimiento Logístico .....	105

<b>Figura 19:</b> Gráfica de MATLAB para la Formación de Producto.....	106
<b>Figura 20:</b> Gráfica de MATLAB para el Consumo de Sustrato .....	107
<b>Figura 21:</b> Gráfica de la Curva de Calibración para el Fosforo (P) .....	107

## ÍNDICE DE DIAGRAMAS

<b>Diagrama 1:</b> Diferentes Vías de Producción de Ácido Láctico .....	14
<b>Diagrama 2:</b> Ruta Metabólica de la Fermentación Homoláctica .....	19
<b>Diagrama 3:</b> Parámetros Importantes durante la Fermentación Homoláctica .....	29
<b>Diagrama 4:</b> Reacciones Químicas Involucradas y el Diagrama General de Proceso de la Separación Mediante Precipitación.....	34
<b>Diagrama 5:</b> Diagrama del Proceso de Separación mediante Extracción Líquido-Líquido ...	36
<b>Diagrama 6:</b> Diagrama General de Proceso de la Separación mediante Membranas.....	38
<b>Diagrama 7:</b> Diferentes Vías de Producción de Ácido Láctico .....	63
<b>Diagrama 8:</b> Métodos de Producción de Ácido Láctico. (a) Síntesis Química, (b) Fermentación Microbiana. (SSF) Sacarificación y Fermentación Simultánea.....	64
<b>Diagrama 9:</b> Proceso de Producción de Ácido Láctico.....	67
<b>Diagrama 10:</b> SIMULACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ÁCIDO LÁCTICO - ASPEN HYSYS V 14.2 .....	80

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1:</b> Forma Diferencial del Modelo de Crecimiento Logístico.....	44
<b>Ecuación 2:</b> Forma Integrada de la Ecuación de Crecimiento Logístico .....	44
<b>Ecuación 3:</b> Modo Diferencial de la Ecuación de Luedeking-Piret .....	45
<b>Ecuación 4:</b> Ecuación de Consumo de Glucosa .....	46

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES.

El ácido láctico es un compuesto orgánico ampliamente utilizado en diversas industrias, como la alimentaria, farmacéutica, cosmética y química, debido a sus propiedades como conservante, acidulante y agente antimicrobiano. En la actualidad, la producción de ácido láctico ha cobrado relevancia debido a su aplicación en la síntesis de polímeros biodegradables, como el ácido poliláctico (PLA), que constituye una alternativa sostenible a los plásticos convencionales derivados del petróleo. La creciente demanda de productos ecoamigables ha impulsado la investigación y optimización de los procesos de producción de ácido láctico, en especial aquellos basados en fermentación biotecnológica, que emplean microorganismos como *Lactobacillus* para transformar diversas fuentes de carbohidratos en ácido láctico. (Datta & Henry, 2006)

El proceso de producción de ácido láctico mediante fermentación ha sido objeto de estudio durante décadas, evolucionando hacia la utilización de materias primas más accesibles y económicas. Tradicionalmente, la glucosa y otros azúcares refinados han sido las principales fuentes de sustrato en los procesos fermentativos. Sin embargo, los elevados costos asociados a estas materias primas han promovido la búsqueda de alternativas más sostenibles y de bajo costo, como los subproductos agroindustriales. Entre estos subproductos, el lactosuero, un derivado de la industria láctea, ha emergido como una materia prima prometedora debido a su abundancia, bajo costo y elevado contenido de lactosa, lo que lo convierte en un sustrato adecuado para la producción biotecnológica de ácido láctico. (Ayala & Fernández, 2020)

El lactosuero es un subproducto líquido obtenido durante la fabricación de queso y otros productos lácteos. Está compuesto principalmente por agua, lactosa, proteínas, minerales y trazas de grasa. A pesar de su valioso contenido nutricional, su manejo y disposición representan un desafío ambiental significativo, dado su elevado potencial contaminante si no es tratado

adecuadamente. Como resultado, la valorización del lactosuero a través de su aprovechamiento en procesos de fermentación para la producción de ácido láctico ofrece una doble ventaja: una alternativa económica para los productores y una solución sostenible para la industria láctea al reducir los problemas asociados con la gestión de residuos. (Asas et al., 2021)

El microorganismo más utilizado para la fermentación de lactosa es *Lactobacillus casei*, que ha mostrado ser eficiente en la conversión de lactosa a ácido láctico. Este proceso es altamente dependiente de factores como la temperatura, el pH, la concentración de sustrato, y la cinética de crecimiento del microorganismo, lo que hace fundamental un estudio detallado de las condiciones físico-químicas y microbiológicas del lactosuero para garantizar una producción eficiente. Además, la simulación y modelado de estos procesos permiten optimizar las condiciones de operación y predecir el comportamiento del sistema, lo que contribuye a mejorar la productividad y la viabilidad económica del proceso a escala industrial. (Nanfra, 2021)

A lo largo de los años, se han desarrollado diferentes modelos matemáticos que describen el crecimiento microbiano, la producción de ácido láctico y el consumo de sustrato. Sin embargo, estos modelos deben ser validados con datos experimentales específicos para cada tipo de materia prima.

El uso de herramientas como MATLAB y Aspen Hysys ha facilitado el análisis y simulación de estos procesos, permitiendo el diseño de esquemas de producción más eficientes y sostenibles. En este contexto, la implementación de simulaciones del proceso de fermentación utilizando lactosuero como materia prima puede proporcionar valiosa información sobre las condiciones óptimas para maximizar la producción de ácido láctico, reducir costos y minimizar el impacto ambiental. (González & Rivas, 2011)

Por lo tanto, el presente proyecto se enfoca en el modelado y la simulación del proceso de producción de ácido láctico a partir de lactosuero, considerando un análisis detallado de las propiedades físico-químicas y microbiológicas de la materia prima, con el fin de desarrollar un proceso eficiente, sostenible y económicamente viable para su aplicación industrial.

## **1.2. OBJETIVOS.**

### **1.2.1. Objetivo General.**

Modelar y simular el proceso de producción de ácido láctico junto con el análisis físico-químico y microbiológico del lactosuero como materia prima.

### **1.2.2. Objetivos Específicos.**

- Seleccionar el proceso de producción óptimo del ácido láctico.
- Modelar la cinética de crecimiento de biomasa, cinética de consumo de sustrato y cinética de producción de ácido láctico de un biorreactor
- Simular el proceso de producción de ácido láctico empleando los datos óptimos para el proceso.
- Evaluar la viabilidad económica del proceso simulación de ácido láctico.
- Realizar análisis físico-químico y microbiológico del lactosuero.
- Evaluar las propiedades físico-químicas y microbiológicas del lactosuero para determinar su viabilidad como materia prima en el proceso de producción de ácido láctico.
- Relacionar los parámetros físico-químicos y microbiológicos del lactosuero con normas en vigencia.
- Adquirir habilidades y destrezas en el manejo operativo de equipos e instrumentos de laboratorio.

## **1.3. JUSTIFICACIÓN.**

La creciente demanda de ácido láctico a nivel global, impulsada por sus múltiples aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y de bioplásticos, ha generado la necesidad de explorar nuevas fuentes de producción más sostenibles y económicas. En este contexto, el lactosuero, un subproducto abundante de la industria láctea, emerge como una materia prima viable para la

producción de ácido láctico, especialmente en regiones, donde la industria láctea juega un papel crucial en la economía local.

Actualmente, el lactosuero es subutilizado, con gran parte siendo desechado o destinado a usos de bajo valor. Este subproducto, rico en lactosa, podría ser transformado en un recurso de alto valor mediante su utilización en la fermentación para la producción de ácido láctico. Aprovechar el lactosuero no solo reduciría los costos asociados con la gestión de residuos en la industria láctea, sino que también ofrecería una solución más ecológica y sostenible al problema del desperdicio de subproductos.

El proceso de producción del ácido láctico tiene el potencial para generar beneficios económicos, ambientales y tecnológicos. Económicamente, la producción de ácido láctico a partir de lactosuero podría reducir significativamente los costos de materia prima, permitiendo a las empresas locales competir de manera más efectiva en el mercado nacional e internacional. Ambientalmente, el proyecto contribuiría a la reducción de residuos en la industria láctea, minimizando el impacto ambiental asociado con la disposición del lactosuero. Desde una perspectiva tecnológica, este proyecto busca innovar en el proceso de producción de ácido láctico, optimizando las condiciones de fermentación y mejorando la eficiencia del proceso.

Además, este proyecto tiene el potencial de sentar las bases para la implementación a escala industrial del proceso, posicionando a la región como un referente en la producción sostenible de ácido láctico. El modelado y simulación del proceso y el análisis físico-químico y microbiológico del lactosuero proporcionarán la información necesaria para garantizar la viabilidad técnica del proyecto, asegurando que el proceso sea tanto efectivo como seguro.

## **1.4. METODOLOGÍA.**

### **1.4.1. Tipo de Investigación.**

El tipo de investigación utilizado en este proyecto es de naturaleza experimental y descriptiva.

- **Enfoque Experimental:** Permite la simulación del proceso de producción de ácido láctico utilizando lactosuero como materia prima.
- **Enfoque Descriptivo:** se centra en el análisis físico-químico y microbiológico de esta materia prima.

Este estudio combina tanto una fase de laboratorio, desarrollado en el Laboratorio de Química de Alimentos y Nutrientes del Instituto Tecnológico de Alimentos (I.T.A.), como una fase analítica para caracterizar los componentes del lactosuero, asegurando que los resultados obtenidos sean relevantes y replicables.

#### **1.4.2. Métodos y Técnicas.**

- **Método Experimental:** Para la recolección de datos en el análisis físico-químico y microbiológico del lactosuero, así como en la simulación de procesos.
- **Método Analítico:** Para interpretar los resultados obtenidos del análisis de laboratorio y la simulación del proceso de producción.
- **Técnicas:** Uso de MATLAB para el modelado basado en la cinética de crecimiento microbiano y la producción de ácido láctico durante el proceso de fermentación, así como de Aspen Hysys para la simulación del proceso de producción de ácido láctico.

#### **1.4.3. Diseño Experimental.**

Se implementa un diseño experimental para evaluar las condiciones que influyen en la producción de ácido láctico. Las variables independientes consideradas incluyen la concentración de lactosa, la temperatura, el pH, el tiempo de fermentación y la concentración de microorganismos, las cuales se modulan sistemáticamente en los experimentos.

#### **1.4.4. Población y Muestra.**

La población está constituida por muestras de lactosuero proveniente de distintas fuentes de producción de productos lácteos, mientras que la muestra utilizada para la investigación será una selección representativa de lotes de lactosuero obtenidos de la producción de queso. Cada lote será caracterizado previamente mediante análisis fisicoquímicos para garantizar la uniformidad de las condiciones iniciales.

#### **1.4.5. Criterios de Inclusión y Exclusión.**

##### **Criterios de Inclusión**

- Muestras de lactosuero fresco recolectadas dentro de las 24 horas posteriores a su producción.
- Lactosuero proveniente exclusivamente de la producción de queso tipo fresco o maduro.

##### **Criterios de Exclusión**

- Muestras con evidencia de contaminación o almacenadas a temperaturas inadecuadas.
- Lactosuero de origen no identificado o mezclado con otros subproductos lácteos.

#### **1.4.6. Instrumentos de Investigación.**

- **Protocolos de Análisis de Laboratorio:** Métodos normalizados para cada parámetro físico-químico y microbiológico.
- **Materiales de Laboratorio:** pH-metro, balanza analítica, espectrofotómetro, bureta, agitador magnético, horno de calcinación, entre otros.

Esta metodología asegura un enfoque sistemático para la recolección, análisis y simulación de datos, garantizando resultados fiables y aplicables al proceso de producción de ácido láctico.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. MARCO CONCEPTUAL.**

##### **2.1.1. Lactosuero.**

El suero de leche es un producto lácteo obtenido por la precipitación de la caseína en la fabricación de quesos; contiene más del 50% de los sólidos de la leche, incluyendo proteínas, lactosa, minerales y vitaminas. Durante muchos años se consideró como un desperdicio y agente contaminante, sin embargo, este punto de vista ha cambiado radicalmente debido a que este subproducto es una fuente rica en materias primas y cada uno de sus componentes puede ser aprovechado de alguna forma (Hernández, 2014).

##### **2.1.1.1. Definición.**

Según la NOM-243-SSA1-2010. Productos y Servicios. Leche, Formula Láctea, Producto Lácteo Combinado y Derivados Lácteos. Disposiciones y Especificaciones Sanitarias. Métodos De Prueba (2010), el lactosuero es el líquido obtenido de la coagulación de la caseína de la leche, mediante la acción de enzimas coagulantes de origen animal, vegetal o microbiano, por la adición de ácidos orgánicos o minerales de grado alimentario; acidificación por intercambio iónico hasta alcanzar el punto isoelectrico de la caseína. (Secretaría de Salud, 2010)

Mientras que la NMX-F-721-COFOCALEC-2012 Sistema Producto Leche – Alimentos – Lácteos – Suero De Leche (Líquido o en Polvo) – Especificaciones y Métodos de Prueba (2012) define al lactosuero como la parte líquida de la leche que se obtiene después de la separación de la cuajada durante la elaboración del queso y/o la caseína. Su composición varía en función de la leche utilizada, el tipo de queso del cual proviene, del método de coagulación y de los

procesos a los que es sometido para obtener propiedades funcionales específicas. Puede ser dulce o ácido según el pH que presente. (COFOCALEC, 2012)

#### **2.1.1.2. Tipos de Lactosuero.**

El tipo y la composición química del lactosuero varía dependiendo de diferentes factores algunos de ellos son: características de la leche utilizada, el tipo de queso y el proceso tecnológico empleado. Partiendo de estas diferencias podemos clasificar al lactosuero en los dos tipos más comunes los cuales son el dulce y el ácido (Rojas, 2016).

El suero dulce se obtiene de la elaboración del queso mediante el uso de enzimas proteolíticas o cuajo, las cuales actúan sobre las caseínas de la leche y las fragmentan, haciendo que éstas se desestabilicen y precipiten, todo esto bajo condiciones específicas de temperatura, aproximadamente entre 15-50 °C, con un pH levemente ácido. Por otro lado, el suero ácido se genera mediante la precipitación ácida de la caseína, la cual se logra disminuyendo el pH de la leche a un valor de 4.5 o 4.6. A este pH se alcanza el punto isoeléctrico de la mayoría de las caseínas presentes; en este punto, la carga eléctrica neta de la proteína es igual a cero, lo cual produce que la micela de caseína se desestabilice y precipite, dejando en solución solamente las proteínas de tipo séricas (Hernández & Vélez, 2019).

Como ya se mencionó con anterioridad el suero de leche se puede obtener por diferentes vías: coagulación ácida, enzimática o por fermentación bacteriana. El suero utilizado en este trabajo se obtuvo por coagulación enzimática.

#### **2.1.1.3. Obtención del Suero por medio de Coagulación Enzimática.**

El actor principal para que se pueda llevar a cabo la coagulación es la caseína, la cual, es una fosfoproteína presente en la leche, que forma varias fracciones que constituyen un complejo con el calcio, a este conjunto se le denomina micelas de caseína.

Dentro de este complejo micelar existe un tipo de caseína la cual juega un rol esencial en este complejo, la K caseína, ya que esta es insensible al calcio y actúa entonces de coloide protector, formando una capa la cual se encuentra hidratada con una fracción de K-caseína. Como la capa hidratada es también asiento de la misma carga eléctrica, las micelas de caseína se repelen mutuamente e impiden la coagulación. (Chacón et al., 2020)

La coagulación enzimática ocurre en dos fases:

- **Fase Enzimática:** El coloide protector representado por la k-caseína se disocia desapareciendo la capa hidratada cesando la protección
- **Fase Secundaria:** Se forman puentes salinos en adecuadas temperaturas, entre las micelas de caseína sensibles al calcio produciéndose la coagulación del gel originado es una formación reticulada, o sea una estructura tridimensional comparable a una esponja de porosidad fina. O sea, el caseinato de calcio que se encontraba en solución coloidal se convierte en una estructura de paracaseinato de calcio, insoluble en agua. (Chacón et al., 2020)

La coagulación enzimática es irreversible. La acción del cuajo no afecta a las proteínas hidrosolubles. El cuajo ejerce una acción proteolítica poco profunda, pero realmente señalada y orientada, sin la cual la coagulación y por consiguiente la obtención del suero no podría efectuarse.

#### **2.1.1.4. Especificaciones Fisicoquímicas y Microbiológicas.**

Para garantizar una transformación óptima del lactosuero, la norma NMX-F-721-COFOCALEC-2012 establece parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que permiten evaluar su calidad y detectar posibles alteraciones en su composición.

Las propiedades mencionadas se muestran a continuación en la Tabla 1:

**Tabla 1:** Propiedades Fisicoquímicas y Microbiológicas del Lactosuero Pasteurizado

PARÁMETRO	SUERO DULCE	SUERO ÁCIDO
Acidez expresada como Ácido Láctico (%)	0.07 a 0.12	>0.12
Punto Crioscópico °C (°H)	-0.498 (-0.520) a -0.556 (-0.580)	< -0.556 (-0.580)
pH	6.4 a 6.7	< 6.4
Densidad (g/mL)	1.023 a 1026	1.023 a 1026
Inhibidores	Negativo	Negativo
Bacterias Mesofilias Aerobias (UFC/mL)	10,000 máx	10,000 máx
Organismos Coliformes (UFC/mL)	100 máx	100 máx

**Fuente:** (COFOCALEC, 2012)

### 2.1.1.5. Composición Química del Lactosuero.

Como ya se mencionó anteriormente las características del lactosuero variaran debido al tipo, en la Tabla 2 se muestran las características químicas y nutricionales más importantes publicadas bibliográficamente.

**Tabla 2:** Composición Química y Nutricional del Lactosuero

COMPONENTE	SUERO DULCE (g/L)	SUERO ÁCIDO (g/L)
Lactosa	46 - 52	44 - 46
Grasa	0 - 5	0 - 5
Proteína	6.0 - 10	6.0 - 8.0
Calcio	0.4 - 0.7	1.2 - 1.6
Fósforo	1.4 - 1.6	1.4 - 1.6
Cloruros	2.0 - 2.2	2.0 - 2.2

**Fuente:** (Chacón et al., 2020)

En términos promedio, el suero de leche contiene más de la mitad de los sólidos presentes en la leche original, incluyendo alrededor del 20% de las proteínas (lactoalbúminas y lactoglobulinas), la mayor parte de la lactosa, minerales (calcio, fósforo, sodio y magnesio) y vitaminas hidrosolubles (tiamina, ácido pantoténico, riboflavina piridoxina, ácido nicotínico, cobalamina y ácido ascórbico). (Poveda, 2013)

La Tabla 2 podemos observar que el lactosuero dulce contiene una mayor concentración de lactosa y proteína, en comparación con el ácido, a su vez este tipo, contiene una mayor cantidad de fosforo y calcio.

Debido a que una de las primicias de este trabajo fue la obtención de ácido láctico a partir de la lactosa, se optó por la utilización de lacto suero dulce ya que contiene una mayor concentración de esta sustancia. Este tipo de lactosuero es común en la industria láctea, ya que la mayor producción de este tipo de residuo es creado por quesos frescos.

Para poder transformar la lactosa contenida en el suero de leche en ácido láctico existen dos vías: síntesis química o por fermentación de hidratos de carbono. El primer proceso da como resultado una mezcla racémica de los ácidos lácticos, mientras que el segundo conduce a un estereoisómero de ácido láctico D (-) o L (+). El 90,0 % de la producción mundial de ácido láctico se consigue por fermentación, lo que muestra la preferencia por este método frente a la síntesis química. (Nanfra, 2021)

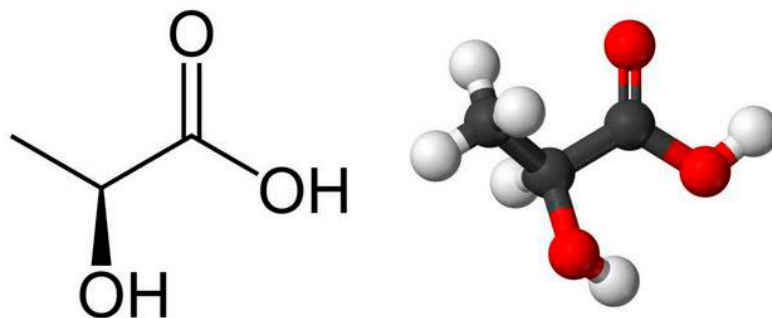
La producción biotecnológica está basada en la fermentación de sustratos ricos en carbohidratos por bacterias u hongos y tiene la ventaja de formar enantiómeros D (-) o L (+), ópticamente activos. La producción biotecnológica depende del tipo de microorganismo utilizado, la inmovilización o recirculación del microorganismo, el pH, la temperatura, la fuente de carbono, la fuente de nitrógeno, el modo de fermentación empleado y la formación de subproductos. (Sánchez et al., 2020)

### 2.1.2. Ácido Láctico.

El ácido láctico es producido por animales, plantas y microorganismos en la naturaleza. También puede ser derivado a partir de intermedios con un origen en materiales renovables por ejemplo acetaldehído y etanol o a partir de químicos derivados del carbón. (Serna-Cock, 2020)

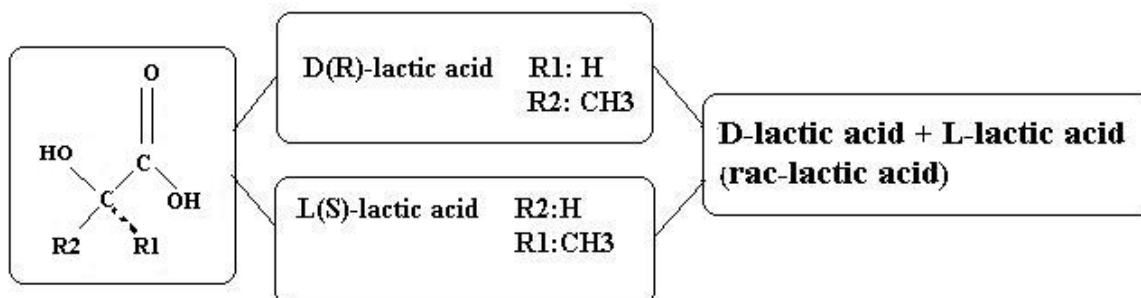
A continuación, las Figura 1 y Figura 2 muestran la estructura química, así como las estereofomas del ácido láctico.

**Figura 1:** Estructura Química del Ácido Láctico



**Fuente:** (Koohi, 2021)

**Figura 2:** Estereofomas del Ácido Láctico



**Fuente:** (Koohi, 2021)

### 2.1.2.1. Propiedades Físicas y Químicas del Ácido Láctico.

El ácido láctico, también llamado 'ácido de la leche', es un ácido orgánico con la siguiente fórmula química:  $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{CO}_2\text{H}$ . El nombre oficial otorgado por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) es ácido 2-hidroxipropanoico. (Mandenius, 2022)

Las diferentes propiedades físicas y químicas que se atribuyen para el ácido láctico se ilustran en la Tabla 3.

**Tabla 3:** Propiedades Físicas y Químicas del Ácido Láctico

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Nombre Compuesto	Ácido Láctico
Nombre IUPAC	Ácido 2-hidroxipropanoico
Formula Química	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$
Masa Molecular	$90.08 \text{ mol g}^{-1}$
Apariencia	Líquido incoloro; alternativamente, un compuesto blanco solido a amarillo.
Sabor	Suave sabor ácido
Olor	Inoloro
Punto de Ebullición	$122 \text{ }^\circ\text{C}$
Punto de Fusión	$17 \text{ }^\circ\text{C}$
Gravedad Especifica / Densidad	1.2
Ka	$1.38 \times 10^{-4}$
pKa	3.86

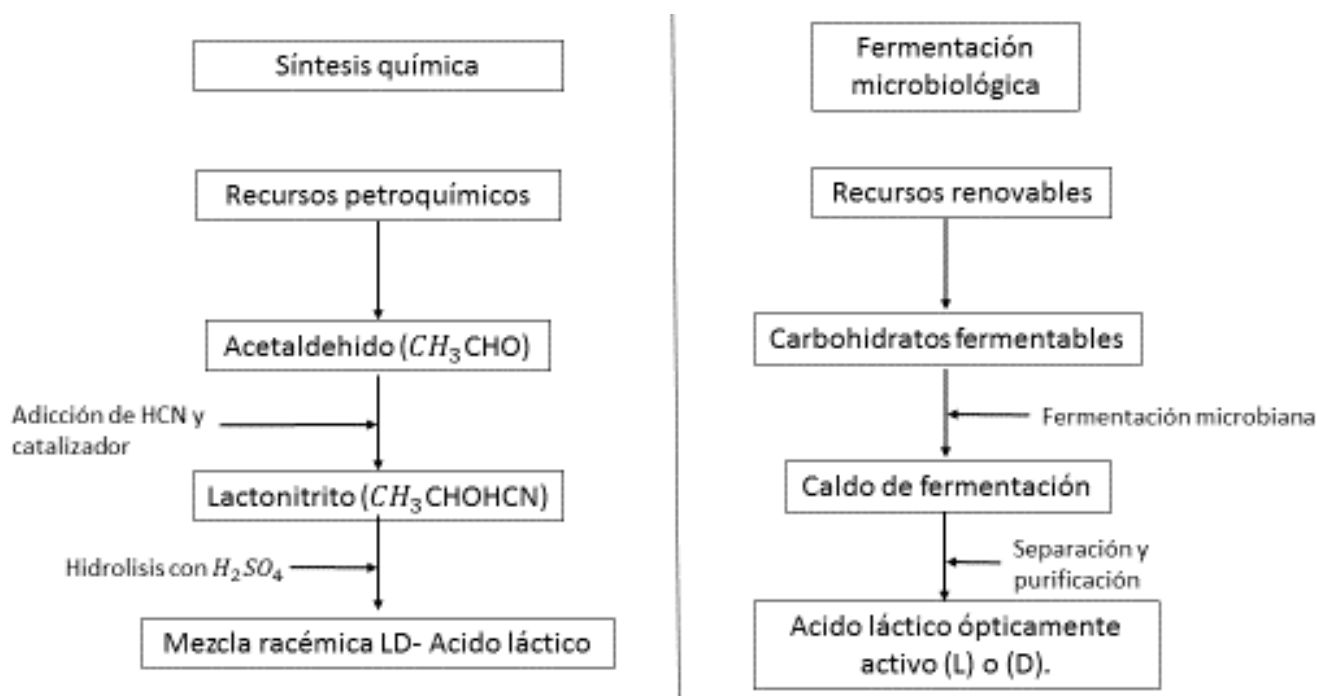
**Fuente:** (Mandenius, 2022)

### 2.1.2.2. Producción de Ácido Láctico.

El ácido láctico puede ser obtenido por vía química o fermentativa. La producción química, está basada en la reacción de acetaldehído con ácido cianhídrico (HCN) para dar lacto nitrilo, el cual puede ser hidrolizado a ácido láctico; otro tipo de reacción se basa en la reacción a alta presión de acetaldehído con monóxido de carbono y agua en presencia de ácido sulfúrico como catalizador.

La síntesis química tiene la desventaja que el ácido láctico producido es una mezcla de D y L ácido láctico ópticamente inactivo por lo cual, el 90% del ácido láctico producido en el mundo es elaborado por vía biotecnológica, es decir a través de una fermentación láctica utilizando bacterias y diversos sustratos, como se muestra en el Diagrama 1. (Gänzle & Hertel, 2022)

**Diagrama 1:** Diferentes Vías de Producción de Ácido Láctico



**Fuente:** (Tian et al., 2021)

### 2.1.2.3. Ventajas y Desventajas de Métodos de Producción de Ácido Láctico.

A continuación, en la Tabla 4. Se muestran algunas ventajas y desventajas de los dos métodos de producción de ácido láctico a gran escala.

**Tabla 4:** Ventajas y Desventajas de los distintos Métodos de Producción de Ácido Láctico

VENTAJAS	PRODUCCIÓN PETROQUÍMICA	PRODUCCIÓN BIOTECNOLÓGICA
Origen	Materia prima no renovable.	Materia prima de base biológica.
Costo	Más barato que las fuentes renovables.	Etapa de separación con alto costo.
Rutas	Rutas desarrolladas y tecnología establecida.	Nuevas tecnologías.
Rendimiento	Alto.	Hay productos secundarios, bajas concentraciones y elevado tiempo de reacción.
<b>DESVENTAJAS</b>	Se espera que la disponibilidad disminuya con el tiempo, alta demanda energética y problemas de eliminación del catalizador.	Sensibilidad de los microorganismos, nutrientes requeridos, proceso de recuperación complicada.
Opinión Pública	Disminución de popularidad.	Aumento de interés.

**Fuente:** (Rogers & Lee, 2021)

### 2.1.3. Producción Biotecnológica de Ácido Láctico.

Como ya se mencionó con anterioridad la mayoría de la producción de ácido láctico se da por la vía de la fermentación láctica, utilizando diferentes microorganismos, así como diversos

sustratos, una vez concluida esta fermentación se somete a un proceso de separación y/o purificación, el cual será defensorio en la pureza obtenida del ácido láctico.

En el proceso de fabricación se busca que los microorganismos fermenten rápida y completamente sustratos baratos, con adición mínima de nutrientes nitrogenados y alta estereoespecificidad, en condiciones de valores reducidos de pH y elevadas temperaturas, que se produzca muy poca biomasa y que la cantidad de subproductos sea despreciable. (Zhang & Zhao, 2023)

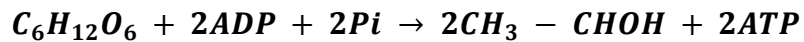
### **2.1.3.1. Fermentación Láctica.**

La fermentación láctica es una ruta metabólica que ocurre en la matriz citoplasma de la célula, en la cual se fermenta la glucosa (se oxida parcialmente) para obtener energía metabólica y un producto de desecho que principalmente es el ácido láctico (fermentación homoláctica) la cual se muestra en la reacción, además de otros ácidos (fermentación heteroláctica). Se trata de un proceso biológico en el que los azúcares presentes en el medio (generalmente azúcares de seis carbonos como son la glucosa, galactosa y fructosa) se transforman en ácido láctico. (Madigan et al., 2020)

Las bacterias encargadas de esta fermentación son llamadas BAL (bacterias ácido lácticas), las cuales llevan a cabo rutas metabólicas y productos similares. Las BAL son organismos procariontes, que se reproducen por división celular, con un tiempo de reproducción relativamente bajo a condiciones óptimas. Las BAL homofermentativas producen ácido láctico como su principal producto final. (Kumar & Singh, 2020)

En la Diagrama 2 y Tabla 5 se muestra la ruta metabólica, así como las enzimas involucradas que siguen las bacterias homofermentativas, es decir, la vía bioquímica en la que el ácido láctico es el principal producto.

La estequiometria clásica de la fermentación homoláctica es la siguiente:



**Fuente:** (Kumar & Singh, 2020)

La ruta metabólica de mayor protagonismo de las BAL empieza con el transporte activo de lactosa a través de las membranas de la célula, convirtiéndose en glucosa y galactosa. Vía homofermentativas se sintetizan dos moléculas de ATP por mol de glucosa. En esta vía la glucosa sigue todas las reacciones de la glucólisis para producir dos moléculas de piruvato y luego este compuesto es reducido a ácido láctico, mediante la oxidación de una molécula de NADH. La enzima que cataliza la reacción es llamada, deshidrogenasa láctica. (Gänzle & Hertel, 2022)

La fermentación homoláctica puede además dar lugar a una mezcla de ácidos cuando existe una concentración de glucosa limitante, cuando se incrementa el pH, se aumenta la temperatura o se fermentan azúcares diferentes a la glucosa; en estos casos, la diferencia radica en el metabolismo del piruvato, el cual además de producir ácido láctico produce además formiato y acetil CoA por la enzima piruvato formiatoliasa. (Gänzle & Hertel, 2022)

### **2.1.3.2. Bacterias Ácido Lácticas.**

El termino bacterias lácticas engloba a un grupo heterogéneo de microorganismo cuya característica definitoria es la producción de ácido láctico a partir de la fermentación de azúcares. (Mansour, 2020)

Las bacterias ácido lácticas (BAL), se definen como una clase funcional que designa un grupo heterogéneo de bacterias Gram positivas, no patógenas, no toxigénicas, fermentadoras, caracterizadas por producir ácido láctico a partir de carbohidratos, lo que las hace útiles como

cultivos iniciadores para la fermentación. Comparten otros rasgos comunes como ser aerotolerantes, no forman esporas y no producen pigmento. (O'Sullivan, 2022)

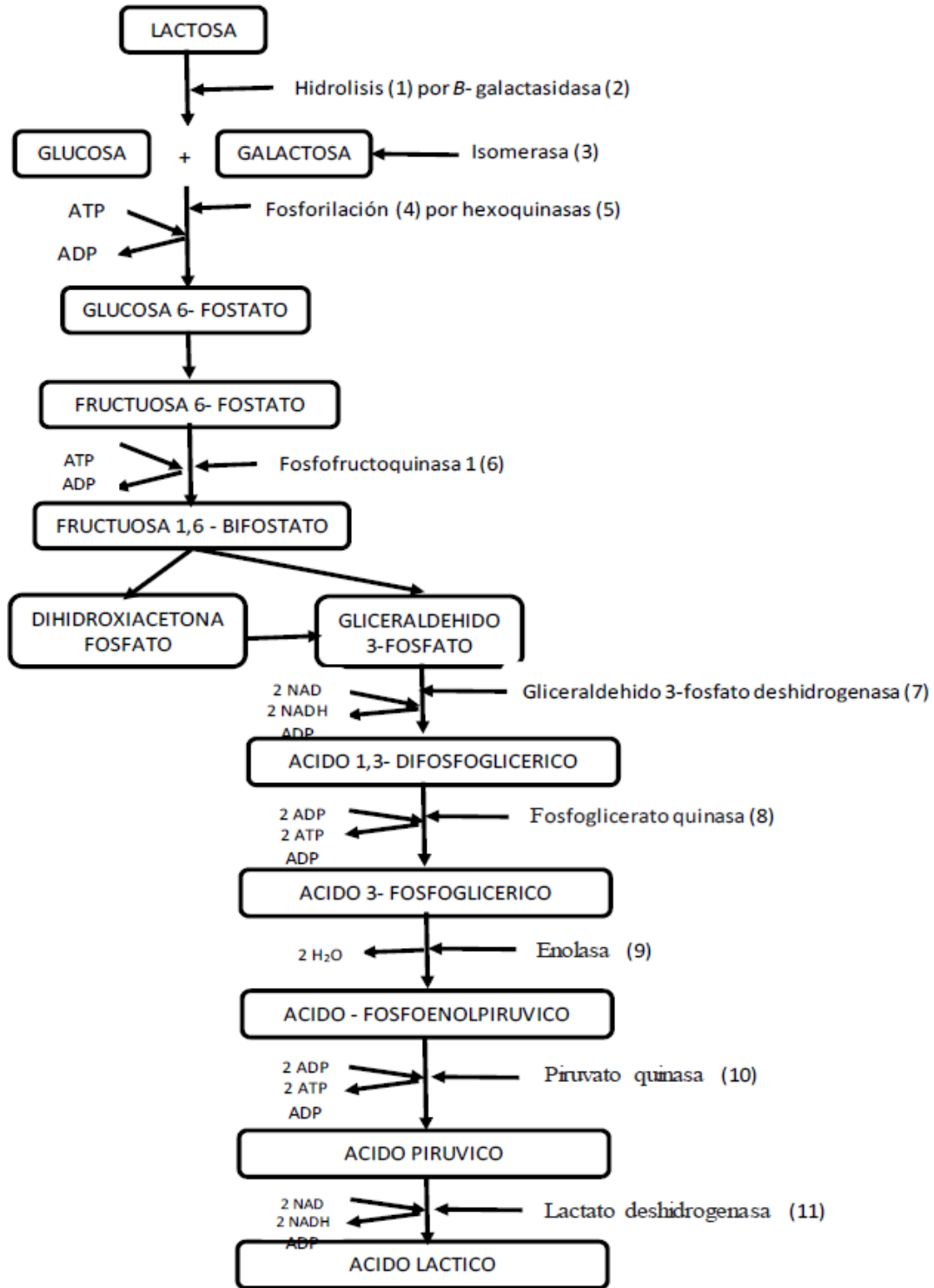
El grupo se subdivide en bacterias homo y heterofermentativas en función de los productos de su metabolismo. Las homofermentativas se caracterizan porque el único producto de la fermentación de los carbohidratos es el ácido láctico, mientras que las segundas pueden originar, además, dióxido de carbono, etanol o ácido acético. Dentro de las BAL, los géneros más utilizados para la obtención de alimentos y bebidas fermentadas son *Lactococcus*, *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Oenococcus* y dentro del género *Streptococcus* la especie *S. thermophilus*. (O'Sullivan, 2022)

Las BAL son microorganismos delicados con complejas y variadas necesidades nutritivas. Requieren como fuente de carbono y de energía para producir ATP hidratos de carbono, principalmente la lactosa y glucosa. Las proteínas de la leche, péptidos, aminoácidos específicos y los derivados ácidos nucleicos también son necesarios. Varias vitaminas, en particular la vitamina del complejo B son a menudo necesarias como catalizadores para reacciones enzimáticas, pero las necesidades de vitaminas y minerales específicos varían entre las especies. (Berenjian, 2019)

Gran parte de las LAB producen únicamente una forma isomérica de ácido láctico; las formas isoméricas de lactato deshidrogenasa presente en las LAB determinan el isómero de ácido láctico producido, ya que la deshidrogenasa láctica es esteroespecífica. Sin embargo, algunas LAB producen formas racémicas donde el isómero predominante depende de cambios en la aireación, cantidad de NaCl, tipo de fermentación, incrementos en el pH y concentración de sustrato. (Duncan, 2021)

Las especies del género *Lactobacillus* por ejemplo, producen además de formas isoméricas L(+) y, D(-), una mezcla racémica de ambos isómeros. (Kumar & Singh, 2020)

**Diagrama 2:** Ruta Metabólica de la Fermentación Homoláctica



**Fuente:** (Fadda, 2021)

**Tabla 5:** Principales Enzimas y Mecanismos Metabólicos durante la Fermentación Láctica

1	<b>Hidrolisis</b>	Una molécula orgánica y el agua reaccionan rompiendo un enlace covalente para formar dos moléculas orgánicas con grupos funcionales que incluyen los átomos de la molécula de agua.
2	<b>Galactosidasa</b>	Es una enzima que cataliza la hidrólisis de glucósidos a monosacáridos, el sitio activo de la $\beta$ -galactosidasa hidroliza a un disacárido en presencia de iones de potasio monovalentes ( $K^+$ ) e iones de magnesio bivalentes ( $Mg^{2+}$ ). El enlace glicosídico del sustrato es clavado por un grupo carboxilo terminal de un ácido glutámico presente en la enzima.
3	<b>Isomerasa</b>	Enzima encargada de convertir la galactosa en glucosa.
4	<b>Fosforilación</b>	Es un proceso metabólico que utiliza energía liberada por la oxidación de nutrientes para producir adenosina trifosfato (ATP).
5	<b>Hexoquinasas</b>	Son un grupo de enzimas del tipo transferasa, que pueden transferir un grupo fosfato desde una molécula de "alta energía" a otra, que actuará como aceptora de este fosfato, denominada sustrato. Esta transferencia se denomina Fosforilación.
6	<b>Fosfofructoquinasa 1</b>	Es la principal enzima reguladora de la glucólisis. cataliza la Fosforilación de la fructosa-6-fosfato con gasto de una molécula de ATP para formar fructosa-1,6-bisfosfato y ADP. Esta reacción tiene un cambio en la energía libre de $-14,2$ kJ/mol, por lo que es irreversible. Este paso está sujeto a una regulación extensiva ya que no solamente es irreversible, sino que también el sustrato original está forzado a proceder hacia la ruta glicolítica luego de este paso. Esto sigue a un control preciso de la glucosa y otros monosacáridos, galactosa y fructosa, hacia la ruta de glucólisis.
7	<b>Gliceraldehido 3-fosfato deshidrogenasa</b>	Es una enzima implicada en una de las reacciones más importantes de la glucólisis, puesto que cataliza un paso en el cual se genera el primer intermediario de elevada energía, y, además, genera un par de equivalentes de reducción (en forma de NADH).
8	<b>Fosfoglicerato quinasa</b>	Es una enzima transferasa que cataliza la segunda etapa de la segunda fase de la glicólisis, la conversión reversible de 1,3-difosfo-glicerato a 3-fosfoglicerato con la generación de una molécula de ATP. Mediante esta reacción se transfiere un grupo fosfato desde el 1,3-difosfoglicerato al ADP.
9	<b>Enolasa</b>	Es una enzima que cataliza la transformación de 2- fosfoglicerato a fosfoenolpiruvato durante la glucólisis.

10	<b>Piruvato quinasa</b>	Es una enzima de la glucólisis que cataliza la transferencia de un grupo fosfato del fosfoenolpiruvato al adenosín difosfato (ADP), produciendo una molécula de piruvato y otra de adenosín trifosfato (ATP).
----	-------------------------	---

**Fuente:** (Fadda, 2021)

### 2.1.3.3. Bacterias Utilizadas en la Producción de Ácido Láctico.

Cuando se utilizan bacterias en la producción de ácido láctico vía fermentativa, se busca que éstas sean preferiblemente termófilas, que fermenten rápida y completamente sustratos baratos, con adición mínima de nutrientes nitrogenados que crezcan en condiciones de valores reducidos de pH, que presenten poca producción de biomasa y una despreciable cantidad de subproductos. (Cao, 2020)

Las bacterias que pueden utilizarse para la producción de ácido láctico son cocos y bacilos Gram positivos, anaerobios facultativos, no esporulados, inmóviles pertenecientes a los géneros *Lactobacillus*, *Carnobacterium*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, *Streptococcus*, *Tetragenococcus*, *Lactococcus*, *Vagococcus*, *Enterococcus*, *Aerococcus* y *Weissella* (Gänzle & Hertel, 2022).

La mayoría de las especies pertenecientes a estos géneros tienen alta tolerancia a pH por debajo de 5. Esta tolerancia ácida les da ventajas competitivas sobre otras bacterias; la temperatura óptima de crecimiento varía entre géneros y está en un rango de 20°C a 45°C.

La mayoría de los LAB son facultativamente anaeróbicos, catalasa negativos, no móviles y sin formación de esporas. Tienen una alta tolerancia a los ácidos y sobreviven a un pH 5 o menor. Su tolerancia ácida les da una ventaja competitiva sobre otras bacterias.

Estas bacterias necesitan requerimientos nutricionales bastante complejos, ya que es limitada su síntesis de aminoácidos y vitamina B, en consecuencia, se reproducen y actúan en sustratos ricos nutricionalmente, como por ejemplo el lactosuero. (Duncan, 2021)

En la Tabla 6 se muestran los microorganismos más recientemente utilizados para la producción de ácido láctico, así como la producción, rendimiento y productividad durante la fermentación.

**Tabla 6:** Microorganismos utilizados para Investigaciones Recientes de la Producción Biotecnológica de Ácido Láctico

Organismo	Producción de Ácido Láctico g/L	Rendimiento g/g	Productividad g/Lh
<i>Rhizopus Oryzae ATCC 52311</i>	83.0	0.88	2.6
<i>Rhizopus Oryzae NRRL 395</i>	104.6	0.87	1.8
<i>Enterococcus Faecalis RKY1</i>	144.0	0.96	5.1
<i>Lactobacillus Rhamnosus ATCC 10863</i>	67.0	0.84	2.5
<i>Lactobacillus Helveticus ATCC 15009</i>	65.5	0.66	2.7
<i>Lactobacillus Bulgaricus NRRL B-548</i>	38.7	0.9	3.5
<i>Lactobacillus Casei NRRL B-441</i>	83.2	0.91	5.6
<i>Lactobacillus Plantarum ATCC 21028</i>	41.0	0.97	1.0
<i>Lactobacillus Pentosus ATCC 8041</i>	21.8	0.77	0.8
<i>Lactobacillus Amylophilus GV6</i>	76.2	0.7	0.8
<i>Lactobacillus Delbrueckii NCIMB 8130</i>	90.0	0.97	3.8
<i>Lactococcus Lactis ssp. Lactis IFO 12007</i>	90.0	0.76	1.6

**Fuente:** (Tian et al., 2021)

De las bacterias ácido lácticas los *Lactobacillus delbrueckii* son los microorganismos más utilizados en la producción a gran escala de ácido láctico ya que tiene la ventaja de producir únicamente isómeros L(+), consumir eficientemente glucosa y ser un microorganismo termófilo con temperatura óptima de crecimiento 41.5°C, lo que reduce costes de enfriamiento y esterilización, así como riesgos de contaminación microbiológica en el fermentador. Este

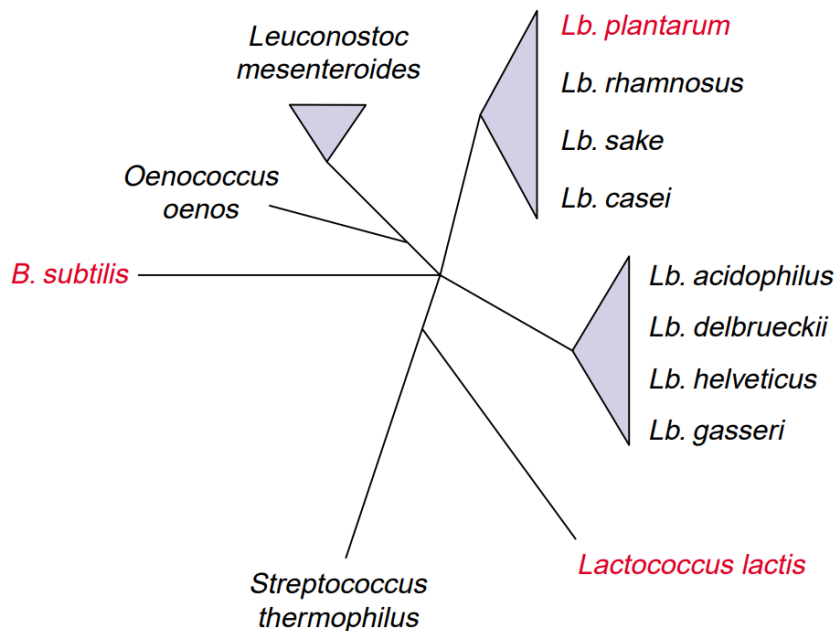
microorganismo crece bien a un pH entre 5,5 y 6,5, por lo cual el ácido producido debe ser continuamente neutralizado. (Gänzle & Hertel, 2022)

#### 2.1.4. Los Microorganismos Productores de Ácido Láctico.

Las bacterias ácido lácticas (LAB) son ampliamente usadas en fermentaciones industriales de alimentos y están recibiendo gran atención por su uso como fábricas celulares para la producción de compuestos industriales y farmacéuticos. La conversión glicolítica de azúcares a ácido láctico es la ruta metabólica más importante en estas bacterias.

Las LAB son microorganismos de crecimiento rápido con pequeños genomas, metabolismo simple y relevancia industrial. Estas son un grupo de bacterias Gram-positivas relacionadas filogenéticamente, que incluye *Lactococcus* y *Lactobacillus* sp. (Figura 3). Además, son consideradas fábricas celulares programadas que producen ácido láctico a partir de azúcares y son usadas en varias aplicaciones industriales. (Buchanan, 2019)

**Figura 3:** Álbum Filogenético de Bacterias Ácido Lácticas (LAB) y Bacterias Relacionadas



**Fuente:** (Buchanan, 2019)

Las LAB consisten en los géneros: *Carnobacterium*, *Enterococcus* (*Ent*), *Lactobacillus* (*Lb*), *Lactococcus* (*Lc*), *Leuconostoc* (*Leu*), *Oenococcus*, *Pediococcus* (*Ped*), *Streptococcus* (*Str*), *Tetragenococcus*, *Vagococcus*, y *Weissella*. (Huang & Zhang, 2022)

Son microorganismos de tipo “coci”, con la excepción de los *Lactobacillus* y *Carnobacteria* que son bastones (rods), incapaces de sintetizar ATP por respiración, y que tienen el ácido láctico como el mayor producto final a partir de la conservación de energía en la fermentación de azúcares.

La mayor parte de LAB son anaerobios facultativos, catalasa negativos, y no formadores de esporas. Tienen alta tolerancia a los ácidos y sobreviven a pH de 5 y menores. Su tolerancia ácida les da ventaja sobre otras bacterias. Su temperatura de crecimiento óptima varía entre 20 y 45 °C. La mayor parte de ellas son consideradas GRAS, pero algunas de las cepas como *Streptococci* son patógenicas. Todos los géneros LAB pertenecen a la subdivisión *Clostridium*. (Huang & Zhang, 2022)

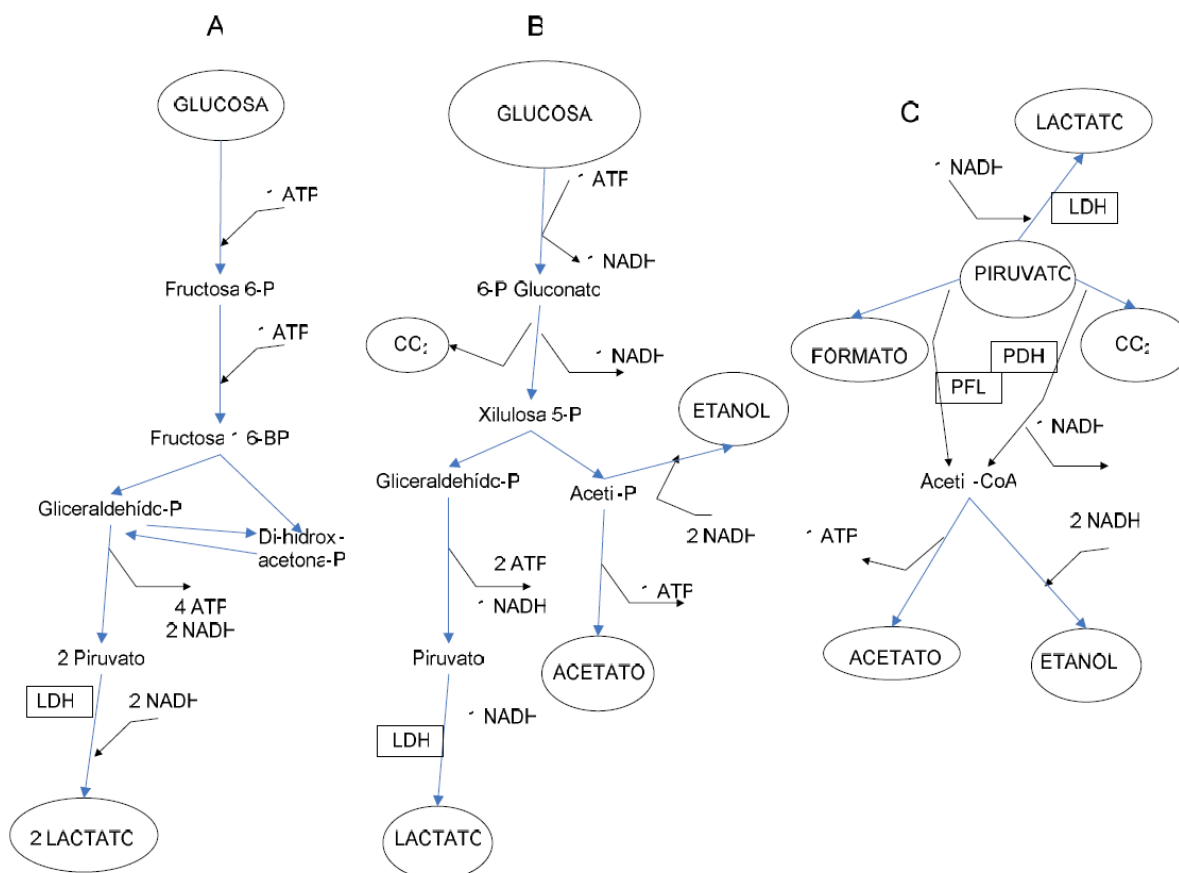
Estos microorganismos tienen requerimientos nutricionales complejos, debido a su limitada habilidad para sintetizar vitaminas B y aminoácidos. Por lo que existen ambientes naturales ricos en nutrientes como plantas, leche y dentro de cuerpos de humanos y animales.

Los LAB han sido usadas por los humanos para la fermentación de comidas y productos alimenticios desde la antigüedad y su mayor aplicación actual es todavía en la industria de alimentos, por ejemplo, en la producción de productos lácteos, carne y vinos. Las aplicaciones técnicas actuales de las LAB incluyen la producción de dextrano a partir de sucrosa por *Leuconostoc mesenteroides*, la producción de lisina a partir de *Lactococcus lactis ssp. lactis* y la producción de ácido láctico para diferentes aplicaciones. También se ha sugerido que las LAB podrían ser usadas como vectores para medicina oral.

Las LAB fermentan azúcares a través de diferentes rutas metabólicas resultando en fermentaciones homo, hetero y ácida mezclada (Figura 4). (Huang & Zhang, 2022)

En la homofermentación se obtiene ácido láctico como el producto final del metabolismo de la glucosa, usando la ruta metabólica Embed- Meyerhof-Parnas (Figura 4A). En la fermentación se forman cantidades equimolares de ácido láctico, dióxido de carbono y etanol o acetato, a partir de la glucosa a través de la ruta metabólica de la fosfoquetolasa (Figura 4B). La relación de etanol y acetato depende en el potencial redox del sistema. Esta ruta es usada por heterofermentadores facultativos como *Lactobacillus casei*, para la fermentación de pentosas, y la fermentación de hexosas y pentosas por homofermentadores obligados como *Leuconostoc*. Todas las LAB excepto *Lactobacilli* tipo I (Por ejemplo, *Lactobacillus delbrueckii*) son capaces de fermentar pentosas, por lo que son heterofermentadores facultativos. (Huang & Zhang, 2022)

**Figura 4:** Rutas Metabólicas en LAB para obtener Ácido Láctico. Homofermentación (A), Heterofermentación (B), Fermentación Ácida Mezclada (C), P = Fosfato, BP = Bifosfato, LDH = Lactato Deshidrogenasa, PFL = Liasa Piruvato Formato



Fuente: (Huang & Zhang, 2022)

Los ácidos mezclados son formados por homofermentadores como *Lactococci* durante la limitación de la glucosa y durante el crecimiento en otros azúcares, por ejemplo, el *Lactococcus lactis* cuando crece en maltosa o lactosa o a pH elevados y bajas temperaturas produce, además del ácido láctico, etanol, acetato y formato. Durante estas condiciones la ruta metabólica homofermentativa es usada, pero la diferencia está en el metabolismo del piruvato, que en adición al ácido láctico también es metabolizado en acetil-CoA por el piruvato formato liasa (PFL) (Figura 4C). En la presencia de oxígeno la PFL es inactivada y se activa una ruta alternativa del metabolismo del piruvato vía piruvato deshidrogenasa (PDH), resultando en la producción de dióxido de carbono, acetil-CoA y NADH. (Huang & Zhang, 2022)

El grupo de los lactobacilos homofermentativos está integrado por *Lactobacillus caucasicus*, *Lactobacillus delbrueckii*, *Lactobacillus lactis* y *Lactobacillus acidophilus*. (O'Sullivan, 2022)

#### **2.1.4.1. Lactobacillus.**

El género *Lactobacillus* (*lactis*-leche; *bacillus*-pequeños bacilos) se caracteriza por presentar células en forma de bacilos largos y extendidos, aunque con frecuencia pueden observarse bacilos cortos o coco-bacilos. Estos bacilos se presentan comúnmente formando cadenas y en general son no motiles, pero cuando tienen motilidad es por la presencia de flagelación peritrica. Son Gram positivos y sólo las células muertas pueden dar resultados variables a la tinción de Gram. Los grandes bacilos homofermentativos presentan gránulos internos revelados por tinción de Gram o por tinción con azul de metileno. (Duar et al., 2019)

Esta familia de bacterias presenta particularidades para cada especie respecto a los requerimientos nutricionales complejos para los aminoácidos, péptidos, derivados de ácidos nucleicos, vitaminas, sales, ácidos grasos o ésteres de ácidos grasos y carbohidratos fermentables. Requieren no sólo carbohidratos como fuentes de carbono y energía, sino también: aminoácidos, vitaminas y nucleótidos. Generalmente estos requerimientos variados suelen suplirse cuando el medio de cultivo de los lactobacilos contiene carbohidratos fermentables, peptona, extracto de carne y extracto de levadura, aunque una suplementación con jugo de

tomate, manganeso, acetato y ésteres del ácido oleico, resulta estimuladora y hasta esencial para muchas especies. Por eso, estos compuestos se incluyen en el medio MRS. Existen especies que se adaptan a sustratos muy particulares y necesitan factores de crecimiento especiales. (Duar et al., 2019)

Los lactobacilos crecen bien en medios ligeramente ácidos, con pH inicial de 6,4 - 4,5 y con uno óptimo de desarrollo entre 5,5 y 6,2. Su crecimiento cesa cuando el pH alcanza valores desde 4 hasta 3,6 en dependencia de especies y cepas y disminuye notablemente en medios neutros o ligeramente alcalinos. Los lactobacilos son capaces de disminuir el pH del sustrato donde se encuentran por debajo del valor 4,0 mediante la formación de ácido láctico. De esta forma evitan o al menos disminuyen considerablemente el crecimiento de casi todos los otros microorganismos competidores, exceptuando el de otras bacterias lácticas y el de las levaduras. La mayoría de las cepas de *Lactobacillus* son principalmente aerotolerantes; su crecimiento óptimo se alcanza bajo condiciones microaerofílicas o anaeróbicas y se conoce que un incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> (de aproximadamente 5% o hasta el 10%) puede estimular el crecimiento, sobre todo en el caso del crecimiento superficial sobre medios sólidos.

La mayor parte de los lactobacilos son mesófilos (30 - 40°C), con un límite superior de 40°C. Aunque su rango de temperaturas para el crecimiento oscila entre 2 y 53°C, algunos crecen por debajo de 15°C y hay cepas que crecen por debajo de 5°C. Otros crecen a temperaturas bajas, cercanas al punto de congelación (por ejemplo, los que habitan en carnes y pescados congelados). Los llamados lactobacilos “termófilos” pueden tener un límite superior de temperatura de 55°C y no crecen por debajo de 15°C. Aún no se conocen los verdaderos lactobacilos termófilos que crezcan por encima de 55°C. (Duar et al., 2019)

Los miembros de este género transforman la glucosa y las hexosas aldehídicas similares, los carbohidratos que producen estos azúcares simples y los alcoholes polihidroxílicos en ácido láctico por homofermentación o bien, en ácido láctico y otros productos finales adicionales como ácido acético, etanol, dióxido de carbono, ácido fórmico y ácido succínico por heterofermentación, constituyendo al menos un 50% de los productos finales el ácido láctico, el

cual usualmente no es fermentado. Las principales vías de la fermentación para las hexosas son: la de Embden-Meyerhof, donde se convierte 1 mol de hexosa en 2 moles de ácido láctico por fermentación homoláctica y la vía del 6-fosfogluconato, cuyo resultado es 1 mol de CO<sub>2</sub>, 1 mol de etanol (o de ácido acético) y 1 mol de ácido láctico, por fermentación heteroláctica. (Duar et al., 2019)

Algunas BAL de ese tipo de familia y que convierten la glucosa exclusivamente en ácido láctico son *Lactobacillus caucasicus*, *Lactobacillus bulgaricus*, *Lactobacillus lactis*, *Lactobacillus helveticus*, *Lactobacillus acidophilus* y *Lactobacillus delbrueckii*. (Duar et al., 2019)

#### **2.1.4.2. Streptococcus.**

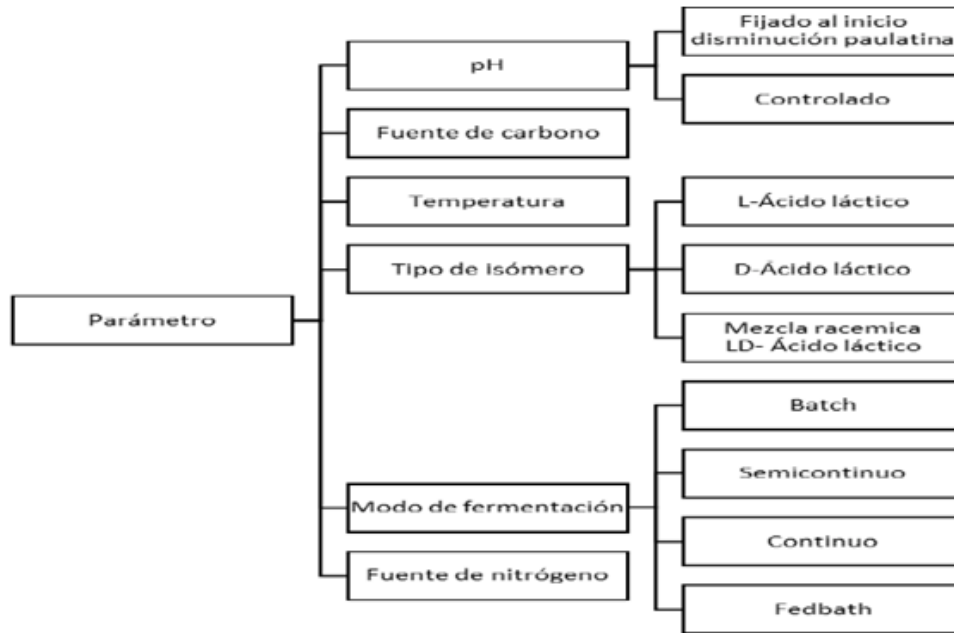
El género *Streptococcus* está integrado por cocos Gram-positivos, oxidasa y catalasa negativos. Se trata de un grupo muy dinámico desde un punto de vista taxonómico y actualmente incluye al menos 110 especies y 15 subespecies. Únicamente dos especies de *Streptococcus* (*S. salivarius* y *S. thermophilus*) han encontrado aplicaciones industriales. (Mansour, 2020)

*Streptococcus thermophilus* es una especie relevante dentro de las bacterias ácido lácticas, su principal papel en las fermentaciones lácteas es proporcionar una acidificación rápida mediante la producción de lactato a partir de lactosa. La capacidad de esta bacteria para utilizar los carbohidratos es limitada y, a diferencia de la mayoría de las bacterias gran positivas, prefiere la lactosa a la glucosa como fuente primaria de carbono y energía: en consecuencia, se ha especializado en la toma de lactosa y su consiguiente catabolismo mediante glicolisis. (Mansour, 2020)

#### **2.1.5. Parámetros Importantes durante la Fermentación.**

En la Diagrama 3 se muestran algunos parámetros importantes que se deben controlar adecuadamente con el fin de obtener el mayor rendimiento de ácido láctico durante la fermentación.

**Diagrama 3:** Parámetros Importantes durante la Fermentación Homoláctica



**Fuente:** (Gómez, 2019)

Durante la fermentación Batch los sustratos y las materias primas requeridas para la fermentación y el crecimiento microbiano deseado se colocan en un biorreactor; la incubación puede continuar a condición de que se definan los parámetros de operación tales como el pH y los valores térmicos. Durante la fermentación, no se agrega nada excepto el oxígeno en el caso de microorganismos aeróbicos. Después de cada proceso, se recoge el producto y se limpia el fermentador; luego, otro lote puede prepararse y el proceso puede reiniciarse. (Mandenius, 2022)

Mientras que por el método de alimentación Fedbatch los sustratos y las materias primas se agregan en pequeñas cantidades durante el proceso de fermentación. Los sistemas de alimentación Batch y Fedbatch se consideran sistemas de fermentación "cerrados", a diferencia de los sistemas "abiertos" como la fermentación continua, ya que la adición de sustratos y materias primas se realiza continuamente durante el proceso. En consecuencia, la fermentación continua se considera como un sistema abierto: se permite la introducción de nuevas materias primas, a diferencia de los sistemas "cerrados". (Mandenius, 2022)

La mayor concentración de ácido láctico se obtiene normalmente en procesos batch y Fedbatch, mientras que la mayor productividad se observa en procesos de fermentación continua debido a periodos temporales más largos. (Mandenius, 2022)

#### **2.1.6. Producción de Ácido Láctico con Sustratos Agroindustriales.**

La industria procesadora de alimentos genera grandes volúmenes de residuos de carbohidratos que son sustratos ideales para la bioconversión a productos útiles de alto valor como el ácido láctico y sus derivados, que incluyen plásticos biodegradables, oxiquímicos, solventes ecológicos y productos químicos especiales. Existen oportunidades para desarrollar tecnologías ecológicas más eficientes para la producción en gran escala del ácido láctico y el desarrollo de nuevas aplicaciones para sus derivados. Si el ácido láctico pudiera producirse a partir de carbohidratos a costos más bajos y en mayores cantidades derivados. (Zhang & Zhao, 2023)

La literatura muestra una gran tendencia en la producción de ácido láctico a partir de sustratos agroindustriales, la Tabla 7 muestra algunos sustratos diferentes a la lactosa y glucosa, para la producción vía fermentativa de este producto.

En cuanto a las materias primas, existe una gran variedad y deben reunir las siguientes características: costo reducido, bajo nivel de contaminantes, alta velocidad de fermentación, gran rendimiento en ácido láctico, poca o ninguna formación de subproductos, posibilidad de ser fermentada con poco o ningún pretratamiento y disponibilidad durante todo el año. (Zhang & Zhao, 2023)

La efectividad del proceso biotecnológico de producción del ácido láctico puede ser medida como la concentración de ácido láctico producido, el rendimiento en ácido láctico basado en el sustrato consumido y como la velocidad de producción de ácido láctico. (Gänzle & Hertel, 2022)

Sin embargo, la producción de ácido láctico de estos sustratos agroindustriales requiere de los siguientes pasos: I) Hidrólisis del sustrato hasta azúcares fermentables; II) Fermentación de azúcares a ácido láctico; III) Separación de biomasa y partículas sólidas del medio de fermentación; IV) Purificación del ácido láctico obtenido. (Gänzle & Hertel, 2022)

**Tabla 7:** Algunos Sustratos diferentes a la Lactosa para la Producción de Ácido Láctico

Sustrato	Microorganismo	Suplemento	Condiciones de fermentación	Ácido Láctico	Rendimiento en producto y productividad volumétrica	Tipo de fermentación	Autor
Corazón de la mazorca de maíz (100 g)	<i>Lb. Pentoaceticum</i>	.	30°C / 2 Sem	13.8 g	0.13 g/g	Discontinuo	Fred y Paterson (1921)
Jugo de cáscara de cítricos	<i>Lb. delbrueckii</i> + <i>Lactobacillus de jugo de uva</i>	Autolisado de levadura malta	45°C / 144 h	0.711 g/L	-	Discontinuo	Kagan y Pilnik (1960)
Melazas	<i>Lb. Delbrueckii ATCC 9649</i>	Extracto de malta Sulfato de amonio	45-46°C / 300 rpm / 48 h	1.78 g/L	0.63 g/g	Discontinuo	Laverde y Muñoz (1990)
Lactosuero (50 g/L lactosa)	<i>Lactobacillus sp</i>	Extracto de levadura y minerales	35°C / pH 6.5 250rpm / 22 h	3.41 g/L	-	Discontinuo / Continuo	Zayed y Winter (1995)
Almidón de yuca, papa, trigo, arroz o maíz (10g/L)	<i>Lb. amylovurus ATCC 33620</i>	Extracto de levadura	40°C / 36 h	4.72 - 10.05 g/L	0.42 - 0.9 g/g	Discontinuo	Xiaodong (1997)
Hidrolizado de harina de trigo (182 g/L)	<i>Lc. Lactis ssp lactis ATCC 19435</i>	.	30°C / pH 6.0 / 48 h	86 g/L	2.9 g/Lh	-	Akerberg (1998)
Fibras de alfalfa 5 g	<i>Lb. Plantarum</i> / <i>Lb. Delbrueckii</i>	Con / sin adición de otros nutrientes	37-41°C / pH 5.5-6.0 130 rpm / 47 - 70.5 h	34 - 43.4 g/L	0.354 - 0.606 g/g	Discontinuo, sacarificación y fermentación simultánea	Srenath (2000)
Salvado de trigo / Tusa de trigo / paja de trigo / fibra de soya 5 g	<i>Lb. Delbrueckii</i>	Si adición de otros nutrientes	37-41°C / pH 5.5-6.0 130 rpm	22 - 38 g/L	-	Discontinuo	Srenath (2001)

Fuente: (Gänzle & Hertel, 2022)

### 2.1.7. Separación y Purificación del Ácido Láctico.

La separación, purificación y preconcentración del ácido láctico obtenido de los medios de fermentación es difícil debido a la alta afinidad del ácido por el agua y a su baja volatilidad. En la mayoría de los procesos, el ácido láctico es recuperado bajo la forma de lactato de calcio, y los tratamientos posteriores van a depender de la pureza deseada. (Gänzle & Hertel, 2022)

Se ha llevado a cabo una cantidad considerable de investigaciones para encontrar una técnica de separación atractiva para la recuperación de AL del caldo de fermentación. Aunque existen varios métodos para la recuperación de AL, como la precipitación, la destilación, la extracción por solvente, la adsorción y los procesos de separación por membrana (ósmosis inversa, electrodiálisis y ultrafiltración), etc., aún existen muchos inconvenientes para su aplicación industrial. Los inconvenientes incluyen altos costos de equipos, recuperación de solventes y alto consumo de energía. (Zhao & Lu, 2023)

La Tabla 8 compara los diversos métodos utilizados para la separación y recuperación de AL del caldo de fermentación.

**Tabla 8:** Ventajas y Desventajas de diversos métodos utilizados para la Separación y Recuperación de AL del Caldo Fermentado

PROCESO DE SEPARACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Precipitación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil aplicación en plantas industriales.</li> <li>- Operación simple.</li> <li>- Baja pureza del producto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto consumo de ácido sulfúrico.</li> <li>- Generación de yeso, que requiere eliminación en vertedero.</li> </ul>
Extracción Líquido-Líquido	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sin generación de yeso.</li> <li>- Reducción del riesgo de descomposición térmica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El extractante necesita ser regenerado por destilación.</li> <li>- La pureza del producto no es alta.</li> <li>- Los agentes de extracción convencionales muestran coeficientes de distribución muy desfavorables.</li> </ul>

Separación por Membranas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran flexibilidad en escala de producción.</li> <li>- Alta selectividad.</li> <li>- Altos niveles de purificación.</li> <li>- Posibilidad de integración con fermentadores convencionales, reduciendo el costo de inversión del equipo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto costo de membranas.</li> <li>- Ensuciamiento de la membrana.</li> <li>- Problemas de polarización.</li> <li>- Difícil de escala.</li> </ul>
Destilación Reactiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Integración de reacción y separación en el mismo aparato.</li> <li>- Altos niveles de purificación.</li> <li>- Menor consumo de energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El proceso es complejo.</li> <li>- Aplicado específicamente a reacciones químicas reversibles en la fase líquida.</li> <li>- Las aplicaciones se limitan a sistemas en los que las velocidades de reacción son bastante altas y no hay desajuste de temperaturas favorables para la reacción y la separación.</li> <li>- Problemas de corrosión y separación mediante el uso de un catalizador homogéneo.</li> </ul>

**Fuente:** (Zhao & Lu, 2023)

A continuación, se abordará de manera más específica cada uno de estos métodos de separación y/o purificación.

### **2.1.7.1. Métodos de Separación y/o Purificación.**

#### **2.1.7.1.1. *Precipitación.***

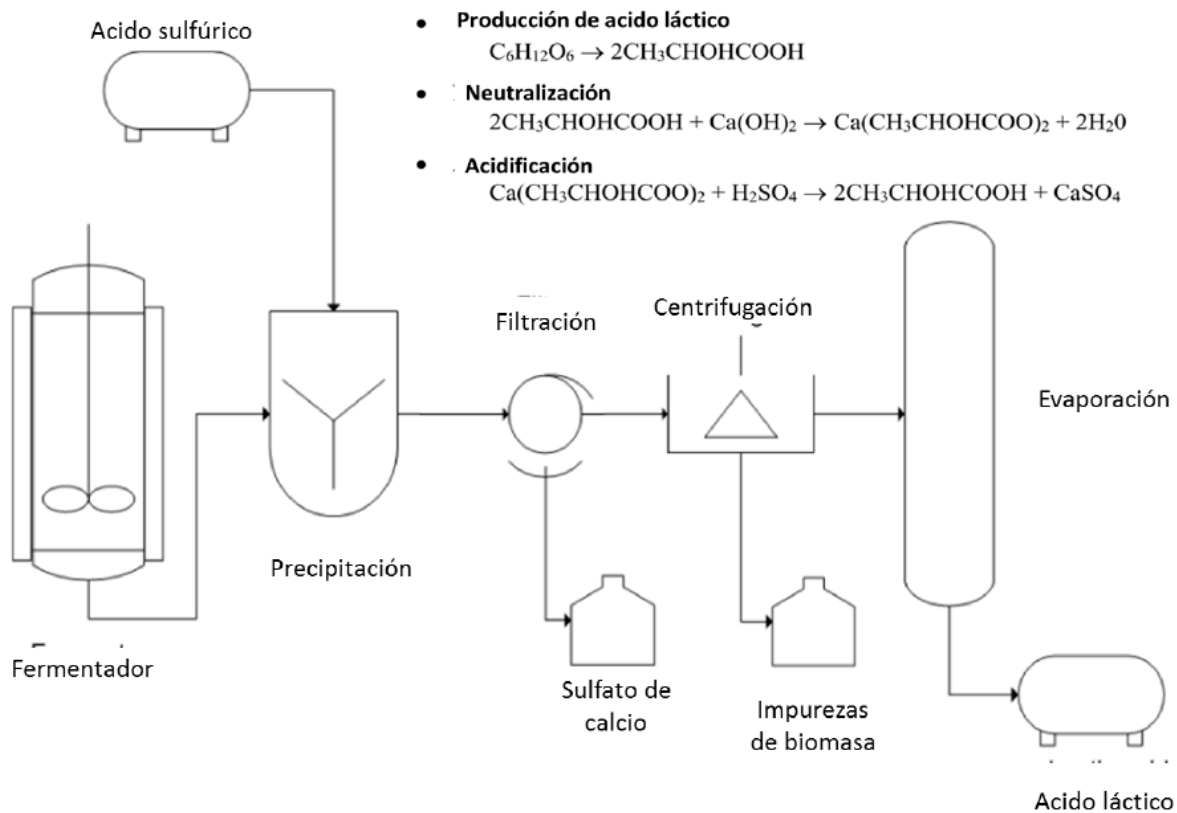
La separación por precipitación es la etapa de purificación primaria más convencional en la producción de AL por fermentación. En este método, se agrega exceso de carbonato de calcio o hidróxido de calcio al fermentador para neutralizar el ácido producido, manteniendo el pH alrededor de 5 a 6 y produciendo una sal de calcio del ácido, el lactato de calcio. (Oliveira et al., 2019)

La neutralización se realiza porque las altas concentraciones de AL y pH bajo tienen efectos inhibidores sobre el metabolismo celular a través de la forma altamente protonada de AL. (Zhao & Lu, 2023)

En el proceso, el caldo de fermentación se trata con ácido sulfúrico para precipitar sulfato de calcio el cual se filtra. El filtrado que contiene ácido orgánico libre se evapora para obtener LA puro.

Los pasos de las reacciones químicas involucradas y el diagrama general de proceso se muestran en la Diagrama 4.

**Diagrama 4:** Reacciones Químicas Involucradas y el Diagrama General de Proceso de la Separación Mediante Precipitación



**Fuente:** (Zhao & Lu, 2023)

El grado de pureza obtenido mediante este proceso es de 22% a 44%. Sin embargo, para aplicaciones de mayor valor agregado, se requieren LA con alta pureza y estabilidad térmica. Para productos de alta pureza, el LA de grado técnico se esterifica con metanol o etanol, y el éster se recupera por destilación, se hidroliza con agua, se evapora y el alcohol se recicla. (Oliveira et al., 2019)

La separación de LA por precipitación tiene varias desventajas. Existe un alto costo de reactivos, proceso de filtración y otros procesos de separación, especialmente cuando se requiere un producto de mayor pureza. Desde el punto de vista ambiental, se generan grandes cantidades de aguas residuales. (Zhao & Lu, 2023)

Los agentes neutralizantes pueden evitarse si se usan cepas tolerantes a los ácidos en la fermentación de LA. Las ventajas de estas cepas son que pueden crecer a pH bajo y utilizar fuentes de carbono abundantes y baratas, como la biomasa vegetal (Liaud, 2015).

#### ***2.1.7.1.2. Extracción con Solvente o Extracción Líquido - Líquido.***

La extracción con disolvente es el proceso en el que se eliminan uno o más solutos de una mezcla líquida transfiriendo el o los solutos a una segunda fase líquida inmiscible formada introduciendo un disolvente. Por lo tanto, la separación se basa en la diferencia en la solubilidad del soluto en las dos fases líquidas. (Seader et al., 2019)

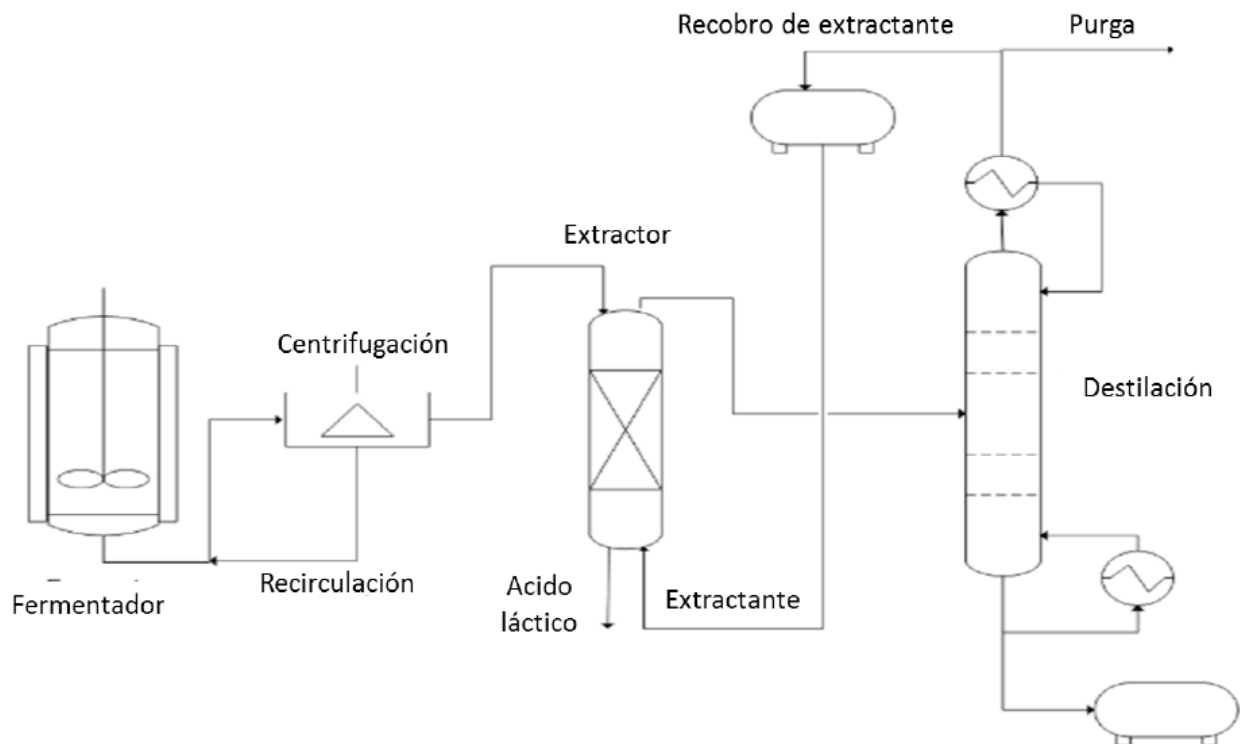
Otros factores importantes son los coeficientes de distribución (relación de la concentración de LA en fase de disolvente a fase acuosa), separación fácil de la fase líquida, selectividad del extractante y elección de extracción con disolvente. El solvente (o extractante) disuelve parcialmente ciertas especies de la alimentación líquida, efectuando al menos una separación parcial de los componentes de la alimentación. (Seader et al., 2019)

Las características para la elección del solvente incluyen: selectividad, químicamente estable, regenerable, baja corrosividad, baja toxicidad y baja viscosidad. Los diluyentes se usan cuando

los extractantes tienen una alta viscosidad. Además, mejoran el poder de extracción del solvente. (Seader et al., 2019)

La extracción líquido-líquido o la extracción con solvente se han propuesto como una alternativa al proceso de precipitación clásica. Un esquema más general se muestra a continuación en el Diagrama 5.

**Diagrama 5:** Diagrama del Proceso de Separación mediante Extracción Líquido-Líquido



**Fuente:** (Zhao & Lu, 2023)

La extracción del solvente requiere un área de intercambio alta para una separación eficiente, lo que resulta en altos costos de recuperación de equipo y solvente en los pasos de extracción. Además, la alta toxicidad del extractante para los microorganismos limita su aplicación a la fermentación extractiva in situ. (Seader et al., 2019)

En los últimos 30 años, muchos estudios han investigado en el área de productos de separación basados en la fermentación. A pesar de estos esfuerzos, la extracción líquido-líquido no se aplica generalmente en procesos industriales porque los agentes de extracción convencionales tienen coeficientes de distribución desfavorables para ácidos orgánicos y un extractante de baja toxicidad y alta extractabilidad es indispensable para un proceso eficiente. (Kurzrock, 2010)

Sin embargo, los estudios más recientes muestran que este tipo de extracción seguido de algún otro método de separación como por ejemplo la destilación reactiva muestran resultados muy favorables tanto para la recuperación de ácido láctico, así como para la recuperación del extractante.

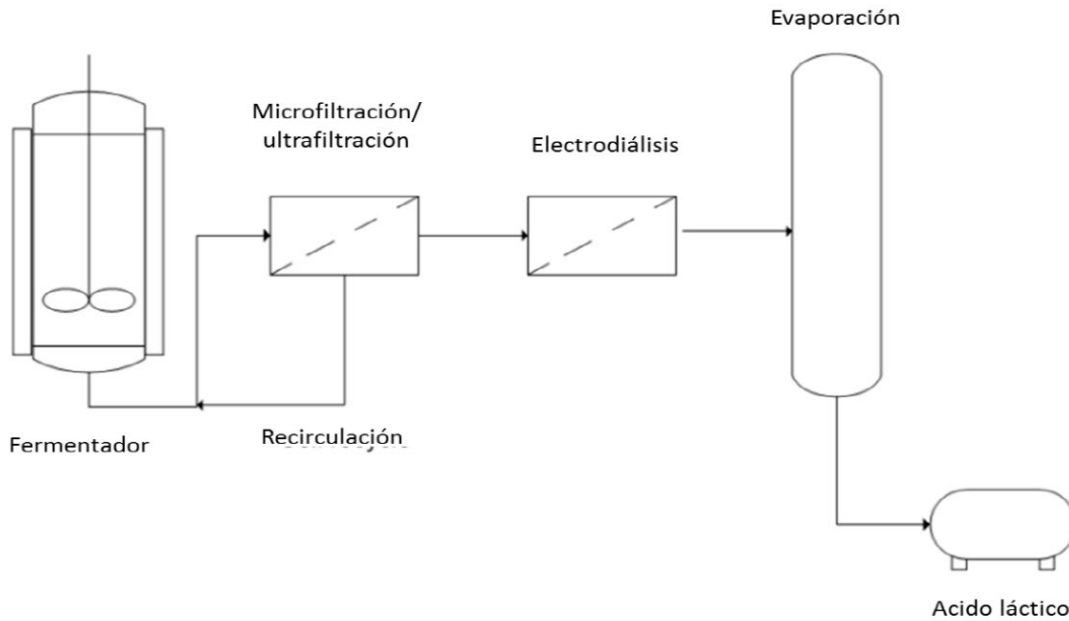
#### ***2.1.7.1.3. Separación con Membranas.***

Los procesos de separación de membranas se basan en la transferencia de solutos a través de una barrera física semipermeable que separa dos fases, restringiendo el transporte de componentes de una fase a otra. Los sectores de la industria química que usan membranas en sus procesos son muy diversos: biotecnología, tratamiento del agua, alimentos, productos farmacéuticos, etc. La ventaja de las membranas en estos casos se refiere a la especificidad y el bajo consumo de energía. (Zhao & Lu, 2023)

Desde 1960, los procesos de separación de membranas se han sugerido como una alternativa para la extracción de AL (Prado, 2010). Los avances en separación y purificación basados en membranas, particularmente microfiltración, ultrafiltración y tecnología de electrodiálisis, permitieron la creación de nuevos procesos de producción, que no producen un residuo de sal, en lugar del proceso de precipitación tradicional de LA. (Oliveira et al., 2019)

En el Diagrama 6 se muestra un diagrama esquemático general para la separación de LA por membranas.

**Diagrama 6:** Diagrama General de Proceso de la Separación mediante Membranas



**Fuente:** (Zhao & Lu, 2023)

La electrodiálisis es un método de separación que emplea membranas de intercambio catiónico y aniónico permeable selectivamente. Estas membranas están dispuestas alternativamente entre el cátodo y el ánodo; aplicando un potencial eléctrico entre los electrodos, los cationes migran al cátodo y los aniones al ánodo. Las membranas utilizadas en electrodiálisis son poliméricas, no porosas y tienen un espesor entre 10 y 500  $\mu\text{m}$ . (Gohil, 2021)

La electrodiálisis se aplica para eliminar sales de soluciones o para concentrar sustancias iónicas (Habövä, 2004). Un tipo especial de configuración es la electrodiálisis con membranas bipolares. Estas membranas pueden disociar la molécula de agua en protones ( $\text{H}^+$ ) e iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ). Las membranas pueden operar a aproximadamente el 80% de la eficiencia termodinámica teórica. (Oliveira et al., 2019)

Los procesos de separación de membranas ofrecen una gran flexibilidad en la escala de producción dependiendo de la demanda del mercado. Debido a su alta selectividad, las membranas pueden garantizar altos niveles de purificación y separación. Además, las

membranas se pueden integrar con fermentadores convencionales, lo que permite la producción y purificación simultáneas, eliminando la necesidad de unidades de separación adicionales y reduciendo el costo de inversión del equipo. (Gohil, 2021)

A pesar de sus ventajas, el alto costo de las membranas, la polarización y los problemas de ensuciamiento limitan el uso de los procesos de electrodiálisis a gran escala. Por lo tanto, se debe realizar más investigación para optimizar este proceso.

#### **2.1.7.1.4. Destilación Reactiva.**

La destilación reactiva es un proceso combinado, en el cual la reacción química y la destilación se llevan a cabo en una sola unidad de proceso. El desarrollo de la reacción con separación en una sola unidad de proceso, ofrece distintas ventajas sobre la configuración convencional, ya que reduce costos de capital y operación, además de aumentar la conversión de los reactantes y la selectividad. (Stankiewicz, 2021)

La destilación reactiva es un proceso en el cual ocurre simultáneamente la reacción química y la separación de productos. Esta es sin duda una de las tecnologías que más ventajas potenciales ofrece para la síntesis química en relación con los procesos convencionales, donde la reacción y la separación se llevan a cabo secuencialmente. (Stankiewicz, 2021)

Una de las principales ventajas de los procesos realizados por destilación reactiva es la eliminación de equipos para la recuperación de productos y para la recirculación de reactivos no convertidos, lo que lleva a la disminución en la inversión de capital y en costos de operación (Monterrubio, 2015).

Entre los procesos simultáneos reacción-separación la destilación reactiva es la tecnología que más ha sido investigada debido a las ventajas que ofrece, principalmente en las reacciones reversibles. Algunas ventajas que hasta el momento no han sido mencionadas, es la significativa reducción de catalizador para el mismo grado de conversión, los menores tiempos de residencia,

la conversión de los reactantes casi al 100% que junto con el aumento en la selectividad generan una alta productividad en esta tecnología (Monterrubio, 2015).

### **2.1.8. Usos Actuales y Aplicaciones del Ácido Láctico.**

El ácido láctico ha recibido una cantidad significativa de atención como un químico con muchas aplicaciones potenciales. Hay cuatro categorías principales para los usos actuales y aplicaciones de ácido láctico: alimentos, cosméticos, farmacéuticos, y aplicaciones químicas. (Tian et al., 2021)

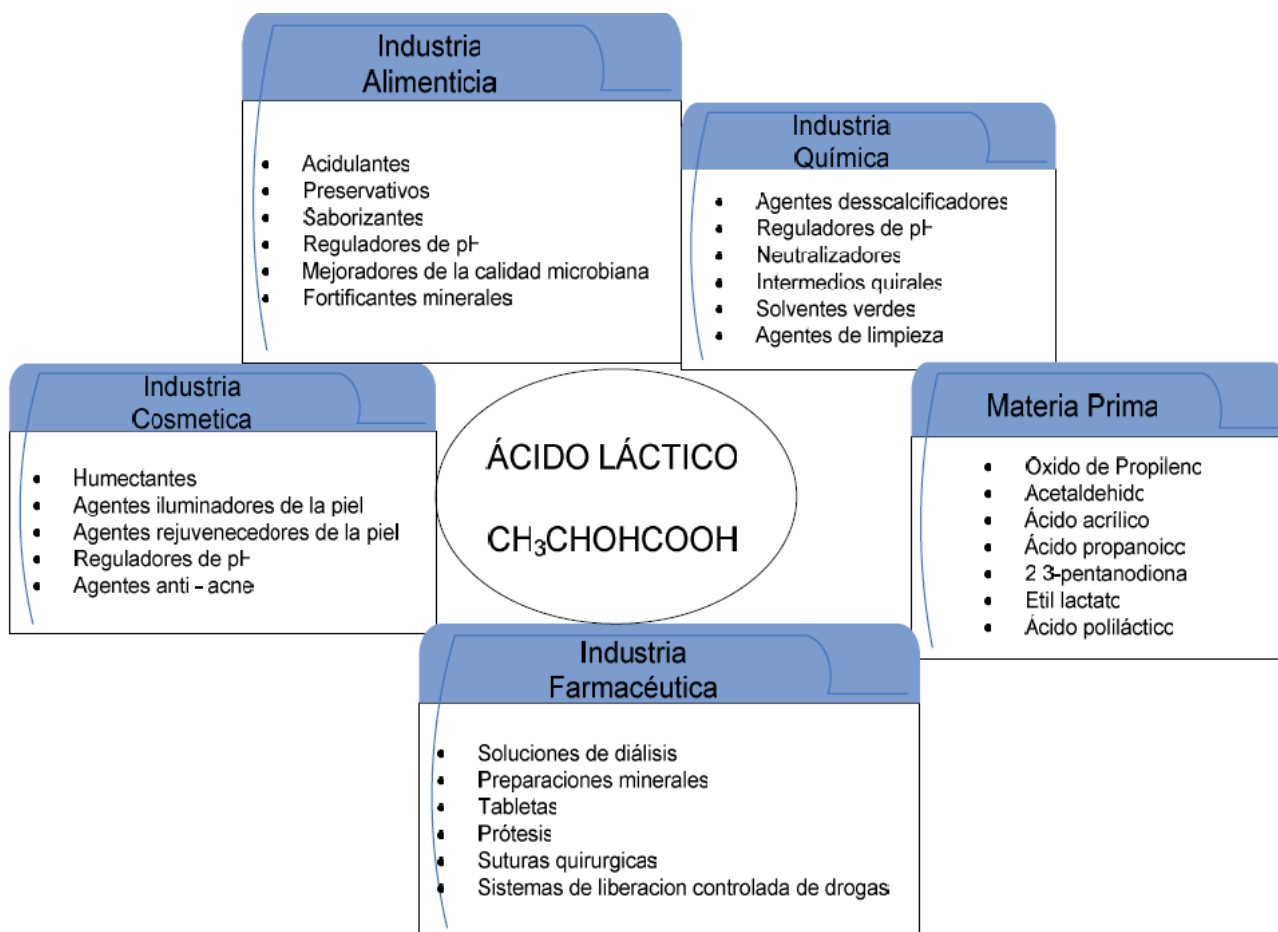
Las posibles aplicaciones del ácido láctico se ilustran en la Figura 5.

Desde que el ácido láctico se clasifica como GRAS para uso como aditivo alimentario por la FDA de los EE. UU. Es ampliamente utilizado en casi todos los segmentos de la industria alimentaria, donde sirve en una amplia gama de funciones, como aromatizantes, regulación del pH y fortificación mineral, sin embargo, el isómero D (-) del ácido láctico es a veces perjudicial para el metabolismo humano y puede provocar acidosis y descalcificación. (Oliveira et al., 2019)

Además, el ácido láctico se usa comercialmente en carne procesada y las industrias avícolas, para proporcionar productos con un aumento en la vida útil, sabor mejorado y mejor control de patógenos nacidos en estos alimentos

Debido al sabor ácido suave de ácido láctico, también se utiliza como un acidulante en ensaladas y aderezos, productos horneados, verduras encurtidas y bebidas. El ácido láctico se usa en confitería, no solo para sabor, sino también para llevar el pH de la mezcla cocida a el punto correcto. Las ventajas de agregar ácido láctico en la repostería incluyen su baja inversión, velocidad, facilidad de manejo y capacidad de producir dulces claros. Otra posible aplicación de ácido láctico en la industria alimentaria es la fortificación mineral de productos alimenticios. (Tian et al., 2021)

**Figura 5:** Diagrama de Usos y Aplicaciones Comerciales del Ácido Láctico



**Fuente:** (Tian et al., 2021)

El ácido láctico ofrece ingredientes naturales para aplicaciones cosméticas. Aunque se utilizan principalmente como humectantes y reguladores de pH, poseen muchas otras propiedades, como actividad antimicrobiana, aclaramiento de la piel e hidratación de la piel. El efecto hidratante se relaciona directamente con la capacidad de retención de agua del lactato, y la acción aclarante de la piel del ácido láctico se produce mediante la supresión de la formación de tirosinas. Dado que son ingredientes naturales del cuerpo humano, el ácido láctico y su sal se adaptan perfectamente a la tendencia moderna hacia formulaciones naturales y más seguras, y producen efectos tales como aclaramiento de la piel y rejuvenecimiento, lo que los hace muy útiles como ingredientes activos en cosméticos. (Tian et al., 2021)

El ácido láctico también se usa en la industria farmacéutica como un electrolito en muchas soluciones parenterales, soluciones que están destinadas a reponer los líquidos corporales o electrolitos. Entre los ejemplos se incluyen las soluciones de lactato de Ringer o Hartmann, la solución CAPD (diálisis peritoneal ambulatoria continua) y la solución de diálisis para las máquinas de riñón artificiales convencionales. Además, el ácido láctico se usa en una amplia variedad de preparaciones minerales, que incluyen tabletas, prótesis, suturas quirúrgicas y sistemas controlados de administración de fármacos. (Tian et al., 2021)

El ácido láctico y su sal se utilizan cada vez más en diversos tipos de productos y procesos químicos. En esta categoría de aplicaciones, el ácido láctico funciona como agente desincrustante, regulador de pH, neutralizador, intermedio quirál, disolvente, agente de limpieza, agente de liberación lenta de ácido, agentes complejantes de metal, agente antimicrobiano y humectante. El ácido láctico natural tiene un uso emergente como un solvente excelente y seguro, que es una alternativa en muchas aplicaciones de limpieza mecánica fina. Debido al alto poder de solubilidad y la solubilidad del ácido láctico, es un excelente eliminador de polímeros y resinas. Está disponible con una pureza isomérica superior al 98% y es adecuado como material de partida en la producción de herbicidas o productos farmacéuticos. (Tian et al., 2021)

Actualmente, el ácido láctico se considera el monómero de materia prima más potencial para las conversiones químicas, ya que contiene dos grupos funcionales reactivos, un grupo carboxílico y un grupo hidroxilo. El ácido láctico puede sufrir una variedad de conversiones químicas en productos químicos potencialmente útiles, como el óxido de propileno (a través de la hidrogenación), el acetaldehído (a través de la descarboxilación), el ácido acrílico (a través de la deshidratación), el ácido propanoico (mediante reducción), 2,3-pentanodiona (a través de la condensación) y dilactida a través de la autoesterificación. (Tian et al., 2021)

El ácido láctico ha recibido recientemente una gran atención como monómero de materia prima para la producción de PLA, que sirve como un plástico biodegradable. El ácido láctico ópticamente puro se puede polimerizar en un PLA de alta masa molecular a través de las

reacciones en serie de policondensación, despolimerización y polimerización de apertura de anillo. (Serna-Cock, 2020). El polímero resultante, PLA, tiene numerosos usos en una amplia gama de aplicaciones, como envasado de alimentos, bolsas de basura, contenedores rígidos, envoltura retráctil y bandejas de vida útil cortas. El reciente gran crecimiento del mercado de PLA estimulará las demandas futuras de ácido láctico considerablemente. (Tian et al., 2021)

Las especificaciones de calidad dependen del uso del ácido láctico al que es destinado, en la Tabla 9 se muestran las especificaciones del ácido láctico en la industria farmacéutica y en la industria de alimentos de USA basada en especificaciones de la FCC. (Gänzle & Hertel, 2022)

**Tabla 9:** Especificaciones de Calidad del Ácido Láctico

Parámetro	Grado farmacéutico	Grado FCC	Grado alimenticio
<b>Pureza (%)</b>	88	95-105	80
<b>Cloruros (%)</b>	0.008	0.2	0.02
<b>Sulfatos (mg/Kg)</b>	0.02	0.25	0.05
<b>Arsénico (mg/Kg)</b>	4	3	0.2
<b>Metales pesados (mg/Kg)</b>	33	10	10
<b>Hierro (mg/Kg)</b>	10	10	10
<b>Cenizas (%)</b>	0.1	0.1	0.1

**Fuente:** (Gänzle & Hertel, 2022)

### 2.1.9. Modelos de Simulación.

Un modelo es aquel que describe las relaciones entre las principales variables de estado y explica cuantitativamente el comportamiento de un sistema. El modelo puede proveer sugerencias para el análisis, diseño y operación de un fermentador. Los modelos de fermentación normalmente son divididos en dos clases: en modelos estructurados en donde las rutas metabólicas intracelulares son consideradas y modelos no estructurados, en donde la biomasa es descrita por una variable. Los modelos estructurados parecen ser complicados para el uso regular, mientras que los modelos no estructurados son mucho más fáciles de usar y han demostrado que tienen la capacidad de describir adecuadamente muchas fermentaciones. (Schenk & Schulz, 2021)

A continuación, se muestran algunos modelos que describen las cinéticas de crecimiento microbiano, producción de ácido láctico y consumo de glucosa (Méndez & Torres, 2023):

### 2.1.9.1. Crecimiento Microbiano (X).

Los modelos no estructurados más ampliamente usados para describir el crecimiento celular son el modelo cinético de Monod, la ecuación logística y el modelo de Haldane.

La ecuación logística es un modelo independiente del sustrato que puede describir la inhibición de crecimiento de la biomasa que se presenta en muchas fermentaciones batch. (Schenk & Schulz, 2021)

El modelo logístico se describe en la Ecuación 1.

**Ecuación 1:** Forma Diferencial del Modelo de Crecimiento Logístico

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m * X * \left(1 - \frac{X}{X_m}\right)$$

**Fuente:** (Schenk & Schulz, 2021)

La forma integrada de la Ecuación 1 usando  $X=X_0$  ( $t=0$ ) (Ecuación 2) da una variación de X como función de t, el cual puede representar tanto la fase exponencial como la fase estacionaria.

**Ecuación 2:** Forma Integrada de la Ecuación de Crecimiento Logístico

$$X = \frac{X_0 * X_m * e^{\mu_m * t}}{X_m - X_0 + X_0 * e^{\mu_m * t}}$$

**Fuente:** (Schenk & Schulz, 2021)

Donde:

- $X_m$ : Representa la concentración de biomasa (g/L) máxima obtenida durante la fermentación.
- $X_0$ : La concentración inicial de biomasa (g/L).
- $\mu_m$ : La velocidad específica máxima de crecimiento ( $h^{-1}$ ).

### 2.1.9.2. Formación de Producto (P).

La cinética de la formación de ácido láctico se basó en las ecuaciones de Luedeking-Piret. Este modelo fue originalmente desarrollado para la formación de ácido láctico por *Lactobacillus delbrucckii*. (Méndez & Torres, 2023)

De acuerdo con este modelo, la velocidad de formación de producto depende de la concentración de biomasa y de la velocidad de crecimiento  $dX/dt$ , de manera lineal (Ecuación 3).

**Ecuación 3:** Modo Diferencial de la Ecuación de Luedeking-Piret

$$\frac{dP}{dt} = \alpha * \frac{dX}{dt} + \beta * X$$

**Fuente:** (Schenk & Schulz, 2021)

Donde:

$\alpha$  (g/g) y  $\beta$  (g/g.h) representan las constantes de producción de ácido láctico asociada y no asociada al crecimiento respectivamente.

### 2.1.9.3. Consumo de Glucosa (S).

Una fuente de consumo de carbono como la glucosa es usada para formación de biomasa, de productos resultantes del metabolismo celular y para el mantenimiento de las células.

La Ecuación 4 muestra cómo se relacionan (Méndez & Torres, 2023):

**Ecuación 4:** Ecuación de Consumo de Glucosa

$$S = S_0 - \frac{X_0}{\mu} * \left[ \left( \frac{\mu_m}{Y_{xs}} + m_s \right) + \left( \frac{\mu + \beta}{Y_{xs}} \right) \right] * (e^{\mu * t} - 1)$$

**Fuente:** (Méndez & Torres, 2023)

Donde:

- $S_0$ : Representa la concentración inicial de sustrato (g/L).
- $Y_{xs}$ : El rendimiento real de sustrato en biomasa (g/g).
- $m_s$ : El coeficiente de mantenimiento (g/g.h).
- $\mu$ : Es la velocidad específica de crecimiento ( $h^{-1}$ ).

#### 2.1.10. Simulación del Proceso de Producción.

Para la simulación del proceso de producción de ácido láctico a partir de lactosuero, ácido láctico crudo, metanol y agua, se utilizó el simulador Aspen Hysys V.14.2

Este software es una herramienta avanzada para el modelado y simulación de procesos químicos e industriales, ampliamente utilizada en la industria y en investigaciones académicas. A continuación, se mencionan las principales características y capacidades del simulador Aspen Hysys, que fueron clave para el desarrollo y optimización del proceso simulado. (Haydary, 2019)

## 2.1.10.1. Simuladores Comerciales.

### 2.1.10.1.1. Tipos de Simuladores.

**Tabla 10:** Simuladores más Utilizados en la Actualidad

SIMULADORES	CONCEPTO
ASPEN HYSYS	Es un software para la simulación de plantas petroquímicas y afines
ASPEN PLUS	Es un simulador estacionario, secuencial modular es el más extendido en la industria
CHEMCAD	Este sistema es muy usado en todo el mundo, para el diseño, operación y mantenimiento de procesos químicos en una gran variedad de industrias
ProModel	Es un programa de simulación de procesos industriales, permite simular cualquier tipo de proceso de manufactura, además de procesos logísticos, procesos de manejos de materiales y contiene excelentes simulaciones de talleres, grúas viajeras, bandas de transporte y mucho más.

Fuente: Ramírez, 2014

### 2.1.10.1.2. Logos de los Diferentes Simuladores.



Fuente: Ramírez, 2014

### **2.1.10.3. Simulador Aspen Hysys.**

Aspen Hysys es una herramienta de modelado de procesos líder en el mercado para el diseño conceptual, la optimización y la supervisión del rendimiento para las industrias de productos químicos, polímeros, productos químicos especializados, metales, minerales y carbón.

Es utilizado por organizaciones químicas más importantes del mundo y de las industrias relacionadas con el diseño y perfeccionamiento de sus plantas de proceso, en el cual además de simulaciones de diagrama de flujo, se puede realizar estimación de propiedades de compuestos, análisis de sensibilidad de variables de proceso, determinar especificaciones de diseño de proceso, síntesis y análisis de procesos químicos, entre otras tareas del diseño de procesos y equipos. (Haydary, 2019)

#### ***2.1.10.3.1. Características Generales.***

- Cuenta con la mayor base de datos extensa propiedad en el mundo y se encarga de los procesos en fase sólida, líquida y gases.
- Es ampliamente utilizado para estudiar e investigar el efecto de diferentes parámetros de funcionamiento en diversas reacciones.
- Predice el comportamiento de proceso, utilizando relaciones de ingeniería tales como balances de masa y energía, fase y química de equilibrio y cinética de la reacción.
- Con propiedades físicas fiables, datos termodinámicos, las condiciones reales de funcionamiento y modelos de equipos rigurosos. (Haydary, 2019)

#### ***2.1.10.3.2. Ventajas y Desventajas.***

A continuación, se exponen las ventajas y desventajas del uso de simulación aspen hysys en diversos procesos. (Haydary, 2019)

**a) Ventajas:**

- Es un proceso relativamente eficiente y flexible.
- Tiene una extensa base de datos.
- El modelo de simulación Aspen Hysys se estructura y nos resuelve en general problemas trascendentes.
- Nos ayuda a examinar varias configuraciones de una planta.
- La simulación en Aspen Hysys permite estudiar los efectos interactivos de los componentes individuales o variables para determinar las más importantes.
- Dentro de la industria, el simulador Aspen Hysys es útil en investigación y desarrollo al agilizar los ensayos en laboratorios y en plantas piloto porque permite predecir resultados o rangos de trabajo óptimo lo cual ahorra mucho tiempo en la experimentación.
- Disminuye el tiempo de diseño de una planta. (Haydary, 2019)

**b) Desventajas:**

- Un buen modelo de simulación puede resultar bastante costoso, a menudo el proceso de desarrollar un modelo es largo y complicado.
- Siempre quedarán variables por fuera y esas variables pueden cambiar completamente los resultados en la vida real que la simulación no previó. (Haydary, 2019)

A pesar de las pocas desventajas que se han obtenido actualmente, el uso de estas herramientas para diversas industrias es favorable ya que se han obtenido resultados satisfactorios y adecuados para cada proceso.

## **2.2. MARCO CONTEXTUAL.**

### **2.2.1. Instituto de Tecnología de Alimentos ITA.**

El Instituto de Tecnología de Alimentos, ITA; es un laboratorio autorizado para la prestación de servicios con carácter oficial en Bolivia en los niveles: Nacional, Internacional y de Referencia.

### **2.2.2. Datos Históricos.**

El Instituto de Tecnología de Alimentos I.T.A., dependiente de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad de San Francisco Xavier de Chuquisaca, tiene varios años de funcionamiento realizando servicios externos, con auto sustentabilidad, de análisis microbiológico y bromatológico en alimentos, así como medio ambientales en aguas y suelos. La institución se asegura de una debida capacitación y asesoramiento a toda la sociedad, además de la formación académica de alumnos de pregrado, desde el 15 de julio de 1986. Dentro de lo que concierne el fortalecimiento institucional el I.T.A. ha estado trabajando en procesos de consolidación y cumplimiento de la planificación estratégica por medio de la Dirección Nacional, que es el ente encargado de gestionar el progreso de la institución, guiar las acciones del Instituto, prever el futuro y desarrollar los procedimientos y operaciones necesarias para alcanzar los objetivos propuestos. Como resultado del taller nacional de la Red Oficial de Análisis de Alimentos, RELOAA, el Instituto de Tecnología de Alimentos ha sido reconocido como Laboratorio oficial debido a que cuenta con un sistema integrado de gestión. (Instituto de Tecnología de Alimentos, 2024)

### **2.2.3. Misión.**

Ofrecer servicio de análisis de laboratorio, garantizando resultados confiables según normas vigentes.

Promover y desarrollar proyectos de investigación e innovación de tecnología de procesos y productos.

Brindar apoyo técnico y de capacitación para docentes, estudiantes, personas e instituciones vinculadas a procesos de desarrollo sostenible en el departamento de Chuquisaca y el resto del país. (Instituto de Tecnología de Alimentos, 2024)

#### **2.2.4. Visión.**

Consolidar al Instituto de Tecnología de Alimentos como un centro de excelencia nacional en la generación de conocimiento científico mediante la investigación, desarrollo de nuevas tecnología y productos innovadores y la prestación de servicios externos a la comunidad con resultados altamente confiables, fortaleciendo el emprendimiento regional y contribuyendo al desarrollo sostenible del país. (Instituto de Tecnología de Alimentos, 2024)

#### **2.2.5. Objetivos Institucionales.**

El Instituto de Tecnología de Alimentos está convencido que la proyección de la imagen institucional aunado a la difusión del trabajo desarrollado en las diferentes áreas constituye elementos claves para encarar la dinámica actual que conlleva cambios vertiginosos en los mercados que exigen mayores niveles de competitividad, innovación, transferencia de tecnologías y mejores niveles de servicio al cliente, para tal efecto, se ha propuesto los siguientes objetivos. (Instituto de Tecnología de Alimentos, 2024)

- Lograr mayor control de calidad interno.
- Asegurar resultados de ensayos confiables.
- Contar con recursos humanos competentes.
- Mejorar y ampliar los servicios de análisis ofertados en relación a las necesidades y expectativas de los clientes.

- Asegurar la mantención del Sistema de Gestión de Calidad y su certificación ISO 9001.
- Incrementar la cantidad de muestras recibidas.

#### **2.2.6. Objetivos Estratégicos.**

- Apoyar con servicios especializados al fortalecimiento y consolidación de encadenamientos productivos agroalimentarios, coadyuvar en la industrialización de productos alimenticios sanos e inocuos de alta calidad nutricional para consumo humano.
- Promover la protección del medio ambiente impulsando la implementación de sistemas eficientes en los procesos productivos y productos finales, generando ventajas competitivas para acceder a mercados potenciales.
- Impulsar procesos de enseñanza e investigación científica y académica contribuyendo con la formación de profesionales de recursos humanos.
- Prestar servicios de análisis en alimentos en general, agua potable, agua de riego, aguas residuales, suelo, bebidas alcohólicas, según Normas Bolivianas (NB) emitidas por el Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA). (Instituto de Tecnología de Alimentos, 2024)

El Instituto de Tecnología de Alimentos (ITA) cuenta con cuatro sectores muy importantes:

- Laboratorio de Microbiología
- Laboratorio de Química de los Alimentos y Nutrientes
- Laboratorio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- Área de Procesos, Investigación y Proyectos

### 2.2.7. Generalidades de la Unidad Receptora.

**Tabla 11:** Datos del Instituto Tecnológico de Alimentos

<b>Nombre</b>	<b>Instituto Tecnológico de Alimentos "ITA"</b>
<b>Logo</b>	
<b>Ubicación</b>	Zona Qhara Punku, Barrio Israel S/N, carretera al ex aeropuerto Juana Azurduy de Padilla
<b>Teléfonos</b>	(591) (4) 64-55174, 64-54698
<b>Fax</b>	(591) (4)64-62672
<b>Página web</b>	<a href="http://www.usfx.edu.bo/ita">www.usfx.edu.bo/ita</a>
<b>Dirección</b>	Chuquisaca, Municipio Sucre (Bolivia)

**Fuente:** (Instituto de Tecnología de Alimentos, 2024)

### 2.2.8. Ubicación.

**Figura 6:** Ubicación del ITA



**Fuente:** maps.google.com, 2024

**Figura 7:** Vista General del ITA



**Fuente:** (Instituto de Tecnología de Alimentos, 2024)

**Figura 8:** Vista Principal del ITA

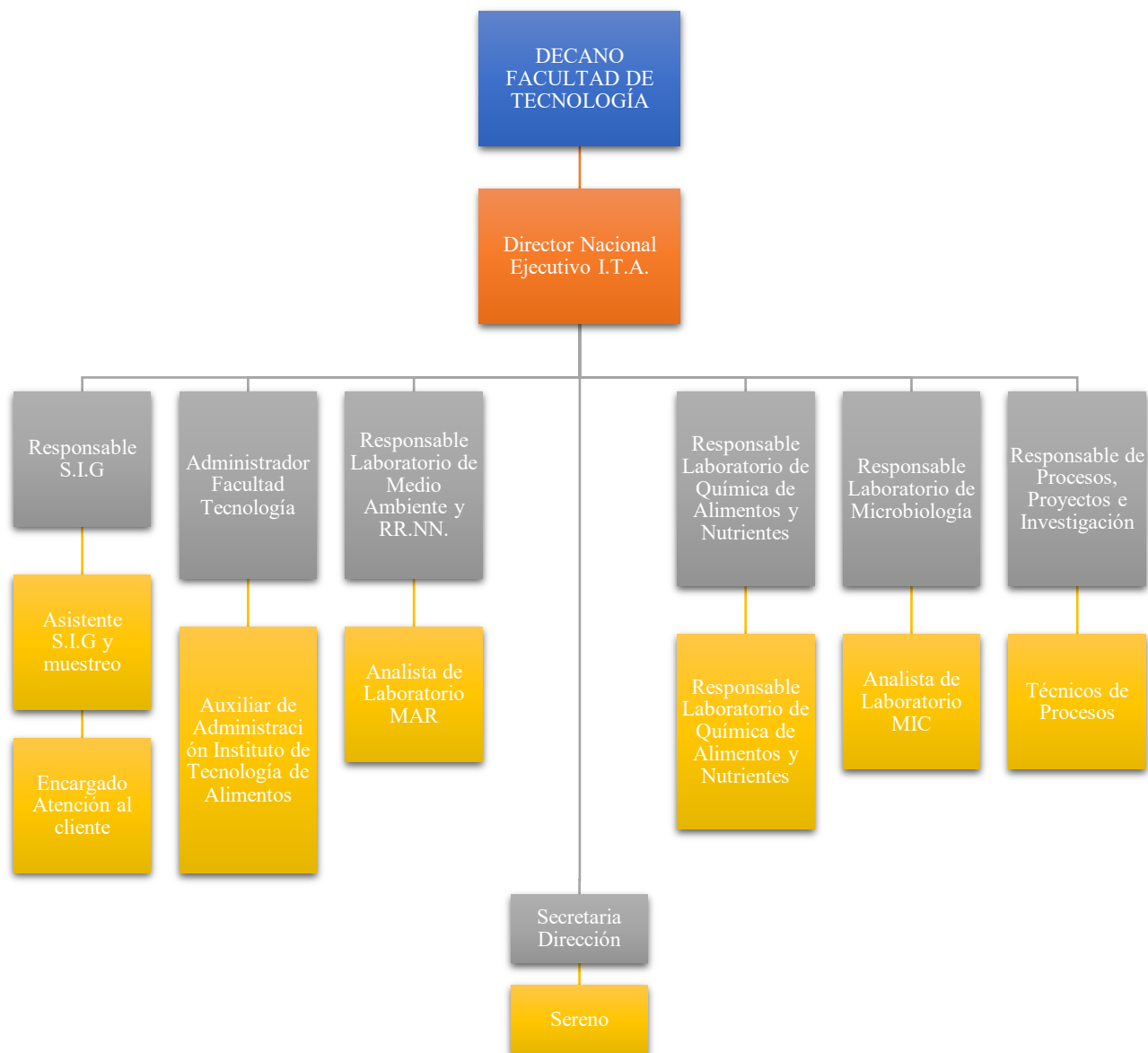


**Fuente:** (Instituto de Tecnología de Alimentos, 2024)

### 2.2.9. Organización General de la Unidad Receptora.

La estructura funcional del ITA se encuentra establecida de la siguiente manera:

**Figura 9:** Organización General del ITA



**Fuente:** (Instituto de Tecnología de Alimentos, 2024)

## **2.2.10. Identificación y Descripción del Departamento y/o Sección en que se realizó las Pruebas Experimentales.**

### **2.2.10.1. Área de laboratorio de Química de Alimentos, Nutrientes y Toxicología.**

#### **a) Servicio de Asistencia Técnica y Capacitación.**

Apoyo a la industrialización de productos alimenticios.

#### **b) Servicio de Desarrollo e Investigación Aplicada.**

- Desarrollo de nuevos productos.
- Conservación, mejoramiento nutritivo y almacenamiento de alimentos.

#### **c) Servicio Técnico Especializado.**

Control de calidad de materias primas, productos de exportación, de consumo interno e importado mediante análisis físico-químico, toxicológico y nutricional de:

- Carnes.
- Productos Cárnicos Derivados.
- Leche y Productos Lácteos.
- Bebidas Alcohólicas y No Alcohólicas.
- Cereales y Derivados de Cereales.
- Legumbres y Productos Vegetales.
- Productos Deshidratados.
- Grasas, Frutas y Derivados.
- Aditivos y Contaminantes.
- Concentrados para Animales.
- Otros tipos de alimentos.
- Se elabora la etiqueta nutricional para todo tipo de alimentos.

**Fuente:** (Instituto de Tecnología de Alimentos, 2024)

El laboratorio de Química de Alientos Nutrición y Toxicología cuenta con cuatro ambientes:

- Sala General.
- Balanzas.
- Calcinación.
- Toxicología.
- Almacén.

**Figura 10:** Laboratorio de Bromatología



**Fuente:** Elaboración Propia

#### **2.2.10.2. Análisis de Parámetros.**

En el área de laboratorio de alimentos los análisis que se realizan son:

- Humedad.
- Cenizas.
- Bromatos.
- Minerales.
- Grasas.

- Proteínas.
- Cloruros.
- Fosforo.
- Solidos solubles.
- Vitamina C.
- pH
- Solidos Totales
- Acidez como Ácido Láctico y Ácido Cítrico.
- Acidez como Ácido Oleico.
- Índice de Peróxidos.
- Índice de Rancidez.
- Densidad Relativa 20°C
- Ácido Clorhídrico 1:1
- Ácido Clorhídrico 1:4
- Cloruro de Lantano 0.3%
- Hidróxido de Sodio 45%
- Grado Alcohólico.
- Molibdato de Amonio.
- Hidroquinona.
- Sulfito de sodio.
- Acidez Total.
- Acidez Libre por Potenciometría.
- Acidez Titulable.
- Densidad relativa.

Esta área, al igual que las demás, se encarga de resolver las dudas del propietario sobre sus productos, específicamente si estos son aptos para el consumo, ya que se trata de alimentos destinados al consumo humano. (Instituto de Tecnología de Alimentos, 2024)

## CAPÍTULO III DESARROLLO

### 3.1. DEFINICIÓN DEL PRODUCTO ESPECÍFICO.

#### 3.1.1. Ácido Láctico.

El ácido láctico se ha usado como preservativo natural en productos alimenticios desde hace mucho tiempo. Actualmente, es usado en una amplia variedad de aplicaciones industriales especializadas. (Chen, 2019)

##### 3.1.1.1. Propiedades del Ácido Láctico.

La Tabla 12 muestra algunas de las propiedades del ácido láctico.

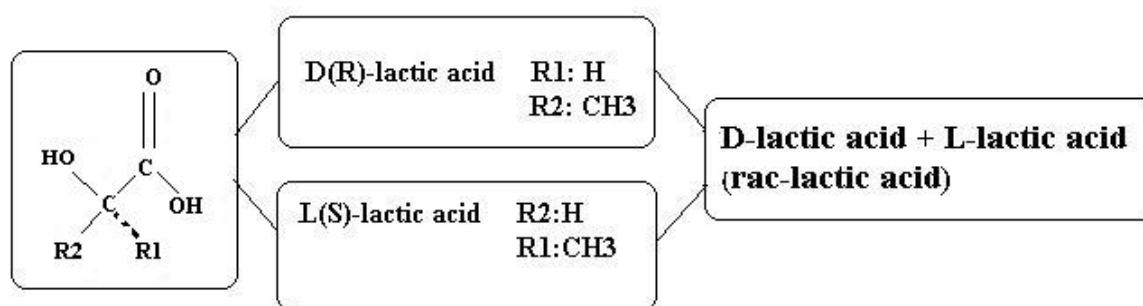
**Tabla 12:** Propiedades del Ácido Láctico

PROPIEDAD	CONCENTRACIÓN	TEMPERATURA / PRESIÓN	VALOR / CUALIDAD	UNIDADES
Estado Físico			Aceitoso	
Color			Incoloro	
Olor			Inodoro	
Valor pH	a 10 g/L H <sub>2</sub> O	(20°C)	2.8	
Viscosidad Dinámica		(20°C)	20-40	mPa*s
Punto de Fusión			18	°C
Punto de Ebullición		(20 hPa)	122	°C
Temperatura de Ignición			No Combustible	
Punto de Inflamación			No Inflamable	
Presión de Vapor		(25°C)	0.1	hPa
Densidad		(20°C)	1.21	g/cm <sup>3</sup>
Solubilidad en Agua		(20°C)	Fácilmente Soluble	

**Fuente:** (Chen, 2019)

El ácido láctico (ácido 2-hidroxipropanoico), es un compuesto incoloro de fórmula  $\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$ . Es una de las moléculas ópticamente activas más pequeñas de la naturaleza y se encuentra bajo dos formas: la dextrógira D(-) y levógira L(+), frecuentemente denominadas ácido D-láctico y ácido L-láctico (Figura 11). Es producido por animales, plantas y microorganismos en la naturaleza. También puede ser derivado a partir de intermedios con un origen en materiales renovables (por ejemplo, acetaldehído, etanol) o a partir de químicos derivados del carbón (Acetileno) o aceites (Etileno). (Abdel-Rahman & Sonomoto, 2022)

**Figura 11:** Estéreoformas del Ácido Láctico



**Fuente:** (Koohi, 2021)

Ya que niveles elevados del isómero D (-) son peligrosos para los humanos, el isómero L(+) es preferido (Cao, 2020). Aproximadamente el 90% del total del ácido láctico es producido a través de fermentación bacteriana y el resto sintéticamente por la hidrólisis de lactonitrilo (Figura 11). (Abdel-Rahman & Sonomoto, 2022)

Esta última siempre resulta en su mezcla racémica, lo cual es su mayor desventaja; mientras que la producción fermentativa puede originar ya sea uno de los isómeros, o la mezcla racémica, dependiendo en el microorganismo, sustrato y condiciones de cultivo usadas. La producción fermentativa ofrece las ventajas de utilización de carbohidratos renovables y de la producción del ácido L o D ópticamente puro. Las propiedades físicas de uno de los principales derivados del ácido láctico, el ácido poliláctico, dependen de la composición isomérica del monómero. (Abdel-Rahman & Sonomoto, 2022)

## **3.2. CARACTERIZACIÓN ESPECÍFICA DE LAS MATERIAS PRIMAS.**

### **3.2.1. Lactosuero.**

El lactosuero, también conocido como suero de leche, es el líquido que se separa de la cuajada durante el proceso de fabricación del queso. De acuerdo con la normativa internacional, como el Codex Alimentarius y legislaciones específicas de la Unión Europea, el lactosuero es definido como el subproducto obtenido después de la coagulación de la leche, ya sea por ácido o cuajo, seguido de la eliminación de la cuajada. Este líquido contiene proteínas solubles, lactosa, minerales y vitaminas.

La legislación europea, específicamente el Reglamento (CE) N.º 853/2004, que establece normas específicas de higiene para los alimentos de origen animal, regula el uso y procesamiento del lactosuero, asegurando que sea seguro para el consumo humano. Además, en diversas normativas internacionales, se estipula que el lactosuero puede ser utilizado en una variedad de productos alimentarios, desde suplementos proteicos hasta la formulación de alimentos infantiles. (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2004)

### **3.2.2. Ácido Láctico Crudo.**

El ácido láctico crudo es un compuesto orgánico que se produce mediante la fermentación de azúcares, como la glucosa, generalmente a partir de fuentes naturales como el maíz o la remolacha. Este ácido se encuentra en una forma impura antes de ser purificado para aplicaciones específicas. En su estado crudo, el ácido láctico contiene impurezas, residuos de microorganismos, y subproductos del proceso de fermentación. Es utilizado en diversas industrias, como la alimentaria, química y farmacéutica, para la producción de alimentos, polímeros biodegradables y cosméticos.

El ácido láctico crudo es regulado bajo normativas de seguridad alimentaria y de productos químicos, como el Reglamento (CE) N.º 231/2012 de la Unión Europea, que establece los

criterios de pureza para los aditivos alimentarios, incluidos los ácidos orgánicos como el ácido láctico. (Comisión Europea, 2012)

### **3.2.3. Metanol.**

El metanol, también conocido como alcohol metílico, es un alcohol simple con la fórmula química  $\text{CH}_3\text{OH}$ . Es un líquido incoloro, volátil y altamente inflamable, con un ligero olor característico. El metanol se utiliza ampliamente como disolvente, en la fabricación de productos químicos industriales, y como combustible. También es un componente clave en la producción de formaldehído, ácido acético y otros productos químicos importantes. Sin embargo, el metanol es tóxico si se ingiere, inhala o entra en contacto prolongado con la piel, pudiendo causar ceguera o la muerte.

El metanol es regulado internacionalmente por normativas de seguridad industrial y química. En la Unión Europea, por ejemplo, su manejo y almacenamiento están sujetos a la Regulación (UE) N.º 1272/2008 (Reglamento CLP) que regula la clasificación, etiquetado y envasado de sustancias químicas peligrosas. (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008)

### **3.2.4. Agua.**

El agua es una sustancia compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno ( $\text{H}_2\text{O}$ ), esencial para la vida. Se presenta en tres estados: líquido, sólido (hielo) y gaseoso (vapor). Es fundamental para los procesos biológicos y el funcionamiento de los ecosistemas, actuando como solvente universal debido a su capacidad para disolver una gran variedad de sustancias. Además, el agua regula la temperatura, transporta nutrientes y elimina desechos en los seres vivos.

El agua desempeña un papel crucial en la producción de ácido láctico, especialmente en procesos de fermentación. Se utiliza como medio para disolver sustratos y nutrientes, facilitando el crecimiento de microorganismos productores de ácido láctico. Además, el control de la calidad y pureza del agua es esencial para evitar contaminaciones que puedan afectar la eficiencia del proceso y la calidad del producto final. (Bai et al., 2023)

### 3.3. PROCESO DE ELABORACIÓN DEL PRODUCTO ESPECÍFICO.

La producción de ácido láctico puede realizarse mediante dos enfoques principales: síntesis química y fermentación microbiana.

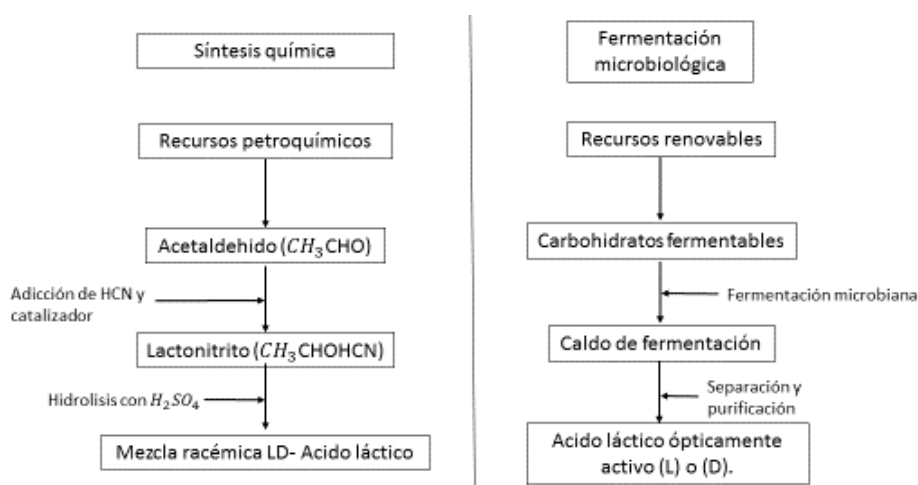
#### 3.3.1. Síntesis Química.

La síntesis química del ácido láctico generalmente implica la hidrólisis de lactonitrilo (nitrilo derivado del ácido láctico), que se produce a partir de acetaldehído y ácido cianhídrico. El proceso se desarrolla en varias etapas, y a menudo se utiliza en la industria debido a su alto rendimiento. (Ghaffar et al., 2024)

#### 3.3.2. Fermentación Microbiana.

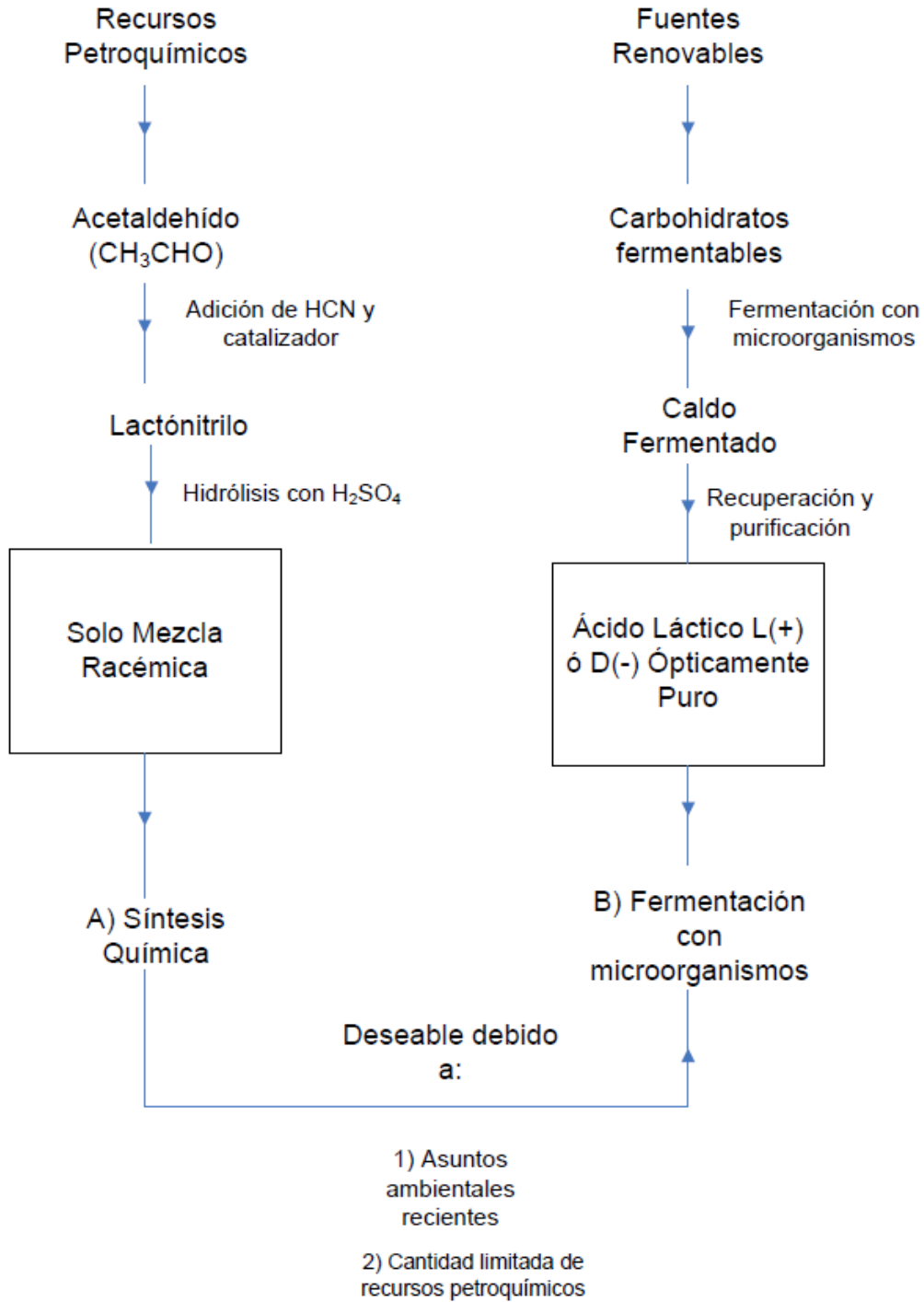
La fermentación microbiana es el método más utilizado actualmente para la producción de ácido láctico, especialmente para aplicaciones que requieren un producto de alta pureza, como alimentos, productos farmacéuticos y cosméticos. Este método utiliza microorganismos, principalmente bacterias ácido-lácticas (BAL) como *Lactobacillus*, para convertir azúcares (generalmente glucosa o lactosa) en ácido láctico bajo condiciones anaeróbicas. (Ghaffar et al., 2024)

**Diagrama 7:** Diferentes Vías de Producción de Ácido Láctico



**Fuente:** (Tian et al., 2021)

**Diagrama 8:** Métodos de Producción de Ácido Láctico. (a) Síntesis Química, (b) Fermentación Microbiana. (SSF) Sacarificación y Fermentación Simultánea



**Fuente:** (Tian et al., 2021)

### 3.3.3. Proceso de Producción Industrial de Ácido Láctico.

El proceso industrial de producción de ácido láctico a partir de ácido láctico crudo, metanol y agua implica varias etapas complejas para maximizar la eficiencia y la pureza del producto final (Gao et al., 2020):

#### 3.3.3.1. Producción de Ácido Láctico Crudo.

- **Materias Primas:** Se utilizan carbohidratos como almidón o glucosa. Bacterias como *Lactobacillus* o *Bacillus* fermentan estos azúcares en condiciones anaeróbicas, produciendo ácido láctico crudo con impurezas.
- **Parámetros:** pH, temperatura (30-45°C), nutrientes, y condiciones de fermentación controladas.

#### 3.3.3.2. Esterificación con Metanol.

- **Reacción:** El ácido láctico crudo se somete a una esterificación con metanol (en presencia de un catalizador ácido, como ácido sulfúrico) para producir lactato de metilo y agua.
- **Temperaturas:** Aproximadamente 50-100°C.
- **Propósito:** Convertir el ácido láctico en una forma esterificada, lo que facilita la separación de impurezas.

#### 3.3.3.3. Purificación del Lactato de Metilo:

- **Proceso:** El lactato de metilo se purifica mediante destilación fraccionada para eliminar el exceso de metanol, impurezas y subproductos, obteniendo lactato de alta pureza.

- **Destilación:** Utiliza columnas de destilación a diferentes presiones y temperaturas para separar compuestos.

#### 3.3.3.4. Hidrólisis del Lactato de Metilo.

- **Reacción química:** Lactato de metilo + Agua  $\rightarrow$  Ácido láctico + Metanol.
- **Condiciones:** Se lleva a cabo a temperaturas controladas (60-90°C) y en presencia de agua para regenerar el ácido láctico puro.
- **Recuperación de metanol:** El metanol que se recupera se recicla dentro del proceso, lo que optimiza los recursos.

#### 3.3.3.5. Refinamiento del Ácido Láctico.

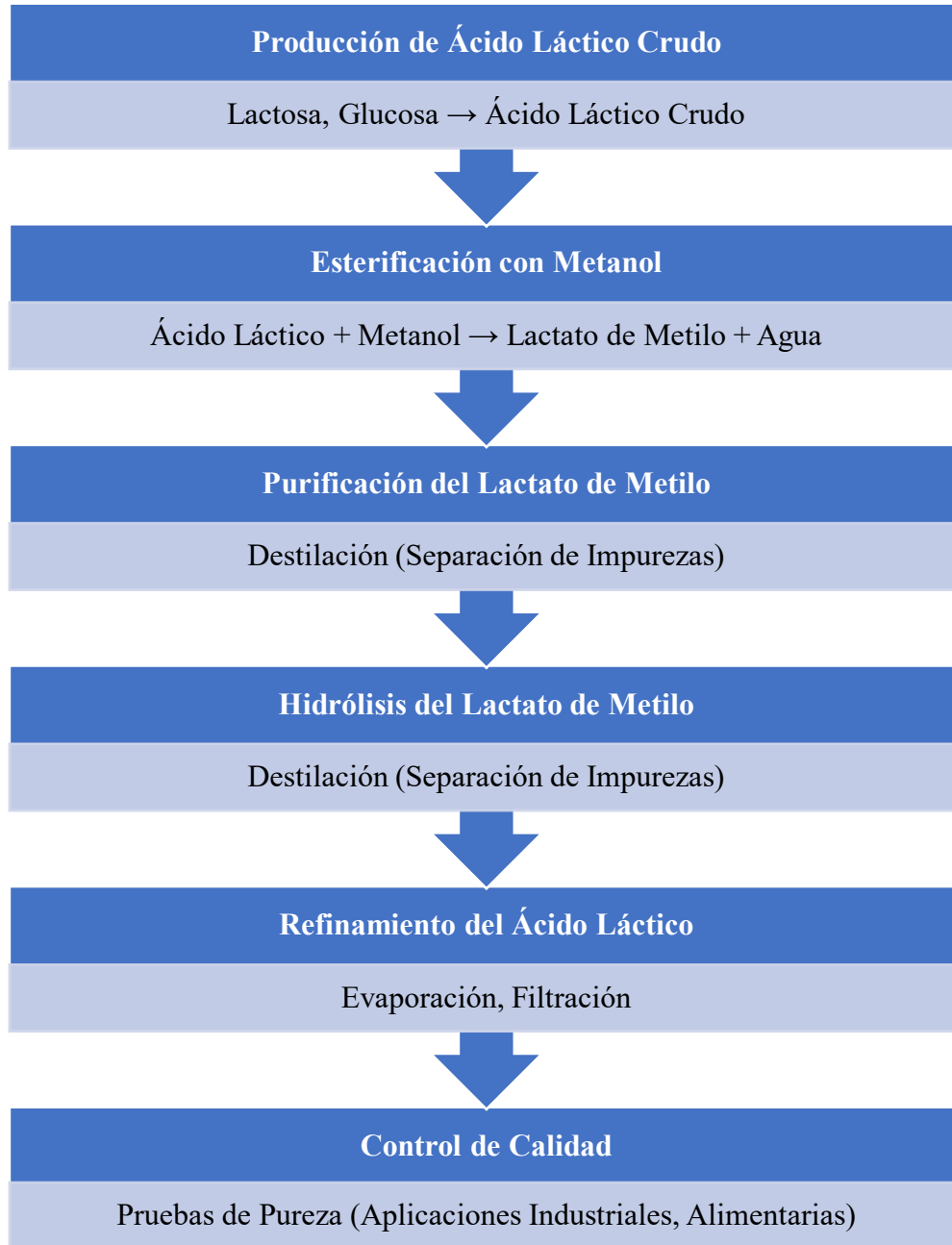
- **Descripción:** El ácido láctico obtenido después de la hidrólisis pasa por un proceso de refinamiento, que incluye pasos como cristalización, evaporación, filtración y cromatografía para obtener ácido láctico de alta pureza (99%).
- **Aplicaciones:** El ácido láctico purificado se utiliza en industrias como la alimentaria (como aditivo), farmacéutica (en formulaciones) y en la producción de biopolímeros como el PLA (ácido poliláctico).

#### 3.3.3.6. Control de Calidad.

- **Pruebas:** Se realizan controles de calidad para asegurar que el producto cumpla con las especificaciones de pureza y seguridad exigidas por las normativas internacionales. (Gao et al., 2020)

### 3.4. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO.

**Diagrama 9:** Proceso de Producción de Ácido Láctico



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.4.1 Descripción del Proceso por Etapas.

#### 3.4.1.1. Modelado del Biorreactor.

##### 3.4.1.1.1. Modelo Básico de Crecimiento Exponencial.

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m * X$$

Donde:

- $X(t)$ : Cantidad de biomasa o población en función del tiempo.
- $\mu_m$ : Tasa específica de crecimiento máximo (supuesto constante).
- $\frac{dX}{dt}$ : Tasa de cambio de la biomasa en función del tiempo.

#### Solución del Modelo de Crecimiento Exponencial.

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m * X$$

$$\frac{1}{X} dX = \mu_m dt$$

$$\int \frac{1}{X} dX = \int \mu_m dt$$

$$\ln(X) = \mu_m * t + C$$

$$X(t) = X_0 * e^{\mu_m * t}$$

La cantidad de biomasa en función del tiempo, describe un crecimiento exponencial, que es apropiado solo para las fases iniciales del crecimiento, cuando los recursos no son limitantes.

$$X(t) = X_0 * e^{\mu_m * t}$$

### **Consideración de las Limitaciones de Recursos.**

Para introducir este efecto en el modelo, agregamos un factor de corrección que reduce la tasa de crecimiento a medida que  $X$  se aproxima a  $X_m$

$$1 - \frac{X}{X_m}$$

Denominado factor de inhibición. A medida que  $X$  se aproxima a  $X_m$ , este termino tiende a 0, lo que reduce la tasa de crecimiento.

### **Incorporación del Factor de Inhibición.**

Al incorporar este factor de inhibición en el modelo exponencial de crecimiento, obtenemos la ecuación diferencial de crecimiento logístico:

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m * X * \left(1 - \frac{X}{X_m}\right)$$

#### **3.4.1.1.2. Modelo de Crecimiento Logístico.**

Esta es la ecuación diferencial logística y describe cómo el crecimiento de una población (o biomasa) es inicialmente exponencial, pero luego se desacelera a medida que se alcanzan los límites de recursos.

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m * X * \left(1 - \frac{X}{X_m}\right)$$

### Interpretación.

- Cuando  $X$  es pequeño en comparación con  $X_m$ , el crecimiento es aproximadamente exponencial.
- Cuando  $X$  es comparable a  $X_m$ , la tasa de crecimiento disminuye.
- Cuando  $X = X_m$ , el crecimiento se detiene por completo, porque el entorno ya no puede soportar más biomasa.

### Solución del Modelo de Crecimiento Logístico.

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m * X * \left(1 - \frac{X}{X_m}\right)$$

$$\frac{1}{X * \left(1 - \frac{X}{X_m}\right)} dX = \mu_m dt$$

$$\frac{1}{X * \left(1 - \frac{X}{X_m}\right)} = \frac{A}{X} + \frac{B}{\left(1 - \frac{X}{X_m}\right)}$$

$$1 = A(X_m - X) + BX$$

$$A = 1$$

$$B = \frac{1}{X_m}$$

$$\frac{1}{X * \left(1 - \frac{X}{X_m}\right)} = \frac{1}{X} + \frac{1}{X_m - X}$$

$$\frac{1}{X} + \frac{1}{X_m - X} dX = \mu_m dt$$

$$\int \frac{1}{X} dX + \int \frac{1}{X_m - X} dX = \int \mu_m dt$$

$$\ln|X| - \ln|X_m - X| = \mu_m t + C$$

$$\ln\left(\frac{X}{X_m - X}\right) = \mu_m t + C$$

$$\frac{X}{X_m - X} = e^{\mu_m t + C}$$

$$K = e^C$$

$$\frac{X}{X_m - X} = K * e^{\mu_m t}$$

$$X(t) = \frac{X_m * K * e^{\mu_m t}}{1 + K * e^{\mu_m t}}$$

$$X(0) = X_0$$

$$K = \frac{X_0}{X_m - X_0}$$

$$X = \frac{X_0 * X_m * e^{\mu_m t}}{X_m - X_0 + X_0 * e^{\mu_m t}}$$

### 3.4.1.1.3. Modelo de Crecimiento Logístico en su Forma Integrada.

$$X = \frac{X_0 * X_m * e^{\mu_m * t}}{X_m - X_0 + X_0 * e^{\mu_m * t}}$$

Donde:

- $X_m$ : Representa la concentración de biomasa (g/L) máxima obtenida durante la fermentación,
- $X_0$ : La concentración inicial de biomasa (g/L)
- $\mu_m$ : La velocidad específica máxima de crecimiento ( $h^{-1}$ ).

### 3.4.1.1.4. Modelo para la Formación de Producto.

$$\frac{dP}{dt} = \alpha * \frac{dX}{dt} + \beta * X$$

Donde:

- $\frac{dP}{dt}$ : Es la tasa de producción del producto  $P$ , es decir, el cambio en la concentración de producto con respecto al tiempo.
- $\frac{dX}{dt}$ : Es la tasa de crecimiento de la biomasa  $X$ , que puede ser descrita por diferentes modelos (exponencial, logístico, etc.).
- $X$ : Es la concentración de biomasa en un momento dado.
- $\alpha$ : Es el coeficiente de producción asociada al crecimiento, que describe cuánta cantidad de producto se genera por cada unidad de biomasa nueva formada.
- $\beta$ : Es el coeficiente de producción no asociada al crecimiento, que describe cuánta cantidad de producto se genera por la biomasa presente independientemente de si está creciendo o no.

## Ecuaciones de Crecimiento de la Biomasa.

Existen diferentes modelos para describir el crecimiento celular. Dos modelos comunes son el modelo exponencial y el modelo logístico.

### Modelo Exponencial.

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m * X$$
$$X(t) = X_0 * e^{\mu_m * t}$$

### Modelo Logístico.

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m * X * \left(1 - \frac{X}{X_m}\right)$$
$$X = \frac{X_0 * X_m * e^{\mu_m * t}}{X_m - X_0 + X_0 * e^{\mu_m * t}}$$

### Solución del Modelo con Crecimiento Exponencial.

$$\frac{dP}{dt} = \alpha * \frac{dX}{dt} + \beta * X$$
$$\frac{dX}{dt} = \mu_m * X$$

$$\frac{dP}{dt} = \alpha * \mu_m * X + \beta * X$$

$$\frac{dP}{dt} = X(\alpha * \mu_m + \beta)$$

$$X(t) = X_0 * e^{\mu_m * t}$$

$$\frac{dP}{dt} = X_0 * e^{\mu_m * t} (\alpha * \mu_m + \beta)$$

$$\int dP = \int X_0 * e^{\mu_m * t} (\alpha * \mu_m + \beta) dt$$

$$P(t) = X_0 * (\alpha * \mu_m + \beta) * \frac{e^{\mu_m * t}}{\mu_m} + C$$

$$t = 0$$

$$P(0) = P_0$$

$$P_0 = X_0 * (\alpha * \mu_m + \beta) * \frac{1}{\mu_m} + C$$

$$C = P_0 - X_0 * \frac{(\alpha * \mu_m + \beta)}{\mu_m}$$

$$P(t) = X_0 * (\alpha * \mu_m + \beta) * \frac{e^{\mu_m * t}}{\mu_m} + P_0 - X_0 * \frac{(\alpha * \mu_m + \beta)}{\mu_m}$$

$$P(t) = P_0 + X_0 * \frac{\alpha * \mu_m + \beta}{\mu_m} * (e^{\mu_m * t} - 1)$$

Esta es la solución general para un modelo de crecimiento exponencial.

### **Solución del Modelo con Crecimiento Logístico.**

$$\frac{dP}{dt} = \alpha * \frac{dX}{dt} + \beta * X$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m * X * \left(1 - \frac{X}{X_m}\right)$$

$$\frac{dP}{dt} = \alpha * \mu_m * X * \left(1 - \frac{X}{X_m}\right) + \beta * X$$

Esta ecuación es complicada de resolver de manera analítica debido a su no linealidad, el término  $X * \left(1 - \frac{X}{X_m}\right)$  introduce una dependencia cuadrática en  $X$ .

Por lo tanto, se utilizan métodos numéricos para encontrar una solución. A continuación, se menciona algunos de los métodos más adecuados, para resolver este tipo de ecuaciones diferenciales:

- MATLAB
- Runge-Kutta
- Euler explícito

#### **3.4.1.1.5. Modelo de Consumo de Sustrato (Glucosa).**

El modelo se basa en el balance de masa de sustrato, considerando que el sustrato se utiliza tanto para el crecimiento celular como para el mantenimiento celular.

El balance en un sistema biológico describe la relación entre la cantidad de sustrato (glucosa) consumida por los microorganismos y la tasa de crecimiento celular.

$$\frac{dS}{dt} = - \left( \frac{1}{Y_{xs}} * \frac{dX}{dt} + m_s * X \right)$$

#### **Modelo de Crecimiento de la Biomasa.**

En muchos modelos de cultivo celular o fermentación, el crecimiento de la biomasa sigue un modelo exponencial durante las primeras etapas del crecimiento:

$$\frac{dX}{dt} = \mu * X$$

$$X(t) = X_0 * e^{\mu * t}$$

**Solución del Modelo de Crecimiento en el Balance de Sustrato.**

$$\frac{dS}{dt} = -\left(\frac{1}{Y_{xs}} * \frac{dX}{dt} + m_s * X\right)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu * X$$

$$X(t) = X_0 * e^{\mu * t}$$

$$\frac{dS}{dt} = -\left(\frac{1}{Y_{xs}} * \mu * X + m_s * X_0 * e^{\mu * t}\right)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\left(\frac{1}{Y_{xs}} * \mu * X_0 * e^{\mu * t} + m_s * X_0 * e^{\mu * t}\right)$$

$$\frac{dS}{dt} = -X_0 * e^{\mu * t} \left(\frac{\mu}{Y_{xs}} + m_s\right)$$

$$\int dS = -X_0 * \left(\frac{\mu}{Y_{xs}} + m_s\right) \int e^{\mu * t} dt$$

$$S(t) = -X_0 * \left(\frac{\mu}{Y_{xs}} + m_s\right) * \frac{e^{\mu * t}}{\mu} + C$$

$$t = 0 ; S(0) = S_0$$

$$S_0 = -X_0 * \left(\frac{\mu}{Y_{xs}} + m_s\right) * \frac{1}{\mu} + C$$

$$C = S_0 + X_0 * \frac{1}{\mu} * \left(\frac{\mu}{Y_{xs}} + m_s\right)$$

$$S(t) = -X_0 * \left(\frac{\mu}{Y_{xs}} + m_s\right) * \frac{e^{\mu * t}}{\mu} + S_0 + X_0 * \frac{1}{\mu} * \left(\frac{\mu}{Y_{xs}} + m_s\right)$$

$$S(t) = S_0 - X_0 * \frac{1}{\mu} * \left(\frac{\mu}{Y_{xs}} + m_s\right) * (e^{\mu * t} - 1)$$

## Incorporación de la Producción No Asociada al Crecimiento.

El término  $\beta$  refleja la producción no asociada al crecimiento. Este se incorpora para modelar situaciones donde el consumo de sustrato está parcialmente desacoplado del crecimiento celular. Por lo tanto, la ecuación completa para el consumo de glucosa durante el crecimiento exponencial de la biomasa y con producción no asociada al crecimiento es:

$$S = S_0 - \frac{X_0}{\mu} * \left[ \left( \frac{\mu_m}{Y_{xs}} + m_s \right) + \left( \frac{\mu + \beta}{Y_{xs}} \right) \right] * (e^{\mu * t} - 1)$$

### 3.4.1.2. Modelado del Biorreactor en MATLAB.

#### 3.4.1.2.1. Código en MATLAB para el Crecimiento Logístico.

```
% Codigo MATLAB para el Crecimiento Logistico

% Definir Parámetros
Xo = 0.35;      % Valor Inicial de X
Xm = 4.3;      % Capacidad Máxima
mum = 0.355;   % Tasa de Crecimiento Máximo Específico
t_initial = 0; % Tiempo Inicial
t_final = 50;  % Tiempo Final
t_step = 0.1;  % Paso de Tiempo

% Crear un Vector de Tiempo
t = t_initial:t_step:t_final;

% Definir la Ecuación de Crecimiento Logístico
X = (Xo * Xm * exp(mum * t)) ./ (Xm - Xo + Xo * exp(mum * t));

% Graficar el Resultado
figure;
plot(t, X, 'LineWidth', 2);
xlabel('Tiempo (h)');
ylabel('Concentración (g/L)');
title('Crecimiento Logístico');
grid on;
```

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.4.1.2.2. Código de MATLAB para la Formación de Producto.

```
% Código MATLAB para la Formación de Producto

% Definir Parámetros
Xo = 0.35;          % Valor Inicial de Biomasa X
Xm = 4.3;          % Capacidad Máxima de Biomasa
mum = 0.355;       % Tasa de Crecimiento Máximo Específico
alpha = 12.57;     % Coeficiente Alfa de la Ecuación de Producto
beta = 0.525;      % Coeficiente Beta de la Ecuación de Producto
P0 = 0;           % Valor Inicial de Producto

% Definir el Lapso de Tiempo
t_initial = 0;    % Tiempo Inicial
t_final = 50;    % Tiempo Final
t_step = 0.1;    % Paso de Tiempo
t = t_initial:t_step:t_final; % Vector de Tiempo

% Definir la Ecuación de Crecimiento Logístico para la Biomasa X
X = (Xo * Xm * exp(mum * t)) ./ (Xm - Xo + Xo * exp(mum * t));

% Calcular la Tasa de Cambio de Biomasa dX/dt
dXd_t = (mum * X .* (1 - X ./ Xm));

% Calcular la Tasa de Formación de Producto dP/dt utilizando la Ecuación
Proporcionada
dPd_t = alpha * dXd_t + beta * X;

% Integrar para encontrar la Formación Total de Producto P(t)
P = cumtrapz(t, dPd_t); % Integración de dP/dt para obtener P(t)

% Graficar los Resultados
figure;
subplot(2,1,1);
plot(t, X, 'LineWidth', 2);
xlabel('Tiempo');
ylabel('Biomasa X(t)');
title('Crecimiento Logístico de la Biomasa');
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(t, P, 'LineWidth', 2, 'Color', 'r');
xlabel('Tiempo');
ylabel('Producto P(t)');
title('Formación de Producto');
grid on;
```

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.4.1.2.3. Código de MATLAB para el Consumo de Sustrato.

```
% Parámetros
S0 = 97.82;          % Concentración Inicial de Sustrato (g/L)
X0 = 0.35;          % Concentración Inicial de Biomasa (g/L)
mumax = 0.355;      % Tasa Máxima de Crecimiento Específico (1/h)
Ks = 0.1775;        % Constante de Saturación del Sustrato (g/L)
Yxs = 0.0654;       % Rendimiento Biomasa/Sustrato (g/g)
ms = 4.03;          % Coeficiente de Mantenimiento
beta = 0.525;       % Coeficiente de Subproductos
t_final = 5;        % Tiempo Final de Simulación (horas)
t_step = 0.1;       % Paso de Tiempo para la Simulación (horas)

% Vector de Tiempo
t = 0:t_step:t_final;

% Inicialización de Variables
S = zeros(size(t)); % Concentración de Sustrato en el Tiempo
S(1) = S0;          % Concentración Inicial de Sustrato
mu = zeros(size(t)); % Tasa de Crecimiento en el Tiempo
X = X0;             % Biomasa Inicial

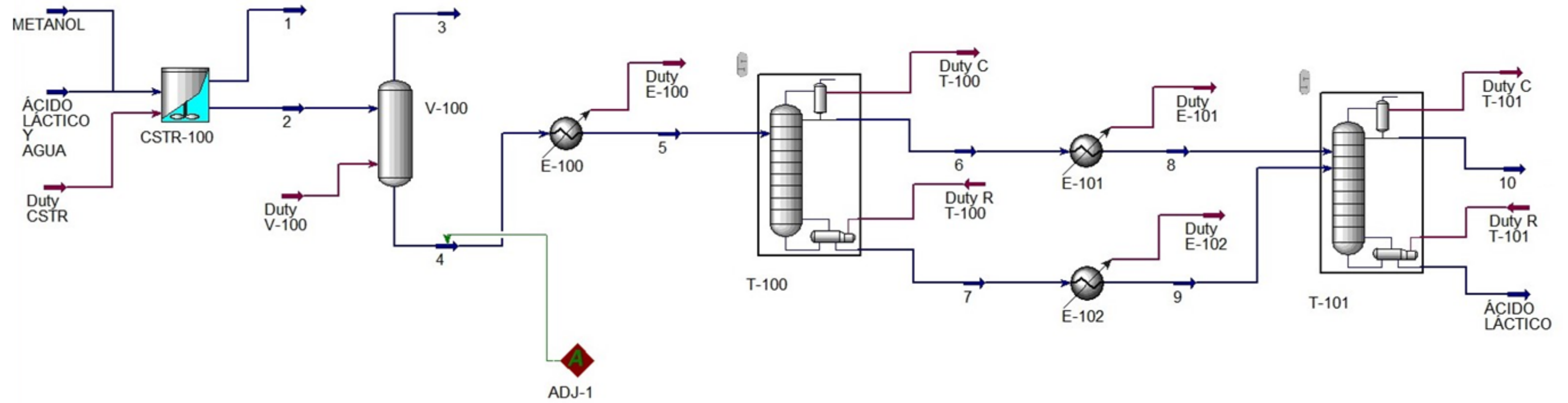
% Bucle de Simulación
for i = 2:length(t)
    % Ecuación de Monod para la Tasa de Crecimiento
    mu(i) = mumax * S(i-1) / (Ks + S(i-1));

    % Ecuación de Consumo de Sustrato
    term1 = (X0 / mu(i)) * (((mumax / Yxs) + ms) + ((mu(i) + beta) / Yxs)) ;
    term2 = (exp(mu(i) * t(i)) - 1);
    S(i) = S0 - term1 * term2; % Actualizar Concentración de Sustrato
end

% Gráfica de Resultados
figure;
plot(t, S, 'LineWidth', 2);
xlabel('Tiempo (h)');
ylabel('Concentración de Sustrato (g/L)');
title('Consumo de Sustrato en Función del Tiempo');
grid on;
```

**Fuente:** Elaboración propia

**Diagrama 10:** SIMULACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ÁCIDO LÁCTICO - ASPEN HYSYS V 14.2



**Fuente:** (Elaboración propia, Aspen HYSYS V. 14.2)

**Tabla 13: BALANCE DE MATERIA DE LAS CORRIENTES**

PARÁMETRO	METANOL	ÁCIDO LÁCTICO Y AGUA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ÁCIDO LÁCTICO
TEMPERATURA (°C)	70	70	70	70	153,41	153,41	60	100,04	244,66	55	60	75,725	235,78
PRESIÓN (atm)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FLUJO MÁSSICO (kg/h)	23,021	65,047	0	82,068	31,521	53,547	51,547	7,4832	40,063	7,4832	39,063	10,663	29,883
FLUJO MOLAR (kmol/h)	0,5	1	0	1,5	0,92675	0,80325	0,75325	0,42668	0,29657	0,41668	0,32657	0,34668	0,31657
FRACCIÓN MOLAR-AGUA	0	0,5	0,557	0,79	0,4	0,5	0,9181	0,9381	0,003	0,9901	0,001	0,001	0,0091
FRACCIÓN MOLAR-ÁCIDO LÁCTICO	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,99
FRACCIÓN MOLAR- LACTATO DE METILO	0	0	0,223	0,21	0,4	0,5	0,002	0,002	0,9891	0,002	0,0081	0,0093	0,0006
FRACCIÓN MOLAR- METANOL	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9797	0,9897	0

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 14:** BALANCE DE ENERGÍA Y UTILITIES

EQUIPO	UTILITY	ENERGIA (Kj/h)	ENERGIA (MJ/ton)	PRESIÓN (atm)	TENIRADA (°C)	TSAIDA (°C)	Cp (kJ/kmol°C)	$\Delta H_{vap}$ (kJ/kmol)	Flujo (kg/h)	Flujo total (Kg/año)	Costo unitario (US\$/ton)	Costo total (US\$/año)
<b>CSIR-100</b>	Lps	4890	153,3396	11,2	186,02	186,02	79,889	36231	2,429411	19240,38	16,4	315,5514
<b>V-100</b>	Lps	41700	1307,993	1	30	45	79,889		2,972203	163467,6	16,4	2691,546
<b>E-100</b>	cw	6730	211,0379	1	30	45	79,889		101,0903	800634,9	0,0148	11,8494
<b>T-100</b>	cw	43500	1364,064	1	30	45	79,889		653,4066	5174980	0,0148	76,58971
<b>T-100</b>	Lps	52400	1642,208	11,2	186,02	186,02	79,889	36231	26	206000	16,4	3379,433
<b>E-101</b>	Cw	1360	42,48981	1	30	45	79,889		20,32405	161176	0,0148	2,385725
<b>E-102</b>	cw	7510	235,5597	1	30	45	79,889		112,8366	893665,6	0,0148	13,22625
<b>T-101</b>	cw	20300	635,3089	1	30	45	79,889		304,3222	2410232	0,0148	35,67144
<b>T-101</b>	lps	27100	848,8554	11,2	186,02	186,02	79,889	36231	13,4	107000	16,4	1746,826

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.1.3. Caracterización de Equipos.

#### 3.4.1.3.1. Consideraciones utilizadas por Aspen Hysys.

El simulador de procesos químicos Hysys es una herramienta de gran utilidad para los ingenieros químicos, mediante el cual se puede realizar desde una simple evaluación de propiedades de la mezcla hasta la simulación completa de una planta de procesos. (Haydary, 2019)

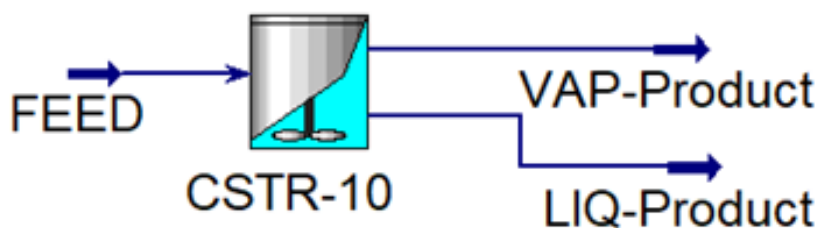
#### 3.4.1.3.2. Entorno de Simulación.

Los principales módulos y propiedades que conforman el modelo de la planta de del presente trabajo son:

#### 3.4.1.3.3. Reactor CSTR.

El reactor CSTR, considera que la mezcla esté perfectamente mezclada, y las concentraciones la misma en cada uno de sus puntos, por lo tanto, calcula, las condiciones de las corrientes de salida del reactor. (Aspen Hysys V. 14.2, 2024)

**Figura 12:** Reactor CSTR



**Fuente:** Aspen Hysys V. 14.2

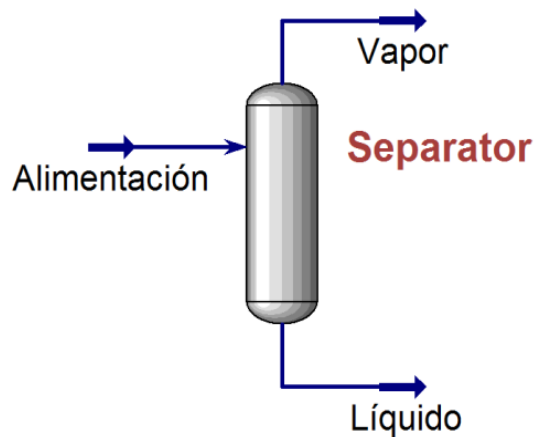
Las condiciones que se deben especificar son:

- El volumen del reactor.
- El Nivel de líquido.
- La Temperatura de salida de productos o calor transferido.
- La Presión de salida de los productos o la caída de presión en su interior.
- La estequiometría de las reacciones.
- Los parámetros de la velocidad de reacción de cada reacción. (Haydary, 2019)

#### 3.4.1.3.4. *Separador Flash (Separator).*

Los separadores son básicamente tanques donde la separación de las fases ocurre a la menor presión de alimentación menos una caída de presión a través del equipo. (Aspen Hysys V. 14.2, 2024)

**Figura 13:** Separador Flash (Separator)

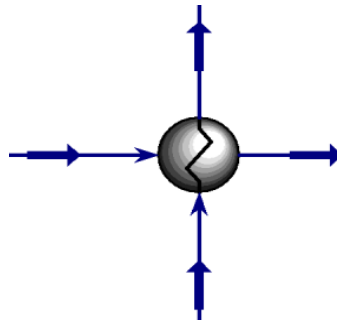


**Fuente:** Aspen Hysys V. 14.2

### 3.4.1.3.5. *Enfriadores y Calentadores (Cooler / Heater).*

Los módulos COOLER /HEATER son intercambiadores de calor de un solo lado. La corriente de entrada es enfriada (o calentada) hasta las condiciones de salida requeridas y la corriente de energía proporciona la diferencia de entalpía entre las dos corrientes. (Aspen Hysys V. 14.2, 2024)

**Figura 14:** Enfriadores y Calentadores (Cooler / Heater)



**Fuente:** Aspen Hysys V. 14.2

Los módulos COOLER y HEATER usan las mismas ecuaciones básicas; la diferencia fundamental es el signo convencional para el flujo de energía. (Haydary, 2019)

### 3.4.1.3.6. *Bloque de Ajuste (Adjuster).*

El bloque Adjuster en Hysys se utiliza para encontrar el valor de una variable manipulada (entrada) que hace que otra variable (objetivo) alcance un valor específico. Por ejemplo, podrías ajustar el flujo de una corriente para alcanzar una concentración específica en un producto. (Aspen Hysys V. 14.2, 2024)

**Figura 15:** Bloque de Ajuste (Adjuster)



ADJ-1

**Fuente:** Aspen Hysys V. 14.2

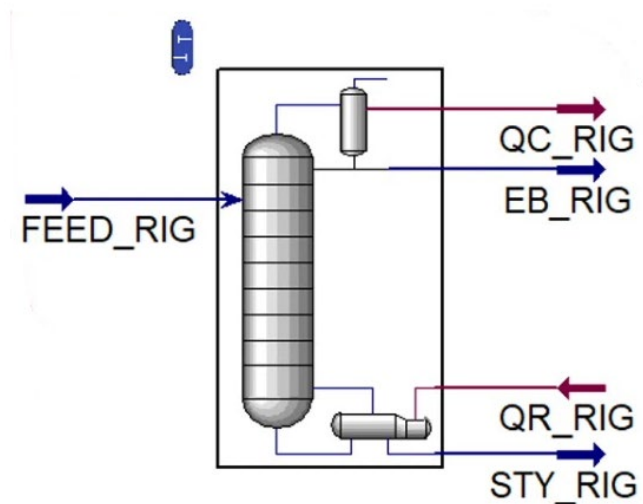
### Especificaciones típicas:

- **Variable Manipulada (Input/Adjusted):** Es la variable que el ajuste modificará para cumplir con el objetivo. Puede ser el flujo másico o volumétrico, la composición, la temperatura, o la presión de una corriente o equipo.
- **Variable Objetivo (Target):** Es la variable en la que se busca alcanzar un valor deseado. Puede ser la concentración de un componente, la entalpía, o cualquier otra propiedad de las corrientes o equipos. (Haydary, 2019)

#### 3.4.1.3.7. Columna de Destilación.

La columna de Destilación básica tiene una entrada y dos o tres flujos de salida, dependiendo de la configuración del condensador. Cuando se usa solo, la columna destilación tiene tres o cuatro flujos de límites, pero requiere cuatro o cinco especificaciones de flujo de presión. (Aspen Hysys V. 14.2, 2024)

**Figura 16:** Columna de Destilación



**Fuente:** Aspen Hysys V. 14.2

#### ***3.4.1.3.7.1. Parámetros Básicos de Columna.***

##### **Presión.**

El perfil de presión en una sección de bandeja de columna se calcula utilizando sus especificaciones. Puede ingresar explícitamente todas las presiones de etapa o ingresar las presiones de bandeja superior e inferior, de forma que HYSYS pueda interpolar entre los valores especificados para determinar el perfil de presión. (Haydary, 2019)

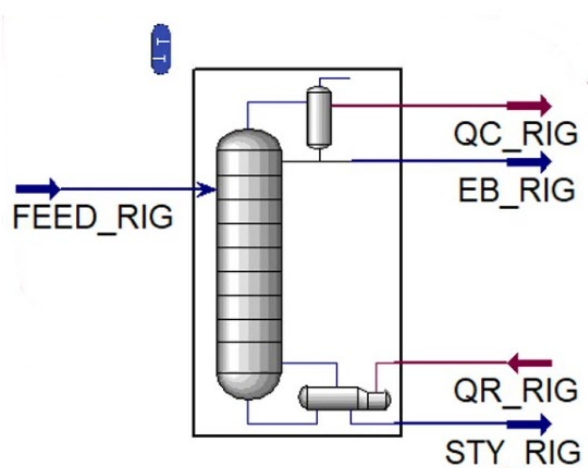
##### **Cantidad de etapas.**

El número de etapas que especifique para la sección de bandeja no incluye el condensador y el calderín inferior. Por defecto, HYSYS numera las etapas de arriba hacia abajo. HYSYS inicialmente trata las etapas como ideales. Si desea que sus etapas se traten como etapas reales, debe especificar. (Haydary, 2019)

#### ***3.4.1.3.8. Columna de Destilación Reactiva.***

La columna de destilación reactiva combina las operaciones de destilación y reacción en un solo equipo. En esta columna, las reacciones químicas y la separación de los componentes ocurren simultáneamente, lo que es muy útil para procesos donde una de las reacciones mejora la separación o viceversa. Este tipo de equipo se utiliza, por ejemplo, en reacciones de esterificación o hidrólisis. (Aspen Hysys V. 14.2, 2024)

**Figura 17:** Columna de Destilación Reactiva



**Fuente:** Aspen Hysys V. 14.2

#### ***3.4.1.3.8.1. Parámetros Básicos de la Columna de Destilación Reactiva.***

##### **Reacciones en la Columna:**

- A diferencia de una columna convencional, en una torre reactiva, hay una o más zonas donde ocurre una reacción química, como la esterificación o hidrólisis.
- La reacción ocurre en las bandejas o en una zona específica de la columna, y los productos de la reacción se separan inmediatamente a medida que se vaporizan o condensan, lo que puede aumentar la conversión y mejorar la selectividad del proceso. (Haydary, 2019)

##### **Corrientes en la Torre:**

- **Corriente de alimentación:** Se introduce la mezcla reactiva, que puede contener reactivos como lactato de metilo, metanol, o ácido láctico, dependiendo de la reacción que esté ocurriendo.

- **Corriente de producto superior:** Generalmente es el componente más volátil, que podría ser uno de los productos de la reacción, como metanol en una reacción de hidrólisis.
- **Corriente de producto inferior:** Es el componente menos volátil, que podría incluir el ácido láctico si se está realizando una hidrólisis o el reactivo no convertido. (Haydary, 2019)

#### **Intercambiadores de Calor.**

- **Condensador (Duty C):** En la parte superior de la columna, el condensador enfría el vapor para obtener un líquido en la parte superior. El producto superior suele ser el componente más volátil.
- **Rebóiler (Duty R):** En la parte inferior de la columna, el rebóiler suministra calor para vaporizar parte de la corriente líquida, permitiendo que el vapor suba y facilite la separación de los componentes. (Haydary, 2019)

### **3.5. CONTROL DE CALIDAD.**

El control de calidad es una etapa crítica en la producción de ácido láctico utilizando lactosuero como materia prima, garantizando que cada fase del proceso cumpla con los requisitos fisicoquímicos y microbiológicos necesarios. Este proceso incluye la verificación de la calidad de las materias primas, el monitoreo del producto en proceso y la evaluación final del producto terminado.

#### **3.5.1. Materias Primas.**

El lactosuero, como principal materia prima en este proceso, debe someterse a rigurosos controles de calidad antes de su procesamiento para la producción de ácido láctico.

El análisis fisicoquímico del lactosuero incluye la medición de pH, contenido de sólidos totales, concentración de proteínas y lactosa, que son fundamentales para el rendimiento óptimo de la fermentación.

Además, se realizan pruebas microbiológicas para asegurar que no existan contaminantes que puedan interferir con el proceso de fermentación o comprometer la calidad del ácido láctico final. Es esencial que el lactosuero esté libre de patógenos y se mantenga en condiciones óptimas de almacenamiento para preservar su estabilidad.

#### **3.5.1.1. Análisis Físico-Químico.**

- Acidez expresada como ácido láctico (%).
- pH.
- Densidad (g/mL).
- Sólidos Totales.
- Lactosa.
- Grasa.
- Proteína.
- Cenizas.
- Calcio.
- Fósforo.
- Cloruros.

#### **3.5.1.2. Análisis Microbiológico.**

- Aerobios Mesófilos Totales (UFC/mL).
- Coliformes Totales (UFC/mL).

### 3.5.1.3. Técnicas para la Determinación de los diferentes Parámetros y Pruebas.

#### 3.5.1.3.1. *Proceso de Determinación de Acidez como Ácido Láctico.*

**Método:** Volumétrico o de Titulación Ácido-Base

**Procedimiento:**

- Pesar 5 gramos de cada muestra.
- Medir en una probeta alcohol de 90 GL.
- Agregar alcohol de 90 GL verificando con el alcoholímetro.
- Agregar fenolftaleína, hidróxido de sodio 0.1% hasta un cambio de color a rosa claro.
- Verter la disolución.
- Mezclar en el agitador magnético, por 1 hora, controlando el tiempo de forma exacta.
- Filtrar y extraer 10 ml para cada muestra.
- Agregar hidróxido de sodio 0.1 N en la bureta.
- Titular con hidróxido de sodio 0.1 N en la bureta, agregando gotas de indicador fenolftaleína a cada muestra, hasta observar un cambio de coloración a rosa.
- Anotar el volumen gastado
- Realizar los cálculos por fórmula.

$$\text{Acidez (\% ácido láctico)} = \left( \frac{\text{ml de NaOH} * \text{Normalidad de NaOH} * 90.08}{\text{Volumen de la muestra (ml)}} \right) * 100$$

**Referencia:** NB 229 Productos lácteos - Determinación de la acidez titulable

#### 3.5.1.3.2. *Proceso de Determinación de pH.*

**Método:** Potenciométrico

- Encender el equipo pH metro.
- Calibrar con los patrones de ser necesario.
- Introducir el sensor en la muestra.
- Realizar la lectura directa de los resultados.

**Referencia:** AOAC 981.12 Método para medición de pH

#### ***3.5.1.3.3. Proceso de Determinación de Densidad relativa a 20 °C.***

**Método:** Lactodensímetro

- Sacar el equipo.
- Homogenizar la muestra.
- Sacar probeta de 100ml.
- Verter el líquido.
- Introducir el densímetro en la muestra.
- Realizar la lectura.
- Registro del valor obtenido.

**Referencia:** NB 230 Productos lácteos - Determinación de la densidad relativa

#### ***3.5.1.3.4. Proceso de Determinación de Sólidos Totales – Humedad.***

Es empleado tanto para sólidos totales como humedad, razón por la cual el proceso es el mismo.

**Método:** Gravimétrico

**Procedimiento:**

- Iniciamos con secado del vaso de precipitado en el horno a 105 °C por 15 min, sacar y llevarlo al desecador por 15 min, con la ayuda de una pinza, pesar el vaso de precipitado seco y registrar.
- Pesado de muestras en vasos con arenilla por ser muestras líquidas y registrar los datos.
- Ingreso al horno por 2 horas con la muestra en el horno a 105 °C, enfriado en el desecador y registro de datos.
- Ingreso por 1 hora, enfriado en el desecador y registro de datos.
- Repetir el proceso por 5 corridas, hasta obtener un peso constante.

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{G_2 - G_3}{G_2 - G_1} * 100$$

Donde:

- $G_1$ : Peso del recipiente vacío.
- $G_2$ : Peso del recipiente más la muestra húmeda.
- $G_3$ : Peso del recipiente más la muestra seca.

**Referencia:** NB 231:1 Productos lácteos -Parte 1: Determinación de sólidos totales

**3.5.1.3.5. Proceso de Determinación de Grasas.**

**Método:** Gerber

- Pesado de muestras en vasos de precipitado.
- Agregar ácido clorhídrico 1:4 a las muestras.
- Someter al calor las muestras en la hornilla eléctrica.
- Realizar el filtrado de las muestras con papel filtro en matraces Erlenmeyer.

- Lavar varias veces con agua destilada caliente para obtener la grasa.
- Esperar a la conclusión del filtrado.
- Realizar el proceso de destilación con el uso de hexano por el lapso de 4 horas.
- Colocar al horno por 30 min.
- Pesar los balones y registrar los resultados.
- Realizar los cálculos para la determinación del porcentaje de grasas.

$$Gr = \frac{100 * (G_2 - G_1)}{G}$$

Donde:

- $Gr$ : Contenido de materia grasa en porciento en peso de muestra seca.
- $G$ : Peso de la muestra seca en granos.
- $G_1$ : Peso del matraz en gramos.
- $G_2$ : Peso del matraz conteniendo el extracto éter en gramos.

**Referencia:** NB 228 Productos lácteos - Determinación del contenido graso en leche por los métodos Gerber - Rose Gottlieb

### ***3.5.1.3.6. Proceso de Determinación de Proteínas.***

**Método:** Kjeldahl

**Procedimiento:**

**Etapa de Digestión.**

- Pesamos 0,5 gramos de muestra.
- Pesamos 5 gramos de sulfato de sodio.

- Pesamos 0,1 gramos de sulfato de cobre.
- Introducimos la muestra y los reactivos en un matraz volumétrico.
- Llevamos a la campana, donde se introducirá ácido sulfúrico concentrado, con un volumen de 10 ml.
- Llevar a las campanas donde estará en digestión por 4 horas aproximadamente.
- Observar el cambio de color.
- Enfriar a temperatura ambiente.

### **Etapa de Neutralización y Destilación.**

- Medir 20 mL de Ácido Bórico en una probeta de 25 mL.
- Añadir 2-3 gotas del indicador Rojo de Metilo.
- Colocar la solución de ácido Bórico a la salida del destilador.
- Neutralizar con NaOH a la muestra ya digerida.
- Colocar la muestra neutralizada en el destilador.
- Encender el equipo y seleccionar el botón STEAM.
- Llegar hasta los 280 °C de temperatura.
- Detener una vez llegado a los 150 mL.
- Vaciar al matraz Erlenmeyer el contenido del destilado.
- Observar el cambio de color de la muestra destilada a un color verde claro.

### **Etapa de Titulación.**

- Armar el Equipo de Titulación.
- Cargar la Bureta con Ácido Sulfúrico [0,1].
- Titular la muestra de 150 mL.
- Observar el cambio de viraje a fucsia.
- Registrar el volumen gastado del titulante.
- Calcular el contenido de proteínas mediante la formula.

$$(\%) \text{ Proteína} = \frac{V * N * 0,014 * 100}{m} * f$$

Donde:

- $V$ : Volumen de ácido clorhídrico empleado en la titulación, en  $\text{cm}^3$ .
- $N$ : Normalidad del ácido clorhídrico.
- $m$ : Masa de la muestra en gramos.
- 0,014: Miliequivalentes del nitrógeno.

**Referencia:** AOAC 991.20 NB 076 Cereales - Determinación de Proteínas Totales - Método Kjeldahl

### 3.5.1.3.7. *Proceso de Determinación de Cenizas.*

**Método:** Gravimétrico

- Secar el crisol en el horno de secador a  $105\text{ }^\circ\text{C}$  por 15 min, llevar el crisol con la ayuda de las pinzas al desecador, pesar el crisol vacío y registrar el valor.
- Pesado de muestras en los crisoles previamente tarados y registro de los datos.
- Pre calcinación de las muestras de ser necesario.
- Ingreso a la mufla a  $550\text{ }^\circ\text{C}$  por 4 horas.
- Transferir el crisol a un desecador hasta que alcance la temperatura ambiente.
- Pesar el crisol más la muestra y registrar datos.
- Calcular el porcentaje de cenizas.

$$(\%) \text{ Ceniza} = \frac{m_3 - m_2}{m_1} * 100$$

Donde:

- $m_1$ : Peso de la muestra en gramos.

- $m_2$ : Peso de crisol vacío en gramos.
- $m_3$ : Peso del crisol más la muestra calcinada.

**Referencia:** NB 231-2 Productos lácteos - Parte 2: Determinación de cenizas

#### **3.5.1.3.8. *Proceso de Determinación de Minerales.***

- A partir de las cenizas del proceso de calcinación, medir ácido clorhídrico 1:1 para cada muestra.
- Someter al calor los crisoles a 160 °C.
- Agregar nuevamente ácido clorhídrico.1:1, someterlo al calor por 5 min.
- Verter las muestras en su respectivo matraz volumétrico.
- Realizar el proceso de filtrado y homogeneización.

#### **3.5.1.3.9. *Proceso de Determinación de Fosforo.***

**Método:** Espectro UV/Vis

- A partir de la preparación de minerales.
- Medir 10ml con agua destilada más la muestra preparada
- Agitar con el equipo.
- Extraer 7 ml de muestra en un tubo de ensayo.
- Preparar hidroquinona.
- Agregar el molibdato de amonio.
- Agregar la hidroquinona.
- Agregar el sulfito de sodio,
- Homogenizar en el equipo.
- Esperar por 15 min en la oscuridad.
- Encender el equipo y esperar por 30 minutos.

- Realizar la lectura en el equipo del espectrofotómetro UV/VIS.
- Registrar los resultados y las diluciones de ser necesario por la elevada concentración de las muestras.

### **Curva de Calibración.**

$$Cp = a + b * A$$

Donde:

- $Cp$ : Concentración de fosforo, en ppm.
- $A$ : Absorbancia de la muestra.
- $a$ : Coeficiente de regresión (ordenada al origen).
- $b$ : Coeficiente de regresión (pendiente).

### **Concentración del Fosforo a partir de la Muestra.**

$$Cp = a + b * A_m$$

Donde:

- $Cp$ : Concentración de fosforo, en ppm.
- $A_m$ : Absorbancia de la muestra.
- $a$ : Coeficiente de regresión (ordenada al origen).
- $b$ : Coeficiente de regresión (pendiente).

### **Cálculo del Fosforo considerando las Diluciones Efectuadas:**

$$mg \text{ de } P/100g = \frac{C'p * 200}{M}$$

Donde:

- $C'p$ : Concentración de fosforo, en ppm.
- $M$ : Masa de la muestra analizada en gramos.
- 200: factor de dilución.

**Referencia:** AOAC 986.24 Determinación de Fósforo en Productos Alimenticios y otros Materiales

#### ***3.5.1.3.10. Proceso de Determinación de Cloruros.***

**Método:** Volumétrico

- Pesar las muestras para el proceso de cenizas.
- Utilizar las cenizas de las muestras previamente obtenidas.
- A partir de las cenizas del proceso de calcinación, medir agua destilada.
- Realizar la disolución de las muestras en un vaso precipitado.
- Agregar cromato de potasio al 5%.
- Agregar nitrato de plata.
- Colocarlo en el equipo de agitación.
- Encender el equipo de agitación.

- Lavar los imanes antes de introducirlos a la muestra, para evitar cualquier tipo de contaminación.
- Agregar el imán para su homogeneización.
- Agregar el titulante a la bureta.
- Realizar la titulación con 0,1M de nitrato de plata, hasta observar un cambio de coloración naranja.
- Leer el volumen gastado.
- Registrar el volumen gastado.
- Calcular el contenido de cloruros mediante la formula.

$$g / 100g NaCl = \frac{(V_2 - V_1) * 0,005844}{W_m} * 100$$

Donde:

- $V_2$ : Volumen en ml, de la solución de nitrato de plata, usada en la muestra.
- $V_1$ : Volumen en ml, de la solución de nitrato de plata, usada el blanco.
- $W_m$ : Peso de la muestra en gramos.

**Referencia:** NB 312005 Determinación de Cloruro de Sodio

### 3.5.2. Productos en Proceso.

Durante el proceso de producción de ácido láctico, los productos en proceso requieren un seguimiento constante y riguroso para garantizar que cada etapa contribuya eficazmente a la conversión del lactosuero en ácido láctico. Este control se logra mediante la implementación de

pruebas de calidad en varias fases clave, lo que permite identificar y corregir cualquier desviación que pudiera comprometer la eficiencia y pureza del producto. Los parámetros físicos y químicos, como la temperatura, el pH y la concentración de sustratos en el medio de fermentación, deben ser monitoreados en intervalos específicos. Esto facilita el ajuste inmediato de las condiciones de fermentación en respuesta a cambios detectados en las variables del sistema, optimizando así el rendimiento de la producción.

Además, deben realizarse análisis microbiológicos periódicos, los cuales cumplen un rol esencial para asegurar la viabilidad y actividad de las cepas bacterianas, como *Lactobacillus casei*, responsables de la fermentación. Estos análisis también verifican la ausencia de microorganismos contaminantes, que podrían interferir con la calidad y seguridad del ácido láctico producido. A través de estos controles, no solo se garantiza la calidad y consistencia del producto final, sino que también se contribuye a la sostenibilidad del proceso.

### **3.5.3. Producto Final.**

El control de calidad del producto final, es decir, el ácido láctico, debe incluir un exhaustivo análisis fisicoquímico para evaluar su pureza, concentración y características sensoriales si el producto es destinado para la industria alimentaria o farmacéutica. Se verifican parámetros como la acidez, el contenido de agua, la estabilidad térmica y la ausencia de impurezas o residuos no deseados. Desde el punto de vista microbiológico, el ácido láctico debe estar libre de microorganismos patógenos y cumplir con las normativas sanitarias y de seguridad alimentaria aplicables. La calidad del producto final determina su idoneidad para su uso en las aplicaciones previstas, ya sea en la industria alimentaria, farmacéutica o química, y asegura su aceptación en el mercado.

### 3.6. PRUEBAS EXPERIMENTALES.

#### 3.6.1. Tablas.

**Tabla 15:** Parámetros Experimentales de las Muestras de Lactosuero

PARÁMETRO	LACTOSUERO A	LACTOSUERO B
Acidez expresada como Ácido Láctico (%)	0,66	0,89
pH	4,18	3,81
Densidad (g/mL)	1,023	1,060
Sólidos Totales	5,26	14,0
Cenizas	0,68	0,62
Lactosa	3,273	8,246
Grasa	0,02	0,09
Proteína	0,52	0,71
Calcio	157	131
Fósforo	64,5	65,4
Cloruros	0,20	0,18
Aerobios Mesófilos Totales (UFC/mL)	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$
Coliformes Totales (UFC/mL)	$<1,0 \times 10^1$	$<1,0 \times 10^1$

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 16:** Datos de la Curva de Calibración para el Fosforo (P)

C	ABS
0	-0,01
0,7	0,072
2	0,206
4	0,477
6	0,696

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 17:** Indicadores Económicos

INDICADORES	CONSUMO
Agua de enfriamiento (t/t)	37,46
Lps (Low Pressure Steam) (Mj/t)	3.952,34
Ventas (US\$/Año)	388080
Costo de Capital (US\$)	737854
Costo de Utilities (US\$/año)	8273
Costo de Materias Primas (US\$/año)	185648
Utilidades (US\$/Año)	194158
VPN (Valor Presente Neto) (US\$)	241139

**Fuente:** (Elaboración propia, Aspen HYSYS V. 14.2)

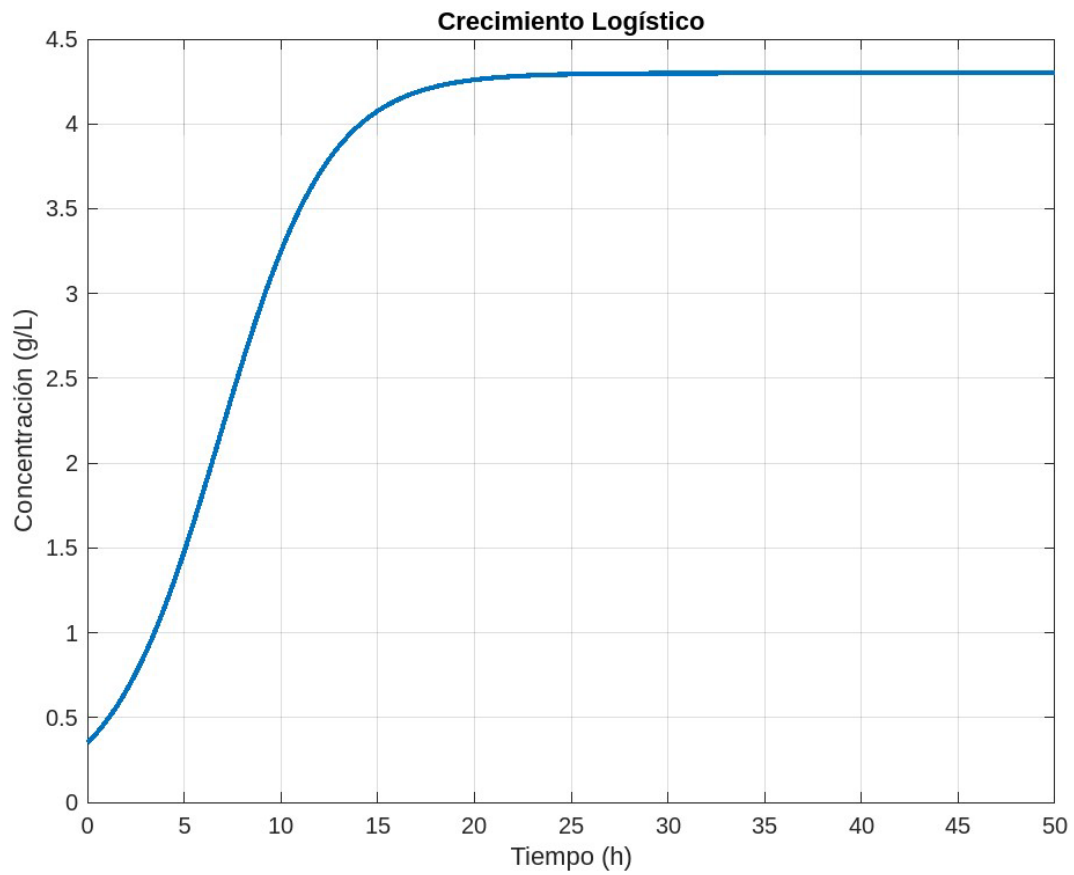
**Tabla 18:** Parámetros Fisicoquímicos y Microbiológicos del Lactosuero con Normas en Vigencia

Parámetro	Lactosuero A	Lactosuero B	Norma Vigente
<b>Acidez (%)</b>	0.66	0.89	Codex Alimentarius (máx. 0.15% en suero fresco) – Código: Codex STAN 206-1999
<b>pH</b>	4.18	3.81	Codex Alimentarius (5.9 - 6.6 en suero fresco) – Código: Codex STAN 206-1999
<b>Densidad (g/mL)</b>	1.023	1.06	Codex Alimentarius (1.02 - 1.03 g/mL) – Código: Codex STAN 206-1999
<b>Sólidos Totales (g/L)</b>	5.26	14.0	Codex Alimentarius (5-7% en suero dulce) – Código: Codex STAN 206-1999
<b>Cenizas (%)</b>	0.68	0.62	Codex Alimentarius (0.5-0.7%) – Código: Codex STAN 206-1999
<b>Lactosa (g/L)</b>	3.273	8.24	Codex Alimentarius (4.5-5.0% en suero dulce) – Código: Codex STAN 206-1999
<b>Grasa (g/L)</b>	0.02	0.09	Codex Alimentarius (<0.4%) – Código: Codex STAN 206-1999
<b>Proteína (g/L)</b>	0.52	0.71	Codex Alimentarius (0.6-0.9%) – Código: Codex STAN 206-1999
<b>Calcio (mg/L)</b>	157	131	Codex Alimentarius (50-170 mg/L) – Código: Codex STAN 206-1999
<b>Fosforo (mg/L)</b>	64.5	65.4	Codex Alimentarius (40-70 mg/L) – Código: Codex STAN 206-1999
<b>Cloruros (g/L)</b>	0.2	0.18	No especificado en el Codex (se acepta bajo nivel de cloruros)
<b>Aerobios Mesófilos Totales (UFC/mL)</b>	<1.0x10 <sup>1</sup>	<1.0x10 <sup>1</sup>	Codex Alimentarius (<100 UFC/mL) – Código: Codex STAN 206-1999
<b>Coliformes Totales (UFC/mL)</b>	<1.0x10 <sup>1</sup>	<1.0x10 <sup>1</sup>	Codex Alimentarius (<100 UFC/mL) – Código: Codex STAN 206-1999

**Fuente:** Elaboración Propia

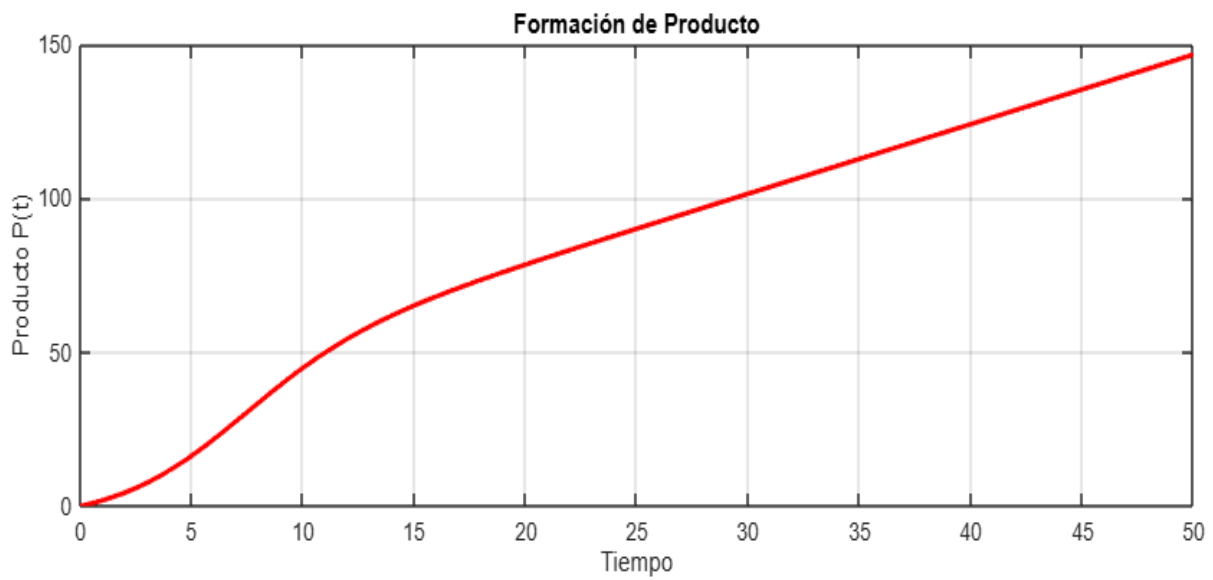
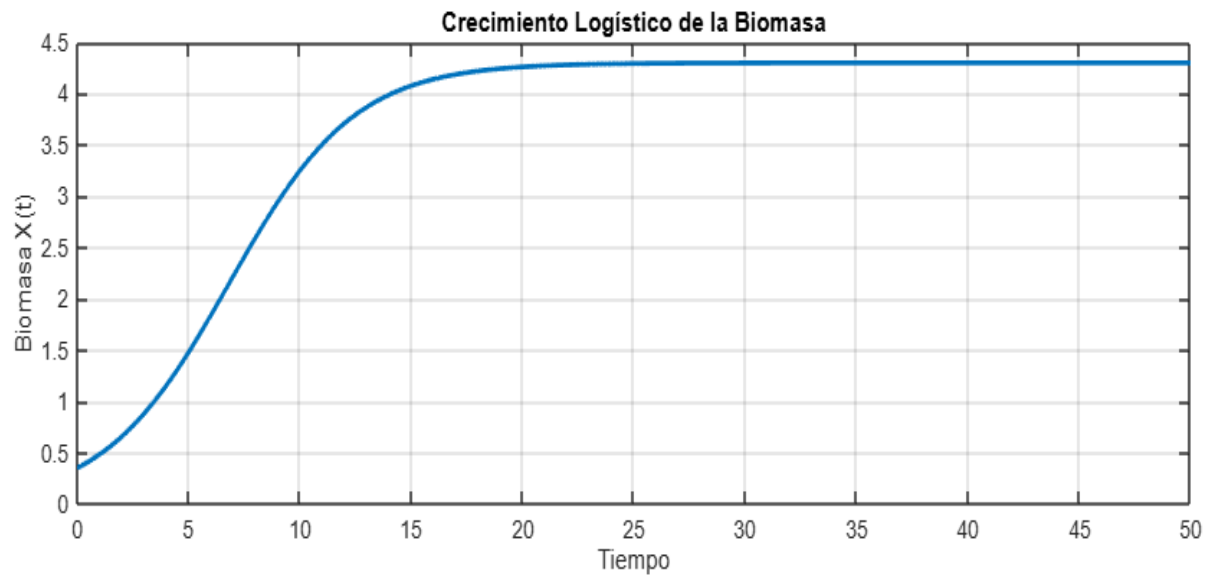
### 3.6.2. Figuras.

**Figura 18:** Gráfica en MATLAB para el Crecimiento Logístico



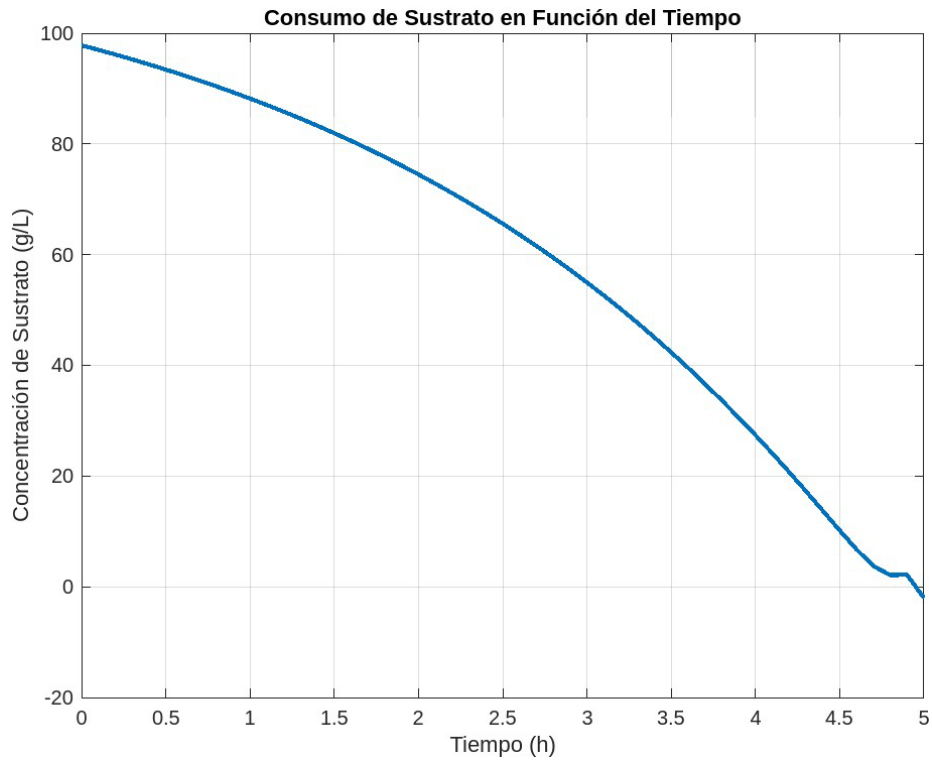
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 19:** Gráfica de MATLAB para la Formación de Producto



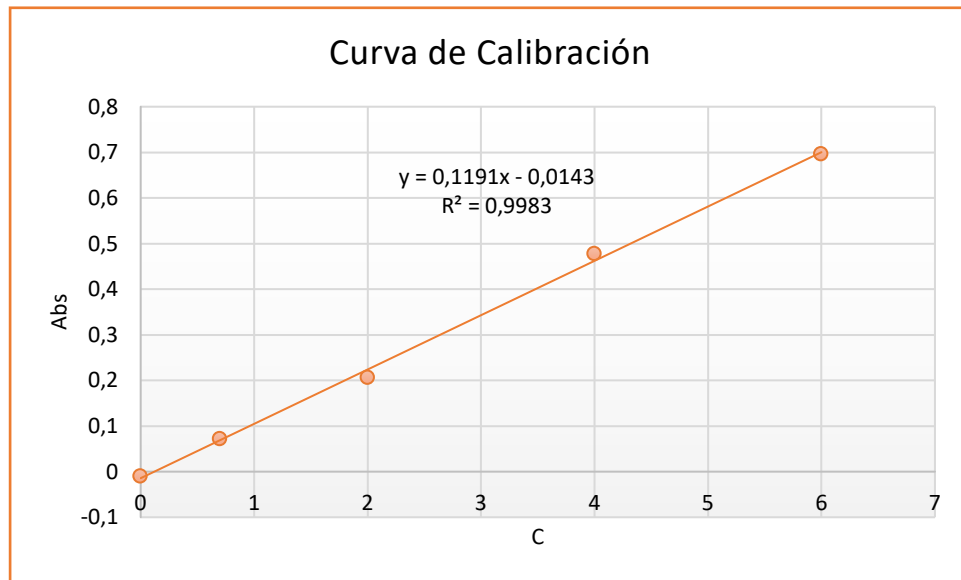
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 20:** Gráfica de MATLAB para el Consumo de Sustrato



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 21:** Gráfica de la Curva de Calibración para el Fosforo (P)



**Fuente:** Elaboración Propia

### 3.6.3. Cálculos.

#### 3.6.3.1. Cálculo de la Lactosa.

$$SNF = \frac{0,075 * G\% + 100 - 100/Densidad}{0,378}$$

$$SNF = SNG$$

$$Lactosa = SNG * 0,55 (\%)$$

Donde:

- *SNG*: Contenido de SNG en porcentajes (%)
- 0,55: Coeficiente constante

#### Cálculo de la Lactosa del Lactosuero A.

$$SNF = \frac{0,075 * 0,02 + 100 - 100/1,023}{0,378}$$

$$SNF = 5,952$$

$$Lactosa = 5,952 * 0,55 (\%)$$

$$Lactosa = 3,273 \%$$

### **Cálculo de la Lactosa del Lactosuero B.**

$$SNF = \frac{0,075 * 0,09 + 100 - 100/1,060}{0,378}$$

$$SNF = 14,992$$

$$Lactosa = 14,992 * 0,55 (\%)$$

$$Lactosa = 8,246 \%$$

### **3.6.3.2. Cálculo del Fosforo (P).**

#### **Cálculo de la Concentración Nueva del Lactosuero A.**

$$y = 0,1191x - 0,0143$$

$$CN = \frac{(0,2020 - 0,0010) - (-0,014)}{0,119}$$

$$CN = 1,806$$

#### **Cálculo del Factor de Dilución.**

$$FD = \frac{(100 * 25 * 10 * 10)}{1000 * 7 * 0,5}$$

$$FD = 71,42$$

**Cálculo del Fosforo del Lactosuero A.**

$$Fosforo (mg/100g) = \frac{1,806 * 71,42}{2,0002}$$

$$Fosforo (mg/100g) = 64,5$$

**Cálculo de la Concentración Nueva del Lactosuero B.**

$$y = 0,1191x - 0,0143$$

$$CN = \frac{(0,2050 - 0,0010) - (-0,014)}{0,119}$$

$$CN = 1,832$$

**Cálculo del Factor de Dilución.**

$$FD = \frac{(100 * 25 * 10 * 10)}{1000 * 7 * 0,5}$$

$$FD = 71,42$$

**Cálculo del Fosforo del Lactosuero B.**

$$Fosforo (mg/100g) = \frac{1,832 * 71,42}{2,0002}$$

$$Fosforo (mg/100g) = 65,4$$

### **3.7. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y REFERENCIAS.**

#### **3.7.1. Interpretación de Resultados de la Simulación en Aspen Hysys.**

La interpretación de los resultados de la simulación en Aspen Hysys para la producción de ácido láctico a partir de lactosuero implica evaluar las variables clave del proceso: temperatura, presión, flujos másicos y molares, y las fracciones molares de los componentes principales (agua, ácido láctico, lactato de metilo, metanol).

El análisis de estas variables permite entender las distintas fases del proceso, incluyendo la esterificación del ácido láctico y la purificación final del producto.

##### **3.7.1.1. Temperatura (°C).**

- Las primeras corrientes (METANOL, ÁCIDO LÁCTICO Y AGUA, y las corrientes 1-4) tienen una temperatura uniforme de 70 °C, lo que sugiere que estas corrientes están involucradas en las etapas iniciales de reacción o pretratamiento, posiblemente para la mezcla de reactivos o la esterificación.
- Las corrientes 5 y 6 presentan un aumento significativo de la temperatura (153,41 °C), lo que indica que estas etapas pueden estar relacionadas con la reacción de esterificación del ácido láctico con metanol para formar lactato de metilo.
- Las corrientes 8 y 9 muestran temperaturas aún más elevadas (100,04°C y 244,66 °C, respectivamente), lo que podría estar relacionado con la destilación del lactato de metilo para separarlo de otros compuestos como el agua o residuos de metanol.
- Las corrientes finales (10 y ÁCIDO LÁCTICO) tienen temperaturas más bajas (55 °C y 60 °C), con la excepción de la corriente final de ácido láctico (235,78 °C), lo que indica una etapa de purificación o destilación final donde el ácido láctico se concentra y se separa del resto de los componentes.

### 3.7.1.2. Presión (Atm).

- La presión se mantiene constante en 1 atm a lo largo de todas las corrientes, lo que sugiere que el proceso se lleva a cabo a presión atmosférica. Esto es común en procesos donde no es necesario aplicar presiones elevadas para favorecer las reacciones o separaciones.

### 3.7.1.3. Flujo Másico (kg/h).

- El flujo másico varía notablemente entre las corrientes. Las corrientes 2 y 4 tienen flujos másicos elevados (65,047 kg/h y 82,068 kg/h, respectivamente), lo que indica que son corrientes importantes en la etapa de producción de lactato de metilo o la mezcla inicial de componentes.
- La corriente 9, con 40,063 kg/h, podría estar asociada con una corriente de producto que contiene lactato de metilo antes de ser purificado o destilado.
- Las corrientes METANOL y ÁCIDO LÁCTICO Y AGUA tienen flujos másicos de 23,021 kg/h y 65,047 kg/h, lo que sugiere que son las corrientes de entrada principales, aportando el metanol y la mezcla de ácido láctico y agua al sistema.

### 3.7.1.4. Flujo Molar (kmol/h).

- El flujo molar sigue una tendencia similar al flujo másico. Las corrientes 4 y 5 tienen los flujos molares más altos (1,5 kmol/h y 0,92675 kmol/h), lo que indica que son flujos ricos en componentes claves como lactato de metilo o precursores de ácido láctico.
- Las corrientes con flujos molares bajos (corrientes 3, 9, y 10) probablemente representan subproductos o corrientes de purificación con menor cantidad de material en comparación con las corrientes principales de reacción.

### **3.7.1.5. Fracción Molar – Agua.**

- Las corrientes ÁCIDO LÁCTICO Y AGUA, 1, 2, 3, 7, 8 y 9 tienen una alta fracción molar de agua, especialmente las corrientes 7 y 8, con valores superiores al 90 %, lo que indica que estas corrientes son principalmente agua. Esto es típico en las etapas de separación de los subproductos, donde el agua se retira antes de concentrar el ácido láctico.
- La corriente final de ÁCIDO LÁCTICO muestra una fracción molar de agua muy baja (0,0091), lo que indica que el agua ha sido separada de manera efectiva en la purificación final, logrando un producto final altamente concentrado en ácido láctico.

### **3.7.1.6. Fracción Molar - Ácido Láctico.**

- La única corriente que contiene ácido láctico es la corriente final (ÁCIDO LÁCTICO), con una fracción molar del 99 %, lo que confirma que el proceso de separación y purificación ha sido exitoso, obteniendo ácido láctico prácticamente puro como producto final.
- Las demás corrientes no contienen ácido láctico, lo que es consistente con etapas intermedias donde el ácido láctico ha sido convertido a lactato de metilo o aún no ha sido recuperado.

### **3.7.1.7. Fracción Molar - Lactato de Metilo.**

- El lactato de metilo aparece en las corrientes 3, 4, 5, y 6, con fracciones molares que varían entre 0,21 y 0,5, lo que indica que estas corrientes están relacionadas con la esterificación y producción de lactato de metilo. Estas fracciones son relativamente altas, lo que sugiere que se ha producido lactato de metilo en cantidades significativas.
- La corriente 9 tiene una fracción molar muy alta de lactato de metilo (98,91 %), lo que sugiere que esta corriente es casi puramente lactato de metilo, probablemente listo para ser procesado en etapas de destilación o purificación.

### 3.7.1.8. Fracción Molar – Metanol.

- El metanol está presente principalmente en la corriente METANOL (100% metanol) y en las corrientes 10 y ÁCIDO LÁCTICO, donde la fracción de metanol es alta (97,97 % y 98,97 % respectivamente). Esto sugiere que el metanol no reaccionado ha sido recuperado en estas corrientes, lo que es positivo desde el punto de vista económico, ya que puede ser reciclado para futuras reacciones.
- En las demás corrientes, la fracción de metanol es nula o cercana a cero, lo que indica que el metanol ha sido utilizado en la reacción de esterificación y que ha sido separado eficazmente de las otras fases del proceso.

### 3.7.2. Interpretación General del Proceso.

El proceso simulado en Aspen Hysys parece consistir en varias etapas claves:

- **Esterificación del Ácido Láctico con Metanol:** Para producir lactato de metilo, lo que está respaldado por las corrientes que contienen lactato de metilo (corrientes 3, 4, 5, y 6) y el uso de metanol puro como corriente de entrada.
- **Destilación y Separación del Lactato de Metilo:** En las corrientes 7, 8 y 9, donde el lactato de metilo alcanza una pureza cercana al 99% antes de ser procesado.
- **Purificación Final del Ácido Láctico:** Se refleja en la corriente final (ÁCIDO LÁCTICO) con una pureza del 99 %, lo que indica que el ácido láctico ha sido separado de los otros componentes, como el agua y el metanol.

Este análisis confirma la viabilidad del proceso de producción de ácido láctico utilizando lactosuero como materia prima, con una eficiente esterificación, separación y purificación del producto final.

### **3.7.3. Interpretación de la Viabilidad Económica del Proceso.**

El análisis de viabilidad económica del proceso de producción de ácido láctico, basado en los indicadores financieros y de consumo proporcionados, muestra resultados prometedores que justifican la implementación del proyecto.

A continuación, se analiza cada indicador obtenido del simulador:

#### **3.7.3.1. Consumo de Recursos.**

- **Agua de Enfriamiento:** Se consume 37,46 toneladas de agua de enfriamiento por cada tonelada de ácido láctico producido, lo cual es significativo, pero esperable en procesos que involucran múltiples etapas de reacción y purificación térmica. Este costo se debe considerar como parte de las utilities y puede representar un gasto importante en regiones con acceso limitado o costoso a recursos hídricos.
- **Lps (Low Pressure Steam):** El proceso requiere 3.952,34 MJ de vapor de baja presión por tonelada de producto, lo cual indica que se trata de un proceso intensivo en energía. Este consumo de vapor es crítico para las operaciones de esterificación, destilación y purificación, que son etapas clave del proceso. A pesar de ser un gasto considerable, la energía de vapor puede optimizarse mediante mejoras en la eficiencia energética, como el uso de intercambiadores de calor o sistemas de reciclaje de calor residual.

#### **3.7.3.2. Indicadores Económicos.**

- **Ventas (US\$/año):** Las ventas anuales proyectadas son de 388.080 US\$, lo que muestra que el mercado del ácido láctico puede generar ingresos significativos. Este dato es crucial para determinar la capacidad del proyecto de generar utilidades suficientes para cubrir los costos operativos y de capital.

- **Costo de Capital (US\$):** El costo inicial de inversión es de 737.854 US\$, lo que representa un desembolso importante para implementar el proyecto. Sin embargo, este tipo de costo es usualmente alto en proyectos de producción industrial debido a la necesidad de infraestructura, equipos, y tecnología especializada.
- **Costo de Utilities (US\$/año):** El costo anual de utilities, que incluye el consumo de agua, vapor y otros servicios, asciende a 8.273 US\$. Si bien es un gasto adicional, representa un porcentaje relativamente pequeño en comparación con otros costos como materias primas, lo que sugiere que la optimización de estos recursos podría mejorar aún más la rentabilidad.
- **Costo de Materias Primas (US\$/año):** El costo de las materias primas necesarias para la producción anual de ácido láctico es de 185.648 US\$, lo que representa una parte considerable de los costos operativos. Optimizar el uso del lactosuero como materia prima, que es un subproducto industrial, podría reducir aún más estos costos y mejorar la sostenibilidad del proyecto.

#### **3.7.3.3. Utilidades (US\$/Año).**

- Las utilidades anuales proyectadas son de 194.158 US\$, lo que muestra que el proyecto es capaz de generar ganancias considerables una vez cubiertos los costos operativos. Esta cifra es fundamental para asegurar la recuperación del costo de capital inicial y garantizar la rentabilidad a largo plazo.

#### **3.7.3.4. Valor Presente Neto (VPN) (US\$).**

- El Valor Presente Neto (VPN) de 241.139 US\$ indica que el proyecto es económicamente rentable a lo largo de 10 años. El VPN positivo significa que los flujos de caja descontados superan la inversión inicial, lo que sugiere que, a pesar del elevado

costo de capital, el proyecto tiene el potencial de generar un retorno positivo a largo plazo. Además, este resultado implica que los inversionistas podrían recuperar su inversión y generar utilidades dentro del horizonte temporal de 10 años.

#### **3.7.3.5. Recuperación del Costo de Capital.**

- A pesar de un costo de capital elevado de 737.854 US\$, las proyecciones económicas sugieren que este monto se podría recuperar en menos de 10 años gracias a las utilidades anuales generadas por la operación. Este hecho subraya la viabilidad del proyecto desde una perspectiva de inversión, ya que permite cubrir los costos de puesta en marcha en un plazo razonable.

#### **3.7.4. Interpretación de Resultados del Análisis Bromatológico y Microbiológico.**

A partir de la tabla que detalla el análisis físico-químico y microbiológico de dos tipos de Lactosuero, Lactosuero A y Lactosuero B, se puede interpretar lo siguiente:

##### **3.7.4.1. Acidez Expresada como Ácido Láctico (%).**

- **Lactosuero A:** 0.66%
- **Lactosuero B:** 0.89%

La mayor acidez del Lactosuero B (0.89 %) indica que ha experimentado una mayor fermentación o descomposición en comparación con el Lactosuero A (0.66 %). Esto sugiere que Lactosuero B podría estar más cerca de un estado donde el ácido láctico ya se ha producido en mayor cantidad, lo cual puede influir en la estrategia de fermentación posterior. Un nivel de acidez más alto puede favorecer un proceso de fermentación más rápido, aunque es necesario controlarlo para evitar la inhibición microbiana.

#### 3.7.4.2. pH.

- **Lactosuero A:** 4.18
- **Lactosuero B:** 3.81

El Lactosuero B tiene un pH más bajo, lo que confirma su mayor acidez en comparación con el Lactosuero A. Un pH por debajo de 4 puede inhibir ciertos microorganismos, por lo que se deben ajustar las condiciones de fermentación para mantener la actividad óptima de las bacterias productoras de ácido láctico.

#### 3.7.4.3. Densidad (g/mL).

- **Lactosuero A:** 1.023 g/mL
- **Lactosuero B:** 1.060 g/mL

La mayor densidad del Lactosuero B (1.060 g/mL) está asociada con su mayor contenido de sólidos totales, lactosa y otros componentes. Esto sugiere que el Lactosuero B tiene una mayor concentración de nutrientes disponibles para la fermentación, lo que puede aumentar la eficiencia del proceso de producción de ácido láctico.

#### 3.7.4.4. Sólidos Totales.

- **Lactosuero A:** 5.26 g/L
- **Lactosuero B:** 14.0 g/L

El contenido significativamente mayor de sólidos totales en el Lactosuero B indica una mayor concentración de componentes sólidos como lactosa, proteínas y minerales. Esto hace que el Lactosuero B sea una fuente más rica de nutrientes para la fermentación, lo que podría mejorar el rendimiento en la producción de ácido láctico.

#### 3.7.4.5. Cenizas.

- **Lactosuero A:** 0.68%
- **Lactosuero B:** 0.62%

El contenido de cenizas, que representa los minerales presentes, es similar en ambos lactosueros. Aunque Lactosuero A tiene un valor ligeramente mayor, las diferencias no son significativas en términos de su impacto en el proceso de fermentación.

#### 3.7.4.6. Lactosa.

- **Lactosuero A:** 3.273 g/L
- **Lactosuero B:** 8.24 g/L

Lactosuero B tiene un contenido mucho mayor de lactosa, que es el principal sustrato para las bacterias productoras de ácido láctico. Esto lo convierte en una mejor opción para el proceso de fermentación, ya que una mayor cantidad de lactosa puede resultar en una mayor producción de ácido láctico. Lactosuero A, aunque también contiene lactosa, presenta un contenido mucho menor, lo que puede limitar su eficiencia en el proceso.

#### 3.7.4.7. Grasa.

- **Lactosuero A:** 0.02 g/L
- **Lactosuero B:** 0.09 g/L

Ambos lactosueros tienen bajos niveles de grasa, lo cual es positivo para el proceso de fermentación. Sin embargo, Lactosuero B contiene una cantidad ligeramente mayor de grasa, lo que podría requerir una etapa adicional de pretratamiento para evitar posibles interferencias en la actividad microbiana.

#### **3.7.4.8. Proteína.**

- **Lactosuero A:** 0.52 g/L
- **Lactosuero B:** 0.71 g/L

Lactosuero B también tiene un mayor contenido de proteínas, lo cual puede ofrecer un valor añadido en el uso del suero, pero no afecta directamente al proceso de fermentación del ácido láctico. Sin embargo, una mayor cantidad de proteína puede ser beneficiosa si se desean recuperar estos compuestos tras el proceso.

#### **3.7.4.9. Calcio.**

- **Lactosuero A:** 157 mg/L
- **Lactosuero B:** 131 mg/L

Lactosuero A tiene un mayor contenido de calcio. Dado que el calcio puede afectar la coagulación y otros aspectos del proceso de fermentación, este valor más alto podría influir en la estabilidad del proceso. Sin embargo, ambos valores están dentro de un rango que no debería interferir significativamente con la fermentación.

#### **3.7.4.10. Fósforo.**

- **Lactosuero A:** 64.5 mg/L
- **Lactosuero B:** 65.4 mg/L

El contenido de fósforo es prácticamente el mismo en ambos lactosueros. El fósforo es esencial para la actividad microbiana, por lo que estos valores son adecuados para soportar el crecimiento de las bacterias durante la fermentación.

#### 3.7.4.11. Cloruros.

- **Lactosuero A:** 0.20 g/L
- **Lactosuero B:** 0.18 g/L

Ambos sueros tienen niveles muy similares de cloruros, lo que sugiere que no habrá diferencias significativas en la salinidad de los mismos. Estos niveles no deberían afectar negativamente el proceso de fermentación.

#### 3.7.4.12. Microbiología.

- **Ambos Lactosueros:**  $<1,0 \times 10^1$  UFC/mL

Ambos lactosueros cumplen con los límites microbiológicos, presentando recuentos muy bajos de aerobios mesófilos totales y coliformes. Esto indica que no será necesario realizar un tratamiento adicional para garantizar la seguridad microbiológica del proceso, lo cual es positivo desde el punto de vista de la viabilidad del proceso de fermentación.

El análisis muestra que Lactosuero B es una mejor opción para la producción de ácido láctico debido a su mayor contenido de lactosa, sólidos totales y nutrientes. Sin embargo, su mayor acidez y menor pH pueden requerir un control más riguroso durante el proceso de fermentación para evitar la inhibición microbiana. Lactosuero A también es viable, pero su menor concentración de lactosa y sólidos podría limitar el rendimiento en la producción de ácido láctico. Ambos lactosueros cumplen con los requisitos microbiológicos, lo que asegura un proceso de fermentación seguro desde el punto de vista microbiológico.

### **3.7.5. Interpretación de Parámetros Físico-Químicos y Microbiológicos del Lactosuero con Normas en Vigencia.**

A continuación, se realiza un análisis de cada parámetro del Lactosuero A y B en comparación con los estándares establecidos en la norma Codex STAN 206-1999, que regula la calidad del lactosuero como subproducto de la industria láctea.

#### **3.7.5.1. Acidez Expresada como Ácido Láctico (%).**

- **Lactosuero A:** 0.66%
- **Lactosuero B:** 0.89%
- **Norma Codex:** Máximo 0.15% en suero fresco.

Ambos lactosueros exceden el límite de acidez para suero fresco según la norma. Esto indica que los lactosueros han experimentado procesos de fermentación, donde la producción de ácido láctico ha aumentado la acidez. Aunque no cumplen con la especificación de lactosuero fresco, son adecuados para la producción de ácido láctico.

#### **3.7.5.2. pH.**

- **Lactosuero A:** 4.18
- **Lactosuero B:** 3.81
- **Norma Codex:** Rango de 5.9 a 6.6 para suero fresco.

Ambos lactosueros presentan valores de pH por debajo del rango establecido, lo que confirma un estado de fermentación avanzado. Este pH más bajo es característico de sueros destinados a procesos de fermentación y no a consumo directo como suero fresco.

### 3.7.5.3. Densidad (g/mL).

- **Lactosuero A:** 1.023 g/mL
- **Lactosuero B:** 1.06 g/mL
- **Norma Codex:** Entre 1.02 y 1.03 g/mL para suero dulce.

Lactosuero A cumple con los valores estipulados por la norma. Sin embargo, Lactosuero B supera el límite superior, lo cual puede atribuirse a su mayor contenido de sólidos totales, lo que lo hace más concentrado y denso.

### 3.7.5.4. Sólidos Totales (g/L).

- **Lactosuero A:** 5.26 g/L
- **Lactosuero B:** 14.0 g/L
- **Norma Codex:** Entre 5% y 7% para suero dulce.

Lactosuero A se encuentra dentro del rango establecido por el Codex, mientras que Lactosuero B excede el valor máximo. Este contenido elevado de sólidos totales en Lactosuero B es favorable para procesos de fermentación, ya que implica una mayor concentración de nutrientes.

### 3.7.5.5. Cenizas (%)

- **Lactosuero A:** 0.68%
- **Lactosuero B:** 0.62%
- **Norma Codex:** Entre 0.5% y 0.7%.

Ambos lactosueros cumplen con la norma para el contenido de cenizas, lo que indica un nivel adecuado de minerales.

#### 3.7.5.6. Lactosa (g/L).

- **Lactosuero A:** 3.273 g/L
- **Lactosuero B:** 8.24 g/L
- **Norma Codex:** Entre 4.5% y 5.0% en suero dulce.

Lactosuero A presenta un valor inferior al rango establecido, mientras que Lactosuero B supera ligeramente este rango. El mayor contenido de lactosa en Lactosuero B es ventajoso para la producción de ácido láctico, ya que proporciona más sustrato para la fermentación.

#### 3.7.5.7. Grasa (g/L).

- **Lactosuero A:** 0.02 g/L
- **Lactosuero B:** 0.09 g/L
- **Norma Codex:** Menor a 0.4%.

Ambos lactosueros cumplen con la norma en cuanto al contenido de grasa, lo cual es ideal para evitar interferencias en el proceso de fermentación.

#### 3.7.5.8. Proteína (g/L).

- **Lactosuero A:** 0.52 g/L
- **Lactosuero B:** 0.71 g/L
- **Norma Codex:** Entre 0.6% y 0.9%.

Lactosuero B cumple con la norma, mientras que Lactosuero A tiene un valor ligeramente inferior. Esto sugiere que el contenido proteico es más adecuado en Lactosuero B.

#### 3.7.5.9. Calcio (mg/L).

- **Lactosuero A:** 157 mg/L
- **Lactosuero B:** 131 mg/L
- **Norma Codex:** Entre 50 y 170 mg/L.

Ambos lactosueros están dentro del rango establecido, lo que indica niveles adecuados de calcio para la estabilidad del proceso de fermentación y el desarrollo microbiano.

#### 3.7.5.10. Fósforo (mg/L).

- **Lactosuero A:** 64.5 mg/L
- **Lactosuero B:** 65.4 mg/L
- **Norma Codex:** Entre 40 y 70 mg/L.

Ambos lactosueros cumplen con el rango permitido, asegurando un adecuado contenido de fósforo para el crecimiento microbiano durante la fermentación.

#### 3.7.5.11. Cloruros (g/L).

- **Lactosuero A:** 0.20 g/L
- **Lactosuero B:** 0.18 g/L
- **Norma Codex:** No especificado.

Aunque no hay un valor específico en la norma, ambos presentan niveles bajos de cloruros, lo cual es favorable para la fermentación, ya que evita posibles efectos negativos sobre la actividad enzimática y microbiana.

### 3.7.5.12. Aerobios Mesófilos Totales (UFC/mL).

- **Lactosuero A:**  $<1.0 \times 10^1$  UFC/mL
- **Lactosuero B:**  $<1.0 \times 10^1$  UFC/mL
- **Norma Codex:** Menos de 100 UFC/mL.

Ambos lactosueros cumplen ampliamente con el límite microbiológico establecido, lo que asegura que no hay proliferación significativa de microorganismos aerobios.

### 3.7.5.13. Coliformes Totales (UFC/mL).

- **Lactosuero A:**  $<1.0 \times 10^1$  UFC/mL
- **Lactosuero B:**  $<1.0 \times 10^1$  UFC/mL
- **Norma Codex:** Menos de 100 UFC/mL.

Ambos lactosueros cumplen con los estándares microbiológicos, asegurando un bajo riesgo de contaminación fecal.

Los resultados muestran que ambos lactosueros cumplen con la mayoría de los parámetros establecidos en el **Codex STAN 206-1999**, aunque sus características fisicoquímicas indican un proceso de fermentación avanzado. Esto los hace idóneos como materia prima para la producción de ácido láctico. Lactosuero B es particularmente más rico en sólidos y lactosa, lo que podría favorecer un mayor rendimiento en la fermentación.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### CONCLUSIONES.

- Se identificó y analizó el proceso industrial óptimo de fermentación microbiónológica para la producción de ácido láctico, destacando etapas clave como la fermentación, esterificación, purificación, hidrólisis y refinamiento, logrando una pureza superior al 99%. La optimización de parámetros operativos y la recuperación de reactivos garantizan un proceso eficiente, sostenible y rentable, posicionando al ácido láctico como un insumo de alta calidad para diversas industrias.
- El modelado de la cinética de crecimiento de biomasa y producción de ácido láctico demostró que las condiciones experimentales y simuladas son adecuadas para maximizar el rendimiento del proceso. El uso de *Lactobacillus casei* como microorganismo fermentador fue eficaz, y los modelos predictivos pueden ser ajustados para mejorar aún más la productividad.
- A través de la simulación en Aspen Hysys, se logró modelar con éxito el proceso de producción de ácido láctico a partir de lactosuero, integrando todas las fases clave del proceso, como la esterificación, destilación y purificación. La simulación mostró que es posible obtener ácido láctico con una pureza del 99%, lo que demuestra la viabilidad técnica del proceso propuesto.
- Los resultados económicos indicaron que el proceso es rentable a largo plazo. Con un valor presente neto (VPN) de 241.139 US\$ y utilidades anuales de 194.158 US\$, el proyecto tiene un retorno económico favorable. Además, los costos de materias primas y utilities pueden ser optimizados, especialmente al utilizar el lactosuero, que es un subproducto de bajo costo.
- El análisis físico-químico y microbiónológico del lactosuero permitió confirmar su viabilidad como materia prima en la producción de ácido láctico. Los parámetros evaluados, como el contenido de lactosa, sólidos totales y condiciones microbiónológicas, indicaron que el lactosuero es un sustrato adecuado para el proceso de fermentación. En particular, el

Lactosuero B, con su mayor contenido de lactosa y sólidos totales, mostró ser la opción más eficiente.

- El análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del lactosuero, según el Codex STAN 206-1999, confirma su idoneidad para aplicaciones industriales. Ambos lactosueros cumplen con los límites microbiológicos, garantizando su seguridad. Los valores de acidez y pH reflejan un estado fermentado, favorable para la producción de ácido láctico. Lactosuero B, con mayor contenido de lactosa y sólidos totales, destaca por su potencial para maximizar el rendimiento fermentativo. Esto respalda la viabilidad del lactosuero como materia prima eficiente y segura, contribuyendo a un proceso productivo sostenible y rentable.
- El desarrollo de habilidades y destrezas en el manejo operativo de equipos e instrumentos de laboratorio es esencial para asegurar la calidad y precisión de los datos experimentales. Estas competencias permiten realizar con éxito los análisis fisicoquímicos y microbiológicos necesarios para evaluar la materia prima conforme a estándares internacionales, como el Codex STAN 206-1999. Asimismo, este conocimiento práctico fortalece la capacidad de optimizar procesos productivos y garantiza la reproducibilidad y fiabilidad de los resultados en la simulación del proceso industrial.

## **RECOMENDACIONES.**

- Se sugiere realizar estudios adicionales para el proceso a nivel industrial, considerando las condiciones óptimas obtenidas en la simulación. El cual debe incluir el análisis del suministro de lactosuero y la implementación de tecnologías de reciclaje de metanol y agua.
- Para optimizar el rendimiento del proceso de fermentación, se recomienda implementar tecnologías de pretratamiento del lactosuero, especialmente para lactosuero con menor concentración de lactosa (como Lactosuero A), lo que podría mejorar la eficiencia del proceso y reducir la inhibición microbiana.
- Se recomienda la implementación de sistemas de monitoreo y control en tiempo real en el biorreactor, con el fin de ajustar automáticamente parámetros como el pH y la temperatura, para garantizar un proceso de fermentación más eficiente y estable.

- Aunque el proceso es económicamente viable, se sugiere realizar un análisis detallado del impacto ambiental de todo el ciclo de vida del proyecto, incluyendo la gestión de residuos y el consumo de recursos hídricos, para garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Asas, C., Llanos, C., Matavaca, J., & Verdezoto, D. (2021). *El lactosuero: impacto ambiental, usos y aplicaciones vía mecanismos de la biotecnología*. *Agroindustrial Science*, 11(1), 105–116.
- Ayala, M., & Fernández, L. (2020). *Aprovechamiento de lactosuero para la producción de ácido láctico y posibles aplicaciones*. *GIPAMA*, 8(1), 34–45.
- Bai, D. M., Wei, Q., Yan, Z. H., Zhao, X. M., & Li, X. G. (2023). *Fed-batch fermentation of *Lactobacillus lactis* for hyper-production of L-lactic acid*.
- Berenjian, A. (Ed.). (2019). *Essentials in Fermentation Technology*. Springer.
- Cao, Y., & Wu, Y. (2020). *Recent Advances in Lactic Acid Fermentation: Technologies and Applications*. Elsevier.
- Chacón Gurrola, L. R., Chávez-Martínez, A., Rentería-Monterrubio, A. L., & Rodríguez-Figueroa, J. C. (2020). *Proteínas del lactosuero: usos, relación con la salud y bioactividades*. *Interciencia*, 42(11), 748-754.
- Chen, W. (Ed.). (2019). *Lactic Acid Bacteria: Bioengineering and Industrial Applications*. Springer.
- COFOCALEC. (2012). *NMX-F-721-COFOCALEC-2012: Sistema Producto Leche – Alimentos – Lácteos – Suero de Leche (Líquido o en Polvo) – Especificaciones y Métodos de Prueba*. Comité Nacional Sistema Producto Leche.
- Comisión Europea. (2012). Reglamento (UE) n.º 231/2012 de la Comisión, de 9 de marzo de 2012, por el que se establecen especificaciones para los aditivos alimentarios que figuran en los anexos II y III del Reglamento (CE) n.º 1333/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 83, 1–295.
- Datta, R., & Henry, M. (2006). *Lactic acid: recent advances in products, processes and technologies: A review*. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 82, 1119–1129.
- Datta, R., & Henry, M. (2006). *Lactic acid: Recent advances in products, processes, and technologies - A review*. *Biotechnology Advances*, 23(6), 547–651.

- Duar, R. M., Lin, X. B., Zheng, J., & Martino, M. E. (Eds.). (2019). *Lactobacillus Genomics and Metabolic Engineering*. Springer.
- Duncan, S. H., & Holt, J. G. (2021). *Lactic acid bacteria: The food industry and beyond*. Springer.
- Fadda, S. (2021). *Food Microbiology: A Comprehensive Introduction*. Wiley-Blackwell.
- Gänzle, M., & Hertel, C. (Eds.). (2022). *Bacterial Metabolism in Modern Biotechnology*. Springer.
- Gao, M. T., Hirata, M., & Toorisaka, E. (2020). *Production of lactic acid from raw starch by a novel lactic acid bacterium strain*.
- Ghaffar, T., Irshad, M., Anwar, Z., Aqil, T., Zulifqar, Z., Tariq, A., Kamran, M., Ehsan, N., & Mehmood, S. (2024). *Recent trends in lactic acid biotechnology: A brief review on production to purification*. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(2), 222-229.
- Gohil, J. M. (2021). *Membrane Processes: Pervaporation, Vapor Permeation and Membrane Distillation for Industrial Scale Separations*. CRC Press.
- Gómez, M. I. (2019). *Producción de ácido láctico de lactosuero suplementado utilizando Lactobacillus casei*. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*.
- González, G., & Rivas, J. (2011). *Modelación, simulación y control de procesos de fermentación*. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 19(2), 234–245.
- Haydary, J. (2019). *Chemical Process Design and Simulation: Aspen Plus and Aspen Hysys Applications*. Wiley-AIChE.
- Hernández, M., & Vélez, J. (2019). *Suero de leche y su aplicación en la elaboración de alimentos funcionales*. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 8(2), 13–22.
- Huang, Y., & Zhang, L. (2022). *Industrial Biotechnology: Products and Processes*. Academic Press.
- Instituto de Tecnología de Alimentos (ITA). (2024). Universidad de San Francisco Xavier de Chuquisaca. Recuperado de [https://tecnologia.usfx.bo/ita/quienes\\_somos/](https://tecnologia.usfx.bo/ita/quienes_somos/)
- Koohi, A. (2021). *Isomers of lactic acid*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/355521273\\_Isomers\\_of\\_lactic\\_acid](https://www.researchgate.net/publication/355521273_Isomers_of_lactic_acid)

- Kumar, A., & Singh, A. (2020). *Biotechnology of Lactic Acid Production: Advances and Applications*. Academic Press.
- Kurzrock, T., & Weuster-Botz, D. (2010). *Recovery of succinic acid from fermentation broth*. *Biotechnology Letters*, 32(3), 331–339.
- Liaud, N., Rosso, M. N., Fabre, N., Crapart, S., Herpoël-Gimbert, I., Sigoillot, J. C., & Levasseur, A. (2015). *L-lactic acid production by Aspergillus brasiliensis overexpressing the heterologous ldha gene from Rhizopus oryzae*. *Microbial Cell Factories*, 14(1), 1–9.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Bender, K. S., Buckley, D. H., & Stahl, D. A. (2020). *Brock Biology of Microorganisms*. (15<sup>a</sup> ed.). Pearson.
- Mandenius, C.-F. (2022). *Bioreactors: Design, Operation and Novel Applications*. Wiley-VCH.
- Mansour, A. (2020). *Bacterial Fermentation: Advances in Production and Applications*. Nova Science Publishers.
- Monterrubio, H. A. (2015). *Producción de Acetato de n-Propilo por medio de destilación reactiva*. Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.
- Nanfra, L. (2021). *Producción de ácido láctico por vía biotecnológica*. Universidad Juan Agustín Maza.
- Oliveira, J. A. R., Martins, L. H. S., Maciel, M. R. W., & Maciel Filho, R. (2019). *Lactic acid production to purification: A review*. *BioResources*.
- O'Sullivan, J. M. (2022). *Fermentation Technology: Fundamentals and Applications*. Wiley.
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2004). Reglamento (CE) n.º 853/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004 por el que se establecen normas específicas de higiene de los alimentos de origen animal. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 139, 55–205.
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2008). Reglamento (CE) n.º 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2008 sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas, y por el que se modifican y

derogan las Directivas 67/548/CEE y 1999/45/CE y se modifica el Reglamento (CE) n.º 1907/2006. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 353, 1–1355.

- Poveda, E. (2021). *Suero lácteo, generalidades y potencial uso como fuente de calcio de alta biodisponibilidad*. *Revista Chilena de Nutrición*, 40(4), 397–403.
- Prado, O. (2010). *Integration of Bioreactor and Membrane Separation Processes: A model based approach*. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
- Ramírez, G. (2014). Softwares de simulación. Recuperado de: <http://softwaresdesimulacion.blogspot.com/2014/02/software-de-simulacion.html>
- Rogers, P. L., & Lee, K. J. (2021). *Bioprocessing for Biofuels Production*. Wiley.
- Rojas, A. M., Montaña, L. P., & Bastidas, M. J. (2016). *Producción de ácido láctico a partir del lactosuero utilizando *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus**. *Revista Colombiana de Química*, 44(3), 5–10.
- Sánchez, N., Ramírez, D. M., & Zapata, A. D. (2020). *Evaluación de un sistema de fermentación extractiva para la producción de ácido láctico utilizando suero de leche como sustrato*.
- Schenk, C., & Schulz, V. H. (2021). *Existence, Uniqueness and Numerical Modeling of Wine Fermentation Based on Integro-Differential Equations*.
- Seader, J. D., Henley, E. J., & Roper, D. K. (2019). *Separation Process Principles*. (4th ed.). Wiley.
- Secretaría de Salud. (2010). *NOM-243-SSA1-2010: Productos y Servicios. Leche, Fórmula Láctea, Producto Lácteo Combinado y Derivados Lácteos. Disposiciones y Especificaciones Sanitarias. Métodos de Prueba*. *Diario Oficial de la Federación*.
- Serna-Cock, L. (2005). *Producción biotecnológica de ácido láctico: estado del arte*. *Revista Iberoamericana de Polímeros*
- Shuklov, I. A., Dubrovina, N. V., Kühlein, K., & Börner, A. (2020). *Chemo-catalyzed pathways to lactic acid and lactates*. *Advanced Synthesis and Catalysis*.
- Stankiewicz, A. I., & Moulijn, J. A. (2021). *Re-engineering the chemical processing plant: Process intensification*. CRC Press.

- Tian, X., Chen, H., Liu, H., & Chen, J. (2021). *Recent advances in lactic acid production by lactic acid bacteria*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 193(11), 4151–4171.
- Zhang, Y., & Zhao, H. (2023). *Fermentation and Biochemical Engineering Handbook: Principles, Process Design, and Equipment*. Noyes Publications.
- Zhao, Y., & Lu, H. (2023). *Advances in Lactic Acid Production: Technology and Applications*. Springer.

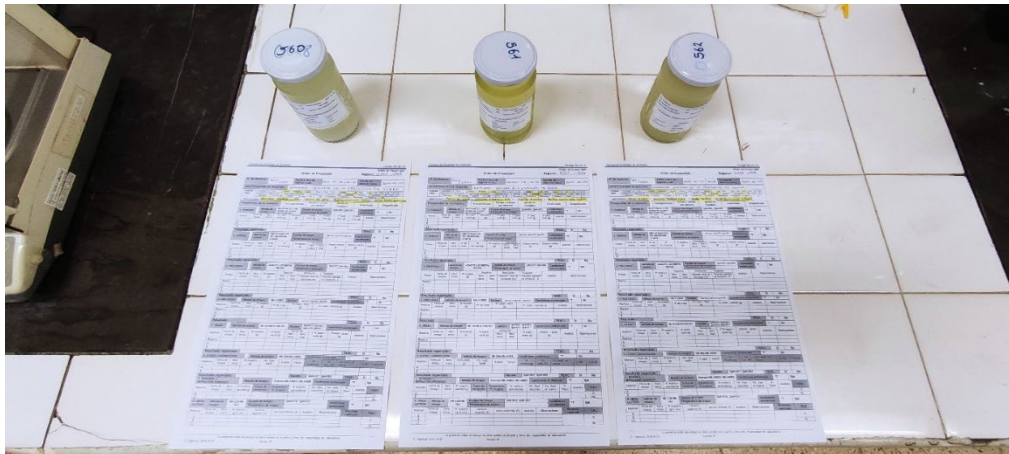
# **ANEXOS**

## ANEXO A

### MUESTRAS DE LACTOSUERO



Muestras de Lactosuero



Recepción de las Muestras en el ITA

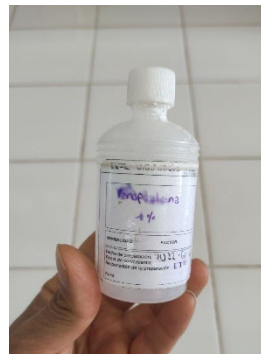
**Fuente:** Elaboración Propia

## ANEXO B

### PROCESO DE DETERMINACIÓN DE ACIDEZ COMO ÁCIDO LÁCTICO



Pesado de las Muestras



Agregado de los Reactivos



Titulación de las Muestras

**Fuente:** Elaboración Propia

## ANEXO C

### PROCESO DE DETERMINACIÓN DE pH



Calibración del Equipo



Homogeneizado de la Muestra



Introducción del Sensor



Lectura de los Resultados



Apagado del Equipo

**Fuente:** Elaboración Propia

## ANEXO D

### PROCESO DE DETERMINACIÓN DE DENSIDAD RELATIVA A 20 °C



Sacado del Instrumento



Homogenizado y Vertido de la Muestra



Introducción del Densímetro en la Muestra



Lectura y Registro del Resultado

**Fuente:** Elaboración Propia

## ANEXO E

### PROCESO DE DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES – HUMEDAD



Pesado de las Muestras



Registro de los Datos



Ingreso al Horno



Enfriado



Pesado y Registro

Fuente: Elaboración Propia

## ANEXO F

### PROCESO DE DETERMINACIÓN DE GRASAS.



Pesado de Muestras Sometido al Calor y Lavado con Agua Destilada



Filtrado de las Muestras



Destilación con Hexano

Secado

Pesado y Registro

Fuente: Elaboración Propia

## ANEXO G

### PROCESO DE DETERMINACIÓN DE PROTEÍNAS



Etapa de Digestión



Etapa de Neutralización y Destilación

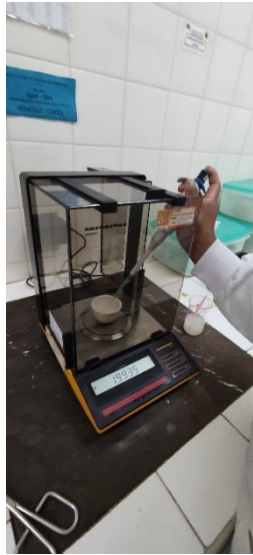


Etapa de Titulación

**Fuente:** Elaboración Propia

## ANEXO H

### PROCESO DE DETERMINACIÓN DE CENIZAS



Pesado de Muestras



Pre Calcinación



Ingreso a la mufla



Enfriado



Pesado y Registro

**Fuente:** Elaboración Propia

## ANEXO I

### PROCESO DE DETERMINACIÓN DE MINERALES



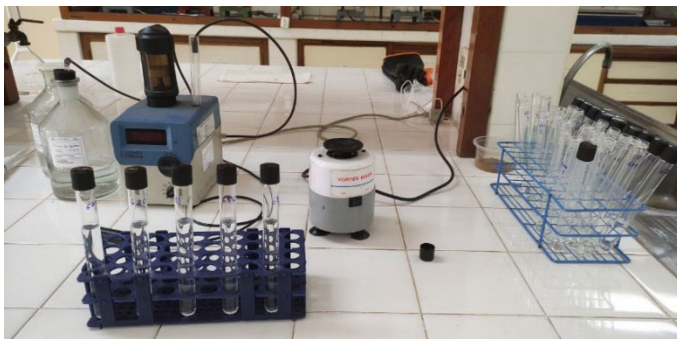
Agregado de Ácido Clorhídrico



Sometido al Calor



Preparación, Lavado, Enrazado y Filtrado de las Muestras



Homogeneización de las muestras



Fuente: Elaboración Propia

## ANEXO J

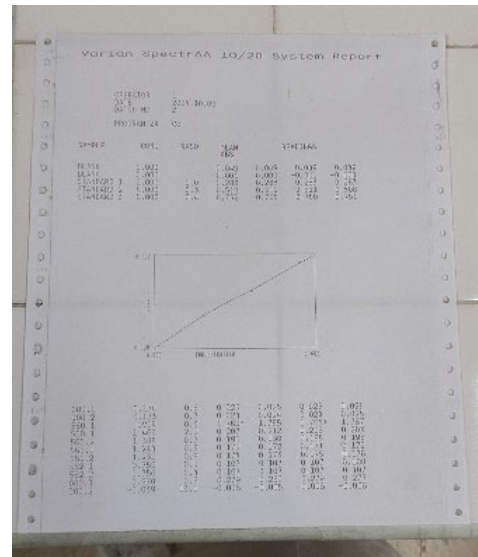
### PROCESO DE DETERMINACIÓN DE CALCIO POR ABSORCIÓN ATÓMICA



Encendido y Calibración del Equipo



Lectura de las Muestras



Resultados

Fuente: Elaboración Propia

## ANEXO K

### PROCESO DE DETERMINACIÓN DE FOSFORO



Preparación de Reactivos



Reactivos y Preparación de las Muestras



Homogeneizado y Reposo en la Oscuridad



Encendido del Equipo y Lecturas

**Fuente:** Elaboración Propia

## ANEXO L

### PROCESO DE DETERMINACIÓN DE CLORUROS



Pesado y Preparación de las Muestras



Agregado de Reactivos



Preparación de la Bureta



Titulación de la Muestra

**Fuente:** Elaboración Propia

# ANEXO M



**UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA**  
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**  
 Fundado el 15 de julio de 1986



N° B-0

ITA-SGC-FO-040.10

**INFORME DE ENSAYO FISICO-QUÍMICO NUTRICIONAL Y TOXICOLÓGICO N°: QAN - 560 / 2024**

N. de Muestra: **QAN/465-560**

N. Solicitud: **465-2024**

Solicitante: UNIV. LUIS ALVARO BARRIENTOS CARVAJAL - CARRERA INDUSTRIA DE ALIMENTOS					
Dirección: Calle Calama N° 125			Teléfono: 69689662		
Producto: LACTOSUERO - DERIVADO DE LA PRODUCCIÓN DE QUESO			N. de Lote: 1		
Cantidad Aprox.: 750 ml		Envase: Plástico	Marca: -----		
Procedencia del Producto: Sucre		Fecha elab/venc.:		FE:2024-09-16 FV:-----	
Muestreado por: Luis Alvaro Barrientos Carvajal		Fecha y hora Muestreo:		2024+09-16 08:30	
Lugar y punto de muestreo:			Mercado Central		
Fecha y hora Recepción en Laboratorio:	2024-10-03 11:00	Fecha y Hora de Ensayo:	2024-10-07 09:30	Fecha de Emisión Informe:	2024-10-10
Condiciones Ambientales de ensayo:		Temperatura °C:	22	Humedad relativa %:	56

Observaciones: La muestra fue recibida en laboratorio con parámetros solicitados por el cliente, mediante formulario ITA-SGC-FO-044.20

**RESULTADOS:**

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	REFERENCIAS*		PRINCIPIO	NORMA DE ENSAYO
			Mínimo	Máximo		
pH	----	4,18	----	----	Potenciométrico	AOAC 981.12
Acidez (como ácido láctico)	g/100g	0,66	----	----	Volumétrico	NB 229
Cloruro de sodio	g/100g	0,20	----	----	Volumétrico	Pearson 1996
Materia grasa	g/100g	0,02	----	----	Gerber	NB 228
Proteínas N°6,38	g/100g	0,52	----	----	Volumétrico	AOAC 991.20
Sólidos totales	g/100g	5,26	----	----	Gravimétrico	NB 231:1
Cenizas	g/100g	0,68	----	----	Gravimétrico	NB 231:2
Fósforo	mg/100g	64,5	----	----	Espectro UV/Vis	AOAC 986.24
Calcio	mg/100g	157	----	----	Espectro AA	AOAC 985.35
Densidad relativa a 20 °C	----	1.023	----	----	Lactodensímetro	NB 230

N° de Registro de datos: ITA-SGC-FO-101.10 - 0560-2024

NOTA 1.- Los resultados reportados en la tabla se refieren unicamente a la muestra ensayada en laboratorio

(\* Ref. No existe norma boliviana especifica para el (los) parámetro (s) solicitado (s) en la muestra analizada.

Analista: M.M.G. - A.H.R



*M. Moya*  
 Lic. Mabel Moya Gonzales  
 RESPONSABLE #1  
 LAB. QUIM. DE ALIMENTOS  
 NUTRIENTES Y TOXICOLOGIA  
 INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS  
 U.M.R.P.S.F.X. C<sup>14</sup>



*Eduardo Rivero Zurita*  
 Ing. Eduardo Rivero Zurita  
 DIRECTOR  
 INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS #1  
 U.M.R.P.S.F.X. C<sup>14</sup>



NOTA: El presente informe de ensayo no puede ser reproducido total o parcialmente sin la autorización del ITA.

F. de Vigencia 2019-01-01

Version 08

Dirección: Barrio Israel s/n (Zona Qara Punku) Teléfono: Fax (591) (4)6462672 63738940  
 Email: ita.laboratorio@usfx.bo Web: tecnologia.usfx.bo/ita Casilla de correo No 369 Sucre - Bolivia

Fuente: ITA, 2024

# ANEXO N



**UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA**  
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA  
**INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**  
 Fundado el 15 de julio de 1986



N° B-0

ITA-SGC-FO-040.10

INFORME DE ENSAYO FÍSICO-QUÍMICO NUTRICIONAL Y TOXICOLÓGICO N°: QAN - 561 / 2024					
N. de Muestra:		QAN/465-561		N. Solicitud:	
				465-2024	
Solicitante: UNIV. LUIS ALVARO BARRIENTOS CARVAJAL - CARRERA INDUSTRIA DE ALIMENTOS					
Dirección: Calle Calama N° 125			Teléfono: 69689662		
Producto: LACTOSUERO - DERIVADO DE LA PRODUCCIÓN DE QUESO			N. de Lote: 2		
Cantidad Aprox.: 750 ml		Envase: Plástico		Marca: -----	
Procedencia del Producto: Sucre			Fecha elab/venc.:		FE:2024-09-18 FV:-----
Muestreado por: Luis Alvaro Barrientos Carvajal		Fecha y hora Muestreo:		2024 -09-18 08:30	
Lugar y punto de muestreo: Plaza 25 de mayo					
Fecha y hora Recepción en Laboratorio: 2024-10-03 11:00		Fecha y Hora de Ensayo: 2024-10-07 09:48		Fecha de Emisión Informe: 2024-10-10	
Condiciones Ambientales de ensayo:		Temperatura °C: 23		Humedad relativa %: 54	

Observaciones: La muestra fue recibida en laboratorio con parámetros solicitados por el cliente, mediante formulario ITA-SGC-FO-044.Z0

**RESULTADOS:**

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	REFERENCIAS*		PRINCIPIO	NORMA DE ENSAYO
			Mínimo	Máximo		
pH	----	3,81	----	----	Potenciométrico	AOAC 981.12
Acidez (como ácido láctico)	g/100g	0,89	----	----	Volumétrico	NB 229
Cloruro de sodio	g/100g	0,18	----	----	Volumétrico	Pearson 1996
Materia Grasa	g/100g	0,09	----	----	Gravimétrico	NB 103
Proteínas N*6,38	g/100g	0,71	----	----	Volumétrico	NB 076
Sólidos totales	g/100g	14,0	----	----	Gravimétrico	NB 231:1
Cenizas	g/100g	0,62	----	----	Gravimétrico	NB 075
Fósforo	mg/100 g	65,4	----	----	Espectro. UV/VIS	AOAC 986.24
Calcio	mg/100 g	131	----	----	Espectro. AA	NB 312011
Densidad relativa a 20 °C	----	1,060	----	----	Lactodensímetro	NB 230

N° de Registro de datos: ITA-SGC-FO-101.10 - 0561-2024

NOTA 1.- Los resultados reportados en la tabla se refieren unicamente a la muestra ensayada en laboratorio

(\*) Ref. No existe norma boliviana especifica para el (los) parámetro (s) solicitado (s) en la muestra analizada.

Analista: M.M.G. - A.H.R



*Mabel Moya Gonzales*  
 Lic. Mabel Moya Gonzales  
 RESPONSABLE a.i.  
 LAB. QUÍMICA DE ALIMENTOS  
 NUTRIENTES Y TOXICOLOGÍA  
 INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS - ITA  
 U.M.R.P.S.F.X.C.H.



*Ing. Eduardo Rivero Zurita*  
 Ing. Eduardo Rivero Zurita  
 DIRECTOR  
 INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS - ITA  
 U.M.R.P.S.F.X.C.H.



NOTA: El presente informe de ensayo no puede ser reproducido total o parcialmente sin la autorización del ITA.

F. de Vigencia 2019-01-01

Version 08

Dirección: Barrio Israel s/n (Zona Qara Punku) Teléfono: Fax (591) (4)6462672 63738940  
 Email: ita.laboratorio@usfx.bo Web: tecnologia.usfx.bo/ita Casilla de correo No 369 Sucre - Bolivia

Fuente: ITA, 2024

# ANEXO O



**UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA**  
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**  
 Fundado el 15 de julio de 1986



N° A-0

ITA-SGC-FO-040.10

**INFORME DE ENSAYO MICROBIOLÓGICO Y TOXICOLÓGICO N°: MIC - 608 / 2024**

N. de Muestra: <b>MIC/465-608</b>		N. Solicitud: <b>465-2024</b>	
Solicitante:	UNIV. LUIS ALVARO BARRIENTOS CARVAJAL - CARRERA INDUSTRIA DE ALIMENTOS		
Dirección:	Calle Calama N° 125	Teléfono:	69689662
Producto:	LACTOSUERO - DERIVADO DE LA PRODUCCIÓN DE QUESO		N. de Lote: 1
Cantidad Aprox.:	750 ml	Envase:	Plástico
Procedencia del Producto:	Sucre	Fecha elab/venc.:	FE:2024-09-16 FV:.....
Muestreado por :	Luis Alvaro Barrientos Carvajal	Fecha y hora Muestreo:	2024+-09-16 08:30
Lugar y punto de muestreo:	Mercado Central		
Fecha y hora Recepción en Laboratorio:	2024-10-03 11:00	Fecha y Hora de Ensayo:	2024-10-03 11:50
Condiciones Ambientales de ensayo:	Temperatura °C:	18,3	Humedad relativa %:
			48,0

Observaciones: La muestra fue recibida en laboratorio con parámetros solicitados por el cliente, mediante formulario ITA-SGC-FO-044.20

**RESULTADOS:**

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	REFERENCIAS*		PRINCIPIO	NORMA DE ENSAYO
			(m)	(M)		
Aerobios mesófilos totales	UFC/ml	<1,0x10 <sup>1</sup>	----	----	Recuento en placa	NB 32003
Coliformes totales	UFC/ml	<1,0x10 <sup>1</sup>	----	----	Recuento en placa	NB 32005

N° de Registro de datos: ITA-SGC-FO-048.10 - 0531/2024

NOTA 1.- Los resultados reportados en la tabla se refieren unicamente a la muestra ensayada en laboratorio

NOTA 2.- Los resultados reportados <3 y <1,0\*10<sup>1</sup> g o ml significa sin proliferación en la mínima dilución.

(\*) Ref. No existe norma boliviana específica para el (los) parámetro (s) solicitado (s) en la muestra analizada.

Analista: LEN.



NOTA: El presente informe de ensayo no puede ser reproducido total o parcialmente sin la autorización del ITA.

F. de Vigencia 2019-01-01

Version 08

Dirección: Barrio Israel s/n (Zona Qara Punku) Teléfono: Fax (591) (4)6462672 63738940  
 Email: ita.laboratorio@usfx.bo Web: tecnologia.usfx.bo/ita Casilla de correo No 369 Sucre - Bolivia



Fuente: ITA, 2024

# ANEXO P



**UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA**  
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**  
 Fundado el 15 de julio de 1986



Nº A-0

ITA-SGC-FO-040.10

## INFORME DE ENSAYO MICROBIOLÓGICO Y TOXICOLÓGICO Nº: MIC - 609 / 2024

N. de Muestra: **MIC/465-609**

N. Solicitud: **465-2024**

Solicitante:	UNIV. LUIS ALVARO BARRIENTOS CARVAJAL - CARRERA INDUSTRIA DE ALIMENTOS				
Dirección:	Calle Calama Nº 125		Teléfono: 69689662		
Producto:	LACTOSUERO - DERIVADO DE LA PRODUCCIÓN DE QUESO			N. de Lote: 2	
Cantidad Aprox.:	750 ml	Envase:	Plástico	Marca: .....	
Procedencia del Producto:	Sucre		Fecha elab/venc.: FE:2024-09-18 FV:.....		
Muestreado por:	Luis Alvaro Barrientos Carvajal		Fecha y hora Muestreo: 2024 -09-18 08:30		
Lugar y punto de muestreo:	Plaza 25 de mayo				
Fecha y hora Recepción en Laboratorio:	2024-10-03 11:00	Fecha y Hora de Ensayo:	2024-10-03 11:50	Fecha de Emisión Informe:	2024-10-09
Condiciones Ambientales de ensayo:	Temperatura °C:		18,3	Humedad relativa %:	48,0

Observaciones: La muestra fue recibida en laboratorio con parámetros solicitados por el cliente, mediante formulario ITA-SGC-FO-044.20

### RESULTADOS:

PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	REFERENCIAS*		PRINCIPIO	NORMA DE ENSAYO
			(m)	(M)		
Aerobios mesófilos totales	UFC/ml	<1,0x10 <sup>-1</sup>	----	----	Recuento en placa	NB 32003
Coliformes totales	UFC/ml	<1,0x10 <sup>-1</sup>	----	----	Recuento en placa	NB 32005

Nº de Registro de datos: ITA-SGC-FO-048.10 - 0532/2024

NOTA 1.- Los resultados reportados en la tabla se refieren únicamente a la muestra ensayada en laboratorio

NOTA 2.- Los resultados reportados <3 y <1,0\*10<sup>-1</sup> g o ml significa sin proliferación en la mínima dilución.

(\* Ref. No existe norma boliviana específica para el (los) parámetro (s) solicitado (s) en la muestra analizada.

Analista: LEN.

Lic. SIESIN M. Vega Olmos,  
 RESPONSABLE LABORATORIO  
 MICROBIOLOGIA  
 INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS  
 U.M.R.P.S.F.X.CH.



Ing. Eduardo Rivero Zurita  
 DIRECTOR  
 INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS - ITA  
 U.M.R.P.S.F.X.CH.



NOTA: El presente informe de ensayo no puede ser reproducido total o parcialmente sin la autorización del ITA.

F. de Vigencia 2019-01-01

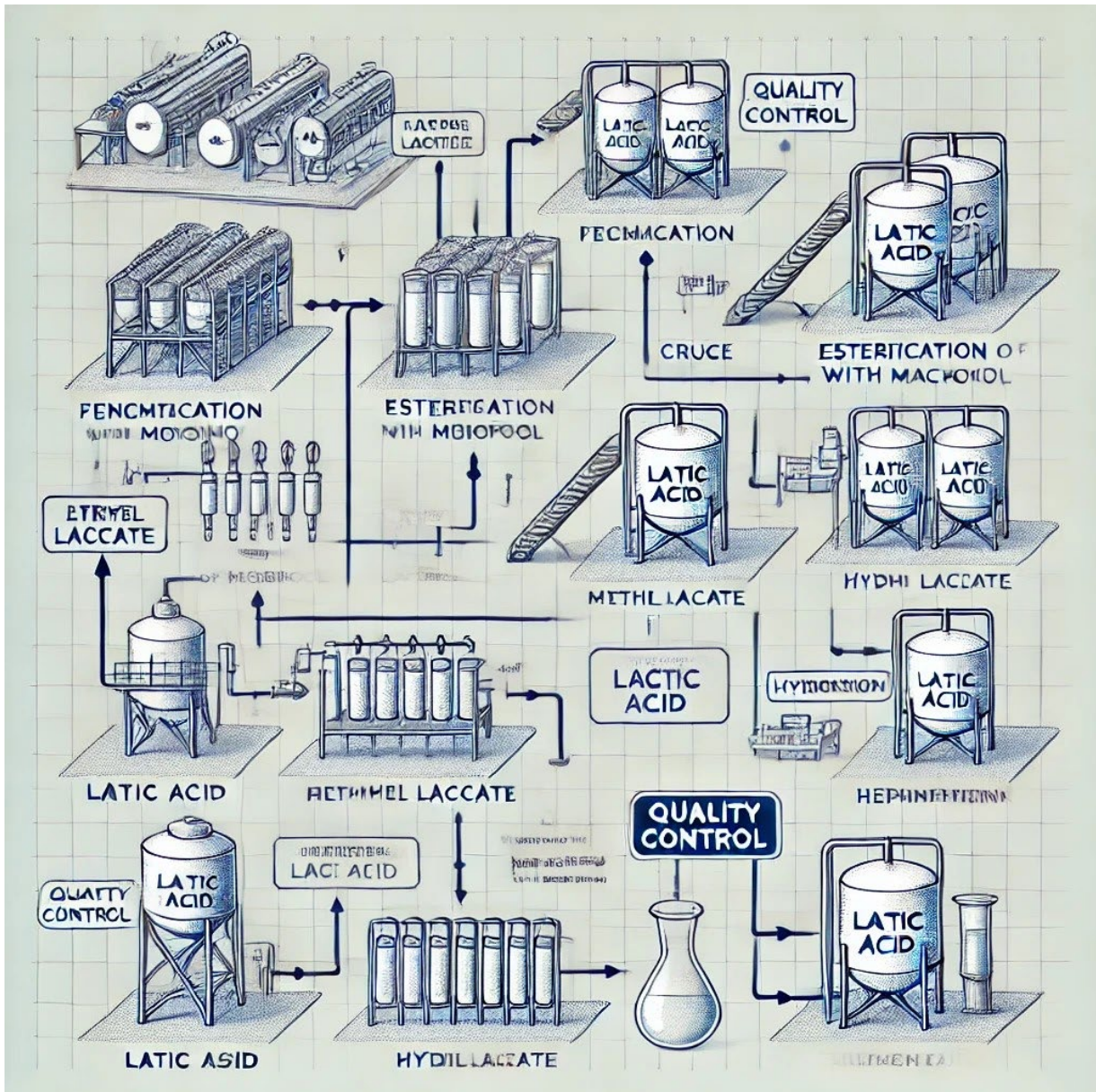
Version 08

Dirección: Barrio Israel s/n (Zona Qara Punku) Teléfono: Fax (591) (4)6462672 63738940  
 Email: ita.laboratorio@usfx.bo Web: tecnologia.usfx.bo/ita Casilla de correo No 369 Sucre - Bolivia

Fuente: ITA, 2024

## ANEXO Q

### DIAGRAMA DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ÁCIDO LÁCTICO



Fuente: Elaboración Propia