



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**FACTIBILIDAD TÉCNICO – ECONÓMICA DE LA OBTENCIÓN DE ETANOL  
A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS.**

**Tutor Académico**

**Prof. Juan Cristóbal García**

**Co- tutor Académico**

**Prof. María Eugenia León**

**Autores**

**Alejandro Arzola**

**Nayrí Echenique**

Valencia, Noviembre de 2008.



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**FACTIBILIDAD TÉCNICO – ECONÓMICA DE LA OBTENCIÓN DE ETANOL  
A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS.**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO QUÍMICO**

**Tutor Académico**  
Prof. Juan Cristóbal García  
**Co- tutor Académico**  
Prof. María Eugenia León

**Autores**  
Alejandro Arzola  
Nayrí Echenique

Valencia, Noviembre de 2008.



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



### CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para estudiar el Trabajo Especial de Grado, titulado: **“FACTIBILIDAD TÉCNICO – ECONÓMICA DE LA OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS”**, realizado por los bachilleres Nayrí R. Echenique R. de C.I. 16.269.142 y Alejandro Arzola R. de C.I. 16.132.232, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo, y que no nos hacemos responsables de su contenido, pero lo encontramos correcto en su forma y presentación.

---

Prof. Juan Cristóbal García  
**Presidente**

---

Prof. Rubén Matos  
**Jurado**

---

Prof(a). Irina León  
**Jurado**

Valencia, Noviembre de 2008.



---

## **AGRADECIMIENTO**

*Entender que este momento llegaría hace unos meses atrás era difícil concebir, siempre se debe tener confianza, constancia y sobre todo fe en **DIOS** de que las cosas con esfuerzos y bien encaminadas con mucha labor generan frutos que hoy se están cosechando en forma de éxito, a medida que el tiempo pasa las vivencias sean malas o buenas siempre dejan esa huella que se convierte en experiencia; que sirve para crecer como seres humanos y tener esa valentía y ese coraje para lograr alcanzar esta meta tan importante de ser ingeniero químico el cual está dedicado a **DIOS** primeramente y a todas aquellas personas que estuvieron apoyándome en todo momento y que sabían que era solo cuestión de tiempo y dedicación para alcanzar esta meta...**GRACIAS***

***A todos mis compañeros y amigos de clase de la escuela que son muchos; Ismeglys (Landa), Paola, Betty, Livi, Migue, Peter, Richard, Nacho, Eudy... a mis podris lindas: Dismar, Nasly, Mariu, Yosme, Neyla...de igual forma a mi hermano José Vicente; a todos los que no nombre también les agradezco por ser parte importante de una de las mejores etapas de mi vida y gracias por todos los momentos compartidos.***

***A mi tutor Juan Cristóbal García y co-tutor académico María Eugenia León** gracias por su incansable paciencia, sus concomimientos y palabras de aliento para lograr esta meta.*

***A el Ing. Eduardo Malpica** mis más sinceros agradecimientos quien sin interés fue uno de los puntos de apoyo tanto en conocimientos como en ayuda en todos los sentidos para lograr esta investigación...gracias por todo te aprecio*

---



---

***A los Profesores, María Modroño, Jon Aguinaco, María del Carmen Rodríguez, Tony Espinoza, Evelyn Yamal, Vicky Mujica, entre otros, gracias por su preocupación por ayudarnos en esta etapa y por todos sus valiosos conocimientos que ayudaron a formarme como profesional.***

***A todos sinceramente gracias y que DIOS los bendiga***

***Alejandro Arzola Ramírez***





---

## **AGRADECIMIENTO**

*Cuando comencé mi camino por esta carrera llegué a un mundo completamente nuevo, constituido por esta prestigiosa casa de estudios, llena de sueños e ilusiones persiguiendo una de las metas más importantes en mi vida: conseguir mi título de Ingeniero Químico, hoy estoy a un paso de lograrlo y nunca imagine que en este camino iba a encontrar tantos amigos, ángeles y a vivir tantas cosas que me han hecho ser quien soy y llegar hasta donde estoy, por ello no me queda más que agradecerle a Dios y a todos los que me han acompañado y apoyado en los buenos y malos momentos de esta maravillosa aventura.... Un millón de gracias por enseñarme a nunca rendirme, a levantarme cuando me caigo y a sacar de todo un aprendizaje!!!...*

***A Dios y a la virgen santísima,*** por guiarme a lo largo de mi vida e iluminarme en esta importante etapa siendo siempre esa mano que me ayudo a levantarme.

***A los tutores el ingeniero Juan Cristóbal García y la ingeniero María Eugenia León*** por prestar sus conocimientos quienes nos guiaron en la realización de este trabajo de grado.

***A los profesores Tony Espinoza, María del Carmen Rodríguez, Evelyn Yamal, María Modroño y Vicky Mujica,*** por dedicar parte de su tiempo a escucharnos, aconsejarnos y ayudarnos en el desarrollo de este maravilloso trabajo.

***Al profesor Tony Espinoza*** por darnos esas palabras de aliento que no nos permitieron desfallecer y nos animaron a seguir adelante aun cuando las cosas parecieran complicarse.

---



---

**Al profesor y amigo el Ingeniero Jon Aguinaco**, por soportarnos y brindarnos su más valiosa colaboración y oportunas soluciones.

**Al ingeniero Eduardo Malpica**, por que sin su desinteresada ayuda, múltiples conocimientos y valiosos consejos no hubiese sido posible realizar este proyecto de verdad mil gracias y éxitos para ti.

**Al ingeniero Janusz Iwanowski** por su colaboración para la culminación de esta meta.

**A las secretarias de la escuela de Ingeniería Química**, por su diligente gestión.

**A la Profesora Olga Martínez Seijas**, directora de la escuela de Ingeniería Química, por su comprensión y colaboración.

**A todos mis compañeros y amigos** que estudiaron y compartieron conmigo innumerables momentos maravillosos y que nunca olvidare, a **Edenys, Nelsy, mi Linda, Ma. Carolina, Yosmery, Pedro, Daniela, Claigdoly, Miguel Ángel (mi gordo), Nacho, Neyla, Richard, Eudy, Dismar, Mariu, Nasly, Roberto, Jorly** y a todos los que me falta por nombrar porque son muchos, a todos gracias mis amores los quiero muchísimo... cuidense y el mejor de los éxitos para todos nosotros!!!

Finalmente **a todos los profesores** que contribuyeron a mi formación como profesional.

**A todos Gracias y mil bendiciones!!...**

**Nayrí Rosana Echenique Rivas**

---



---

## **DEDICATORIA**

**A Dios**, por acompañarme siempre, por darme fuerza y no dejarme desistir en los momentos difíciles **¡finalmente tu tiempo es perfecto!**

**A la santísima Virgen**, por tomarme siempre entre sus brazos y con su amor de madre ayudarme a seguir siempre hacia adelante.

**A mis Padres**, por quererme y confiar en mí. Gracias por haberme dado todo para llegar hasta aquí, sin ustedes no lo hubiese logrado.

**A mi hermana**, porque es parte esencial en mi vida.

**A mi familia, en especial a mis tías y primas**, por estar cerca en todo momento y darme ánimo.

**A ti Carla**, porque además de ser mi amiga fuiste mi cómplice en muchos momentos de mi vida.

**Al ingeniero Enrique Flores**, por ser un profesor, amigo y un gran apoyo en mi lucha por esta maravillosa carrera.

**A ti Fabiola**, por abrirme las puertas de tu casa y de tu corazón, gracias por tu apoyo y cariño.

**A mis amigos Antonio, Ángela, Carla, Corina y leivi...** los mejores amigos, quienes de una forma u otra han sido parte de este logro en mi vida.

**A Alejandro**, por acompañarme en este reto y por tu apoyo en momentos difíciles.

**A ti José Miguel** por ser quien no me dejó desistir al final, por recordarme que siempre debo pensar en positivo y por devolverle tantas cosas bellas a mi vida tqm.

---



---

**A mis seres queridos** que no me acompañan físicamente, pero sí en espíritu.

Y a todos aquellos que de una forma u otra colaboraron para que este sueño se hiciera realidad y me enseñaron a luchar por lo quiero y a no rendirme por muy difícil que parecieran las cosas, como dicen por ahí **“si se quiere, se puede”**...

**Nayrí Rosana Echenique Rivas**

---



---

## **DEDICATORIA**

**A mi DIOS y a JESUCRISTO**, que siempre han estado a mi lado y que nunca me han dejado solo tanto en los momentos buenos como en los malos.

**A mi maravillosa madre ESTELA** que siempre ha servido para mi vida como ancla siendo capaz de crear al ser que soy con virtudes y defectos como todos; pero con una fuerte convicción de que las metas se cumplen con constancia y que el único límite en la vida solo está en tu mente...te amo mami

**A mis hermanos ALFONSO y ESTEFANÍA** quienes aparte de ser unos maravillosos hermanos son mis mejores amigos y me han apoyado en todo momento...los amo.

**A mi papa** a quien a pesar de todo debo agradecerle por su ayuda a lograr este gran triunfo.

**A mis tías; Maribel, Auristela, Milagro, Argelia, Betty, Zaida...**muchas gracias por siempre estar dándome ese apoyo incondicional durante toda la carrera.

**A mis primos; Karen, Isabel, Víctor, Jesús, Jorge, lisbeth...**gracias por impulsarme con su apoyo y demostrarle a todos el orgullo que sienten por mí... los quiero mucho.

**A Nelsy Seijas** quien más que una amiga ha sido mi hermana durante gran parte de la carrera, juntos compartimos muchos momentos difíciles y alegres, en fin debo agradecerle a DIOS por enviarte a compartir este reto de ser ingeniero a mi lado...gracias por existir

**A Nay** quien se convirtió en otra protagonista para alcanzar este gran sueño y que a pesar de que existieron momentos de mucha tensión, stress, ganas de flaquear siempre existió su ánimo y su apoyo para por

---



---

*fin lograr culminar con éxito esta investigación que empezó hace un año y que parecía ser imposible de lograr...gracias Nayrí por ser parte de este sueño convertido en éxito, te quiero mucho...*

**A tres de mis mejores amigos** con los cuales compartí momentos inolvidables durante la carrera, **Claudia, Jorly y Roberto**...los quiero mucho y gracias por también estar a mi lado durante esta aventura universitaria.

**Alejandro Arzola Ramírez**

---



## RESUMEN

En la actualidad debido al calentamiento global y el protocolo de Kioto, está en boga la tendencia de utilizar bioetanol como una fuente alternativa de combustibles y como aditivo para la gasolina para mejorar sus propiedades, ya que las mezclas de etanol – gasolina permiten aumentar la compresión en el motor, dan un funcionamiento más regular, su recalentamiento es menor y por tanto se puede utilizar a un mayor número de revoluciones y además reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por la ignición de los combustibles fósiles.

Las mezclas de gasolina etanol son cada vez más usadas y las más comunes son E5, E10, E85, E95 y E100; la mezcla E5 significa una mezcla del 5% de Bioetanol y el 95% de gasolina normal y así va aumentando respectivamente la proporción del etanol y disminuyendo la de la gasolina hasta llegar a la E100 que es 100% bioetanol.

La obtención del etanol puede darse de dos maneras fundamentalmente: por hidratación del etileno o bien por fermentación de madera, los desechos municipales y los desperdicios forestales, de cereales básicos como maíz, trigo, cebada, sorgo y de melazas de caña de azúcar y remolacha, las fuentes constituidas por alimentos comprometen la seguridad alimentaria de las regiones que produzcan etanol por estas vías, por esa razón se presenta esta investigación como una alternativa en teoría viable para la obtención de etanol que no compromete los cultivos con fines alimenticios

Los objetivos de esta investigación condujeron al desarrollo de una metodología que abarca las siguientes etapas: identificación de los desechos orgánicos que sirvan como materia prima para obtener etanol, identificación y selección de las tecnologías para la producción y purificación del bioetanol, determinación de las mejores condiciones de operación para la fermentación y la destilación, estudio de factibilidad técnica y económica de la implementación del diseño propuesto, y, por último, la evaluación del impacto ambiental del proceso propuesto.



Los aportes más destacados de este trabajo se centran en la mejora de las condiciones de operación a escala de laboratorio para la obtención y purificación de etanol con los recursos disponibles en el Laboratorio de Ingeniería Química. De igual manera la propuesta de una tecnología de producción de etanol que es técnica, económica y ambientalmente factible.

En base a los resultados obtenidos se puede concluir que la temperatura de fermentado más adecuada para la producción de etanol a partir de los desechos de piña es el rango comprendido entre (30 – 35)°C por producirse durante esta operación mas alcohol y en la mitad del tiempo requerido por el rango comprendido entre (35 – 40)°C.

Bajo los resultados alcanzados, se recomienda que el etanol obtenido a escala de laboratorio por tener solo 50% de pureza no puede ser usado como biocombustible, debe ser purificado nuevamente y para ello se propone pasar el alcohol obtenido por una columna de destilación con el mismo diámetro que la empleada pero con una altura de 9 m para aumentar el porcentaje de etanol por lo menos a 90% y luego pasarlo por un tamiz molecular para llevarla hasta 97 o 99% de pureza.

---



## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	
<b>1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	3
<b>1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA</b> .....	5
1.2.1 Situación actual.....	6
1.2.2 Situación deseada.....	6
<b>1.3 OBJETIVOS</b> .....	7
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos.....	7
<b>1.4 JUSTIFICACIÓN</b> .....	8
<b>1.5 LIMITACIONES</b> .....	9
<b>CAPÍTULO 2. MARCO REFERENCIAL</b>	
<b>2.1 ANTECEDENTES</b> .....	10
<b>2.2 BASES TEÓRICAS</b> .....	15
2.2.1 Bioetanol.....	15
2.2.1.1 Pre-tratamiento de la biomasa.....	18
2.2.1.2 Hidrólisis.....	18
2.2.2 Fermentación.....	22



---

2.2.2.1 Tipos de fermentación.....	23
2.2.2.1.a Fermentación acética.....	23
2.2.2.1.b Fermentación alcohólica.....	23
2.2.2.2.c Fermentación butírica.....	27
2.2.2.2.d Fermentación de la glicerina.....	27
2.2.2.2.e Fermentación láctica.....	27
2.2.2.2.f Fermentación pútrida.....	27
2.2.2.2 Factores que afectan a la fermentación alcohólica.....	28
2.2.2.2.a Levaduras de inicio de reacción.....	32
2.2.2.2.b Levaduras de poder fermentativo medio-alto.....	33
2.2.2.2.c Levaduras de elevado poder fermentativo.....	33
2.2.2.3 Condiciones para la Fermentación alcohólica.....	33
2.2.2.3.a Temperatura.....	33
2.2.2.3.b Aireación.....	34
2.2.2.3.c pH.....	34
2.2.2.3.d Nutrientes y activadores.....	34
2.2.2.3.e Inhibidores.....	35
2.2.2.3.f Concentración inicial de azúcares.....	35
2.2.2.4 Fermentación discontinua.....	36
2.2.2.4.a Fase de latencia.....	37
2.2.2.4.b Fase exponencial.....	37
2.2.2.4.c Fase estacionaria.....	37

---

---



---

2.2.2.4.d Fase de muerte.....	37
2.2.2.5 Fermentación alimentada (FED – Batch).....	38
2.2.2.6 Fermentación continua.....	39
2.2.2.7 Reactores de enzimas o células inmovilizadas.....	41
2.2.3 Destilación.....	41
2.2.3.2 Destilación simple.....	44
2.2.3.3 Destilación fraccionada.....	46

### **CAPÍTULO 3. MARCO METODOLOGICO**

<b>3.1 METODOLOGIA.....</b>	<b>49</b>
3.1.1 Selección de la materia prima a emplear.....	49
3.3.1.1 Identificación de los diferentes desechos orgánicos.....	49
3.3.1.2 Determinación de los criterios de estudio para cada desecho.....	50
3.3.1.3 Selección de la alternativa final.....	51
3.1.2 Selección de la tecnología de fermentación.....	54
3.1.2.1 Identificación de las tecnologías de fermentación.....	54
3.1.2.2 Determinación de los criterios de estudio para cada tecnología.....	55
3.1.2.3 Selección de la alternativa final.....	55
3.1.3 Selección de la tecnología de purificación de etanol.....	57
3.1.3.1 Identificación de las tecnologías de purificación.....	58
3.1.3.2 Determinación de los criterios de estudio para cada tecnología.....	58
3.1.3.3 Selección de la alternativa final.....	59

---

---



---

3.1.4	Determinación de las mejores condiciones de operación para la obtención de etanol vía fermentativa.....	62
3.1.4.1	Variables involucradas en el proceso.....	62
3.1.4.1.a	Identificación de la variable de respuesta.....	63
3.1.4.1.b	identificación de los factores que influyen en el proceso.....	63
3.1.4.1.c	Selección del tipo de diseño de experimentos a utilizar.....	64
3.1.4.1.d	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	64
3.1.4.2	Desarrollo experimental del proceso de fermentación para la obtención del etanol.....	65
3.1.4.2.a	Método operatorio para la fermentación de la materia prima.....	65
3.1.5	Determinar las mejores condiciones de operación para la purificación del etanol.....	67
3.1.5.1	Ensayos pre-experimentales.....	67
3.1.5.2	Establecimiento de las variables involucradas en el proceso.....	68
3.1.5.2.a	Identificación de la variable respuesta.....	69
3.1.5.2.b	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	69
3.1.5.3	Desarrollo experimental del proceso de purificación del etanol obtenido.....	70
3.1.5.3.a	Método operacional para la purificación del etanol mediante destilación simple.....	71
3.1.6	Evaluar técnica y económicamente el proceso para determinar su factibilidad de implantación.....	72
3.1.6.1	Factibilidad técnica del proceso.....	72
3.1.6.1.a	Establecimiento de factores.....	72
3.1.6.1.b	Análisis de los factores.....	73
3.1.6.2	Factibilidad económica del proceso.....	73

---

---



---

3.1.6.2.a Estudio de mercado.....	73
3.1.6.2.b Propuesta para la obtención y purificación de etanol.....	74
3.1.6.2.c Determinar la capacidad del proceso.....	74
3.1.6.2.d Estimar el costo económico para la ejecución practica del sistema.....	74
3.1.6.2.e Establecer los beneficios que genera el proceso de producción.....	74
3.1.7 Evaluación ambiental del proceso para determinar su factibilidad de implantación.....	75

## **CAPÍTULO 4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

<b>4.1 SELECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA A UTILIZAR.....</b>	<b>82</b>
4.1.1 Criterios considerados para la selección de la materia prima.....	82
4.1.2 Matriz aplicada para la selección de la materia prima.....	85
<b>4.2 SELECCIÓN DE LA TECNOLOGIA DE FERMENTACIÓN.....</b>	<b>85</b>
4.2.1 Selección de la alternativa más favorable a fin de fermentar la materia prima previamente seleccionada.....	86
4.2.2 Criterios considerados para la selección de la tecnología de producción.....	87
4.2.3 Matriz aplicada para la selección de la tecnología de producción.....	88
<b>4.3 SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE PURIFICACIÓN DE ETANOL.....</b>	<b>89</b>
4.3.1 Criterios considerados para la selección de la tecnología de purificación.....	89
4.3.2 Matriz aplicada para la selección de la tecnología de purificación.....	91
<b>4.4 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN.....</b>	<b>92</b>
4.4.1 Identificación de los factores que influyen en el proceso.....	92

---

---



---

4.4.2	Determinación de las condiciones del sistema para lograr una fermentación efectiva del sustrato en estudio.....	93
4.4.2.1	Ensayos pre-experimentales.....	93
4.4.2.2	Desarrollo experimental del proceso de fermentación.....	97
4.4.2.3	Análisis de resultados.....	98
<b>4.5</b>	<b>DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL SISTEMA PARA LOGRAR UNA SEPARACIÓN EFECTIVA DE LOS COMPONENTES INVOLUCRADOS EN LA MEZCLA.....</b>	<b>111</b>
4.5.1	Ensayos pre-experimentales.....	111
4.5.2	Desarrollo experimental del proceso de purificación del bioetanol.....	113
4.5.3	Proceso de destilación simple por carga.....	113
4.5.4	Análisis de los valores de composición molar de etanol obtenidos en el destilado acumulado.....	114
<b>4.6</b>	<b>EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE DICHO PROCESO PARA DETERMINAR SU FACTIBILIDAD DE IMPLANTACIÓN.....</b>	<b>120</b>
4.6.1	Factibilidad técnica del montaje realizado en el laboratorio.....	120
4.6.2	Factibilidad económica.....	123
4.6.2.1	Estudio de mercado internacional.....	123
4.6.2.2	Evaluación costo-beneficio del sistema realizado a escala de laboratorio.....	125
4.6.2.3	Propuesta para la obtención y purificación del bioetanol.....	128
4.6.2.3.a	Diseño de la torre de destilación a emplear en la propuesta para la purificación del bioetanol.....	136
4.6.2.4	Evaluación económica de la propuesta realizada para la obtención de etanol a partir de desechos orgánicos.....	144
4.6.2.4.a	Estimación de los flujos de ingresos y egresos.....	144

---

---



---

4.6.2.4.b Estructura del flujo de caja.....	145
4.6.2.4.c Determinación de la factibilidad y rentabilidad del proceso..	157
4.6.2.5 Evaluación de rentabilidad respecto a las tecnologías extranjeras..	161
<b>4.7 EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE DESECHOS ORGÁNICOS.....</b>	<b>162</b>
4.7.1 Determinación de impactos ambientales.....	162
4.7.2 Evaluación de impactos ambientales.....	164
4.7.3 Medidas y recomendaciones ambientales.....	175
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>179</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>181</b>
<b>APÉNDICES.....</b>	<b>185</b>
A. TABLAS DE DATOS.....	186
B. CÁLCULOS TÍPICOS.....	235
C. TABLAS Y FIGURAS BIBLIOGRÁFICAS.....	254
D. DIAGRAMAS Y CURVAS DE CALIBRACIÓN.....	272
<b>ANEXOS.....</b>	<b>275</b>

---

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura1.1.</b> Proceso general para la obtención del etanol a partir de materia orgánica.....	4
<b>Figura2.1.</b> Materias primas para la obtención de bioetanol.....	16
<b>Figura2.2.</b> Esquema representativo del rompimiento de moléculas por hidrólisis ácidas para la obtención de azúcares simples.....	19
<b>Figura2.3.</b> Celulosa: cadenas de D-glucosa unidas por enlaces $\beta$ -1,4 glicosídicos.....	20
<b>Figura2.4.</b> Cadena denominada hemicelulosa.....	21
<b>Figura2.5.</b> Cadena denominada lignina.....	21
<b>Figura2.6.</b> <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .....	24
<b>Figura2.7.</b> Glucólisis y fermentación alcohólica.....	25
<b>Figura2.8.</b> Crecimiento típico de la levadura en el caldo de fermentación.....	36
<b>Figura2.9.</b> Fermentador discontinuo (Batch).....	38
<b>Figura2.10.</b> Reactor continuo de tanque agitado.....	40
<b>Figura2.11.</b> Equipo para destilación simple o sencilla.....	45
<b>Figura2.12.</b> Equipo para destilación fraccionada.....	48



<b>Figura3.1.</b>	Montaje de fermentación realizado.....	67
<b>Figura3.2.</b>	Esquema general de los ensayos pre-experimentales a realizar.....	68
<b>Figura3.3.</b>	Equipo de destilación empleado.....	71
<b>Figura3.4.</b>	Formato de evaluación de impactos.....	79
<b>Figura3.5.</b>	Formato de medidas preventivas.....	81
<b>Figura4.1.</b>	Variación de los °Brix en función del tiempo para un rango de temperatura (35 – 40)°C.....	100
<b>Figura4.2.</b>	Variación de los °Brix en función del tiempo para un rango de temperatura (30 – 35)°C.....	102
<b>Figura4.3.</b>	Variación de los °GL en función del tiempo para un rango de temperatura (35 – 40)°C.....	105
<b>Figura4.4.</b>	Variación de los °GL en función del tiempo para un rango de temperatura (30 – 35)°C.....	107
<b>Figura4.5.</b>	Mercado mundial de etanol.....	124
<b>Figura4.6.</b>	Producción mundial de bioetanol.....	124
<b>Figura4.7.</b>	Etapas del proceso de extracción de etanol a partir de materias primas azucaradas.....	128
<b>Figura4.8.</b>	Etapas del proceso de extracción de etanol propuesta a partir de materias primas azucaradas.....	129
<b>Figura4.9.</b>	Diagrama de bloques del proceso propuesto.....	131
<b>Figura4.10.</b>	Molino.....	132

---



<b>Figura4.11.</b> Filtro prensa.....	133
<b>Figura4.12.</b> Fermentador.....	133
<b>Figura4.13.</b> Diagrama de proceso estimado para una mayor purificación del etanol	134
<b>Figura4.14.</b> Zeolita 3A. Tamiz molecular.....	135
<b>Figura4.15.</b> Numero de etapas equivalentes a la altura de relleno de la torre disponible para el desarrollo de la investigación.....	137
<b>Figura4.16.</b> Estimación del mejor tiempo de destilación.....	140
<b>Figura4.17.</b> Obtención del reflujo mínimo para la torre 2 (T-2).....	142
<b>Figura4.18.</b> Número de etapas necesarias estimadas para lograr la separación deseada.....	143
<b>Figura4.19.</b> Estudio de la sensibilidad del proyecto en función de la disminución de los ingresos.....	160
<b>Figura4.20.</b> Matriz cualitativa de impactos.....	177

---



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 3.1</b> Matriz de selección. Selección de la materia prima.....	54
<b>Tabla 3.2.</b> Matriz de selección. Tecnología de fermentación a implementar.....	57
<b>Tabla 3.3.</b> Matriz de selección. Tecnología de purificación a implementar.....	62
<b>Tabla 3.4.</b> Formato de los factores y niveles en el diseño experimental.....	64
<b>Tabla 3.5.</b> Factores que influyen en el proceso de purificación de la mezcla fermentada.....	70
<b>Tabla 3.6.</b> Disponibilidad de los materiales, equipos e instrumentos en el Laboratorio de Ingeniería Química.....	73
<b>Tabla 3.7.</b> Valores de los criterios de evaluación de impactos.....	76
<b>Tabla 3.8.</b> Criterios ponderados.....	77
<b>Tabla 3.9.</b> Criterios Valor de Impacto Ambiental VIA y relevancia del impacto.....	78
<b>Tabla 4.1.</b> Matriz de selección. Selección de la materia prima.....	85
<b>Tabla 4.2.</b> Matriz de selección. Tecnología de fermentación a emplear.....	88
<b>Tabla 4.3.</b> Matriz de selección. Tecnología de purificación a implementar.....	91
<b>Tabla 4.4.</b> Variación de los °Brix en función del tiempo para un rango de temperatura definido.....	99
<b>Tabla 4.5.</b> Variación de los °Brix en función del tiempo para un rango de temperatura definido.....	101
<b>Tabla 4.6.</b> Estimación de los °GL en función de la variación de los °Brix para un rango de temperatura definido.....	104
<b>Tabla 4.7.</b> Estimación de los °GL en función de la variación de los °Brix para un rango de temperatura definido.....	106



---

<b>Tabla 4.8.</b>	Análisis estadístico de la data recolectada para un rango de temperatura (35 – 40)°C.....	109
<b>Tabla 4.9.</b>	Análisis estadístico de la data recolectada para un rango de temperatura (30 – 35)°C.....	110
<b>Tabla 4.10.</b>	Características del producto final para las destilaciones previas.....	114
<b>Tabla 4.11.</b>	Características del producto final para cada rango de temperatura...	115
<b>Tabla 4.12.</b>	Análisis estadístico de la data recolectada.....	116
<b>Tabla 4.13.</b>	Disponibilidad de los materiales, equipos e instrumentos en el Laboratorio de Ingeniería Química.....	120
<b>Tabla 4.14.</b>	Costos relacionados a consumo energético.....	126
<b>Tabla 4.15.</b>	Costos relacionados a la compra de equipos e instrumentos necesarios para realizar la investigación.....	127
<b>Tabla 4.16.</b>	Altura equivalente de un plato teórico y número de unidades de transferencia de masa en la columna de relleno del equipo de rectificación.....	138
<b>Tabla 4.17.</b>	Flujo de caja del proceso.....	146
<b>Tabla 4.18.</b>	Ingresos.....	147
<b>Tabla 4.19.</b>	Costos fijos.....	152
<b>Tabla 4.20.</b>	Capital de trabajo.....	153
<b>Tabla 4.21.</b>	Capital de producción.....	153
<b>Tabla 4.22.</b>	Gastos generales.....	154
<b>Tabla 4.23.</b>	Préstamo.....	154
<b>Tabla 4.24.</b>	Impuesto sobre la renta (I.S.L.R).....	155
<b>Tabla 4.25.</b>	Sensibilidad ante la disminución progresiva de los ingresos.....	160
<b>Tabla 4.26.</b>	Evaluación de rentabilidad respecto a las tecnológicas extranjeras...	161

---



## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental de la obtención de etanol a partir de desechos orgánicos, con la finalidad de poder emplearlo como gasolina E10.

La investigación se fundamenta en conocimientos de química orgánica y operaciones unitarias, principalmente en catálisis enzimática y separación de mezclas por destilación; además de las nociones generales de control de procesos químicos y transferencia de calor.

La metodología de este trabajo, comienza con la identificación de los desechos orgánicos que pueden servir de materia prima, a continuación se realiza el análisis de los procesos de producción de etanol vía fermentativa y de purificación vía destilación que puedan desarrollarse para este trabajo, se continúa con la selección de los procesos más adecuados, para luego determinar las mejores condiciones de operación para ambos procesos. Por último, se realiza un estudio de factibilidad técnica para la implementación del mismo, se estima el costo para la implementación del diseño propuesto y se evalúa el impacto ambiental de la propuesta realizada.

Este trabajo se desarrolla y estructura en cuatro capítulos. El primero de ellos presenta el planteamiento del problema y las justificaciones en que se basa la investigación; también se señalan los objetivos a lograr, las limitaciones y alcances presentes. El capítulo II, titulado Marco Referencial, muestra los antecedentes y los principales conocimientos teóricos que sustentan las bases de este trabajo. En el capítulo III, se expone la metodología empleada para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos planteados; por último, en el capítulo IV, se muestran los resultados y



discusiones; y, finalmente se indican las conclusiones derivadas de este trabajo y las principales recomendaciones establecidas. Conviene mencionar, que para complementar y sustentar la información suministrada se presentan las secciones de apéndices y anexos.

El desarrollo de esta investigación representa un paso adelante en la búsqueda de la excelencia y el complemento de la educación recibida por los autores a lo largo de la carrera y les proporciona conocimientos que pueden ser aplicados a nivel industrial.



---

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

*A continuación se presenta la descripción del problema que fundamenta este trabajo de investigación, así como las razones que lo justifican. Además, se plantean los objetivos a lograr, las limitaciones y alcances de este trabajo especial de grado.*

### 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El compuesto químico etanol, o alcohol etílico, es un alcohol que se presenta como un líquido incoloro e inflamable con un punto de ebullición de 78 °C. Al mezclarse con agua en cualquier proporción, genera una mezcla azeotrópica. Este alcohol se usa con fines culinarios (Bebida alcohólica), en muchos sectores industriales y en el sector farmacéutico, como principio activo de algunos medicamentos y cosméticos, es un buen disolvente, puede utilizarse como anticongelante y como combustible industrial y doméstico.

En la actualidad, está en boga la tendencia de utilizar etanol como una fuente alternativa de combustibles y como aditivo en la gasolina para mejorar sus propiedades, ya que las mezclas de etanol – gasolina permiten aumentar la compresión en el motor, dan un funcionamiento más regular, su recalentamiento es menor y por tanto se puede utilizar a un mayor número de revoluciones y, además, reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por la ignición de los combustibles fósiles.

La obtención del etanol puede darse de dos maneras fundamentalmente: por hidratación del etileno o bien por fermentación de melazas, almidón o celulosa. El segundo origen son fuentes orgánicas y pueden dividirse en tres grandes grupos:



- En el primer grupo tenemos a los cereales básicos: maíz, trigo, cebada, sorgo. De estos productos, se consigue el almidón que a partir de un proceso de hidrólisis se convierte en azúcares.
- En el segundo grupo, tenemos a la caña de azúcar y la remolacha que son transformadas en melaza y luego, a partir de fermentación, se obtiene el Etanol.
- En un tercer grupo, se han clasificado a la madera, los desechos municipales y los desperdicios forestales, a partir de los cuales se obtienen las celulosas que siguen un proceso de hidrólisis para convertirse en azúcar.

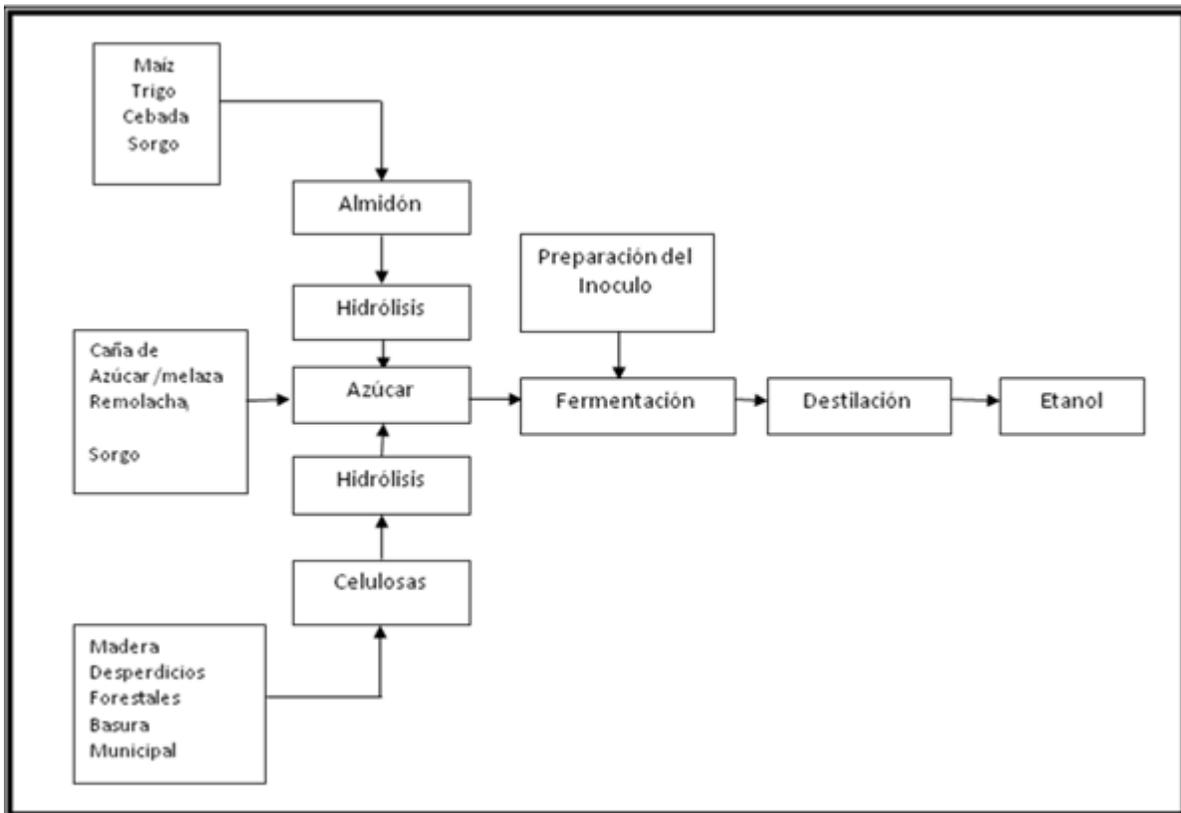


Figura 1.1. Proceso general para la obtención del etanol a partir de materia orgánica (Fuente: Propia)

La obtención de etanol a partir de los dos primeros grupos compromete la seguridad alimentaria de las regiones que produzcan etanol por estas vías, sin embargo, la tercera opción surge como una alternativa viable para la obtención de



---

etanol. En la figura 1.1 se esboza el proceso de obtención de etanol según la materia prima empleada para ello.

Para la obtención de etanol a partir de desechos orgánicos vía enzimática por la acción de una levadura, *Saccharomyces cerevisiae*, es necesario suministrar las condiciones más favorables de pH, humedad, temperatura, tiempo de residencia, oxígeno y agitación; así como también se deben considerar las cantidades de almidón y azúcar que contiene la materia para que la fermentación sea lo mejor posible. Luego, esta mezcla con contenido de etanol pasa a ser sometida a un proceso de destilación para así realizar la separación de la mezcla por la diferencia de volatilidades de sus componentes y obtener finalmente el etanol. Una vez obtenido el etanol, éste debe ser deshidratado para poder ser usado como combustible.

En el proceso de destilación o deshidratación, se calienta el calderín de la columna de destilación para que hierva el líquido obtenido de la fermentación. Debido a que el alcohol tiene punto de ebullición menor que el del agua, el etanol se evapora más rápido que el agua y se condensa. Al final se obtiene alcohol etílico con un poco de agua.

En Venezuela existen diversas industrias que procesan frutas para la obtención de sus productos y el desecho de las mismas es frecuentemente usado como alimento de animales, estos residuos bien pueden ser utilizados con el propósito de obtener etanol a través de una catálisis vía enzimática.

## 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente existen empresas o procesadoras a nivel nacional que utilizan frutas como materia prima, y que por ende generan cierta cantidad de desechos frutales como bagazos y cáscaras, desechos estos que pueden ser destinados para la obtención de

---



---

etanol, con el objeto de ofrecer un producto de alta calidad que no amenace la seguridad alimenticia de la población y además garantice el completo aprovechamiento de la fruta procesada y la no acumulación de desechos orgánicos en el ambiente.

Con esta investigación se quiere determinar la factibilidad técnico – económica y ambiental de obtener etanol a partir de desechos orgánicos.

### **1.2.1 Situación actual**

Actualmente la caña de azúcar es la fuente más atractiva para la producción de etanol, ya que los azúcares que contiene son simples y fermentables directamente por las levaduras. Otra fuente importante es el maíz, el cual es rico en almidón, un hidrato de carbono complejo que necesita ser primero transformado en azúcares simples. Este proceso se denomina sacarificación, e introduce un paso más en la producción, con el consecuente aumento en los costos. Sin embargo, utilizar estas fuentes como materia prima para producir etanol con fines energéticos, sería una solución contradictoria en un mundo con problemas de alimentación.

Por otra parte, existe una cantidad significativa de desechos orgánicos provenientes de industrias procesadoras de frutas, que constituyen en su mayoría un desecho no aprovechado y que representan una fuente de etanol, mediante un proceso de obtención adecuado.

Sin embargo en la actualidad se dispone de poca información experimental de la obtención de etanol a partir de desechos orgánicos.

### **1.2.2 Situación deseada**

Se requiere evaluar ambiental y económicamente el proceso de obtención de etanol a partir de desechos orgánicos con la finalidad de determinar la factibilidad técnico –

---



---

económica – ambiental de aplicación de dicho proceso. Lo interesante de esta alternativa respecto a las ya existentes como la caña de azúcar y maíz es que se utilizan desechos, es decir, una vez que se ha quitado lo necesario para el consumo humano el sobrante se aprovecha para la producción de etanol.

En cuanto al alcance, se determinará el proceso más adecuado a nivel de laboratorio, para la obtención del etanol y las condiciones que ofrezcan un mejor rendimiento y menor costo de producción.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Evaluar técnico-económica y ambientalmente el proceso de obtención de etanol a partir de desechos orgánicos para determinar su factibilidad de implantación.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

1. Identificar los diferentes desechos de los cuales se puede obtener el etanol con la finalidad de seleccionar la materia prima a utilizar.
2. Identificar las tecnologías existentes para la producción de etanol, vía fermentación, con la finalidad de seleccionar la más adecuada.
3. Identificar las tecnologías existentes para la purificación de etanol, vía destilación, con la finalidad de seleccionar la más adecuada.
4. Determinar las mejores condiciones de operación para la obtención de etanol vía fermentativa.
5. Determinar las mejores condiciones de operación para la purificación del etanol.
6. Evaluar económicamente dicho proceso para determinar su factibilidad de implantación.



- 
7. Evaluar ambientalmente dicho proceso para determinar su factibilidad de implantación.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

El ser humano, como todo ser vivo, depende del entorno para obtener energía. Previo al desarrollo industrial, el hombre utilizaba los animales, los vegetales, la fuerza del viento y del agua para obtener la energía necesaria para sus funciones vitales, para producir calor, luz y transporte. Luego, el hombre pasó a utilizar fuentes de energía almacenada en recursos fósiles, primero fue el carbón y posteriormente el petróleo y el gas natural. Actualmente, los combustibles fósiles y la energía nuclear proporcionan cada año alrededor del 90% de la energía que se utiliza en el mundo. Pero las reservas de combustibles fósiles son limitadas y, en mayor o menor grado, son contaminantes. A consecuencia de ello, se ha impulsado el desarrollo de energías alternativas basadas en recursos naturales renovables y menos contaminantes, como la luz solar, las mareas, el agua, y la bioenergía proveniente de los biocombustibles. Una de esas tecnologías es el uso de bioetanol como biocombustible.

Aunado a esto, se encuentra el hecho de que en Venezuela existe una cantidad considerable de industrias procesadoras de frutas que generan un gran volumen de desechos orgánicos y que, en algunos casos, no son aprovechados y, por ende, pasan a formar parte del gran volumen de materia orgánica contaminante para el ecosistema.

Por todo esto es que esta investigación resulta de gran importancia social y ambiental, ya que representa una solución para disminuir el volumen de desechos orgánicos contaminantes, dándoles un uso aprovechable que además presenta ventajas medioambientales y económicas.

Es importante destacar que esta investigación representa una alternativa en teoría viable para la obtención de etanol que no compromete los cultivos con fines alimenticios

---



---

de plantas como maíz, yuca, caña de azúcar, papa, remolacha entre otros. Además busca determinar si esta alternativa resulta factible de aplicar realizando una evaluación técnico – económica y ambiental de todo el proceso en estudio.

Hoy en día gracias al auge tecnológico, a los avances científicos y a un mercado laboral cada vez más competitivo. Los ingenieros deben ser cada vez más versátiles, por lo que durante su formación académica se les debe brindar las herramientas y oportunidades necesarias tanto de forma teórica como experimental, para ser capaces de enfrentar cualquier situación que se les presente en el campo laboral, siendo la formación experimental la más importante porque le permite tener al estudiante contacto con la realidad. Consciente de ello, durante esta investigación tendrán lugar prácticas que permitan reforzar los conocimientos y habilidades adquiridas a lo largo de la carrera universitaria, en cátedras como operaciones unitarias, orgánica, fisicoquímica y diseño de procesos. Desde el punto de vista metodológico se puede decir que esta investigación aportará una estrategia para la fermentación y destilación de etanol partiendo de materia orgánica desechada, que puede resultar de interés para futuras investigaciones.

## **1.5 LIMITACIONES**

Entre las principales limitantes encontradas está el hecho de no disponer de un motor de combustión interna para realizar los ensayos de prueba del funcionamiento de éste, empleando la mezcla del etanol obtenido con gasolina virgen, otro factor limitante es el tiempo disponible para la realización de la misma, el cual no permite realizar una evaluación más exhaustiva ni tomar suficientes datos para analizar y fermentar el desecho de todas las frutas para la obtención de etanol.



---

## II. MARCO REFERENCIAL

*A continuación se presenta la revisión de investigaciones previas relacionadas de manera directa o indirecta con la investigación planteada y que sirven de referencia y sustento para la misma. Además de, los aspectos teóricos que fundamentan este trabajo especial de grado y que permiten la comprensión de los fenómenos relacionados con el tema de estudio.*

### 2.1 ANTECEDENTES

Ronghou L., Shen F. (2006) **Impacts of main factors on bioethanol fermentation from stalk juice of sweet sorghum by immobilized *Saccharomyces cerevisiae*.** (Principales factores de impacto en la producción de bioetanol mediante la fermentación del jugo del bagazo de la caña de azúcar por inmovilización de la *Saccharomyces cerevisiae*). Centro de investigaciones de ingeniería y energía de biomasa. Escuela de agricultura y biología. Universidad de Shanghai. República de China.

Este trabajo tuvo como objetivo general determinar cómo se desarrolla el proceso de fermentación del jugo del bagazo de la caña de azúcar para producir bioetanol una vez que se inmovilizó la bacteria durante un lapso de tiempo, comparar la cantidad de bioetanol que se produjo durante la fermentación bajo la condición de inmovilidad y movilidad de la bacteria y evaluar las emisiones de dióxido de carbono formado durante la reacción de catálisis que se lleva a cabo durante la fermentación.

Al establecer una relación de esta investigación con la que se desea realizar se pudo encontrar que se quieren identificar las condiciones óptimas de reacción para las cuales se obtiene un porcentaje alto de producción de etanol por la fermentación de materia orgánica con alto contenido de azúcar, la diferencia es que la investigación a

---



---

realizar no incluye la inmovilización de la bacteria bajo ningún aspecto, es decir, la levadura permanecerá en constante movimiento durante la reacción. De igual forma no se va a establecer estudio de emisiones de dióxido de carbono durante el mismo proceso.

Copa Rivera E., Costa A. (2006) **Evaluation of optimization techniques for parameter estimation: Application to ethanol fermentation considering the effect of temperatura (Evaluación de la optimización de las técnicas de estimación de parámetros: Aplicación a la fermentación de etanol considerando el efecto de la temperatura)**. Laboratorio de diseño, optimización y control. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de Campinas. Brasil.

En esta investigación se realizó una evaluación del comportamiento del proceso de fermentación ejecutado en un reactor por cargas utilizando la bacteria *Saccharomyces cerevisiae* y a su vez se sometió este mismo a distintos valores de temperatura con la finalidad de establecer bases concretas que permitieran definir por medio de modelos matemáticos la cinética de la reacción generada.

Al comparar la investigación realizada con la deseada a desarrollar se encuentran las siguientes similitudes como la utilización de la misma bacteria al igual que el considerar como un parámetro principal en cuanto a la velocidad de reacción la temperatura del reactor.

Con respecto a las diferencias tenemos el hecho de realizar la investigación deseada a partir de una temperatura fijada tomando esta consideración por medio de referencias bibliográficas mientras que la investigación mencionada anteriormente se basa en la variación de dicho parámetro; otra diferencia es que lo que se desea desarrollar no es precisamente un modelo matemático en función de una cinética de

---



---

reacción sino fijar las mejores condiciones con el propósito de obtener un etanol de buena calidad.

Prasad S., Joshi H.C. (2006) **Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial and urban residues (Etanol como una alternativa de combustible proveniente de residuos de la agricultura, industria y urbanos)**. Instituto de ciencia ambiental – Nueva Delhi, India.

En esta investigación se evaluó las razones económicas y ecológicas de la producción de etanol como fuente de energía específicamente en combustibles, tomando en consideración que la materia prima considerada fueron los residuos de sectores industriales, agrícolas y urbanos con la finalidad de reducir la dependencia del petróleo extranjero y eliminar un problema de vital importancia como es la contaminación.

Este trabajo tiene similitud con respecto a la investigación en desarrollo en cuanto a muchos puntos; como por mencionar algunos la procedencia de la materia prima, estudios económicos donde se incluyen si la producción del etanol es o no factible bajo el esquema experimental desarrollado y algunos destinos que se le pueden dar al producto final en cuyo caso es el etanol.

En cuanto a las diferencias se observa como la de mayor relevancia la materia prima a utilizar ya que para la investigación en desarrollo el desecho a trabajar se selecciona bajo un criterio establecido donde se considera que esta debe poseer altos niveles de carbohidratos o glucosa para evitar un proceso de hidrólisis que afectaría costos y tiempo en el desarrollo de la misma. Otro aspecto que hace discrepancia entre ambos es que la investigación a desarrollar no limita el producto para uso exclusivo en biocombustibles sino para cualquiera que se destine.



---

Monsalve J., Medina I. (2005) **Producción de etanol a partir de la cáscara de banano y almidón de yuca.** Grupo de Bioprocesos-Grupo de Combustibles alternativos. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.

En este trabajo se evaluó la hidrólisis ácida de yuca y cáscara de banano como un alternativa para la producción de jarabe azucarado y su posterior fermentación hasta alcohol (etanol) con *Saccharomyces cerevisiae* y *Zymomonas mobilis*.

Entre las principales conclusiones están que no se nota ningún efecto inhibitorio por parte de los cultivos realizados con cáscara de banano y yuca por la presencia de cianuro en la yuca y por la formación de compuestos tóxicos al hidrolizar la celulosa en banano, ni se apreció una producción considerable de etanol (menor de 0,1 g/L) para ninguno de los medios fermentados con *Z. mobilis* además tanto la yuca como la cáscara de banano son fuentes potenciales para la producción de etanol.

Este antecedente tiene similitud con la investigación en desarrollo, en la metodología para fermentar y cultivar la *Saccharomyces cerevisiae* y en que ambas emplean materia orgánica como base para la obtención de etanol. La diferencia básica es que con el trabajo en curso se pretende no solo evaluar el proceso de fermentación sino también el proceso de destilación para la purificación del alcohol obtenido.

Grohmann K., Widmer B., (2004) **Etanol carburante a partir de desechos de naranja.** Laboratorio de Frutas Cítricas y Productos Subtropicales. Winter Haven, Florida.

Este trabajo tiene como objetivo investigar la viabilidad de convertir las cáscaras cítricas en el combustible etanol. Los materiales sobrantes de la fruta cítrica son ricos en pectina, celulosa y polisacáridos hemicelulosos, los cuales pueden ser hidrolizados a azúcares y fermentados al alcohol. La mayoría de este residuo de cáscara seca—un total de 1,2 millones de toneladas anualmente en la Florida—es vendida como un

---



---

pienso de bajo valor para el ganado, a pesar de tener un costo de procesamiento relativamente alto. La investigación concluyo que si es viable obtener el etanol por esta vía y además logro una producción de desde un cuarto de galón de etanol hasta cantidades de 10 galones, 100 galones y 1.000 galones.

La similitud con el trabajo en desarrollo radica que en ambos se obtiene etanol a partir de desechos orgánicos, en este caso de la cáscara y bagazo de naranja. La diferencia es que en este trabajo se empleo una bacteria obtenida en laboratorio, llamada *Escherichia coli* KO11 para fermentar los azúcares que la levadura no transformó debido a que ciertos aceites naturales en la cáscara de naranja impiden que esta haga un trabajo completo, en pocas palabras, dicha bacteria completa el trabajo.

Grisales P., Ríos L., Triana M. (2000) **Diseño de un proceso de producción de etanol anhidro a partir de jugo de caña.** Escuela de Ingeniería Química - Universidad del Valle. Cali Colombia.

En esta investigación la alternativa de diseño propuesta plantea la producción de 1.000.000 L/día de gasohol a partir de 1000 toneladas/día de jugo de caña, el cual es fermentado con la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, la cual transforma los azúcares reductores (sacarosa, glucosa y fructosa) presentes en el jugo a etanol; posteriormente se recupera el etanol en una etapa de destilación multiefecto (con reutilización del vapor) que contiene dos columnas para obtener un alcohol azeotrópico, casi puro (99,9 a 99.8% V/V o 99.5 a 99.7%p/p, el cual se deshidrata con el uso de membranas en la preevaporación. Este alcohol anhidro se utiliza para la producción de gasohol, el cual tiene una composición final de 10% de etanol anhidro. Los resultados encontrados en el estudio de factibilidad mostraron que el proceso tiene viabilidad económica.



---

Con respecto a la investigación realizada al compararla con la deseada a desarrollar existen horizontes de búsqueda en común por destacar algunos, la optimización del proceso fermentativo para la obtención del etanol en un banco de reactores empleando *Saccharomyces cerevisiae*, así como la respectiva evaluación económica para determinar la factibilidad de dicho proceso, entre las discrepancias observables se nombra el desarrollo de mezclas entre el etanol obtenido por un proceso de fermentación de una orgánica y combustible fósil.

## 2.2 BASES TEÓRICAS

A continuación se definen los tópicos que servirán para la comprensión y soporte de los temas en estudio.

### 2.2.1 BIOETANOL

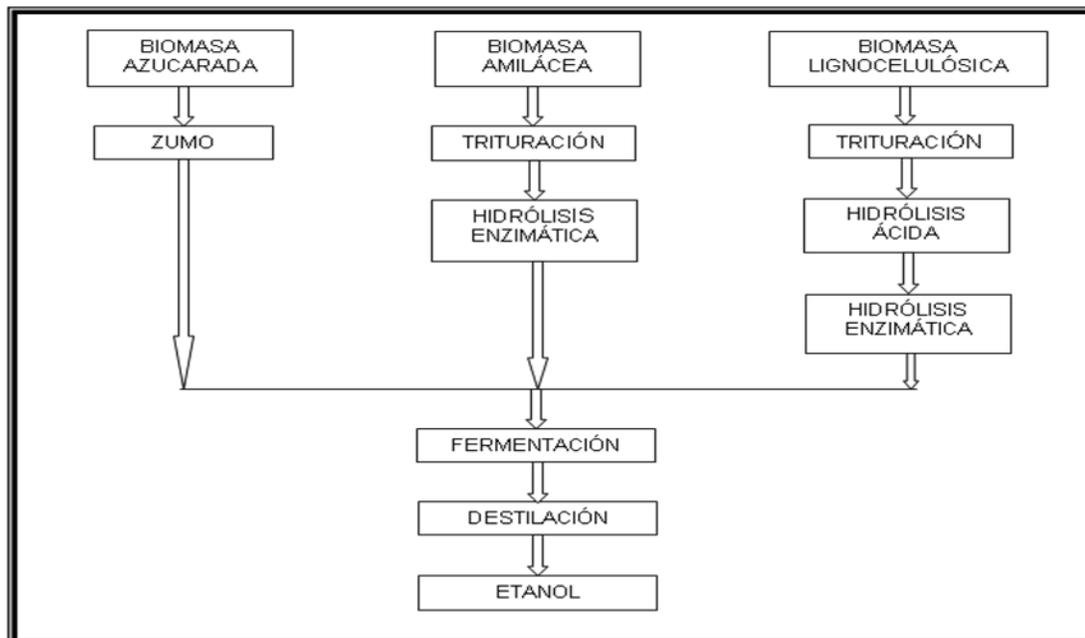
El bioetanol es un alcohol y en su mayor parte se fabrica siguiendo un procedimiento similar al de la cerveza, en el que los almidones son convertidos en azúcares, los azúcares se convierten por fermentación en etanol, el que luego es destilado en su forma final.

Se produce principalmente a partir de caña de azúcar o maíz (en algunos casos el maíz es mezclado con un poco de trigo o cebada), cuyos hidratos de carbono son fermentados a etanol por las levaduras del género *Saccharomyces*.

La caña de azúcar es la fuente más atractiva para la producción de etanol, ya que los azúcares que contiene son simples y fermentables directamente por las levaduras. El mayor inconveniente es que resulta cara como materia prima. Los cultivos como el maíz son ricos en almidón, un hidrato de carbono complejo que necesita ser primero transformado en azúcares simples. Este proceso se denomina sacarificación, e introduce un paso más en la producción, con el consecuente aumento en los costos.



La producción podría realizarse a partir de desechos agrícolas, forestales, industriales o municipales. Las materias primas ricas en celulosa, como los desechos agrícolas y forestales son las más abundantes y baratas, sin embargo la conversión de la celulosa en azúcares fermentables es un proceso complejo y costoso que hace que la obtención de etanol a partir de desechos no sea rentable, al menos por ahora. Lo que si se debe tener en consideración es el tipo de biomasa que compone la materia de la cual se desea obtener etanol por medio de un proceso fermentativo ya que dependiendo de la misma dicha técnica dará o no el resultado esperado.



**Figura 2.1. Materias primas para la obtención del bioetanol**

El bioetanol se produce, como se ha visto, a partir de la fermentación de mostos azucarados, para cuya obtención existen tres vías posibles:

- ✓ Directamente a partir de biomasa azucarada, es decir, productos agrícolas ricos en azúcares, tales como la remolacha y la caña de azúcar.
- ✓ Mediante hidrólisis convencional (moderada y enzimática) de biomasa amilácea, productos agrícolas ricos en almidón, tales como los cereales y la patata. Mediante el



---

proceso de hidrólisis se consigue aflorar los azúcares, glucosa y/o fructosa, que formarán parte del mosto azucarado.

✓ Mediante hidrólisis fuerte (ácida o enzimática) de biomasa lignocelulósica, productos agrícolas que contienen celulosa, como son las materias de origen leñoso.

Las dos primeras vías son las más empleadas en la actualidad pues son procesos perfectamente conocidos por las industrias agrarias. Por el contrario, la tercera está aún en fase de desarrollo presentándose, no obstante, como la gran alternativa de producción de bioetanol en el futuro, dado el bajo precio de la biomasa lignocelulósica en relación a la biomasa azucarada y amilácea. Las enzimas que más comúnmente se utilizan en estos procesos son las levaduras y, entre ellas, la *Saccharomyces cerevisiae*, por ser la más eficiente en la fermentación de azúcares de seis carbonos como es el caso de la glucosa. Cabe destacar que los °Brix estiman la cantidad de sólidos solubles, donde se incluye el azúcar, presentes en la solución y a su vez representa la densidad a 20°C, de una solución de sacarosa al 1%p/v. Los °Brix son, por lo tanto, un índice comercial aproximado de esta concentración que se acepta convencionalmente como si todos los sólidos disueltos fuesen azúcar, estimación usada en todas las industrias de alimentos.

El etanol obtenido tiene dos formas de ser medido en %v/v, la primera de ellas es a partir de un alcoholímetro el cual es un instrumento que realiza la medición de la cantidad de alcohol presente en función de la densidad de la solución y la segunda es por medio de correlaciones o tablas usadas en la industria cervecera que estiman a partir de los °Brix los °GL (grados alcohólicos) presentes en la solución, estos últimos son para mejorar la competitividad del bioetanol frente a los productos derivados del petróleo por ejemplo se deben reducir los costos de las materias primas, ya que éstas suponen el 60-70% del costo final del etanol, introducir mejoras en los cultivos y determinar los cultivos más rentables y adecuados para la producción de bioetanol.



---

Dependiendo del tipo de materia o desecho del cual se espera obtener el etanol vía fermentativa se deben estudiar dos factores muy importantes que determinan la eficiencia del proceso en cuanto al comportamiento de la reacción. Anteriormente se especifico que los porcentajes de carbohidratos o azúcares y almidón presentes en la misma eran de suma importancia con respecto a la composición de dicho alcohol a obtener.

#### **2.2.1.1 Pre-tratamiento de la biomasa**

El pre-tratamiento tiene como objetivo transformar la biomasa a utilizar cuando ésta es poco asequible a la fermentación. El tratamiento más general y aplicable a todas las materias primas, ya que su objetivo fundamental es reducir éstas a partículas pequeñas, de forma que aumente la superficie de contacto para los procesos posteriores, es el mecánico, consistente en la trituración, molienda, pulverización, entre otras de la biomasa.

Cuando se trabaja con biomasa que contiene almidón, se suele someter ésta, además, a una cocción, con objeto de gelatinizarla, es decir, impregnarla bien de agua para obtener una masa homogénea. La celulosa generalmente se trata con diversos agentes químicos (ácidos, principalmente), que permiten solubilizarla y separarla de la lignina, sustancia no fermentable.

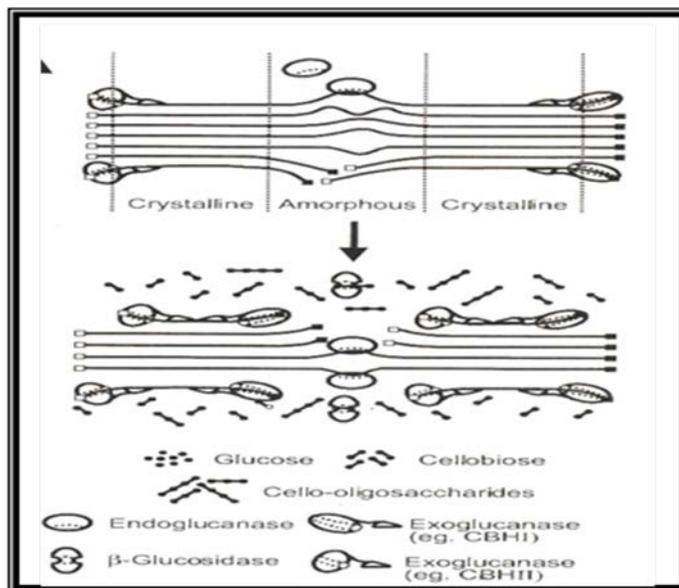
#### **2.2.1.2 Hidrólisis**

La hidrólisis, o ruptura de las moléculas en medio acuoso, tiene como finalidad la transformación de los polímeros de glucosa (almidón y celulosa) en azúcares sencillos. Esta operación se efectúa, bien mediante fermentos o enzimas (hidrólisis enzimática), bien mediante el uso de reactivos químicos (hidrólisis química).



La hidrólisis enzimática se lleva a cabo con la ayuda de enzimas obtenidas de microorganismos, dependiendo las condiciones óptimas del proceso de la naturaleza del organismo productor de enzimas, y sus rendimientos del pre-tratamiento efectuado y del sustrato empleado, cabe destacar que los costos de utilidad son bajos comparados con la hidrólisis ácida o alcalina, usualmente opera en condiciones suaves (pH 4.8 y temperaturas 45-50 C).

La hidrólisis química de la celulosa se efectúa preferentemente con los ácidos clorhídrico y sulfúrico (hidrólisis ácida) o con una base fuerte (hidrólisis alcalina). Aunque en este caso la reacción es mucho más rápida que en la hidrólisis enzimática, las temperaturas de trabajo son muy superiores (mayor consumo de energía) y se producen problemas de corrosión.



**Figura 2.2. Esquema representativo del rompimiento de moléculas por hidrólisis ácida para obtención de azúcares simples**

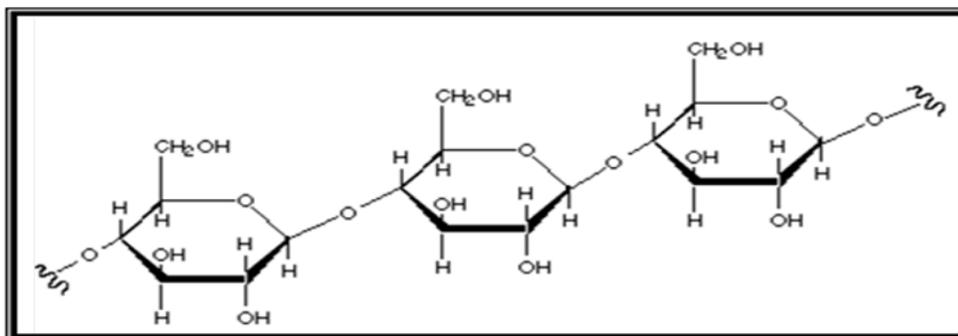
Una gran parte de los materiales con alto contenido de celulosa, susceptibles de ser utilizados como materia prima para la producción de etanol combustible se generan como residuos en los procesos productivos de los sectores agrícola, forestal e industrial. Los residuos agrícolas proceden de los cultivos leñosos y herbáceos y entre



ellos hay que destacar los producidos en los cultivos de cereal y en algunos otros cultivos con utilidad industrial textil y oleícola.

La biomasa de origen forestal proviene de los tratamientos silvícolas y de mejora y mantenimiento de los montes y masas forestales. La biomasa de origen industrial son los generados en las industrias, como la papelera, y la fracción orgánica de los residuos sólidos industriales. Muchos de estos residuos no sólo tienen un valor económico en el contexto en el que se generan, sino que suelen provocar problemas ambientales durante su eliminación.

La biomasa lignocelulósica presenta una estructura compleja compuesta de tres fracciones que deben ser procesadas por separado para asegurar una conversión eficiente de este tipo de materiales a etanol. La fracción mayoritaria de esta biomasa es la celulosa cristalina. La celulosa está compuesta de cadenas largas de moléculas de D-glucosa unidas por enlaces  $\beta$  (1-4) que, a su vez, se agrupan en estructuras superiores de gran cristalinidad, lo que dificulta su hidrólisis y conversión a azúcares fermentables. Sin embargo, una vez se producen los azúcares simples, pueden fermentarse sin dificultad. La celulosa puede ser hidrolizada a etanol mediante procesos ácidos o enzimáticos.



**Figura 2.3. Celulosa: cadenas de D-glucosa unidas por enlaces  $\beta$ -1,4 glicosídicos.**

La segunda fracción es la hemicelulosa, formada por polímeros de azúcares de cinco átomos de carbono (principalmente xilosa). Esta fracción es fácilmente



hidrolizable ya que no presenta estructura cristalina; sin embargo, la xilosa es un azúcar difícil de fermentar a etanol.

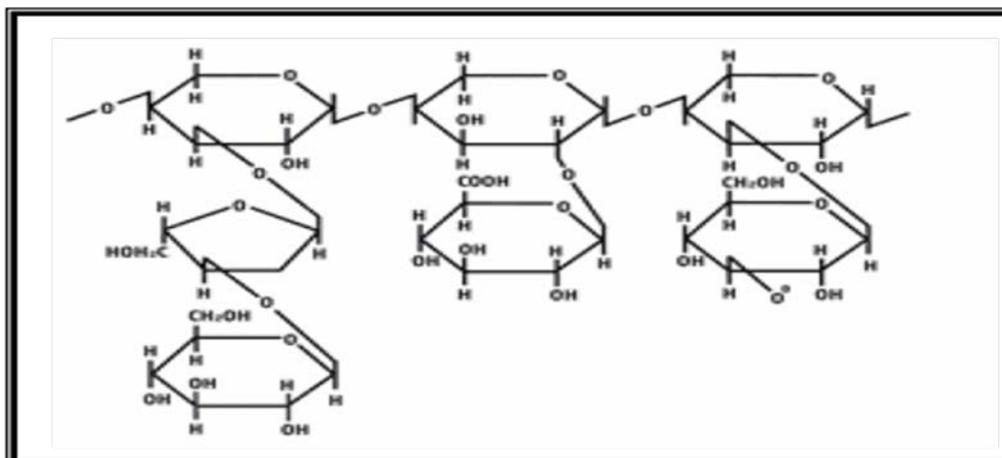


Figura 2.4. Cadena denominada hemicelulosa

La última fracción es lignina, es un biopolímero tridimensional de unidades de fenilpropano ligadas por enlaces éster y C-C.

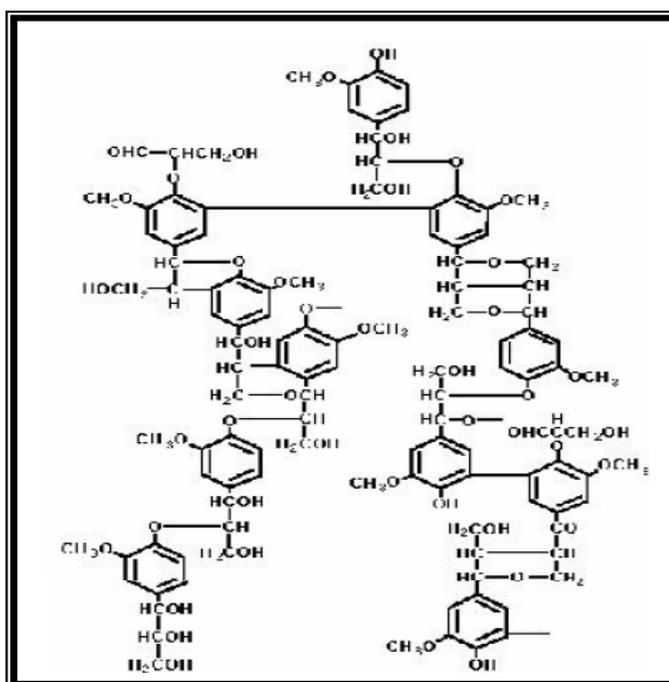


Figura 2.5. Cadena denominada lignina



Los procesos de obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica que utilizan catalizadores ácidos permiten, en condiciones adecuadas de presión y temperatura, una solubilización de la hemicelulosa y la celulosa, quedando prácticamente inalterada la lignina. A temperaturas superiores a los 200°C aparecen productos de descomposición de los azúcares, por lo que no pueden obtenerse rendimientos muy altos. Además, estas sustancias son inhibidoras del proceso fermentativo por lo que deben eliminarse del hidrolizado antes de realizar la fermentación. Los métodos industriales de hidrólisis ácida de la fracción celulósica se agrupan en dos tipos: los que emplean ácidos concentrados y bajas temperaturas y los que utilizan ácidos diluidos a temperaturas más altas. A pesar de los altos rendimientos de hidrólisis que se obtienen con los procesos que utilizan ácidos concentrados, no existe ninguna planta industrial operando con este sistema, por su falta de rentabilidad. Entre los procesos de hidrólisis de celulosa utilizando ácidos diluidos, el más utilizado es el método de percolación, en el que el ácido se hace pasar a través del material.

Los problemas mencionados en los procesos ácidos se evitan si se utiliza en el proceso una hidrólisis enzimática. Para ello, es necesario realizar un pretratamiento de la biomasa lignocelulósica que altere la compleja estructura de este tipo de materiales, facilitando así la acción de los enzimas celulolíticos. La dificultad está en que la cristalinidad de las moléculas de celulosa, y la naturaleza de su asociación con la lignina, constituyen una verdadera barrera física a la penetración de las enzimas.

### **2.2.2 FERMENTACIÓN**

Es un proceso catabólico de oxidación incompleta, totalmente anaeróbico, siendo el producto final un compuesto orgánico. Estos productos finales son los que caracterizan los diversos tipos de fermentaciones. Desde el punto de vista energético, las fermentaciones son muy poco rentables si se comparan con la respiración aerobia, ya que a partir de una molécula de glucosa sólo se obtienen 2 moléculas de ATP,



---

mientras que en la respiración se producen 38. Esto se debe a la oxidación del NADH, que en lugar de penetrar en la cadena respiratoria, cede sus electrones a compuestos orgánicos con poco poder oxidante.

### 2.2.2.1 Tipos de Fermentación

- Fermentación acética
- Fermentación alcohólica
- Fermentación butírica
- Fermentación de la glicerina
- Fermentación láctica
- Fermentación pútrida

#### 2.2.2.1.a Fermentación acética

Es la fermentación bacteriana por *Acetobacter*, un género de bacterias aeróbicas, que transforma el alcohol en ácido acético. La fermentación acética del vino proporciona el vinagre.

#### 2.2.2.1.b Fermentación alcohólica

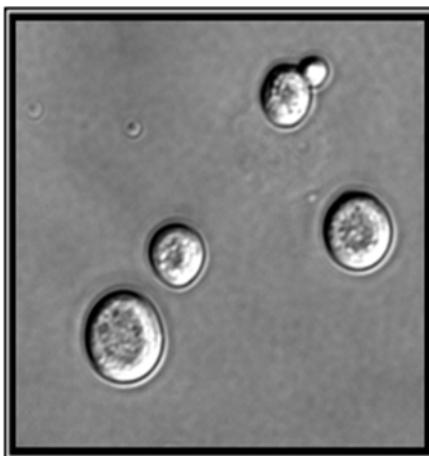
Es un proceso biológico cuya finalidad es proporcionar energía a los microorganismos unicelulares (levadura) en plena ausencia de aire, originado por la actividad de estos mismos que procesan o disocian los hidratos de carbono (por regla general azúcares: como pueden ser por ejemplo la glucosa, la fructosa, la sacarosa, etc.) para obtener la energía necesaria para sobrevivir y obtener como productos finales: un alcohol en forma de etanol ( $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en forma de gas y unas moléculas de ATP que consumen los propios microorganismos en su metabolismo celular energético anaeróbico. Se divide por gemación y puede tener una reproducción asexual cuando se encuentra en su forma haploide, y de manera

---



---

sexual cuando a partir de un cigoto se forma un asca que contiene cuatro ascosporas haploides.



**Figura 2.6. *Saccharomyces cerevisiae*** (Fuente [http://es.wikipedia.org/wiki/Saccharomyces\\_cerevisiae](http://es.wikipedia.org/wiki/Saccharomyces_cerevisiae))

En condiciones de anaerobiosis, las cepas de *Saccharomyces cerevisiae* (levaduras de la panificación) y otras especies de levaduras transforman la glucosa en ácido pirúvico, siguiendo la secuencia de reacciones de la glicólisis. Este proceso es común a la mayoría de los seres vivos; pero aquí radica lo específico de estas levaduras, son capaces de proseguir la degradación del pirúvico hasta etanol, mediante el siguiente proceso:

Cuando el medio es rico en azúcar, la transformación de la misma en alcohol hace que llegada una cierta concentración las levaduras no pueden sobrevivir en tal medio. Aunque hay distintos tipos de levaduras con diferentes tolerancias. La fermentación alcohólica transcurre por la misma ruta enzimática de la glicólisis, pero necesita dos etapas adicionales y produce gran cantidad de  $\text{CO}_2$ , que hace el pan esponjoso y hace que el champán tenga burbujas. Este  $\text{CO}_2$  pesa más que el aire, y puede llegar a crear bolsas sin oxígeno.



En la primera parte, el átomo de carbono  $\alpha$  del piruvato es atacado por el pirofosfato de tiamina y experimenta una descarboxilación o sea, pérdida de  $\text{CO}_2$ ; el coenzima queda en la forma de 2-hidroxi-etil – derivado que puede considerarse una forma del acetaldehído activado o ligado al coenzima Piruvato acetaldehído +  $\text{CO}_2$

En la etapa final al acetaldehído se reduce a etanol y el potencial de reducción es proporcionado por el  $\text{NADH} + \text{H}^+$ , en una reacción catalizada por la alcohol – deshidrogenada.

Las reacciones de la fermentación alcohólica resultan completas en su visión del fenómeno cuando en las mismas se tiene en cuenta la formación de ATP a partir de fosfatos. En realidad, este proceso no puede ocurrir sin la simultánea fosforilación oxidativa del ADP.

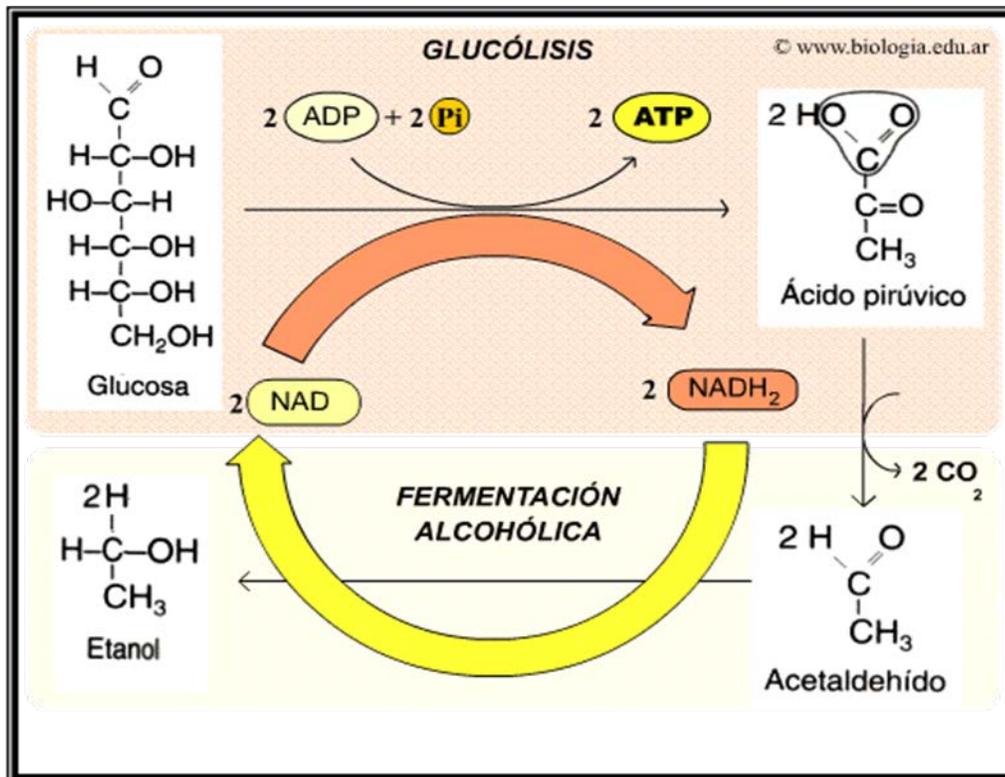


Figura 2.7. Glucólisis y fermentación alcohólica.



---

Es un proceso exotérmico, es decir, se desprende energía en forma de calor. Es necesario controlar este aumento de temperatura ya que si ésta asciende demasiado las levaduras comenzarían a morir deteniéndose el proceso fermentativo.

El rendimiento teórico de un gramo de glucosa es de 0.51 gr. de etanol y 0.49 gr. de CO<sub>2</sub> sin embargo en la práctica aproximadamente el 10% de la glucosa se transforma en biomasa y el rendimiento de etanol y CO<sub>2</sub> alcanzan el 90% del valor teórico, el ATP formado se utiliza para las necesidades energéticas de la célula. La envoltura de la célula de levadura incluye una membrana plástica un espacio periplásmico y una pared celular constituida principalmente por polisacáridos y una pequeña cantidad de péptidos.

La pared tiene una estructura semirrígida permeable al soluto que proporciona a las levaduras una considerable fuerza compresional y tencil. Los grupos carboxilos de los péptidos de la pared celular confieren a las levaduras utilizadas en la elaboración de cerveza una capacidad de floculación importante lo que permite la separación sólido líquido después de la fermentación se cree que la floculación se debe a la formación de puentes salinos entre los iones calcio y estos grupos carboxilos de la pared celular. De la fermentación alcohólica se obtienen muchos productos como: vino, cerveza, alcohol, chocolate, pan, etc.

La degradación de los azúcares puede ocurrir mediante otra vía, dando lugar a otros productos secundarios que participan en las propiedades sensoriales del producto final (Ácido acético, Ácido láctico, Ácido pirúvico y acetaldehído, Ácido succínico, Acetona, Diacetilo y 2-3 Butanodiol (butilenglicol), Alcoholes Superiores, Ésteres y Acetatos, Vinil-Fenoles y Etil-Fenoles). Esto ocurre cuando los niveles de oxígeno permiten que el etanol producido se oxide y se degrade en otros productos como los antes mencionados. Cabe destacar que este es el proceso que se va a utilizar para el



---

desarrollo de esta investigación ya que se obtiene como producto final el deseado por la misma.

#### **2.2.2.1.c Fermentación Butírica**

Se produce a partir de la lactosa o del ácido láctico con formación de ácido butírico y gas. Es característica de las bacterias del género *Clostridium* y se caracteriza por la aparición de olores pútridos y desagradables.

#### **2.2.2.1.d Fermentación de la Glicerina**

El propanotriol es uno de los principales productos de la degradación digestiva de los lípidos en el curso del ciclo de Krebs. Se produce también como un producto intermedio de la fermentación alcohólica.

#### **2.2.2.1.e Fermentación Láctica**

Se llama al proceso celular donde se utiliza glucosa para obtener energía y donde el producto de desecho es el ácido láctico. Este proceso lo realizan muchas bacterias (llamadas bacterias lácticas), algunos protozoos y ocurre en los tejidos animales, en ciertos protozoarios, hongos y bacterias. Un ejemplo de este tipo de fermentación es la acidificación de la leche.

#### **2.2.2.1.f Fermentación Pútrida**

Es un tipo de fermentación que se lleva a cabo sin gasto de sustrato oxidante. Se basa en la degradación de sustratos de naturaleza proteica, para obtener productos malolientes como escatol, cadaverinas o indol.

La descripción de la cinética de la fermentación debe tener en cuenta el desarrollo celular y la actividad que se mantiene en la fase estacionaria. Es importante estudiar la influencia de los factores (inhibición competitiva de la glucosa y de la



---

fructosa, temperatura, inhibición por producto) sobre el crecimiento microbiano así como sobre la viabilidad de las células. La importancia de la densidad celular ayuda a lograr óptimos resultados en la fermentación ya que predice la cinética de crecimiento y por medio de esto se determina el tiempo para obtener los metabolitos deseados.

### 2.2.2.2 Factores que afectan al desarrollo de la fermentación alcohólica:

- **Uso de pesticidas:** Tienen propiedades anti-levaduras, lo que puede perturbar la fermentación.
- **Exceso de azúcares:** A altas concentraciones, los azúcares tienen un efecto inhibitorio sobre el crecimiento de los microorganismos.
- **Efecto del alcohol:** El etanol tiene un efecto antiséptico. A concentración alta (12,5-13%), inhibe el crecimiento de las levaduras
- **Escasez de nitrógeno asimilable:** Las levaduras necesitan nitrógeno “asimilable” constituido por nitrógeno amoniacal y diversos aminoácidos. A veces, es necesario enriquecer los mostos. Un exceso de nitrógeno puede modificar los caracteres aromáticos, con menos productos secundarios de fermentación.
- **Adición de sulfitos:** Los sulfitos tienen importantes funciones antioxidantes, antisépticas, desinfectantes y depuradoras del color. Son inhibidores de la formación de bacterias, mohos y levaduras; permite controlar la presencia de organismos alterantes en el mosto. Respecto a la fermentación, suelen retrasar el inicio pero no el transcurso de la fermentación
- **Temperatura:** Toda fermentación se desarrolla entre 10 y 35 °C. A partir de 35 °C, la velocidad de crecimiento disminuye de manera importante, y a 60-70°C se destruye toda fermentación. Las temperaturas excesivamente frías también influyen sobre la fermentación.

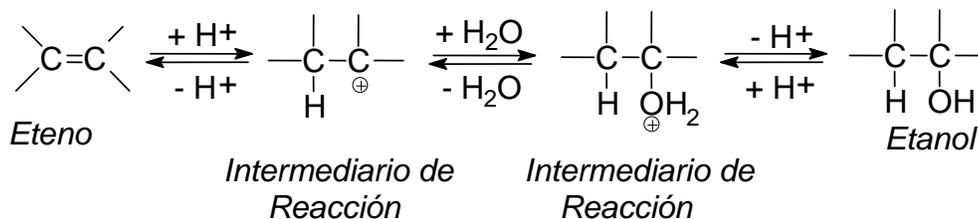
El alcohol etílico es el producto químico orgánico sintético más antiguo empleado por el hombre, sino uno de los más importantes. Sus usos más comunes son



industriales, domésticos y medicinales. La industria emplea mucho el alcohol etílico como disolvente para lacas, barnices, perfumes y condimentos; como medio para reacciones químicas, recristalizaciones y forma parte de proyectos generadores de nuevas alternativas para combustibles en pro de la formación de ambientes más limpios.

Cabe destacar que aproximadamente el 91% de la producción mundial de etanol es obtenido a partir de la fermentación mientras que el resto se obtiene a partir de síntesis química o la mejor llamada hidratación del etileno.

La hidratación del etileno es el método industrial más importante de fabricación de alcohol etílico en presencia de ácido sulfúrico como catalizador y se trata de una reacción de adición electrófila, que esquemáticamente puede representarse mediante la ecuación:



El grupo (-OH) se adiciona al átomo de carbono más sustituido del doble enlace. Por ello, éste es un método muy apropiado para la obtención de alcoholes secundarios y terciarios, algunos de los cuales se preparan así industrialmente a partir de las fracciones de olefinas procedentes del craqueo del petróleo. Asimismo, éste etileno, CH<sub>2</sub> = CH<sub>2</sub> en presencia de ácido sulfúrico.

El proceso de fermentación es anaeróbico ya que se produce en ausencia de oxígeno y se puede definir igualmente como la levitación anaeróbica del metabolismo de unos nutrientes, tales como la azúcar convierte a estos nutrientes en ácido láctico,



---

ácido acético, y etanol. Éstos son el producto final de fermentación de algunos microorganismos:

- Saccharomyces: alcohol etílico y dióxido de carbono
- Estreptococo y Lactobacillus: el ácido láctico
- Propionibacterium: ácido propionico, ácido acético, y el dióxido de carbono
- Escherichia coli: ácido acético, ácido láctico, ácido succinic, alcohol etílico, dióxido de carbono e hidrógeno
- Enterobacter: ácido fórmico, alcohol etílico, ácido 2,3 butanodiol y láctico, dióxido de carbono, e hidrógeno.
- Clostridium: ácido butírico, alcohol butílico, acetona, alcohol de isopropílico, dióxido de carbono, e hidrógeno

En un significado más amplio, la fermentación hace referencia al crecimiento de microorganismos en los alimentos. Aquí, no se establece diferencia entre metabolismo aeróbico (el oxígeno es usado) y anaeróbico (ningún oxígeno es usado). La fermentación cambiará gradualmente las características de los alimentos por la acción de enzimas, producidas por algunas bacterias, mohos y levaduras.

Existen distintos tipos de fermentación con los cuales se obtienen diversos productos. Para el caso de esta investigación la fermentación alcohólica es el punto a desarrollar.

Las levaduras son microorganismos unicelulares, que consiguen su energía por medio de la fermentación alcohólica, en la que rompen las moléculas de glucosa para obtener la energía para sobrevivir y producen el alcohol como consecuencia de la fermentación. Son cuerpos unicelulares (generalmente de forma esférica) de un tamaño que ronda los 2 a 4  $\mu\text{m}$  y que están presentes de forma natural en algunos productos como las frutas, cereales y verduras. Son lo que se denominan: organismos anaeróbicos facultativos, es decir que pueden desarrollar sus funciones biológicas sin

---



---

oxígeno. Se puede decir que el 96% de la producción de etanol la llevan a cabo hongos microscópicos, diferentes especies de levaduras, entre las que se encuentran principalmente *Saccharomyces cerevisiae*, *Kluyveromyces fragilis*, *Torulaspota* y *Zymomonas mobilis*. Los microorganismos responsables de la fermentación son de tres tipos: bacterias, mohos y levaduras. Cada uno de estos microorganismos posee una característica propia sobre la fermentación que son capaces de provocar. En algunos casos son capaces de proporcionar un sabor característico al producto final (como en el caso de los vinos o cervezas). A veces estos microorganismos no actúan solos, sino que cooperan entre sí para la obtención del proceso global de fermentación. Las propias levaduras se han empleado a veces en la alimentación humana como un subproducto industrial. Se ha descubierto que en algunos casos es mejor inmovilizar (reducir el movimiento) de algunas levaduras para que pueda atacar enzimáticamente mejor y con mayor eficiencia sobre el substrato de hidratos de carbono evitando que los microorganismos se difundan facilitando su recuperación (los biocatalizadores suelen ser caros), para ello se emplean 'fijadores' como agar, alginato de calcio, astillas de madera de bálsamo, entre otras.

Algunas cepas de levaduras tienen eficiencias de fermentación altas sin necesidad de fijación, incluso a relativas velocidades de movilidad, tal y como puede ser el caso de *Zymomonas mobilis*. Sin embargo, esta levadura no se ha empleado industrialmente para la fermentación de la cerveza y de la sidra por proporcionar sabores y olores desagradables. No obstante posee una alta resistencia a sobrevivir a concentraciones elevadas de etanol, lo que la convierte en una levadura ideal en la generación de etanol para usos no comestibles (como puede ser biocombustibles) mientras se desarrolle una buena inamovilidad parcial de la misma, la *kluyveromyces fragilis* es una especie fermentadora de la lactosa que se explota en pequeña escala para la producción de alcohol a partir del suero de leche debido a que en este medio es donde este microorganismo se desenvuelve con mayor rendimiento. Cuando el medio es rico en azúcar (como puede ser el caso de las melazas o siropes), la transformación del mismo

---



---

en alcohol hace que la presencia de una cierta concentración (generalmente expresada en grados brix) afecte a la supervivencia de levaduras no pudiendo realizar la fermentación en tal medio (las altas concentraciones de azúcar frenan los procesos osmóticos de las membranas de las células). Algunos enzimas participan en la fermentación, como puede ser la diastasa o la invertasa. Aunque la única responsable de convertir los hidratos de carbono en etanol y dióxido de carbono es la zimasa. La zimasa es la responsable final de dirigir la reacción bioquímica que convierte la glucosa en etanol. La idea de que una sustancia albuminoide específica desarrollada en la célula de la levadura llega a producir la fermentación fue ya expuesta en el año 1858 por Moritz Traube como la *teoría enzimática o fermentativa* y, más tarde, ha sido defendida por Felix Hoppe-Seyler hasta llegar al descubrimiento de Eduard Buchner que llegó a hacer la fermentación sin la intervención de células y hongos de levadura.

Las levaduras fermentativas se pueden clasificar en tres grandes grupos con relación a su influencia dentro de este proceso:

#### **2.2.2.2.a Levaduras de inicio de fermentación**

Se trata generalmente de levaduras apiculadas, es decir con forma de limón, que tienen un bajo poder fermentativo (hasta 4-5 %Vol.). Muchas de ellas son poco beneficiosas ya que producen bastante acidez volátil, a excepción de *Schizosaccharomyces veronae*. Podemos citar *Kloeckera apiculata* como la levadura de este tipo más común en la mayoría de las vinificaciones.

Sobre la base de esta influencia negativa por formación de acidez volátil se creó la denominada "fermentación súper-cuatro" que consistía en encabezar los mostos con alcohol hasta 4 %Vol. con el fin de evitar este tipo de levaduras. Hoy en día es un método en desuso, principalmente debido al empleo de pies de cuba de levaduras seleccionadas o a la utilización de levaduras secas activas.



---

#### **2.2.2.2.b Levaduras de poder fermentativo medio-alto**

Una vez que se han superado los 4-5 %Vol. de alcohol, otras especies de levaduras dominan el proceso como es el caso de *Saccharomyces cerevisiae* var. *ellipsoideus*, *Saccharomyces pastorianus*, y otras.

#### **2.2.2.2.c Levaduras de elevado poder fermentativo**

Al alcanzar los 10-11%Vol de alcohol, hay otras especies de levaduras que comienzan a ejercer su predominio debido a que gozan de un elevado poder fermentativo como son *Saccharomyces oviformis*, *Saccharomyces bayanus*, y otros *Saccharomyces ellipsoideus*, entre otras. Exceptuando microvinificaciones de laboratorio en las que se han llegado a alcanzar hasta 18-20 % Vol. de alcohol, lo habitual es que no puedan fermentar más allá de los 13,5-14,5 % Vol. de alcohol. Dentro de este grupo se encuentran también las levaduras típicas de la segunda fermentación de vinos espumosos.

### **2.2.2.3 Condiciones necesarias para la fermentación alcohólica**

#### **2.2.2.3.a Temperatura**

Las levaduras son microorganismos mesófilos, esto hace que la fermentación pueda tener lugar en un rango de temperaturas desde los 13-14 °C hasta los 33-35 °C. Dentro de este intervalo, cuanto mayor sea la temperatura mayor será la velocidad del proceso fermentativo siendo también mayor la proporción de productos secundarios. Sin embargo, a menor temperatura es más fácil conseguir un mayor grado alcohólico, ya que parece que las altas temperaturas que hacen fermentar más rápido a las levaduras llegan a agotarlas antes.

La temperatura más adecuada para realizar la fermentación alcohólica se sitúa entre los 18-23 °C y es la que se emplea generalmente en la elaboración de vinos



---

blancos. Por encima de 33-35 °C el riesgo de parada de fermentación es muy elevado, al igual que el de alteración bacteriana ya que a estas elevadas temperaturas las membranas celulares de las levaduras dejan de ser tan selectivas, emitiendo substratos muy adecuados para las bacterias.

#### **2.2.2.3.b Aireación**

Durante mucho tiempo se pensó que las levaduras eran microorganismos anaerobios estrictos, es decir, debía realizarse la fermentación en ausencia de oxígeno. Sin embargo, es un hecho erróneo ya que requieren una cierta aireación. Una aireación sumamente excesiva es totalmente absurda ya que, entre otras consecuencias, no obtendríamos alcohol sino agua y anhídrido carbónico debido a que las levaduras, cuando viven en condiciones aeróbicas, no utilizan los azúcares por vía fermentativa sino oxidativa, para obtener con ello mucha más energía.

#### **2.2.2.3.c pH**

El pH (3,1- 4) no es el más adecuado para la vida de las levaduras, menos para la de las bacterias, prefiriendo convivir con valores más elevados. Cuanto menor es el pH es más complicado para las levaduras fermentar, además, más elevada será la fracción de sulfuro que se encuentra libre, por lo que se recomienda un pH alrededor de (4-5).

#### **2.2.2.3.d Nutrientes y Activadores**

Las levaduras fermentativas necesitan los azúcares para su catabolismo, es decir para obtener la energía necesaria para sus procesos vitales, pero además necesitan otros substratos para su anabolismo como son nitrógeno, fósforo, carbono, azufre, potasio, magnesio, calcio y vitaminas, especialmente tiamina (vitamina B1). Por ello es de vital importancia que el medio disponga de una base nutricional adecuada para poder llevar a cabo la fermentación alcohólica.



---

El nitrógeno es de todos el más importante, siendo necesario que el mosto contenga inicialmente nitrógeno amoniacal y en forma de aminoácidos por encima de 130-150 ppm. Una deficiencia de estos nutrientes hará que "no les quede más remedio" que atacar contra su pesar las gigantescas proteínas, liberándose H<sub>2</sub>S (aroma a huevos podridos). La presencia de esteroides y ácidos grasos insaturados es también necesaria obteniéndolos inicialmente del mosto y posteriormente de las células madres. Esteroides y ácidos grasos insaturados de cadena larga son necesarios fundamentalmente para que sus membranas celulares puedan ser funcionales.

#### **2.2.2.3.e Inhibidores**

Es importante evitar la presencia de inhibidores en el mosto como restos de productos fitosanitarios y ácidos grasos saturados de cadena corta.

#### **2.2.2.3.f Concentración inicial de azúcares**

No se puede pensar en fermentar un mosto con una concentración muy elevada de azúcares. En estas condiciones osmófilas las levaduras simplemente estallarían al salir bruscamente el agua de su interior para equilibrar las concentraciones de solutos en el exterior y en el interior de la célula, es decir, lo que se conoce como una plasmólisis.

Esta es la base de la elaboración de mostos concentrados estables microbiológicamente ( $^{\circ}\text{Be} >29$ ), si bien determinadas especies de levaduras como *Saccharomyces Ludwigii* y *Schizosaccharomyces pombe*, entre otras, son capaces de resistir.

Existen distintos tipos o tecnologías comúnmente usadas para la obtención de etanol vía fermentativa en las cuales tenemos:



### 2.2.2.4 Fermentación Discontinua

Una fermentación discontinua (en batch) puede ser considerada como un "sistema cerrado". Al inicio de la operación se añade la solución esterilizada de nutrientes y se inocula con el microorganismo, permitiendo que se lleve a cabo la incubación en condiciones óptimas de fermentación. A lo largo de toda la fermentación no se añade nada, un agente antiespumante en el caso de cargas a gran escala y si es necesario ácidos o bases para controlar el pH. La composición del medio de cultivo, la concentración de la biomasa y la concentración de metabolitos cambia generalmente como resultado del metabolismo de las células observándose las cuatro fases típicas de crecimiento: fase de latencia, fase logarítmica, fase estacionaria y fase de muerte. En los procesos comerciales la fermentación frecuentemente se interrumpe al final de la fase logarítmica (metabolitos primarios) o antes de que comience la fase de muerte (metabolitos Secundarios).

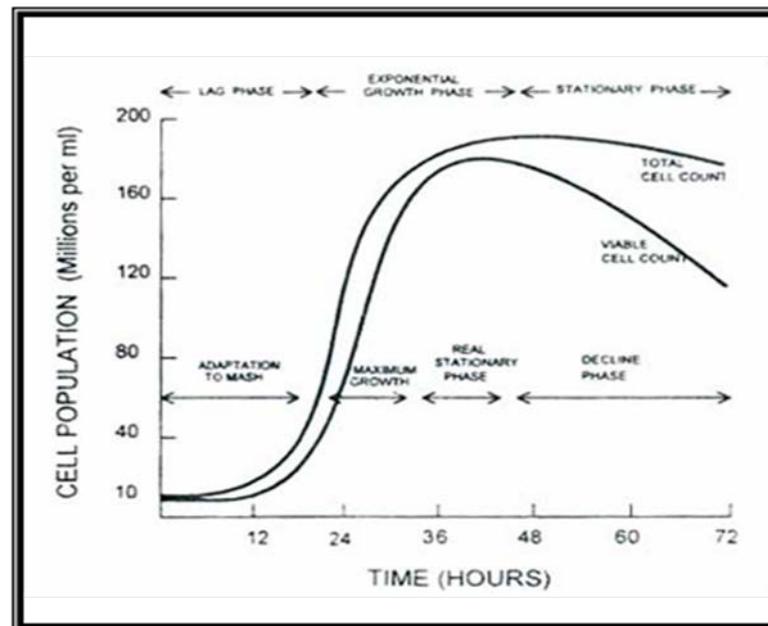


Figura 2.8. Crecimiento típico de la levadura en el caldo de fermentación (tomado de Lyons et al, 1995, 90)



---

Este crecimiento comprende tres fases:

#### **2.2.2.4.a Fase de Latencia**

En esta fase, el microorganismo, sometido a las condiciones necesarias para el comienzo de la degradación de sustrato en la cual está dispuesto. Básicamente es un periodo de ajuste metabólico. El crecimiento es bajo, y prácticamente no se presenta producción de etanol. Debido a la transferencia del microorganismo de la levadura al nuevo medio, éste puede verse afectado por cambios en el pH, aumento en el suministro de nutrientes y descenso en los inhibidores de crecimiento.

#### **2.2.2.4.b Fase Exponencial**

Esta fase es la más importante para el proceso, ya que la mayor parte del etanol se produce en este periodo. Depende parcialmente de la concentración inicial del sustrato, y la cantidad de etanol a producir está condicionada por la duración de esta fase.

#### **2.2.2.4.c Fase estacionaria**

En este punto se detiene el crecimiento, debido al agotamiento de los nutrientes en el caldo de fermentación, así como al efecto inhibitor que provoca la concentración de etanol en el medio. La masa de los microorganismos permanece constante en esta fase, por el equilibrio que se da entre los que permanecen vivos y los muertos.

#### **2.2.2.4.d Fase de muerte**

Aquí se rompe el equilibrio entre los microorganismos vivos y muertos, y la población disminuye. Muchos procesos por lotes finalizan antes de alcanzar esta fase.

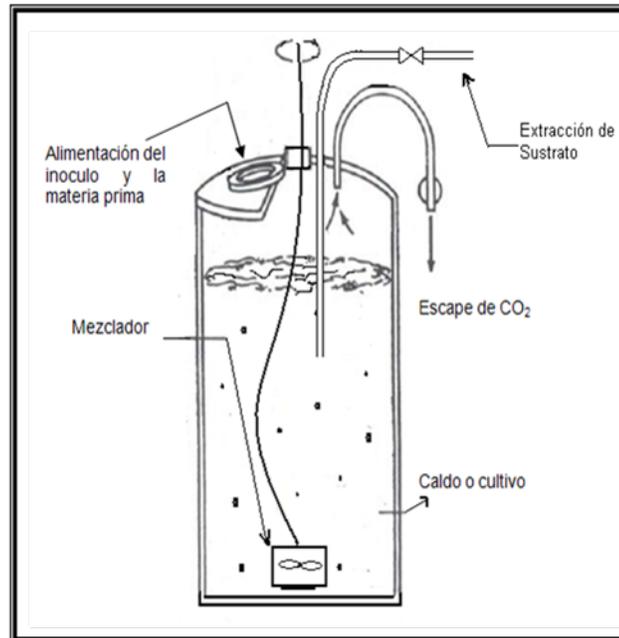


Figura 2.9. Fermentador discontinuo (Batch)

### 2.2.2.5 Fermentación Alimentada (FED – BATCH)

En los procesos convencionales discontinuos que acabamos de describir, todos los sustratos se añaden al principio de la fermentación. Una mejora del proceso cerrado discontinuo es la fermentación alimentada que se utiliza en la producción de sustancias como la penicilina. En los procesos alimentados, los sustratos se añaden escalonadamente a medida que progresa la fermentación. La formación de muchos metabolitos secundarios está sometida a represión catabólica (efecto glucosa). Por esta razón en el método alimentado los elementos críticos de la solución de nutrientes se añaden en pequeñas concentraciones al principio de la fermentación y continúan añadiéndose a pequeñas dosis durante la fase de producción.

En las fermentaciones por lotes alimentados las concentraciones de sustrato son bajas a lo largo del proceso, a medida que aumenta la concentración de etanol. El control de la alimentación representa una ventaja, ya que se neutraliza el efecto



---

inhibidor que tienen las altas concentraciones de sustrato y etanol sobre los microorganismos. Asimismo, se ha observado que las adiciones de sacarosa en forma lineal o exponencialmente decreciente han llevado a aumentos en la productividad de etanol en un 10 a 14 %.

### 2.2.2.6 Fermentación Continua

En la fermentación continua se establece un sistema abierto. La solución nutritiva estéril se añade continuamente al biorreactor y una cantidad equivalente de solución utilizada de los nutrientes, con los microorganismos, se saca simultáneamente del sistema.

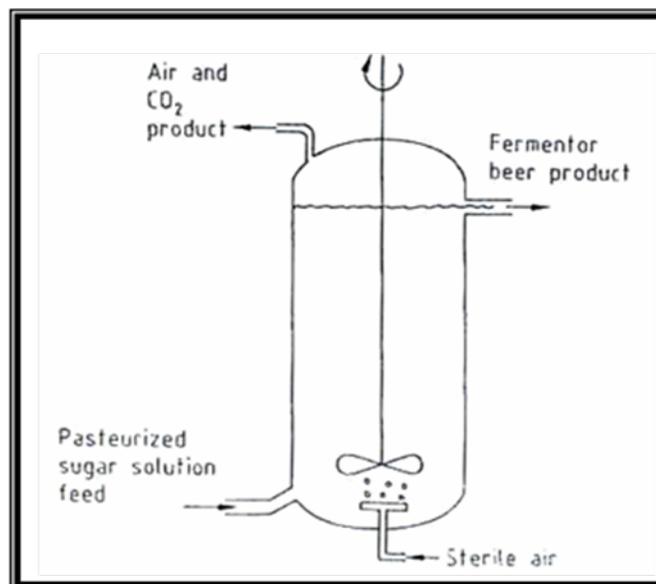
El objetivo fundamental de la industria de las fermentaciones es minimizar costes e incrementar los rendimientos. Este objetivo puede alcanzarse si se desarrolla el tipo de fermentación más adecuado para cada paso en particular. Si bien los procesos de fermentación continua no se utilizan de forma general en la industria, debido fundamentalmente al mayor nivel de experiencia que se tiene en el crecimiento de células en fermentación discontinua, el coste de producción de biomasa mediante cultivo continuo es potencialmente inferior al de cultivo discontinuo. De este modo se han instalado plantas de producción para la producción continua de proteína de origen unicelular a partir de n-alcanos, compuestos C1 y almidones.

Aunque muchas fermentaciones para la producción de metabolitos funcionan bien como procesos continuos, sólo unos pocos procesos han resultado útiles para la aplicación práctica por varias razones:

- Muchos métodos de laboratorio operan continuamente durante solamente 20 a 200 horas; para que sea de utilidad industrial el sistema debe ser estable durante al menos 500 a 1.000 horas.



- Mantener las condiciones estériles a escala industrial a lo largo de un largo período de tiempo es difícil.
- La composición de los sustratos debe ser constante a fin de obtener una producción máxima. La composición de las soluciones de nutrientes industriales son variables (líquido de maceración del maíz, peptona, entre otros.) lo que puede originar cambios en la fisiología de la célula y disminuir la productividad.
- Cuando se utilizan cepas de alto rendimiento se producen mutantes degenerados, los cuales pueden crecer en cultivo continuo más deprisa que las cepas de producción por lo que el rendimiento disminuye con el tiempo ya que cada vez son menos células las que sintetizan el producto de interés.



**Figura 2.10. Reactor continuo de tanque agitado  
(tomado de Kosaric et al, 1987, 610)**



---

### 2.2.2.7 Reactores de enzimas o células inmovilizadas

Consiste en pasar el medio fresco a través de un biorreactor en el que por diversas técnicas hemos inmovilizado células (o enzimas). En el biorreactor se producen las transformaciones bioquímicas que deseamos y recuperamos el producto transformado tras su paso por la columna. Con este sistema se eliminan los problemas de desequilibrio (estabilidad) del sistema continuo clásico y además el producto resultante está libre de células. Presenta el inconveniente de que no todos los microorganismos pueden inmovilizarse.

Existen tres métodos de inmovilizar las células:

- Asociación física mediante resinas de intercambio iónico. La unión se puede romper fácilmente.
- Unión covalente mediante glutaraldehído, tolueno, di-isocianato, iodo acetil celulosa. Unión Fuerte aunque inactivación.
- Atrapamiento mediante colágeno, gelatina, agar, alginatos, poliacrilamida, poliestireno. Es el método más utilizado en inmovilización de células; para ello se mezclan las células con el polisacárido líquido y posteriormente se deja enfriar para que solidifique. Finalmente se fragmenta o granula y se empaqueta en una columna.

### 2.2.3 DESTILACIÓN

Cuando se ponen en contacto dos fases que tienen diferente composición es posible que ocurra la transferencia de algunos de los componentes presentes de una fase hacia la otra y viceversa. Esto constituye la base física de las operaciones de transferencia de masa. Si se permite que estas dos fases permanezcan en contacto durante un tiempo suficiente, se alcanzará una condición de equilibrio bajo la cual no habrá ya transferencia neta de componentes entre las fases. En la mayor parte de los

---



casos de interés que se presentan en las operaciones de transferencia de masa, las dos fases tienen una miscibilidad limitada, de tal forma que en el equilibrio existen dos fases que pueden separarse una de la otra. Con frecuencia, estas fases tienen composiciones diferentes entre sí y distintas también de la composición que tenía cada fase antes de ponerse en contacto con la otra. Como resultado de lo anterior, las cantidades relativas de cada uno de los componentes que han sido transferidas entre las fases, son distintas, lográndose de esta forma una separación. Bajo condiciones adecuadas, la acción repetida de poner las fases en contacto y separarlas a continuación, puede conducir a la separación casi completa de los componentes. Las diferencias en composición que presentan las fases en equilibrio, constituyen la base física para los procesos de separación que utilizan equipos con etapas múltiples.

Cuando se plantea el problema de separar los componentes que forman una mezcla homogénea, el ingeniero aprovecha las diferencias que existen en las propiedades de los constituyentes que forman la mezcla para efectuar su separación. Se analizan las diversas propiedades químicas y físicas de los constituyentes, con el objeto de determinar en cuáles de esas propiedades se observa una mayor diferencia entre los componentes ya que por lo general, cuanto mayor sea la diferencia de alguna propiedad, más fácil y económica será la separación deseada. Resulta evidente que el ingeniero debe tomar en consideración muchos otros factores al seleccionar una ruta de separación para un proceso. Los requerimientos de energía, el costo y disponibilidad de los materiales de construcción y de proceso, así como la integración con el resto del proceso químico, son factores que contribuyen para determinar cual proceso de separación ofrece un mayor atractivo desde el punto de vista económico.

El proceso de separación más utilizado en la industria química es la Destilación, esta operación unitaria también es conocida como fraccionamiento o destilación fraccionada. La separación de los constituyentes se basa en las diferencias de



---

volatilidad. En la destilación, una fase de vapor se pone en contacto con una fase líquida, transfiriéndose masa del líquido al vapor y del vapor al líquido. Por lo general, el líquido y el vapor contienen los mismos componentes aunque en distintas proporciones. El líquido se encuentra a su temperatura de burbuja, mientras que el vapor en equilibrio está a su temperatura de rocío. En forma simultánea, se transfiere masa desde el líquido por evaporación y desde el vapor por condensación. La evaporación y condensación involucran calores latentes de vaporización de cada componente y por ello, al calcular una destilación deben considerarse los efectos del calor.

La destilación se utiliza mucho para separar mezclas líquidas en componentes más o menos puros. Debido a que la destilación implica evaporación y condensación de la mezcla, es una operación que necesita grandes cantidades de energía.

Una gran ventaja de la destilación es que no es necesario añadir un componente a la mezcla para efectuar la separación.

La destilación es la operación de separar, mediante calor, los diferentes componentes líquidos de una mezcla. Esta separación se produce gracias a la diferencia de volatilidad entre las sustancias que forman la mezcla. El componente de mayor volatilidad sale por la parte superior mientras que el menos volátil se obtiene por fondo.

Una forma de destilación, conocida desde la antigüedad, es la obtención de alcohol aplicando calor a una mezcla fermentada. En la industria química se utiliza la destilación para la separación de mezclas simples o complejas. Existen varios tipos de destilación por lo que se puede establecer una clasificación de acuerdo a diferentes criterios.

Según el modo de operación, se tiene:

- Destilación continua.



- 
- Destilación por carga o discontinua.

Según el número de componentes que contenga la mezcla entrante a la columna se distinguen:

- Destilación binaria.
- Destilación multicomponentes.

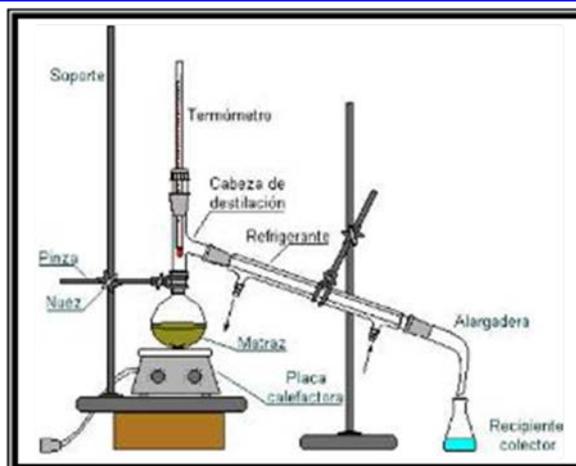
Otros tipos de destilaciones especiales son:

- Destilación simple.
- Destilación fraccionada.
- Destilación azeotrópica.
- Destilación extractiva.
- Destilación al vacío.

La **destilación discontinua** se realiza introduciendo la mezcla en una caldera, donde se le aplica calor y los vapores condensados se almacenan en un recipiente. La operación de llenado de la caldera con la mezcla hace que el proceso se realice en lotes.

### 2.2.3.2 Destilación Simple

Se usa para la separación de líquidos con punto de ebullición inferiores a 150° a presión atmosférica de impurezas no volátiles o de otros líquidos miscibles que presenten un punto de ebullición al menos 25° superior al primero de ellos. Para que la ebullición sea homogénea y no se produzcan proyecciones se introduce en el matraz un trozo de plato poroso (o agitación magnética).



**Figura 2.11. Equipo para destilación simple o sencilla**

Para la destilación sencilla se utiliza el aparato representado en la figura superior montado sobre dos soportes. Consta de un matraz de destilación, provisto de un termómetro, que descansa sobre una placa calefactora. El matraz de destilación va unido a un refrigerante con camisa de refrigeración por la que circula agua en contracorriente. Finalmente el extremo inferior del refrigerante se monta la cola de destilación junto con un recipiente (Erlenmeyer o vaso de precipitados) donde se recogerá el destilado.

El líquido que se quiere destilar se pone en el matraz (que no debe llenarse mucho más de la mitad de su capacidad) y se calienta con la placa calefactora. Cuando se alcanza la temperatura de ebullición del líquido comienza la producción apreciable de vapor, condensándose parte del mismo en el termómetro y en las paredes del matraz.

La mayor parte del vapor pasa al refrigerante donde se condensa debido a la corriente de agua fría que asciende por la camisa de este. El destilado (vapor condensado) escurre al matraz colector a través de la alargadera.

La existencia de una capa de sólido en el fondo del matraz de destilación puede ser causa de violentos saltos durante la destilación, especialmente si se utiliza una calefacción local fuerte en el fondo del matraz. La calefacción de un matraz que lleva



---

cierta cantidad de sólido depositado en el fondo se debe realizar siempre mediante un baño líquido.

### 2.2.3.3 Destilación Fraccionada

Se usa para separar componentes líquidos que difieren de en menos de 25° en su punto de ebullición. Cada uno de los componentes separados se les denomina fracciones. Es un montaje similar a la destilación simple en el que se ha intercalado entre el matraz y la cabeza de destilación una columna que puede tener distinto diseño (columna de relleno). Al calentar la mezcla el vapor se va enriqueciendo en el componente más volátil, conforme asciende en la columna.

La destilación fraccionada es el método más empleado actualmente para separar los componentes de una mezcla líquida. Incluye el retorno de una parte del vapor condensado al equipo, de tal manera que el líquido que se regresa entra en contacto íntimo a contracorriente con los vapores que se dirigen al condensador. Este tipo de destilación es continua y permite manipular grandes cantidades de materiales y el reflujo hace posible alcanzar purzas elevadas en los productos destilados. Los equipos empleados en este tipo de destilación son torres o cilindros metálicos por los que pasan los vapores y los líquidos generados. Dentro de estas columnas se encuentran platos con perforaciones o empaques de cerámica para un mayor contacto líquido-vapor.

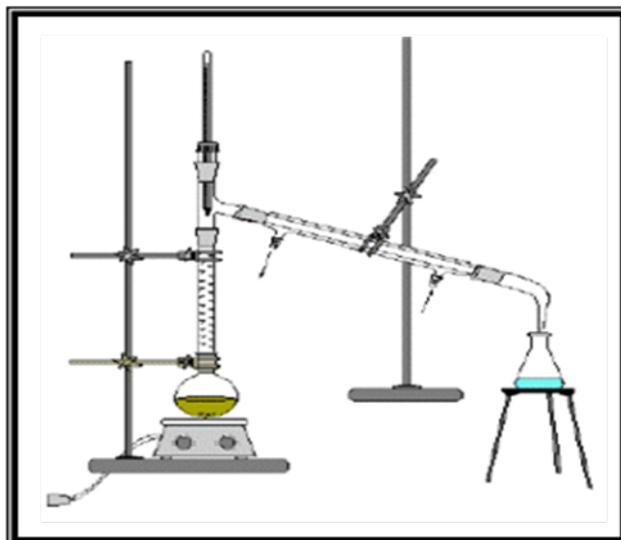


Figura 2.12. Equipo para destilación fraccionada

## 2.2.4 EQUILIBRIO LIQUIDO-VAPOR

El equilibrio liquido-vapor se refiere a una mezcla líquida con una temperatura y presión determinada, que se encuentra en equilibrio con una mezcla de vapor de la misma presión y temperatura bajo la cual se establece el sistema. Los parámetros de interés, para el estudio de estos sistemas son la temperatura, la presión y las composiciones de ambas fases.

El potencial químico no puede ser expresado como una cantidad absoluta, debe definirse un estado de referencia y los valores numéricos del potencial químico son difíciles de expresar utilizando relaciones físicas. Además, el potencial químico se aproxima a un valor negativo a medida que la presión tiende a cero. Por esto, el potencial químico no es conveniente para los cálculos de equilibrio de fases y se prefiere emplear la fugacidad.

La fugacidad de cada uno de los componentes de una mezcla es equivalente a una pseudo presión, definida en términos de potencial químico



---

$$\hat{f}_i = C \times e^{\left[\frac{\mu_i}{R \times T}\right]} \quad (\text{Ec. 2.1}) \text{ (Prausnitz; 1987)}$$

Donde:

$\hat{f}_i$ : Fugacidad del componente i (mmHg).

C: constante que depende de la temperatura.

$\mu$ : potencial químico.

R: constante universal de los gases  $\left[\frac{J}{\text{mol} \times K}\right]$

Cuando se alcanza el equilibrio termodinámico, una especie dada tiene la misma fugacidad en cada fase existente. Esta igualdad así como la condición de temperatura y presión constantes para las fases, constituyen las condiciones requeridas para el equilibrio de fases. Para un componente puro, la fugacidad ( $\hat{f}_i$ ) en la mezcla se transforma en la fugacidad del componente puro ( $f_i$ ). Para un gas ideal, la fugacidad es igual a la presión y para cada componente en la mezcla de gases ideales la fugacidad es igual a su presión parcial

$$\hat{f}_i = P_i = Y_i \times P \quad (\text{Ec. 2.2}) \text{ (Prausnitz; 1987)}$$

Donde:

$P_i$ : presión parcial del componente i (mmHg).

P: presión del sistema (mmHg).

$Y_i$ : composición molar (adim).

---



Para cada componente “i” presente en la mezcla, la condición de equilibrio termodinámico está dada por:

$$f_i^V = f_i^L \quad (\text{Ec. 2.3}) \text{ (Prausnitz; 1987)}$$

Donde:

L: líquido

V: vapor

i: número de componente

la fugacidad de un compuesto depende de la temperatura, presión y la composición en dicha mezcla, como se comentó anteriormente. Por la estrecha relación entre la fugacidad y la presión es conveniente definir la relación para una sustancia pura como:

$$\phi = \frac{f_i}{P} \quad (\text{Ec. 2.4}) \text{ (Prausnitz; 1987)}$$

Donde:

$\phi_i$ : coeficiente de fugacidad de la especie pura (adim).

Para una mezcla, la fugacidad se expresa comúnmente en función de la composición molar “ $y_i$ ”, relacionado el coeficiente de fugacidad de la fase de vapor con la presión y composición:

$$f_i^V = \phi_i^V \times Y_i \times P \quad (\text{Ec. 2.5}) \text{ (Prausnitz; 1987)}$$

En consecuencia, el coeficiente de fugacidad puede ser calculado a partir de datos PVT (presión-volumen-temperatura) de la fase de vapor, obtenidos a partir de ecuaciones de estado. Para una mezcla de gases ideales:  $\phi_i = 1$



Y de la misma forma se puede calcular la fugacidad de cada especie en solución para la fase líquida, expresada con la fracción molar “ $X_i$ ”, y el coeficiente de actividad de la fase líquida de la siguiente manera:

$$f_i^L = X_i \times \gamma_i \times f_i^p \quad (\text{Ec. 2.6}) \text{ (Prausnitz; 1987)}$$

Así se introduce el coeficiente de actividad de la especie  $i$  en solución para la fase líquida, expresada con la fracción molar “ $X_i$ ”, y el coeficiente de actividad de la fase líquida de la siguiente manera:

$$\gamma_i = \frac{\hat{f}_i}{\hat{f}_i^{\text{id}}} = \frac{\hat{f}_i}{X_i \times f_i} \quad (\text{Ec. 2.7}) \text{ (Prausnitz; 1987)}$$

Para soluciones ideales  $\gamma_i^L = \gamma_i = 1$

#### 2.2.4.1 Ecuación de Wilson

La ecuación de Wilson tiene dos parámetros ajustables  $\Lambda_{12}$  y  $\Lambda_{21}$ , que en la deducción de Wilson se relacionan con los volúmenes molares de los componentes puros y con unas diferencias de energías caracterizadas por:

$$\Lambda_{12} \equiv \frac{v_2}{v_1} = e^{\left[ \frac{\lambda_{12} - \lambda_{11}}{R \times T} \right]} \quad (\text{Ec. 2.8}) \text{ (Van Ness; 1997)}$$

$$\Lambda_{21} \equiv \frac{v_1}{v_2} = e^{\left[ \frac{\lambda_{21} - \lambda_{22}}{R \times T} \right]} \quad (\text{Ec. 2.9}) \text{ (Van Ness; 1997)}$$



Donde:

$v$ : volumen molar de líquido puro del componente  $i$  (L/mol).

$\lambda$ : energía de interacción entre las moléculas (J).

Wilson (1974) presentó la siguiente expresión para la energía libre de Gibbs de exceso de una mezcla binaria, basada en consideraciones moleculares:

$$\frac{g^E}{RT} = -x_1 \times \ln(x_1 + A_{12} \times x_2) - x_2 \times \ln(x_2 + A_{21} \times x_1) \quad (\text{Ec. 2.10}) \quad (\text{Van Ness; 1997})$$

Los coeficientes de actividad deducidos a partir de la ecuación (2.10) son:

$$\ln \gamma_1 = -\ln(x_1 + A_{12} \times x_2) + x_2 \times \left[ \frac{A_{12}}{x_1 + A_{12} \times x_2} - \frac{A_{21}}{x_2 + A_{21} \times x_1} \right] \quad (\text{Ec. 2.11}) \quad (\text{Van Ness; 1997})$$

$$\ln \gamma_2 = -\ln(x_2 + A_{21} \times x_1) - x_1 \times \left[ \frac{A_{12}}{x_1 + A_{12} \times x_2} - \frac{A_{21}}{x_2 + A_{21} \times x_1} \right] \quad (\text{Ec. 2.12}) \quad (\text{Van Ness; 1997})$$

Estas ecuaciones tienen la particularidad de ajustar sistemas altamente no ideales completamente miscibles. Es muy efectiva para composiciones diluidas donde los efectos de la entropía dominan sobre los efectos de la entalpía.

Para soluciones ideales, estudios indican que  $\lambda_{ij}$  y  $\lambda_{ji}$  son dependientes de la temperatura. Los valores de  $v_i/v_j$  dependen también de la temperatura, pero la desviación puede ser pequeña comparando con los efectos del término exponencial de las ecuaciones de los parámetros  $A_{12}$  y  $A_{21}$ .

A medida que las mezclas se vuelven no ideales, pero aun miscibles, la ecuación de Wilson se vuelve marcadamente superior a las ecuaciones de Margules y Van Laar.



La ecuación de Wilson es considerablemente más satisfactoria para soluciones multicomponentes:

$$\ln \gamma_i = 1 - \ln \left[ \sum_j x_j \Lambda_{ij} \right] - \sum_k \frac{x_k \Lambda_{kj}}{\sum_j x_j \Lambda_{kj}} \quad (\text{Ec. 2.13}) \quad (\text{Van Ness; 1997})$$

Donde:

$\Lambda_{ij}=1$  para  $i=j$

Todos los índices se refieren a la misma especie y las adiciones están sobre todas las especies. Para cada par  $ij$  hay dos parámetros, porque  $\Lambda_{ij} \neq \Lambda_{ji}$ . Para un sistema ternario los tres pares  $ij$  están asociados con los parámetros  $\Lambda_{12}$ ,  $\Lambda_{21}$ ;  $\Lambda_{13}$ ,  $\Lambda_{31}$ ; y  $\Lambda_{23}$  y  $\Lambda_{32}$ .

La dependencia de la temperatura de los parámetros se da por:

$$\Lambda_{ij} = \frac{V_i}{V_j} \exp \frac{-\alpha_{ij}}{rt} \quad (i \neq j) \quad (\text{Ec. 2.14}) \quad (\text{Van Ness; 1997})$$

Donde:

$V_i$  y  $V_j$ : volúmenes molares a la temperatura  $T$  de los líquidos puros  $j$  e  $i$  (L/mol).

$\alpha_{ij}$ : constante independiente de la composición y temperatura (adim).

En estos términos la ecuación de Wilson, como el resto de los modelos de la composición local, se ha construido dentro de una dependencia aproximada de la temperatura para los parámetros. Es más, todos los parámetros se encuentran a partir de los datos para sistemas binarios (en contraste con los multicomponentes), lo cual hace que la determinación de los parámetros para los modelos de composición local sea una tarea de proporciones manejables.



*Capítulo II. Marco Referencial*





---

### III. MARCO METODOLÓGICO

*A continuación se describe el tipo de investigación a ser desarrollada y se presentan de forma ordenada las estrategias metodológicas que permiten obtener, clasificar, comprender y organizar la información necesaria para el logro de cada uno de los objetivos planteados.*

De acuerdo a los objetivos planteados, la investigación según el nivel de profundidad es de tipo proyectiva o proyecto factible, ya que durante el desarrollo de la misma se pretende crear una propuesta para la adición o anexión de etanol proveniente de la fermentación de desechos orgánicos en gasolinas para el desarrollo de nuevas opciones de mezclas.

En cuanto a la estrategia o diseño metodológico; la investigación es de tipo experimental, ya que se seguirá una serie de pasos con una cronología definida basada en la variación y recolección de datos para finalmente obtener una condición que garantice la obtención del etanol.

De acuerdo a lo descrito anteriormente la investigación es de tipo Proyectiva-Experimental factible, dado que implica una propuesta que engloba una manera de solventar los problemas de índole ambiental y económico, en cuanto a la crisis energética que se presenta actualmente, además de tomar en cuenta la evaluación que se plantea al producir el etanol a partir de materia orgánica (desecho); lo que establece que no se pone en tela de juicio el de proveer de alimentos con contenidos elevados de azúcar, excelentes propuestas como materia prima para generar el etanol, a la población.

Para el desarrollo sistemático de la investigación (DSI) se plantean las siguientes fases:



- Selección del desecho orgánico para proceder a la fermentación.
- Evaluación de las técnicas de fermentación.
- Investigación de la(s) tecnología(s) de extracción que se adaptan al proceso de obtención de etanol.
- Selección de la(s) tecnología(s) que mejor se adapte(n) al proceso de purificación del etanol.
- Evaluación de la relación costo-beneficio de la investigación desarrollada.

### 3.1 METODOLOGÍA

En esta sección se muestra de forma secuencial los pasos seguidos en la metodología empleada para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos planteados.

#### **3.1.1 Selección de la materia prima a utilizar.**

Para la selección de la materia prima a utilizar, se hizo uso de la herramienta metodológica conocida como matriz de selección, la cual es una técnica de comparación cualitativa – cuantitativa que aporta resultados rápidos y confiables.

##### **3.1.1.1 Identificación de los diferentes desechos orgánicos:**

Se conoce como materias primas a los materiales extraídos de la naturaleza que nos sirven para construir los bienes de consumo, obtener productos necesarios para la vida diaria o procesos industriales. Se clasifican según su origen: vegetal, animal, y mineral. En el caso de este trabajo la materia prima a utilizar son desechos orgánicos de frutas, es decir, la parte no aprovechada de las frutas, luego de ser procesadas y extraerles todo aquello necesario para el consumo humano o uso industrial.



---

Los desechos a considerar en esta investigación se escogerán basándose en las estadísticas de producción y consumo nacional de frutas en Venezuela, datos que se buscaran en el Instituto Nacional de Estadísticas y en la Federación Agropecuaria de Venezuela (Fedeagro) y se consideraran aquellos que sean más producidos y consumidos en el país y además se adecuen a las necesidades de la investigación.

### ***3.1.1.2 Determinación de los criterios de estudio para cada desecho.***

Para la aplicación de este método, es necesaria la consideración de una serie de criterios, que para este caso son:

- ✦ **Azúcares:** este criterio se refiere al porcentaje de azúcares directamente fermentables presentes en los desechos frutales, para ser empleados en la obtención de etanol vía fermentativa.
- ✦ **Disponibilidad:** para los autores, abarca lo concerniente a la disponibilidad bruta de frutas para el consumo nacional, expresado en kilogramos por persona al año, o lo que es lo mismo decir el consumo per cápita de dichas frutas.
- ✦ **Características:** este criterio es acerca de las características físicas propias de cada desecho, es decir, textura, homogeneidad, entre otras, que puedan influir de una u otra forma en el proceso de fermentación. También incluye la cantidad aprovechable del desecho para ser sometido al mencionado proceso.
- ✦ **Tratamientos:** abarca todo tratamiento especial que se deba dar al desecho orgánico antes de ser sometido al proceso fermentativo, encierra la adición de compuestos u alteración de la composición física o química del desecho.



- 
- ✦ **Almidón:** este criterio implica el porcentaje de almidón presente en los desechos, lo cual está íntimamente relacionado con el criterio anterior, ya que la presencia de este polisacárido en mayor cantidad que los azúcares directamente fermentables, conlleva al previo sometimiento de dicho desecho a un proceso de sacarificación para convertir el almidón en azúcar y así poder ser fermentadas posteriormente a alcohol etílico.

A cada criterio se le asigna una ponderación, el rango para este factor se fija del 5% al 100%.

### 3.1.1.3 Selección de la alternativa final

A continuación se presentan los criterios y la ponderación de los mismos, que se utilizaron para seleccionar la alternativa más viable.

Los criterios básicos a considerar para la evaluación de las propuestas son los siguientes:

- Azúcares.
- Disponibilidad.
- Características.
- Tratamientos.
- Almidón.

En la matriz de selección se le asigna a cada alternativa una ponderación, respecto a cada criterio. Se fija del 1 al 5, de la menos a la más favorable. A continuación se fijan los factores de peso y escala de evaluación correspondiente:

- ✦ **Azúcares:** Éste es considerado por los autores el criterio de mayor peso en la toma de decisión, ya que se debe seleccionar la materia prima que posea mayor cantidad de azúcares directamente fermentables, por esta



---

razón se le asignó un factor de peso de 30% y una escala comparativa mostrada a continuación:

(1) = muy bajo porcentaje

(2) = bajo porcentaje

(3) = moderado

(4) = alto porcentaje

(5) = muy alto porcentaje

- ✦ **Disponibilidad:** la disponibilidad del desecho orgánico a emplear constituye el segundo factor en orden de importancia para la selección de la alternativa más viable, por ello se le asigna un factor de peso de 25%; quedando la escala comparativa de la siguiente manera:

(1) = no disponible

(2) = poco disponible

(3) = moderadamente disponible

(4) = disponible

(5) = muy disponible

- ✦ **Características:** se considera este como el criterio de menor peso en la toma de decisión y por ello se le asigna un factor de peso de 10% y la siguiente escala comparativa:

(1) = muy malas

(2) = malas



---

(3) = buenas

(4) = muy buenas

- ✦ **Tratamientos:** se refiere al trato especial que se le deba dar al desecho antes de ser fermentado, por ello es considerado por los autores un criterio de mediana importancia, asignándosele un factor de peso de 15%. Dado que hay sólo dos alternativas se asignan dos valores en la escala comparativa:

(1) = lo requiere

(2) = no lo requiere

- ✦ **Almidón:** la presencia de almidón en el desecho en pequeñas o grandes cantidades es un criterio importante de estudiar por lo cual se considera de importancia considerable ya que representa un factor de incremento económico para el proceso. Se le asigna un factor de peso de 20% y los siguientes valores en la escala comparativa:

(1) = muy alto porcentaje

(2) = alto porcentaje

(3) = moderado

(4) = bajo porcentaje

(5) = muy bajo porcentaje

A continuación se muestra la matriz de selección con las alternativas propuestas:



**Tabla 3.1 Matriz de selección. Selección de la materia prima**

Criterios de selección	Factor de peso	Ponderación		
		Materia Prima		
		Desecho 1	Desecho 2	Desecho 3
<b>Azúcares</b>	<b>30%</b>			
<b>Disponibilidad</b>	<b>25%</b>			
<b>Características</b>	<b>10%</b>			
<b>Tratamientos</b>	<b>15%</b>			
<b>Almidón</b>	<b>20%</b>			
<b>Total</b>				

### **3.1.2 Selección de la tecnología de fermentación**

Existen distintos métodos que permiten la obtención de etanol por medio de la fermentación. Se hizo uso de una matriz de selección como herramienta metodológica con la intención de seleccionar la tecnología que mejor se adapte a las necesidades de la investigación.

#### **3.1.2.1 Identificación de las tecnologías de fermentación**

Como se ha mencionado anteriormente la obtención del etanol se realiza por medio de una fermentación que no es más que un proceso bioquímico donde se obtiene etanol a partir de una materia prima orgánica rica en carbohidratos utilizando la bacteria *Saccharomyces cerevisiae* para generar una catálisis enzimática.

Las tecnologías a estudiar en esta investigación se escogerán en base a una revisión bibliográfica para determinar cuáles son las más usadas y además las mas adecuadas a las necesidades del presente trabajo.



---

### **3.1.2.2 Determinación de los criterios de estudio para cada tecnología.**

Para la aplicación de este método, es necesaria la consideración de una serie de criterios, que para este caso son:

- ✦ **Principio:** Para la siguiente investigación se refiere al principio de funcionamiento de la tecnología de fermentación y a cómo se adapta ésta a las necesidades del diseño experimental que se llevará a cabo para la obtención del etanol.
  
- ✦ **Tratamientos:** Abarca todo tratamiento que se deba dar al sustrato que se va a fermentar, considerando las condiciones necesarias para un buen proceso, incluyendo o no la adición de compuestos.
  
- ✦ **Equipos:** este criterio implica la cantidad y disponibilidad de los equipos necesarios en cada tecnología, es decir, equipos para lograr el montaje de una fermentación. Cabe destacar que para este trabajo resulta favorable la utilización de equipos sencillos ya que esto se traduciría en una tecnología poco costosa y de fácil operación. .

A cada criterio se le asigna una ponderación, el rango para este factor se fija del 5% al 100%.

### **3.1.2.3 Selección de la alternativa final.**

A continuación se presentan los criterios y la ponderación de los mismos, que se utilizaron para seleccionar la alternativa más viable.

Los criterios básicos a considerar para la evaluación de las propuestas son los siguientes:



- Principio.
- Tratamientos.
- Equipos.

Igual al objetivo anterior, a cada alternativa se le asigna una ponderación, de acuerdo al criterio. Se fija del 1 al 5, de la menos a la más favorable. Seguidamente se fijan los factores de peso y escala de evaluación correspondiente:

- ✦ **Principio:** referente al principio de funcionamiento de la tecnología de fermentación y en cómo se adapta éste a las necesidades experimentales de esta investigación, es considerado por los autores como el factor de segunda importancia para la toma de decisión, ya que se debe seleccionar la tecnología que mejor se adapte a las necesidades del experimento a realizar, razón por la cual se le asignó un factor de peso de 40% y una escala comparativa mostrada a continuación:

(1) = menos adaptable

(2) = moderadamente adaptable

(3) = adaptable

(4) = muy adaptable

- ✦ **Tratamientos:** está relacionado con el trato especial que requiere la materia prima antes o durante el proceso de fermentación, por ende es considerado por los autores como un criterio de mediana importancia, asignándosele un factor de peso de 35%. Debido a que sólo existen dos opciones se asignan dos valores en la escala comparativa:

(1) = lo requiere



(2) = no lo requiere

- ✦ **Equipos:** La importancia de la utilización de este criterio es de alguna manera diferenciar la complejidad tanto de los equipos que se van a usar, el montaje de los mismos y el factor económico. Se considera el criterio de menor importancia asignándole un factor de peso de 25%. Se asignan los siguientes valores en la escala comparativa:

(1) = poco adaptable

(2) = moderadamente adaptable

(3) = muy adaptable

A continuación se muestra la matriz de selección con las alternativas propuestas:

**Tabla 3.2. Matriz de selección. Tecnología de fermentación a implementar**

Criterios de selección	Factor de peso	Ponderación			
		Tecnología de Fermentación			
		Tecnología 1	Tecnología 2	Tecnología 3	Tecnología 4
<i>Principio</i>	40%				
<i>Tratamientos</i>	35%				
<i>Equipos</i>	25%				
<b>Total</b>					

### 3.1.3 Selección de la tecnología de purificación de etanol.

Con la finalidad de seleccionar la tecnología más adecuada, se hizo uso de la herramienta metodológica conocida como matriz de selección, técnica explicada anteriormente.



---

### **3.1.3.1 Identificación de las tecnologías de purificación:**

La purificación del etanol obtenido vía fermentativa, no es más que la separación de los componentes de la mezcla binaria etanol-agua y el proceso de separación más utilizado en la industria química para este caso, es la destilación que como se ha mencionado anteriormente consiste en la separación de los constituyentes basado en sus diferencias de volatilidad.

Para los autores de este trabajo resulta conveniente escoger las tecnologías de purificación a estudiar, basándose en lo que quieren lograr y de acuerdo a los equipos de los que se dispone para esta investigación.

### **3.1.3.2 Determinación de los criterios de estudio para cada tecnología.**

Es conocido que existen una gran variedad de métodos para la separación de mezclas binarias azeotrópicas que involucran diferentes principios y fenómenos asociados a ellos, y es por esta razón que no todos cumplen los requerimientos de la investigación. Por ello y para la aplicación de la herramienta seleccionada, es necesaria la consideración de una serie de criterios, que para este caso son:

- ✦ **Principio:** Para los autores del presente trabajo, este criterio se refiere al principio de funcionamiento de la tecnología de destilación y a cómo se adapta este a las necesidades del diseño experimental que se llevara a cabo para la purificación del etanol obtenido vía fermentativa.
  
- ✦ **Disponibilidad de equipos:** representa un criterio determinante en la selección de la tecnología, ya que al momento de considerar la implementación de una de las alternativas generadas es indispensable conocer los equipos y accesorios con los que se cuentan en el laboratorio y los que se requieren, para estimar el gasto que implica la adquisición de



el o los complementos principales que conforman el sistema de separación, evitando así la selección de un montaje que requiera de una gran inversión por parte de los autores y/o del Laboratorio de Ingeniería Química.

- ✦ **Tratamientos:** abarca todo tratamiento que se deba dar a la mezcla que se desea purificar, ya sea antes o después de la destilación principal, incluye la adición de compuestos u alteración de la composición física o química de la mezcla a separar.
  
- ✦ **Montajes:** este criterio implica la utilización de equipos extras en cada tecnología, es decir, equipos aparte del montaje simple de una destilación para una mezcla binaria como lo es la mezcla etanol-agua. Para los autores resulta conveniente la utilización de la menor cantidad de equipos extra posibles porque esto se traduciría en una tecnología menos costosa y más sencilla de operar. También abarca la facilidad o simplicidad de operación de dichos equipos.

A cada criterio se le asigna una ponderación, el rango para este factor se fija del 5% al 100%.

### **3.1.3.3 Selección de la alternativa final.**

A continuación se presentan los criterios y la ponderación de los mismos, que se utilizaron para seleccionar la alternativa más viable.

Los criterios básicos a considerar para la evaluación de las propuestas son los siguientes:

- Principio.
- Disponibilidad de equipos.
- Tratamientos.



---

- Montaje.

Como en las matrices de selección anteriores, se asigna a cada alternativa una ponderación, respecto a cada criterio. Se fija del 1 al 5, de la menos a la más favorable. A continuación se fijan los factores de peso y escala de evaluación correspondiente:

- ✦ **Principio:** Se refiere al principio de funcionamiento de la tecnología de destilación y en cómo se adapta dicho principio a las necesidades experimentales de esta investigación. Basándose en lo que se desea lograr en este trabajo, principio se considera el factor de segunda importancia para la toma de decisión por parte de los autores, ya que se debe seleccionar la tecnología que mejor se adapte a las necesidades del experimento a realizar. Por esta razón se le asignó un factor de peso de 25% y una escala comparativa mostrada a continuación:

(1) = menos adaptable

(2) = moderadamente adaptable

(3) = adaptable

(4) = muy adaptable

- ✦ **Disponibilidad de equipos:** : este criterio es considerado el más influyente en la selección de la tecnología de purificación para los autores, por ello se le asigna un factor de peso del 35% y los siguientes criterios de evaluación:

(1) = poca disponibilidad de equipos

(2) = considerable disponibilidad de equipos

(3) = gran variedad de equipos disponibles



- ✦ **Tratamientos:** se refiere al trato especial que se le deba dar a la mezcla antes o después de ser destilada, por ello es considerado por los autores el criterio de menor importancia, asignándosele un factor de peso de 20%. Dado que hay sólo dos alternativas se asignan dos valores en la escala comparativa:

(1) = lo requiere

(2) = no lo requiere

- ✦ **Montajes:** este criterio implica la utilización de equipos extras en cada tecnología, es decir, equipos aparte del calderín, matraz de destilación, termómetro, condensador, columna de fraccionamiento, erlenmeyer, entre otros, así como la simplicidad al momento de ejecutar las experiencias prácticas y al manipular los diferentes accesorios del equipo de separación. Se considera un criterio de mediana importancia y constituye un factor de comodidad en el montaje del equipo y por supuesto, de ahorro económico. Asignándole un factor de peso de 20%. Se asignan los siguientes valores en la escala comparativa:

(1) = doble montaje

(2) = un solo equipo extra

(3) = ninguno

A continuación se muestra la matriz de selección con las alternativas propuestas:



Tabla 3.3. Matriz de selección. Tecnología de purificación a implementar

Criterios de selección	Factor de peso	Ponderación		
		Tecnología de Destilación		
		Tecnología 1	Tecnología 2	Tecnología 3
<i>Principio</i>	25%			
<i>Composición</i>	30%			
<i>Disponibilidad de Equipos</i>	20%			
<i>Tratamientos</i>	10%			
<i>Montajes</i>	15%			
<b>Total</b>				

**3.1.4 Desarrollar un diseño experimental que permita obtener las mejores condiciones de operación para la obtención de etanol vía fermentativa.**

#### **3.1.4.1 Variables involucradas en el proceso**

Una vez realizada una previa consulta en fuentes bibliográficas sobre el tema de fermentación se consideran como variables importantes o críticas determinantes del proceso las siguientes: temperatura del mosto a fermentar, pH de la mezcla, alimentación de oxígeno al reactor, concentración inicial de azúcares, nutrientes y activadores. Pero la de mayor importancia es la temperatura ya que de ella depende la cinética o velocidad de reacción del proceso fermentativo y primordialmente dependerá de esta la producción o no del etanol deseado.



---

#### **3.1.4.1.a Identificación de la variable de respuesta.**

Se selecciona como variable de respuesta aquella por medio de la cual los investigadores puedan determinar la eficiencia del proceso para así poder comprobar que la escogencia realizada de la tecnología es la adecuada. Para el caso de la fermentación es preciso aclarar que como resultado de esta catálisis de tipo enzimática se obtiene como resultado una mezcla de ciertos nutrientes acompañados de una serie de alcoholes más livianos o pesados que el esperado, por lo tanto, dicha mezcla debe ser sometida a una etapa de caracterización para así poder definir si realmente se obtuvo la cantidad de etanol deseada.

#### **3.1.4.1.b Identificación de los factores que influyen en el proceso.**

Estos factores que influyen directamente sobre el proceso se pueden apreciar de mejor manera mediante el uso de herramientas como la tormenta de ideas. Este análisis es una técnica metodológica que consiste en realizar un intercambio de ideas entre los autores de la investigación y los tutores de la misma donde se establecen los factores mas importantes que pueden influir en el proceso de fermentación y a su vez permite identificar las causas más importantes capaces de generar situaciones indeseadas que puedan afectar considerablemente el desarrollo de la investigación y generar resultados no deseados o esperados. Esto, por supuesto, tiene una principal razón de aplicación y es el de ubicar las limitaciones y cómo lograr que estas mismas sean controladas para evitar alteraciones en el proceso; así como también se discute cuáles serán los mecanismos más eficaces que permitan determinar si la investigación se está desarrollando de la manera deseada de acuerdo a las metas previamente establecidas.



### 3.1.4.1.c Selección del tipo de diseño de experimentos a utilizar

La aplicación del diseño de experimento factorial se realiza con la finalidad de determinar la magnitud, dirección e interacción de los efectos en el proceso de fermentación a consecuencia de los cambios en las variables de entrada implicadas y previamente identificadas a través del uso de una tormenta de ideas. Para ejecutar dicho tratamiento experimental es esencial predefinir los niveles para cada factor (o variable de entrada a manipular) y establecer así las posibles combinaciones y número de replicas a realizar a fin de alcanzar experimentalmente los resultados esperados en la variable respuesta.

A continuación se muestra un formato general para la aplicación del diseño factorial:

**Tabla 3.4. Formato de los factores y niveles en el diseño experimental**

Rangos de temperatura de operación °(C)	Masa de levadura
	M (kg)
(T1 – T)°C	
(T – T2)°C	

### 3.1.4.1.d Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para el monitoreo del proceso se deben medir determinadas variables, tales como:

Temperatura.

°Brix

La temperatura se mide con el uso de termómetros bimetálicos dispuestos en la tapa de cada reactor y que tengan un constante contacto con el sustrato para verificar que dicha magnitud posea un comportamiento dentro del rango establecido.



---

Las mediciones de los °Brix se realizan haciendo extracciones de sustrato de los reactores en intervalos de tiempos seleccionados por los investigadores cuya magnitud es obtenida por medio del uso de un refractómetro.

### **3.1.4.2 Desarrollo experimental del proceso de fermentación para la obtención del etanol.**

Determinadas las mejores condiciones para obtener el etanol vía fermentativa y establecidas las variables a controlar y manipular, a continuación se procede a realizar los experimentos planificados por los autores.

Durante la etapa experimental de la investigación, se ejecutan una serie de ensayos planificados previamente en el diseño de experimentos, en la cual se consideran las variables antes definidas como influyentes en el proceso de fermentación. A partir de esta fase, se obtienen una serie de eventos válidos en función de la respuesta del proceso que describe el comportamiento y alcance que el sistema de reactores, una vez puestos en operación, son capaces de proporcionar ante diferentes condiciones de operación establecidas.

#### **3.1.4.2.a Método operatorio para la fermentación de la materia prima**

- A. Realizar el montaje del equipo de la figura 3.1.
- B. Desinfectar la materia prima durante aproximadamente 45 min en contacto con una solución de 60ml de multiplus action o gerdex diluida en 12 L de agua.
- C. Moler y filtrar la materia prima para obtener el sustrato a fermentar.
- D. Tomar una alícuota aproximada de 3 ml de dicho sustrato y medir los °Brix con el uso de un refractómetro para realizar un seguimiento del avance de la reacción.



- 
- E. Determinar la cantidad de levadura a utilizar para la fermentación utilizando una balanza y usando una relación de 1,25 g de levadura comercial por cada litro de jugo o sustrato.
  - F. Realizar el llenado de los cuatro reactores dispuestos para la fermentación del sustrato, cada uno con un volumen de 1300 ml de solución previamente colocado internamente en el sistema de agitación.
  - G. Precalentar los reactores en el baño térmico de agua hasta una temperatura cercana a los 36°C de operación con la finalidad de activar la levadura y asegurar que los gradientes de temperaturas no afecten el rendimiento de la misma. Operar en un intervalo entre (35 – 40)°C.
  - H. Una vez culminado el paso anterior agregar al reactor la cantidad de levadura correspondiente previamente pesada y diluida en un volumen aproximado de 100 ml del mismo sustrato a utilizar; (este paso se repite para cada uno de los cuatro reactores).
  - I. Tapar cada reactor y sumergir cada uno de ellos en el baño térmico accionando el cronometro que contabilice el tiempo que servirá para hacer ciertas extracciones de volumen (3 ml cada extracción) de sustrato a los cuales se les medirá los °Brix y se estimarán los °GL a través del uso de la Tabla C.3.
  - J. Los pasos D, E y F se realizan simultáneamente.
  - K. Realizar las mediciones de °Brix se realizan hasta que este genere un comportamiento estable, lo que indica que la levadura hizo su desempeño.
  - L. Todos los pasos anteriores se repiten con un rango de temperatura de operación entre (30 – 35) °C
-



**Figura 3.1 Montaje de fermentación realizado**

### **3.1.5 Determinar las mejores condiciones de operación para la purificación del etanol**

Esto se logra desarrollando una fase experimental que permita mejorar el proceso de purificación del etanol vía destilación, basándose en información bibliográfica recolectada y en ensayos pre-experimentales realizados por los autores.

#### **3.1.5.1. Ensayos pre-experimentales**

Con la finalidad de recolectar la data que permita dilucidar y ponderar las tecnologías de purificación a ser consideradas en la herramienta metodológica “matriz de selección” que va a ser explicada más adelante, se considera necesario la realización de una serie de experiencias prácticas previas a la purificación del producto obtenido en el proceso fermentativo.

Los ensayos a realizar basados en la consulta a expertos en el área y a la bibliografía existente se muestran en el siguiente esquema:

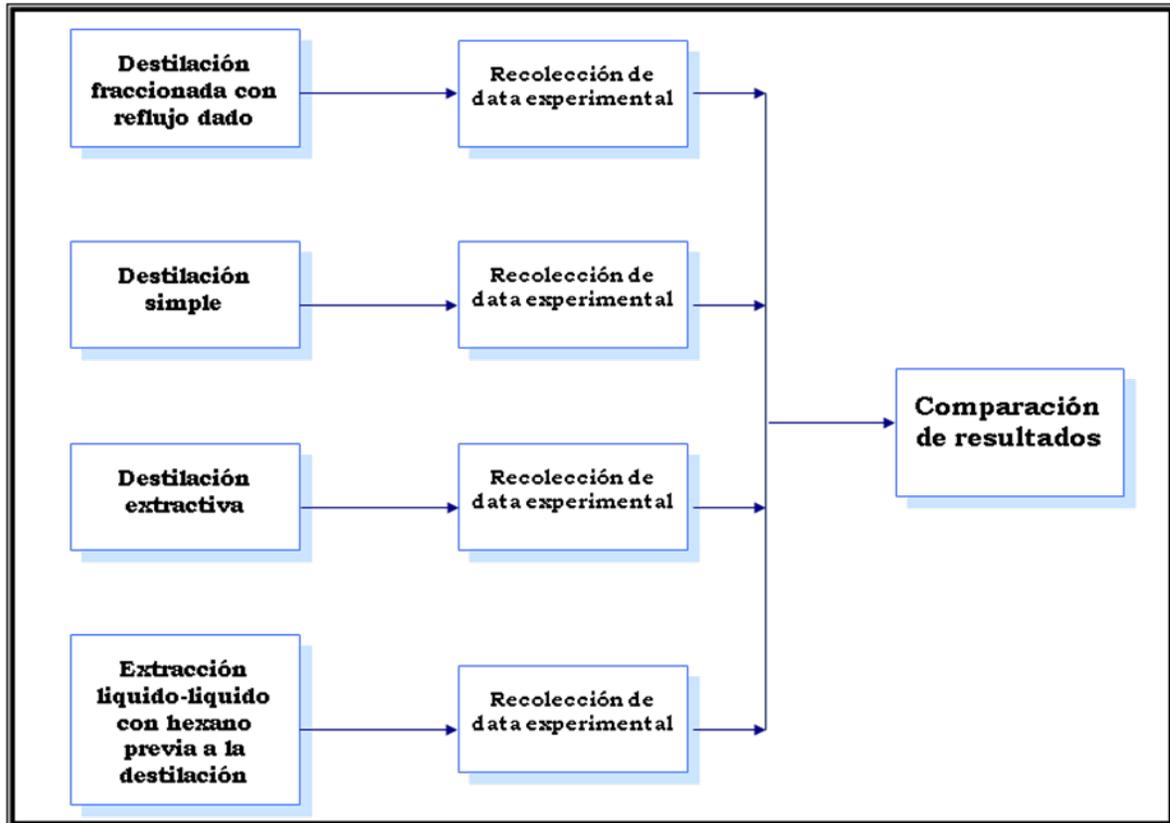


Figura 3.2. Esquema general de los ensayos pre-experimentales a realizar (fuente: propia)

### 3.1.5.2. Establecimiento de las variables involucradas en el proceso

Luego de realizar la respectiva documentación bibliográfica referente al proceso de destilación, se establecieron las siguientes variables a ser consideradas: Temperaturas de cada una de las sustancias, tanto de entrada como de salida, presión de operación, cantidades del solvente y de la sustancia a destilar, calor proporcionado para la destilación, la proporción de reflujo, la composición de las sustancias.

La presión de trabajo, es la presión a la cual se lleva a cabo la operación, y si bien afecta directamente el equilibrio líquido-vapor, generalmente se trabaja a la menor presión posible y, por ende, no se varía frecuentemente.



---

### **3.1.5.2.a Identificación de la variable de respuesta.**

Una variable de respuesta es aquella cuyo resultado permite evaluar el rendimiento del proceso y concluir si la tecnología de destilación seleccionada cumple con el objetivo técnico propuesto en la investigación. En el caso del proceso separativo en estudio, la variable de respuesta considerada será la composición final de la mezcla binaria etanol-agua, es decir, la cantidad del componente menos volátil removido en la destilación. Cabe destacar que se debe establecer una referencia o patrón que permita evaluar el alcance del objetivo propuesto y con ello determinar la efectividad del método empleado. En este caso, la referencia será que la composición lograda sea mayor a la composición azeotrópica de la mezcla.

### **3.1.5.2.b Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para el monitoreo del proceso se deben medir determinadas variables, tales como:

- Temperatura.
- Composición.
- Flujo volumétrico.

La temperatura se mide con el uso de termómetros convencionales de vidrio dispuestos en el tope, calderín (fondo) y condensado de las dos columnas que conforman el sistema de destilación.

Las mediciones de composición de la mezcla se logran a través de la construcción de dos curvas de calibración que correlacionan la composición con el índice de refracción y con la densidad de la mezcla binaria etanol-agua. Ambas propiedades se miden experimentalmente con el uso de un refractómetro y un picnómetro respectivamente. A la serie de muestras tomadas en un rango de composición de 0 a 100% molar, se le determina el índice de refracción y se pesa en



una balanza digital el volumen de mezcla contenido en el picnómetro para determinar posteriormente la densidad de dicha muestra.

El flujo volumétrico de destilado y el reflujo se estiman mediante el uso de un rotámetro, el cual permite establecer una relación entre el líquido que se obtiene como producto destilado y el que se regresa a la torre.

El instrumento propuesto para la toma de datos es:

**Tabla 3.5. Factores que influyen en el proceso de purificación de la mezcla fermentada**

Tiempo ( $t \pm 0,005$ ) s	Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C		Índice de refracción ( $\eta \pm 0,0003$ ) adim	Volumen recolectado de destilado ( $V_A \pm 0,05$ ) mL
	Calderín	Tope	Destilado	

Presión ambiente: (  $\pm 0,05$ ) mmHg

Temperatura ambiente: (  $\pm 0,5$ ) °C

### 3.1.5.3 Desarrollo experimental del proceso de purificación del etanol obtenido.

Durante la etapa experimental de la investigación, se ejecutan una serie de experimentos planificados previamente donde se cumplen las condiciones de operación anteriormente establecidas con las variables a controlar y manipular.

#### ***3.1.5.3.a Método operacional para la purificación del etanol mediante destilación simple.***



- A. Realizar el montaje del equipo indicado en la figura 3.3.
- B. Medir la composición de la mezcla a destilar.
- C. Ajustar el sistema de calentamiento con el dial en 180.
- D. Introducir 350 ml de la mezcla a purificar en el calderín de la torre.
- E. Tomar muestras de destilado cada cierto tiempo.
- F. Medir el índice de refracción de las muestras recolectadas.
- G. Repetir F y G hasta que se cumplan con las condiciones de temperatura de tope y de fondo y en el índice de refracción de las muestras que se asegure que se ha alcanzado la composición deseada en el fondo.
- H. Caracterizar el destilado recolectado.
- I. Desmontar y limpiar el equipo.



**Figura 3.3 Equipo de destilación empleado**



---

### **3.1.6 Evaluar técnica y económicamente dicho proceso para determinar su factibilidad de implantación.**

El término factibilidad se refiere a la disponibilidad de los recursos necesarios para llevar a cabo los objetivos señalados y sirve para recolectar datos relevantes acerca del desarrollo de un proyecto y como base para la toma de la mejor decisión, si procede su estudio, desarrollo o implementación.

#### ***3.1.6.1 factibilidad técnica del proceso***

Una evaluación técnica demuestra si el proyecto puede ponerse en marcha y mantenerse, contemplando los problemas que involucra el proyecto y el mantenerlo en funcionamiento.

Cuando se realiza un estudio de factibilidad técnica, el propósito perseguido es:

- Efectividad del proceso.
- Disponibilidad de tecnología que satisfaga las necesidades.

A continuación se muestra la metodología a seguir para el logro de este objetivo:

#### ***3.1.6.1.a Establecimiento de factores***

Estos factores se refieren a los recursos como herramientas, conocimientos, habilidades, experiencia, etc., que son necesarios para efectuar las actividades o procesos que requiere el proyecto.

En el caso de esta investigación el factor a considerar es la disponibilidad en el Laboratorio de Ingeniería Química de los materiales, equipos e instrumentos requeridos y los conocimientos, habilidades y experiencia de los autores.



### 3.1.6.1.b Análisis de los factores

El proyecto debe considerar si los recursos técnicos actuales son suficientes o deben complementarse. Para facilitar el análisis se construyó la siguiente tabla:

**Tabla 3.6. Disponibilidad de los materiales, equipos e instrumentos en el Laboratorio de Ingeniería Química.**

Equipo	Cantidad requerida	Disponible

### 3.1.6.2 Factibilidad económica del proceso

Debe demostrarse que el proyecto es factible económicamente, lo que significa que la inversión que se deba realizar es justificada por la ganancia que generara el proceso en estudio.

#### 3.1.6.2.a Estudio de mercado

Es importante estudiar el espacio relacionado con la comercialización del producto final (bioetanol), es decir, identificar aquellos países que emplean este producto como combustible y conocer los costos de inversión y ganancia que generan las tecnologías empleadas en dichos países para la obtención y purificación del bioetanol. También se debe estudiar la factibilidad de obtención y la cantidad disponible de la materia prima seleccionada.



---

### **3.1.6.2.b Propuesta para la obtención y purificación del bioetanol**

Después de una extensa revisión bibliográfica y de las experiencias prácticas se debe realizar la propuesta de las tecnologías a emplear para obtener y purificar el bioetanol. Según las investigaciones en el campo se seleccionó para la obtención una vía fermentativa y para la purificación un proceso de destilación.

### **3.1.6.2.c Determinar la capacidad del proceso**

La evaluación técnica se realiza en función del volumen fermentado de alcohol, la pureza y calidad del producto separado experimentalmente así como el volumen de producción logrado con los esquemas propuestos. Una vez instalados el sistema de fermentación y destilación y ejecutadas las experiencias prácticas bajo las condiciones de operación establecidas, se procesan los datos y se analizan los resultados para determinar cuantitativamente la eficiencia técnica del sistema conjunto empleado. Es importante señalar que el volumen total de producción será aquel volumen de bioetanol obtenido en el proceso de destilación.

### **3.1.6.2.d Estimar el costo económico para la ejecución práctica del sistema**

Esta fase permite dilucidar los costos de producción asociados al sistema en conjunto de fermentación y destilación propuesto, a través de modelos de cálculos financieros se estima la relación costo-beneficio de la obtención de bioetanol a partir de desechos orgánicos.

### **3.1.6.2.e Establecer los beneficios que genera el proceso de producción**

Se deben establecer que beneficios técnicos y económicos genera el proceso de obtención y purificación de bioetanol propuesto. Una vez establecidos dichos beneficios, se procede a realizar un estudio comparativo en base a la información recolectada anteriormente acerca de los países que producen bioetanol como



---

biocombustible y determinar de esa manera si el uso de las tecnologías propuestas en esta investigación representan o no una reducción en los costos de producción y una mayor factibilidad técnica de implantación.

### **3.1.7 Evaluar ambientalmente dicho proceso para determinar su factibilidad de implantación.**

#### **3.1.7.1 Proceso de identificación de impactos ambientales**

Se refiere a la identificación de las consecuencias o efectos ambientales que las acciones contempladas en el proceso puedan acarrear sobre los componentes de los medios físico, biológico y sociocultural. La selección de los efectos más relevantes se realizará mediante la consulta a expertos de las diversas aéreas involucradas.

Posteriormente para determinar el nivel de gravedad o relevancia de los efectos identificados y seleccionados, tanto en el área de afectación directa como indirecta, se procederá a realizar la evaluación de impacto ambiental.

#### **3.7.1.2 Evaluación de Impactos**

El método a utilizar para la evaluación de los impactos es el de los "Criterios Relevantes Integrados". Este es un método, en el cual se pondera cada uno de los criterios de acuerdo con las características del Proceso.

Los criterios que permitirán decidir sobre la importancia del impacto son los siguientes:

- ❖ **Probabilidad:** Indica la probabilidad de que ocurra el efecto. Se mide en una escala que va del 1, mínima probabilidad de ocurrencia hasta 10, máxima probabilidad de ocurrencia.
- ❖ **Intensidad:** Indica el vigor con el cual se estima que se manifestará el efecto. Se mide en una escala que va desde 1, el de menor intensidad hasta 10 el de mayor intensidad.



- ❖ **Duración:** Mide el tiempo durante el cual ocurre el efecto o sus consecuencias. Se mide en una escala que va del 1, efecto que dura poco tiempo (temporal), hasta el 10, efecto que se ejerce durante un período largo de tiempo (tiempo de vida del proyecto).
- ❖ **Extensión:** Mide la distancia, superficie, volumen o número de personas que sufren modificaciones como consecuencia de la manifestación del efecto. Se mide en una escala que va desde 1, cantidad mínima alterada, hasta 10, que representa una cantidad elevada o máxima en relación con la disponible.
- ❖ **Reversibilidad:** Indica la capacidad de recuperación del componente alterado. Se mide en una escala de 1, capacidad para recuperarse rápidamente hasta 10, irreversible o muy baja capacidad de recuperación.

Los valores que se utilizarán para cada una de las condiciones de impacto consideradas según cada criterio del método, se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3.7. Valores de los criterios de evaluación de impactos**

Probabilidad	Intensidad	Duración	Extensión	Reversibilidad	Valor
Muy Alta	Muy Alta	Muy Larga (Permanente)	Regional	Irreversible	9-10
Alta	Alta	Larga (5-10 años)	Sub-regional	Reversible a largo plazo	7-8
Media	Media	Media (2-5 años)	Mediana	Reversible a medio plazo	4-6
Baja	Baja	Corta	Puntual	Reversible	1-3

Fuente: Elaboración propia



La ponderación de los criterios se realizará aplicando los pesos asignados a cada uno de los criterios utilizados para la evaluación de los impactos identificados, según se indica en la tabla siguiente:

**Tabla 3.8. Criterios ponderados**

<b>Criterio</b>	<b>Peso (%)</b>
Probabilidad	20
Intensidad	20
Duración	20
Extensión	20
Reversibilidad	20
<b>Total</b>	<b>100</b>

Fuente: Elaboración propia

El Valor del Impacto Ambiental (VIA) se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$\mathbf{VIA = (P \times v_P) + (I \times v_I) + (D \times v_D) + (E \times v_E) + (R \times v_R)} \quad (3.1) \text{ (Gonzalez, 2008)}$$

Donde:

**P** = Probabilidad

**I** = Intensidad

**D** = Duración

**E** = Extensión

**R** = Reversibilidad

**v<sub>P</sub>, v<sub>I</sub>, v<sub>E</sub>, v<sub>D</sub>, v<sub>R</sub>** = VIA o peso ponderado de los criterios



Finalmente, es importante destacar que para simplificar su lectura y comprensión, la evaluación de impactos se presentará en planillas resumen (ver modelo a continuación), en las cuales aparecerá la siguiente codificación:

**F = Físico; B = Biológico; SC = Sociocultural**

Los números que acompañan a las siglas señaladas, corresponderán a la enumeración secuencial dada a cada impacto evaluado.

La relevancia del impacto será expresada con el siguiente código de colores:

**Tabla 3.9. Criterios Valor de Impacto Ambiental (VIA) y Relevancia del Impacto**

VIA	Relevancia
1-3	Baja
4-6	Media
7-8	Alta
9-10	Muy Alta

Fuente: Elaboración propia

Lo expuesto anteriormente se registra en el siguiente formato:



**Figura 3.4 Formato de evaluación de impactos**

<b>CÓDIGO</b>	<b>Denominación:</b>	<b>FASE</b>
<b>Acción desencadenante:</b>		
<b>Componente afectado:</b>		
<b>Sitio(s) afectado(s):</b>		
<b>Efectos asociados:</b>		
<b>Indicador de impacto:</b>		
<b>Descripción:</b>		
<b>Probabilidad:</b>		
<b>Intensidad:</b>		
<b>Duración:</b>		
<b>Extensión:</b>		
<b>Reversibilidad:</b>		
<b>Valor de Impacto Ambiental (VIA) y Relevancia del Impacto</b>		
<b>Impacto normado:</b>	<b>Norma que lo rige:</b>	
<b>Medida/Recomendación:</b>		



---

### **3.1.7.3 Medidas y Recomendaciones Ambientales**

Tomando en cuenta los resultados obtenidos de la evaluación de impactos, se procederá a proponer las medidas orientadas a prevenir, mitigar, controlar o corregir su manifestación sobre los medios físico, biológico y socioeconómico, en las distintas fases del proyecto. Las medidas serán especialmente formuladas para atender los impactos que hayan alcanzado relevancia media o alta.

Cada medida será analizada y descrita adecuadamente, de acuerdo con las siguientes especificaciones:

- Impacto al cual va dirigida.
- Carácter: preventivo, mitigante o correctivo del impacto.
- Naturaleza: principal, alternativa, complementaria o única.
- Duración: permanente o temporal.
- Oportunidad de aplicación: construcción u operación.
- Asignación de los entes responsables de su aplicación.
- Descripción de la medida: lineamientos para su ejecución.

A fin de facilitar la comprensión, se elaborarán planillas de medidas ambientales para cada medio o ámbito de análisis (físico, biológico, socioeconómico y cultural). Estas planillas tendrá el siguiente formato:



**Figura 3.5 Formato de medidas preventivas**

<b>Código de la medida: Identificación de la medida</b>	
<i>Impactos a los que va dirigida</i>	
<i>Carácter</i>	
<i>Naturaleza</i>	
<i>Duración</i>	
<i>Etapas de aplicación</i>	
<i>Entes responsables</i>	
<b>Descripción de la medida</b>	



## IV. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

*En este capítulo se muestran los resultados obtenidos, en el logro de cada uno de los objetivos planteados, producto de la aplicación de la metodología descrita en el capítulo precedente; así como su respectivo análisis.*

### **4.1 Selección de la materia prima a utilizar.**

Para los autores de este trabajo, basándose en el objetivo principal que es la obtención de etanol a partir de desechos orgánicos, en los datos del Instituto Nacional de Estadísticas y en las consultas bibliográficas realizadas, resulta favorable estudiar las siguientes frutas o, mejor dicho, los desechos de las mismas, ya que son los más consumidos en el país y que, por ende, constituyen la mayor cantidad de desechos disponibles:

- Cáscara y bagazo de Naranja.
- Cáscara de Piña.
- Cáscara de Cambur

Para seleccionar entre estos desechos se desarrolló una matriz de selección tal como se explicó en el marco metodológico.

#### **4.1.1 Criterios considerados para la selección de la materia prima**

Para seleccionar el desecho destinado como materia prima se deben tener en



cuenta diversas variables, una vez realizada una serie de consultas a fuentes bibliográficas tal como se explica en el capítulo III se hacen varias consideraciones entre las cuales se pueden mencionar la disponibilidad del desecho, cantidades de almidón y azúcares presentes en el mismo, tratamiento previo de la materia prima antes de la fermentación, entre otros.

Luego, se procede a ponderar cada una de las opciones de desecho en escalas determinadas por los autores de acuerdo al grado de complejidad que tenga cada una de las variables, tomando en cuenta la proporción en la que esta afecta el desarrollo del proceso. Cabe destacar que a pesar de que existe un universo extenso de materia orgánica disponible, se hizo una selección previa de solo tres donde se consideró la disponibilidad de la misma basados en estadísticas nacionales de producción y consumo y con la ayuda de fuentes bibliográficas se determinó cuales de estos se han usado en trabajos de investigación que muestran similitud con el que los autores desarrollan.

✓ **Azúcares:** en la ponderación de este criterio se tomó en cuenta el porcentaje de azúcares directamente fermentables que se encuentran presentes en los desechos de las frutas estudiadas, asumiendo que en estos se encuentra una parte de dicho porcentaje; por esa razón se consultó a la tabla C.1 (apéndice C) los gramos de carbohidratos disponibles en la pulpa de las frutas en estudio, para la piña existen 14,1 g, para el cambur 23,2 g y para la naranja 8,8 g. Se puede apreciar que la que posee mayor cantidad de glúcidos es el cambur; pero en función del interés de la investigación que son los desechos, solo la piña presenta aproximadamente una pérdida de su pulpa en su desecho del 40%, por lo que se estima que esta última es la de mayor cantidad de azúcar fermentable disponible, lo que genera que a ésta se le asigne la mayor puntuación seguida del cambur y en último lugar la naranja.

✓ **Disponibilidad:** este criterio se ponderó en base a la información proporcionada



---

por el instituto nacional de estadísticas acerca del consumo per cápita de las frutas estudiadas, expresado en kilogramos por persona al año. En este caso, la puntuación más alta corresponde al cambur por ser la fruta más consumida a nivel nacional seguida por la piña y dejando en último lugar con la puntuación más baja a la naranja.

✓ **Características:** para la valoración de este criterio se identificaron las características físicas de cada uno de los desechos en estudio, la puntuación mayor corresponde a la piña por presentar las características más favorables para el experimento, considerando que geométricamente es la única fruta que posee pulpa cuando es retirada la cascara, lo que favorece a la producción de etanol mientras que la naranja y el cambur reciben la misma puntuación por presentar características similares para los autores.

✓ **Tratamientos:** se califica considerando si la materia prima a emplear requiere o no un tratamiento especial que altere alguna de sus características o propiedades. En este caso, los tres desechos reciben la misma puntuación ya que todos requieren ser lavados y desinfectados así como molidos y filtrados.

✓ **Almidón:** se cuantifica de acuerdo a la cantidad en gramos de almidón presente en cada fruta, la cual es inversamente proporcional a la cantidad de etanol que se pueda lograr obtener. Esto quiere decir que, mientras más almidón posea el desecho será menor la cantidad de azúcar fermentable ya que se debe hacer un previo proceso conocido como hidrólisis para romper las cadenas celulósica que permitan la liberación de la glucosa fermentable. Se le asigna la mayor puntuación a la pulpa del cambur, luego la pulpa de piña y por último la naranja por la relación de carbohidratos presentes, a pesar de no poseer una magnitud exacta del almidón presente en las materias

---



orgánicas a fermentar que conforman la matriz de selección; se puede concluir que los tres desechos poseen almidón, lo cual afecta el rendimiento del proceso pero la piña es aquella en cuyo desecho posee mayor cantidad de azúcar fermentable que es lo importante para la investigación, por lo tanto, es la que recibe la ponderación más alta en función de lo explicado anteriormente.

#### 4.1.2 Matriz aplicada para la selección de la materia prima

A continuación se muestran los resultados obtenidos una vez ponderados los criterios establecidos para la selección de la materia prima:

**Tabla 4.1. Matriz de selección. Selección de la materia prima**

Criterios de selección	Factor de peso	Ponderación		
		Materia Prima		
		Naranja	Piña	Cambur
<b><i>Azúcares</i></b>	<b>30%</b>	2	5	3
<b><i>Disponibilidad</i></b>	<b>25%</b>	3	4	5
<b><i>Características</i></b>	<b>10%</b>	2	4	2
<b><i>Tratamientos</i></b>	<b>15%</b>	1	1	1
<b><i>Almidón</i></b>	<b>20%</b>	3	5	4
<b>Total</b>		<b>2,30</b>	<b>4,05</b>	<b>3,30</b>

La materia prima seleccionada son los desechos de ***Piña***



---

## **4.2 Selección de la tecnología de fermentación**

Por las razones anteriormente mencionadas en la metodología a seguir, resulta conveniente para los autores de la investigación estudiar las siguientes tecnologías de fermentación:

- Fermentación Continua
- Fermentación Discontinua
- Fermentación Alimentada (Fed-batch)
- Fermentación utilizando reactores de enzimas o células inmovilizadas.

### **4.2.1 Selección de la alternativa más favorable a fin de fermentar la materia prima previamente seleccionada.**

Considerando los criterios establecidos previamente en capítulos anteriores y usando distintas fuentes bibliográficas para calificar cada tecnología de fermentación, se procede a darle valores a cada una de las mismas dependiendo de la ponderación establecida por los investigadores; donde se toma en consideración variables como existencia o no de equipos, factibilidad de aplicación, disponibilidad en el laboratorio, entre otros.

Al observar la matriz anexa y totalizando dichas puntuaciones obtenidas se procede a considerar la tecnología que cumple con los requerimientos de la investigación y a su vez con la disponibilidad de los materiales y equipos como aquella con el mayor índice de puntos obtenidos durante la evaluación comparativa, esto como consecuencia de verificar que las demás tecnologías presentan ciertas especificaciones



de operación que no permiten su aplicabilidad o presentan muchos inconvenientes tanto de índole económica como de nivel técnico. Por mencionar algunas la no existencia de algún equipo, falta de recursos para adquirir los mismos y por problemas ajenos al laboratorio que dificultan la obtención de algún reactivo o material necesario para el desarrollo de la misma.

#### **4.2.2 Criterios considerados para la selección de la tecnología de producción**

✓ **Principio:** Se ponderó de acuerdo al nivel de adaptación de las tecnologías en estudio a las necesidades exigidas por esta investigación, las cuales están relacionadas con el hecho de obtener la mayor cantidad de etanol. En el caso de la fermentación continua, la misma es una de las tecnologías menos aplicadas actualmente ya que se requiere cuidar muchos detalles importantes como la alimentación de sustrato y monitorear el comportamiento de la levadura en la reacción, lo cual le confiere el puntaje más bajo. En el caso de la fermentación de tipo discontinua, ésta se adapta más a las condiciones buscadas ya que se realiza en un recipiente cerrado de material inerte como el vidrio donde se agrega el sustrato y el medio digestor en este caso la levadura para obtener el etanol, por lo tanto, es el más práctico de aplicar y obtiene la mayor ponderación en la matriz de selección anexa. Con respecto a la fermentación alimentada es un proceso bastante eficiente ya que como se detalla en el capítulo II se procede a dosificar la cantidad de sustrato a fermentar en el reactor, obteniendo mejores rendimientos en cuanto a producto de la reacción como consecuencia de la disminución en los efectos inhibidores como la concentración de etanol y azúcares, en consecuencia, es la tecnología con el segundo puntaje más alto ya que a pesar de obtenerse buenos resultados los autores de la investigación no poseen todas las herramientas o equipos disponibles para desarrollarla. Por último, se



encuentra la fermentación con el uso de células inmovilizadas cuya implementación es la más complicada de todas las tecnologías estudiadas y se necesita un buen sistema de montaje para desarrollarla por ende y al igual que la fermentación continua obtiene el puntaje más bajo.

✓ **Tratamientos:** se realiza la ponderación bajo un respaldo en referencias bibliográficas y antecedentes de experiencias relacionadas a los sistemas de fermentación, apuntando a la fermentación discontinua como el único que no requiere tratamientos especiales, ya que solo consiste en el uso de un reactor cerrado donde entran en contacto el sustrato con la levadura como se explico anteriormente, lo que la califica con la puntuación más alta.

✓ **Equipos:** evaluando la complejidad del montaje de los equipos requeridos para el desarrollo de cada una de las tecnologías y a su vez con el respaldo de referencias bibliográficas e investigaciones pasadas los autores determinan que la de mayor puntuación es aquella más simple de usar y que igualmente brinde buenos resultados. Por tal motivo, en este caso se considera el utilizado para realizar la fermentación discontinua.

#### 4.2.3 Matriz aplicada para la selección de la tecnología de producción

A continuación se muestra la matriz de selección aplicada:



Tabla 4.2. Matriz de selección. Tecnología de fermentación a emplear.

Criterios de selección	Factor de peso	Ponderación			
		Tecnología de Fermentación			
		Continua	Discontinua	Alimentada (Fed-batch)	Enzimas Inmovilizadas
<i>Principio</i>	40%	1	4	2	1
<i>Tratamientos</i>	35%	1	2	1	1
<i>Equipos</i>	25%	1	3	2	1
<b>Total</b>		<b>1,00</b>	<b>3,05</b>	<b>1,65</b>	<b>1,00</b>

Observando la evaluación realizada se determina que la tecnología más conveniente para realizar la investigación es la **Fermentación Discontinua o Batch**.

#### 4.3 Selección de la tecnología de purificación de etanol.

De acuerdo con los objetivos a alcanzar y de acuerdo a los equipos de los que se dispone para esta investigación, es conveniente estudiar las siguientes tecnologías:

- Destilación Simple.
- Destilación Fraccionada con reflujo.
- Destilación Extractiva.



---

### 4.3.1 Criterios considerados para la selección de la tecnología de purificación

Para la separación de la mezcla etanol-agua obtenida se comparan las características de cada uno de los métodos propuestos para escoger el que mejor se adapte a los requerimientos técnicos y a las condiciones del Laboratorio de Ingeniería Química, para ello se fijaron los criterios anteriormente expuestos en el marco metodológico. Al igual que en los objetivos anteriores se usaron diferentes fuentes para calificar cada tecnología de destilación:

✓ **Principio de funcionamiento:** este criterio se ponderó de acuerdo al nivel de adaptación de las tecnologías en estudio a las necesidades del diseño experimental de esta investigación, relacionadas con el hecho de conseguir un destilado de pureza considerable. En el caso de la destilación simple y la fraccionada la máxima composición de etanol alcanzada es la del punto del azeotrópo, sin embargo de acuerdo a la data pre-experimental recolectada se observa que la composición alcanzada por la destilación simple es mayor que con la fraccionada con reflujo por lo que este último método recibe la puntuación más baja. En el caso de la destilación extractiva consigue saltar el punto de azeotrópo por lo que recibe la máxima puntuación.

✓ **Disponibilidad de equipos:** este criterio se ponderó en base a una inspección a los equipos y accesorios disponibles en el laboratorio de ingeniería química (LIQ); en consecuencia, la destilación simple y la fraccionada lideran la puntuación ya que se disponen de todos los componentes necesarios para ambos sistemas destiladores, seguidamente se encuentra la destilación extractiva.



✓ **Tratamiento:** se cuantifica verificando en las referencias bibliográficas y antecedentes de experiencias relacionadas a los esquemas de separación en estudio, apuntando a la destilación extractiva como el único sistema que requiere tratamientos especiales, consistiendo éstos en agregar un tercer componente a la mezcla binaria a purificar y en una segunda destilación simple para separar el disolvente añadido del etanol. Por esa razón, esta se considera la tecnología con menor puntuación ya que los dos sistemas restantes no requieren ningún tratamiento especial a la mezcla.

✓ **Montajes:** se determina según las indicaciones obtenidas en las referencias bibliográficas y trabajos relacionados al tema, trabajos especiales de grado y proyectos del LIQ II, asignando según los indicadores mencionados la mayor puntuación a la destilación simple y a la fraccionada por requerir un montaje sencillo y fácil de manipular. Seguidamente se encuentra la destilación extractiva ya que esta tiene un procedimiento de operación sencillo pero requiere de un equipo de destilación simple adicional, es decir, se necesitan dos columnas de destilación y un dispositivo de alimentación de disolvente.

#### 4.3.2 Matriz aplicada para la selección de la tecnología de purificación

A continuación se muestra la matriz de selección con las alternativas propuestas



Tabla 4.3. Matriz de selección. Tecnología de purificación a implementar

Criterios de selección	Factor de peso	Ponderación		
		Tecnología de Destilación		
		Simple	Fraccionada	Extractiva
<b>Principio</b>	<b>25%</b>	3	2	4
<b>Disponibilidad de Equipos</b>	<b>35%</b>	3	3	2
<b>Tratamientos</b>	<b>20%</b>	2	2	1
<b>Montajes</b>	<b>20%</b>	3	3	2
<b>Total</b>		<b>2,80</b>	<b>2,55</b>	<b>2,30</b>

Una vez ponderados los criterios de acuerdo a las consideraciones expuestas anteriormente, la tecnología seleccionada para la purificación del etanol resultó ser la **Destilación Simple**.

#### 4.4 Condiciones de operación del proceso de fermentación

##### 4.4.1 Identificación de los factores que influyen en el proceso.

Mediante el uso de una tormenta de ideas, previas consultas bibliográficas y a expertos en el área, se determinó entre otras cosas que la bacteria más adecuada para realizar el proceso fermentativo es la levadura de la familia ***Saccharomyces cerevisiae*** por ser una de las más adecuadas para el logro del objetivo principal de esta investigación que es fermentar un sustrato procedente de un desecho orgánico para



obtener etanol. Además, en su forma comercial es de fácil acceso y manipulación así como también en su proceso de degradación de la materia es una de las menos sensibles, lo cual la hace un poco más resistente ante cambios que puedan causarle la muerte por un ligero descenso de pH o la misma formación de etanol el cual es un efecto inhibitor de la reacción. Cabe destacar que la temperatura es otro factor de extrema importancia la cual se debe tener bien monitoreada ya que si la levadura es expuesta a un ambiente muy caliente o muy frío está propensa a morir y en consecuencia traer rendimientos muy bajos en cuanto a la producción de etanol. En razón a lo anterior y en base a las consultas previas se establece realizar dos series de experimentos donde se expone el sustrato con la levadura a dos rangos de temperaturas (30 – 35)°C y (35 – 40)°C respectivamente con el fin de establecer la mejor condición de operación diferenciando entre ambas condiciones tiempos de reacción, energía consumida para lograr la misma entre otras. Otro detalle muy importante es determinar el pH al inicio y durante el transcurso de la experimentación del sustrato el cual debe estar en un rango (3,5 – 5,5) ya que la levadura en un medio fuera de este rango descrito muere o disminuye su poder digestor.

#### **4.4.2 Determinación de las condiciones del sistema para lograr una fermentación efectiva del sustrato en estudio**

##### **4.4.2.1 Ensayos pre-experimentales**

Antes de establecer o determinar las mejores condiciones para el desarrollo de la fermentación se deben realizar una serie de ensayos preliminares o pre-experimentales en el laboratorio para así lograr que todas las variables esenciales que rigen la reacción consultadas previamente en bibliografías y estudios e investigaciones anteriores garanticen los resultados esperados; cabe destacar que todos estos ensayos previos son de suma utilidad ya que a pesar de tener un buen respaldo teórico de la investigación a realizar se debe determinar cuál es el comportamiento del sistema para



realizar la investigación; así como el desarrollo de la reacción manipulando todas las variables de las cuales dependa el estudio hasta lograr una armonía entre estas que permita obtener los resultados esperados. Entre los parámetros más importantes se encuentran:

✓ **Método de desinfección de la materia prima:** El desecho de la piña se recolecta directamente en establecimientos comerciales por lo que es fácil deducir que este mismo presenta una gran cantidad de bacterias que pueden afectar el rendimiento de la levadura, por lo tanto, se procede a la desinfección utilizando multiplus action, el cual funciona como un buen agente desinfectante en el área de medicina, específicamente, salas de operaciones. Vale la pena mencionar que durante la manipulación y el uso del desecho en uno de los montajes de fermentación se observó la formación de una especie de espuma de color negro en las paredes superiores del fermentador al igual que la ausencia del olor característico del mosto fermentado y la no disminución de los °Brix a medida que el tiempo pasaba, lo que arrojó como conclusión la contaminación del sustrato; lo que genera la muerte de la levadura y por ende la finalización de la reacción bajo condiciones no deseadas. Para minimizar estos efectos se procedió a realizar una manipulación de la concha de piña con mayor rigurosidad antes de moler la misma para obtener el jugo a fermentar utilizándose guantes y tapa bocas así mismo se hizo un lavado más minucioso de la materia prima con agua ozonificada y jabón y se permitió un contacto más prolongado con el multiplus action; luego una vez molido dicho desecho desinfectado se le hizo un cultivo en un laboratorio para determinar si existían Bacilos Gram Negativos y Hongo Filamentoso lo que arrojó como resultado que a pesar de la desinfección realizada aun existían estos microorganismo pero en proporciones no perjudiciales para la fermentación.

✓ **Dilución del sustrato:** Este parámetro es vital para la investigación ya que mientras más diluido se encuentre el sustrato menor será la cantidad de azúcar



fermentable. Inicialmente se realiza el proceso de moler la concha de piña en una licuadora, dándose cuenta que el dicho equipo no presenta la suficiente potencia para moler la materia prima sin presencia de agua motivo por el cual se decidió realizar adiciones de agua destilada en una proporción de 250 ml por cada kg de concha de piña. Una vez realizado el proceso de trituración y filtrado de la concha se miden los °Brix de la solución obteniéndose un valor de 4 °Brix el cual es muy bajo según las referencias bibliográficas consultadas lo que arrojaría cantidades de alcohol extremadamente bajas luego de la fermentación, por lo tanto, se procede a buscar otra alternativa para moler la concha de piña; en este caso un molino y así no es necesario el uso del agua. Aplicada esta consideración, se prepara un nuevo sustrato previamente desinfectado y al medirle a esta los °Brix se nota un ascenso considerable hasta 9,5 °Brix lo cual constituye una buena base de azúcar para producir el alcohol deseado.

✓ **Volúmenes de sustrato a fermentar:** Los reactores poseen una capacidad máxima de 2 L. Como prueba pre-experimental para determinar la cantidad adecuada de sustrato a fermentar se decidió alimentar los mismos primeramente con volúmenes altos de aproximadamente 1,8 L; observándose que agregada la cantidad de levadura a la solución se generaba una espuma por el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) formado como producto de la reacción que permitía que el jugo se derramara por la tapa dispuesta en el reactor, por lo tanto, para disminuir este efecto que altera las condiciones de reacción existen dos posibilidades: la primera es colocar una especie de malla atrapa espuma en el interior del reactor justamente en la flor del líquido y la segunda, es disminuir el volumen de sustrato; aplicado el segundo criterio con la masa de levadura adecuada, se explica la obtención de dicha cantidad de levadura en el próximo punto y en el análisis de resultados, se determina a través de varios montajes y a varios volúmenes de sustrato que el adecuado es 1,3 ml del mismo. Con esta magnitud se aprecia que la reacción se genera de manera satisfactoria, ya que la espuma generada por el dióxido



llega hasta la tapa del reactor pero sin la suficiente fuerza que permita levantar la misma, lo cual garantiza que el oxígeno no ingrese al reactor y las condiciones de la reacción no se alteren, permitiendo un buen desarrollo de la fermentación.

✓ **Cantidad de masa de levadura a utilizar:** Este parámetro es esencial para llevar un proceso de fermentación eficiente ya que se debe agregar la cantidad exacta de levadura para así poder determinar el avance de la reacción y, por ende, obtener la máxima cantidad de alcohol que se pueda generar. Durante los ensayos preliminares de fermentación se probó con distintas cantidades de masa de levadura obteniéndose resultados erróneos como por ejemplo: exceso de espuma generada por la producción de gases carbónicos en la reacción debido a que era muy grande la cantidad de levadura agregada, no se logró llevar paulatinamente el avance de la reacción a través de la disminución de los °Brix en función de la variación del tiempo como consecuencia de que la levadura se encontraba en exceso en el sustrato y la ingestión del azúcar fermentable ocurrió en tiempos muy rápidos. Todo esto mencionado con anterioridad generó la necesidad de consultar referencias bibliográficas de trabajos similares desarrollados con anterioridad y la ayuda de expertos en el área para determinar cual era la masa de levadura idónea a ser agregada al jugo. En este caso, era de suma importancia lograr dilucidar si esa masa era la estrictamente necesaria y eso se obtendría observando el comportamiento o avance de la reacción.

✓ **Control del avance de la reacción en función del tiempo:** Seguir el avance de la reacción forma parte importante del desarrollo de la investigación ya que por medio de ésta se determina la eficiencia de la levadura en cuanto al proceso de degradación del azúcar presente en el sustrato y a su vez se puede dilucidar si la reacción se está desarrollando de la forma esperada. Con información previamente recolectada se decidió realizar dos monitoreos durante la reacción de fermentación; el primero de ellos



era la medición de los °Brix durante el transcurso del tiempo y el segundo era lograr medir los grados de alcohol o °GL de la solución haciendo extracciones planificadas de sustrato del reactor durante el proceso; para que esta última medición se lograra con éxito se debía realizar un proceso previo de clarificación de la solución utilizando tierras filtrantes denominadas también “diatomeas” junto a un sistema de filtración al vacío; con el propósito de eliminar levaduras, nutrientes, entre otros sólidos que afectan la densidad de la solución y, en consecuencia, la medición arrojada por el alcoholímetro. Puesta en marcha la planificación experimental se observó que realizando las sucesivas extracciones de sustrato durante la fermentación y este mismo, al ser expuesto al proceso de filtrado al vacío con las tierras filtrantes, se lograba la clarificación deseada pero al sumergir el alcoholímetro en la solución previamente tratada no se obtenía ninguna lectura que admitiera la presencia de etanol en la solución. Estos resultados son contradictorios como consecuencia de que durante el tiempo de la fermentación los °Brix disminuían intuyéndose la formación de alcohol; por lo cual se notó que la filtración era muy prolongada generada por el deficiente vacío dado por el sistema lo que trae como consecuencia la pérdida del etanol al ambiente. A partir de este evento, se decide descartar la opción de filtrar y por medio de consultas bibliográficas se logra resolver este inconveniente utilizando las tablas C.3, por medio de las cuales usando los °Brix medidos durante el avance de la reacción se pueden estimar los °GL presentes en la solución.

#### **4.4.2.2 Desarrollo experimental del proceso de fermentación.**

Previamente preparado el desecho orgánico seleccionado y definidas las variables a controlar, se procede a fermentar dicha materia prima.

##### **4.4.2.2.a Fermentación discontinua o Batch**

Antes de realizar dicho proceso de fermentación se debe preparar previamente el



desecho seleccionado, el cual se pone en contacto íntimo con la bacteria que se encarga de realizar la degradación de la misma.

- ❖ **Descripción del equipo:** el proceso se lleva a cabo en un envase de 2000 ml de capacidad elaborado de vidrio, el cual desempeñara la función de reactor y debe poseer una tapa que no permita el escape del etanol obtenido durante el proceso y a su vez detener la entrada de oxígeno del aire que afecta la condición anaeróbica que requiere la fermentación. Es notable considerar que uno de los productos de la reacción es el dióxido de carbono y éste debe tener una salida del reactor para evitar la presurización del mismo por medio de una manguera cuya salida estará sumergida en agua para evitar el ingreso de oxígeno por los motivos antes mencionados. Debe poseer de igual forma un medio de agitación y un mecanismo de extracción de sustrato para realizar un seguimiento de reacción en intervalos de tiempo definido. Para ello se dispone de una manguera con un dispositivo de entrada y salida de fluido que permiten mantener estables las condiciones de la reacción.
  
- ❖ **Obtención del etanol:** se desarrolla el proceso fermentativo siguiendo la metodología descrita en el capítulo 3.

#### 4.4.2.3 Análisis de resultados

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos pre-experimentales se determinó cuales eran las mejores condiciones para lograr que el proceso de fermentación se desarrollara de la manera deseada. Previamente definidas las variables que afectan el proceso, se procede a determinar los niveles del diseño de experimentos a desarrollar, cuyos niveles vienen referidos al estudio del efecto de la temperatura a la que se expone el sustrato a fermentar. Es importante determinar la



---

influencia de dicha condición sobre la relación que existe entre la cantidad de sustrato empleado con el volumen de etanol obtenido una vez sometida la mezcla al proceso de purificación.

Se debe considerar que para este diseño solo se considera el desarrollo de los experimentos a partir de dos niveles explicados anteriormente y un solo factor que es la cantidad de cepa o levadura la cual es de 1,25 g por cada litro de sustrato, determinada a partir de la naturaleza del mosto a fermentar, a través de consultas a expertos en el área de fermentación y de investigaciones realizadas con anterioridad considerando que esta sea del mismo origen y de la misma familia.

Es importante mencionar que existen diversos orígenes específicos de levaduras, aquellas comerciales con un porcentaje de pureza no superior al 80%, genéticamente alteradas y las otras tratadas en laboratorios denominadas cepas puras. Se planteó de igual forma realizar la reacción con cepas cuyo crecimiento y reproducción fuesen de distintos medios de manipulación; surgieron dos motivos importantes por los cuales se descartó esta posibilidad; el primero de ellos es que la manipulación in situ de la ***Saccharomyces cerevisiae*** requiere de ciertos requerimientos como equipos y técnicas de las cuales no se disponían y por consiguiente significaba una limitante para que los autores lograran desarrollar la fermentación para cepas de la misma familia pero tratadas e inoculadas de distinta forma. Debido a este inconveniente mediante consultas bibliográficas y estudios relacionados con la fermentación realizada con diversas cepas cultivadas de distintas formas se concluyó que el rendimiento obtenido utilizando cepas de la misma familia pero manipuladas bajo distintas condiciones era casi el mismo, por lo tanto, se decidió realizar el experimentos con una sola cepa, siendo esta la levadura de origen comercial.

A continuación se presentan los resultados obtenidos tanto en tablas como gráficamente del seguimiento del avance de la reacción en función de la variación de

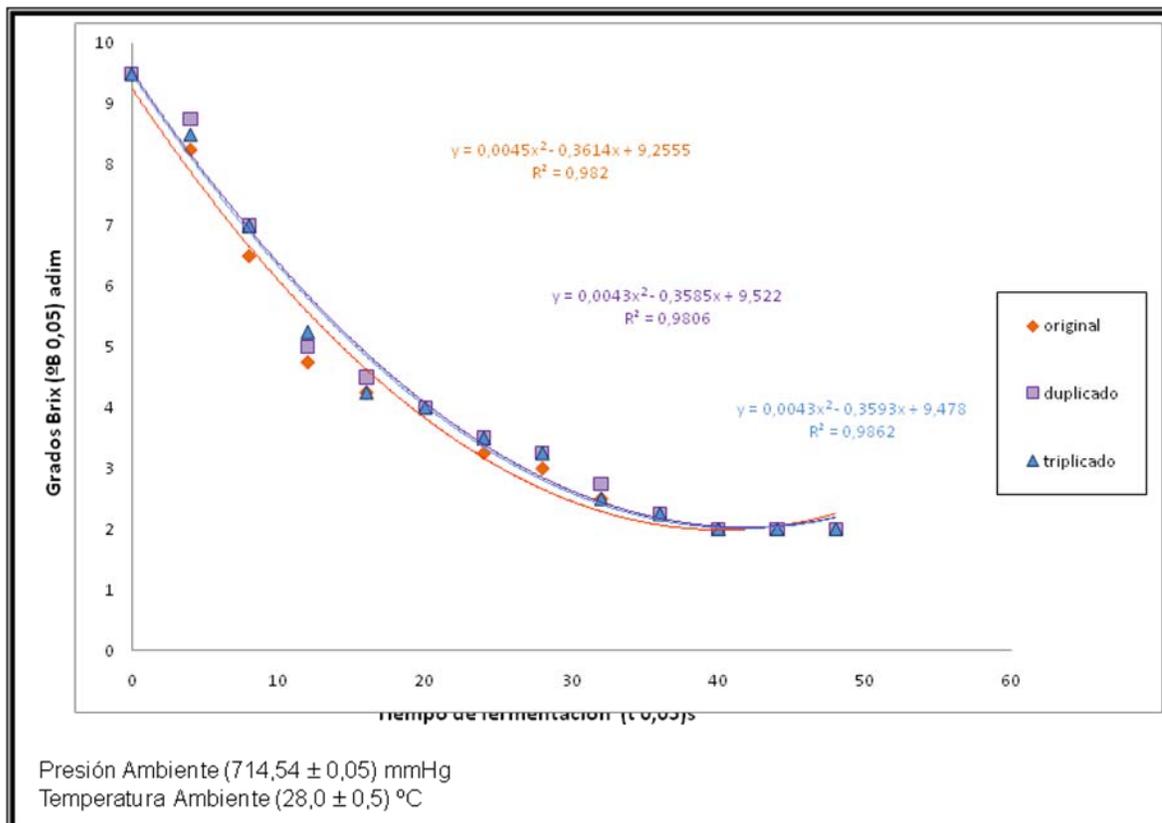
---



los °Brix:

**TABLA 4.4. Variación de los °Brix en función del tiempo para un rango de temperatura definido**

Tiempo de Reacción (h)	°Brix (35 – 40)°C		
	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3
0	9,50	9,50	9,50
4	8,25	8,75	8,50
8	6,50	7,00	7,00
12	4,75	5,00	5,25
16	4,25	4,50	4,25
20	4,00	4,00	4,00
24	3,25	3,50	3,50
28	3,00	3,25	3,25
32	2,50	2,75	2,50
36	2,25	2,25	2,25
40	2,00	2,00	2,00
44	2,00	2,00	2,00
48	2,00	2,00	2,00



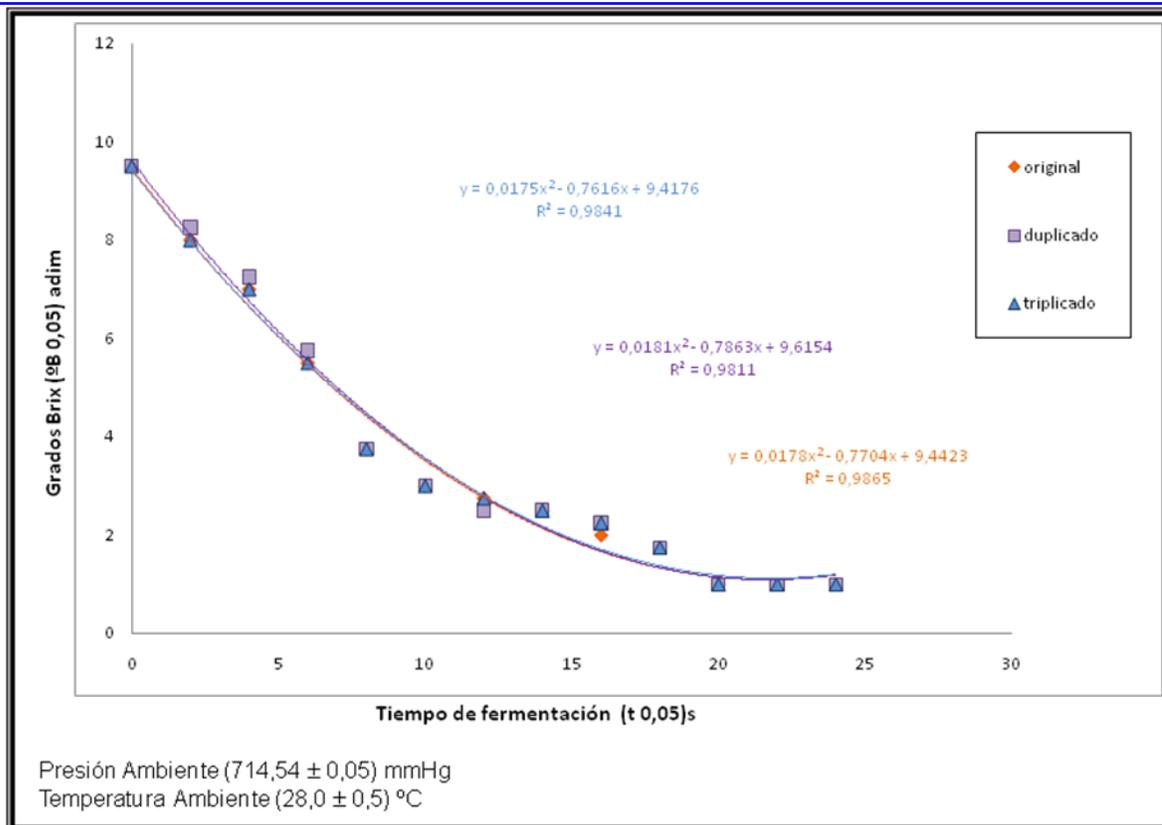
**Figura 4.1. Variación de los °Brix en función del tiempo para un rango de temperatura (35 – 40)°C**

En la gráfica anterior se describe la variación de los °Brix en función del tiempo donde si observamos el comportamiento de las tres curvas; dos de ellas poseen un desplazamiento casi idéntico mientras que la perteneciente a la alícuota original está un poco desviada de las dos anteriores, esto puede deberse a que el rango de temperatura que se estaba trabajando en este experimento no favorece el comportamiento adecuado de la levadura en cuanto a la degradación de la materia orgánica, por ser muy alto.



**TABLA 4.5. Variación de los °Brix en función del tiempo para un rango de temperatura definido**

Tiempo de Reacción (h)	°Brix (30 – 35)°C		
	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3
0	9,50	9,50	9,50
2	8,00	8,25	8,00
4	7,00	7,25	7,00
6	5,50	5,75	5,50
8	3,75	3,75	3,75
10	3,00	3,00	3,00
12	2,75	2,50	2,75
14	2,50	2,50	2,50
16	2,00	2,25	2,25
18	1,75	1,75	1,75
20	1,00	1,00	1,00
22	1,00	1,00	1,00
24	1,00	1,00	1,00



**Figura 4.2. Variación de los °Brix en función del tiempo para un rango de temperatura (30 – 35) °C**

En la gráfica anterior se describe la variación de los °Brix en función del tiempo donde si observamos el comportamiento de las tres curvas estas poseen un desplazamiento mucho mas idéntico al de las curvas obtenidas anteriormente; esto es como consecuencia de que el rango de temperatura definido para este experimento es el más acorde según lo investigado previamente para realizar este tipo de reacción lo que hace concluir que esta condición térmica es más adecuada para que la levadura consuma el azúcar del sustrato.

Al observar las tablas 4.4 y 4.5; si se comparan los tiempos de reacción y se detalla el último valor de °Brix se concluye lo que anteriormente se explica con respecto



al diseño de experimentos de trabajar con el factor de masa de levadura definido previamente ya que el hecho de que para el rango de temperatura entre  $(35 - 40)^{\circ}\text{C}$  los  $^{\circ}\text{Brix}$  finales son de 2; se puede concluir que tal vez por este comportamiento si era necesario variar la masa para disminuir dicha magnitud y obtener mayor cantidad de etanol pero al someter la reacción a otro rango de temperatura inferior específicamente  $(30 - 35)^{\circ}\text{C}$  ocurre lo esperado que era la disminución de los  $^{\circ}\text{Brix}$  y a su vez el tiempo de reacción; lo que trae como consecuencia la comprobación de lo que se explicó en el capítulo II sobre el efecto de la temperatura en la eficiencia de la levadura durante la fermentación, por lo tanto, hacer variaciones de masa de levadura no corresponden en este caso de la investigación porque si por algún motivo disminuyen mas los  $^{\circ}\text{Brix}$  lo harían en una proporción muy mínima formando solo trazas de etanol no significativas a expensas de un gasto energético nada positivo.

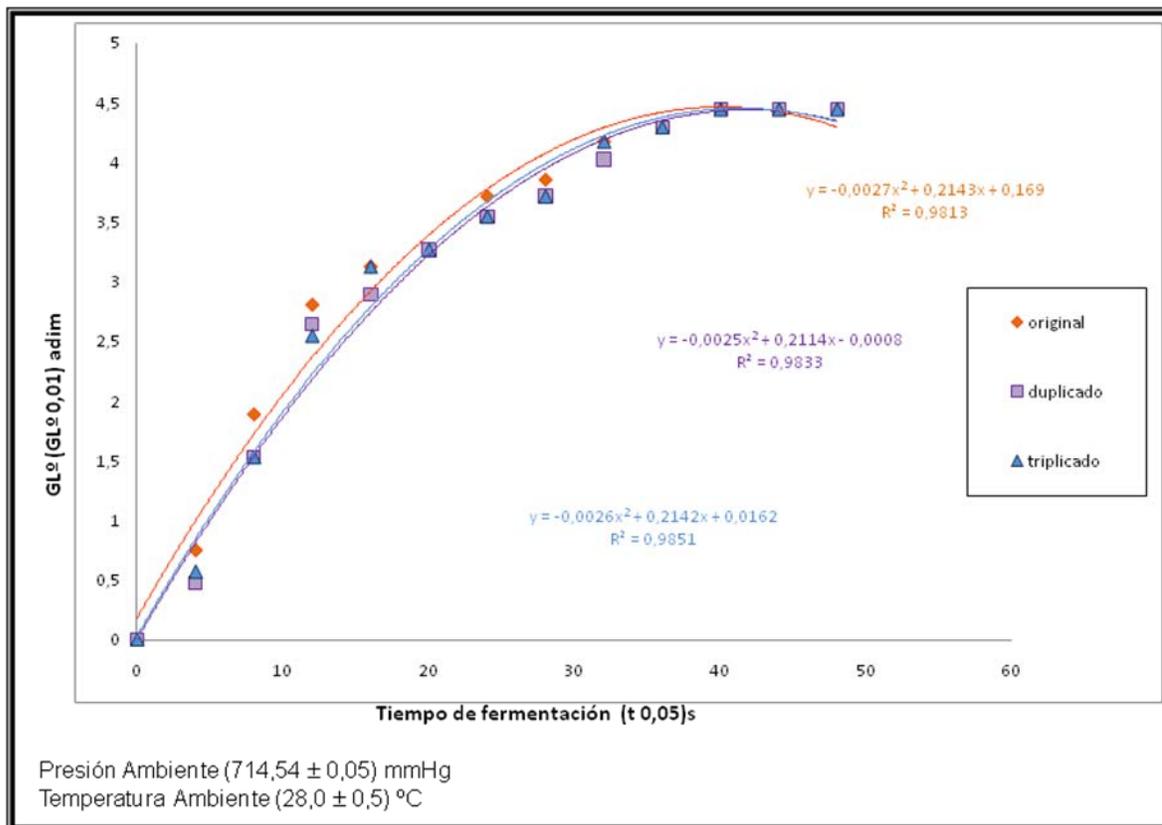
Otra manera ya mencionada de seguir el avance de la reacción es la estimación de los  $^{\circ}\text{GL}$  por medio de la variación de los  $^{\circ}\text{Brix}$  en función del tiempo utilizando la tabla C.3 (apéndices), dicha estimación se realiza a niveles de la industria cervecera para monitorear el etanol aproximado que se puede producir en función de los  $^{\circ}\text{Brix}$  que inicialmente presente la solución a fermentar

A continuación se presentan los resultados obtenidos tanto en tablas como gráficamente del seguimiento del avance de la reacción en función de la estimación de los  $^{\circ}\text{GL}$ :



**TABLA 4.6. Estimación de los °GL en función de la variación de los °Brix para un rango de temperatura definido**

Tiempo de Reacción (h)	°GL (35 – 40)°C		
	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3
0	0	0	0
4	0,75	0,47	0,57
8	1,89	1,53	1,53
12	2,81	2,65	2,55
16	3,13	2,90	3,13
20	3,27	3,27	3,27
24	3,72	3,55	3,55
28	3,86	3,72	3,72
32	4,18	4,03	4,18
36	4,30	4,30	4,30
40	4,45	4,45	4,45
44	4,45	4,45	4,45
48	4,45	4,45	4,45



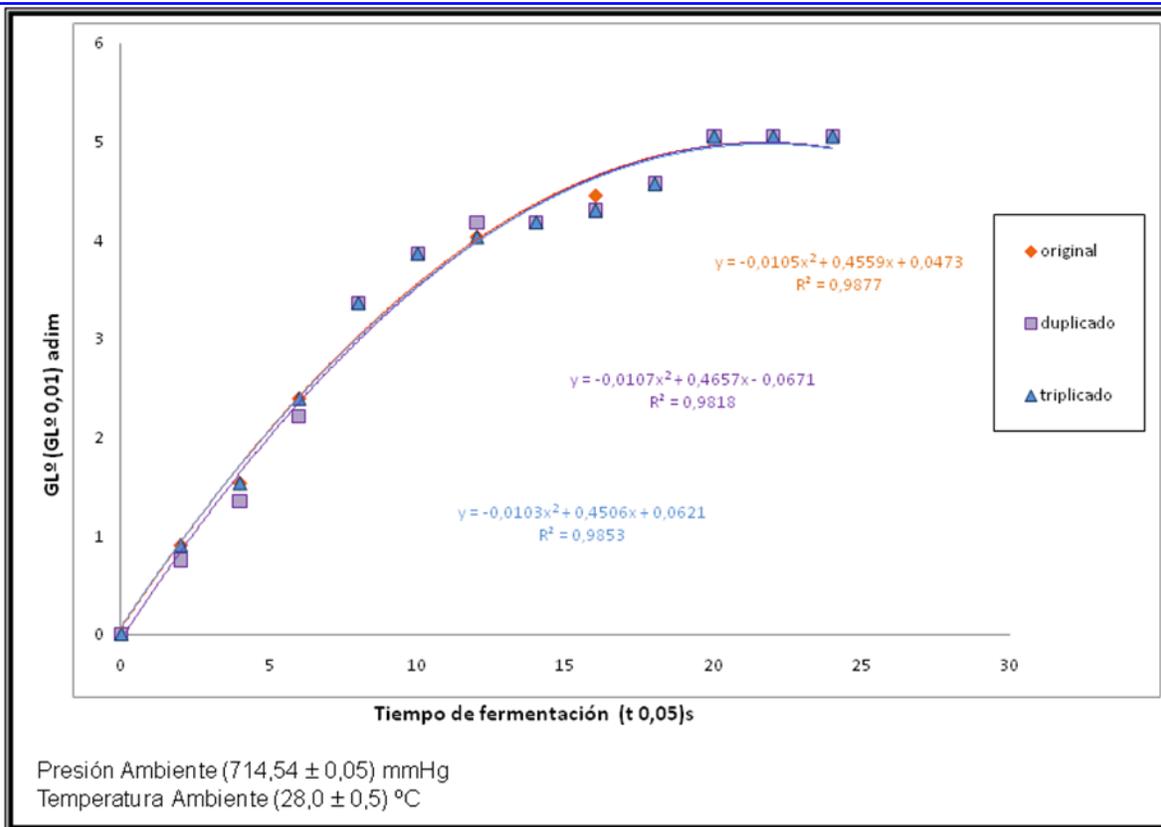
**Figura 4.3. Variación de los °GL estimados en función del tiempo para un rango de temperatura (35 – 40) °C**

Al observar el comportamiento o desplazamiento que generan estas curvas ocurre algo similar a lo acontecido con la disminución de los °Brix ya que para este intervalo de temperatura escogido la levadura se encuentra en un estado que vulnera su eficiencia en el momento de realizar la digestión del azúcar disponible, por lo tanto, a pesar de no tratarse de una dispersión muy significativa se pone en manifiesto que la condición térmica a la cual se somete la batería no es el más adecuado.



**TABLA 4.7. Estimación de los °GL en función de la variación de los °Brix para un rango de temperatura definido**

Tiempo de Reacción (h)	°GL (30 – 35)°C		
	Alícuota 1	Alícuota 2	Alícuota 3
0	0	0	0
2	0,90	0,75	0,90
4	1,53	1,35	1,53
6	2,39	2,21	2,39
8	3,36	3,36	3,36
10	3,86	3,86	3,86
12	4,03	4,18	4,03
14	4,18	4,18	4,18
16	4,45	4,30	4,30
18	4,57	4,57	4,57
20	5,05	5,05	5,05
22	5,05	5,05	5,05
24	5,05	5,05	5,05



**Figura 4.4. Variación de los °GL estimados en función del tiempo para un rango de temperatura (30 – 35) °C**

Una vez realizada la fermentación bajo una temperatura en un rango más adecuado como el caso entre (30 – 35)°C para el microorganismo se observa que el comportamiento de las curvas posee menos diferencia en cuanto a su desplazamiento al compararse con las anteriores; lo que hace determinante tanto para este caso de estimación de °GL como para el comportamiento de los °Brix que a medida que avanza la reacción el gradiente de temperatura al que se expone el sustrato es la variable determinante para obtener los mejores resultados en cuanto a cantidad de etanol producido y al tiempo que conlleve esta reacción.

Al observar las tablas 4.6 y 4.7; si se comparan los tiempos de reacción ocurre el



---

mismo comportamiento descrito anteriormente en cuanto a la disminución de los °Brix y si se logra observar el valor más grande de °GL estimado se encuentra en el rango de temperatura entre (30 – 35)°C; por lo que se puede concluir que la reacción ocurre de mejor manera en cuanto al tiempo y a la producción de alcohol bajo este rango térmico descrito anteriormente, lo que hace plena concordancia con las investigaciones y las referencias bibliográficas antes consultadas para el desarrollo de la misma, es de considerable importancia acotar que ambas reacciones se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones exceptuando los cambios de temperatura descritos en el diseño experimental.

A continuación se presenta un análisis estadístico de los datos recolectados durante la fermentación específicamente solo para los °Brix ya que los °GL son estimados a partir del comportamiento de estos mismo; consiste en el cálculo de los coeficientes de variación el cual es útil para comparar dispersiones y a su vez equivale a la razón entre la media aritmética y la desviación típica o estándar. Este cálculo es importante ya que permite dilucidar si hay que repetir alguna prueba realizada durante los experimentos ya que si este coeficiente es mayor al 5% existen motivos por los cuales ocurra este comportamiento entre los cuales tenemos; la escala o patrón de medición de alguna variable de interés es de una apreciación de magnitud significativa por lo que dichas medidas tengan diferencias relevantes entre ellas y esto estadísticamente no significa que la medición este errada y la otra opción es que realmente exista algún error de cualquier índole que genere esa medición sospechosa lo cual es recomendable la repetición de la experiencia

Al analizar los resultados obtenidos para las fermentaciones realizadas se obtuvo:



**TABLA 4.8. Análisis estadístico de la data recolectada para un rango de temperatura (35-40)°C**

<b>Tiempo de RxN (h)</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Coefficientes de variación (%)</b>
0	0,00	0,00
4	0,25	2,94
8	0,29	4,22
12	0,25	5,00
16	0,14	3,33
20	0	0,00
24	0,14	4,22
28	0,14	4,56
32	0,14	5,59
36	0,00	0,00
40	0,00	0,00
44	0,00	0,00
48	0,00	0,00

Al observar el cálculo de los coeficientes de variación todos los resultados cumplen la condición de ser menores del 5% exceptuando solo el generado para un tiempo de 32 horas como lo describe la tabla anexa; si observamos el origen de las medidas denotamos que la escala del equipo, en este caso el refractómetro, va de 0,25 en 0,25 por lo tanto esa diferencia o ese rango de decimales entre una medida y otra genera este comportamiento el cual no significa que la medición este errada.



**TABLA 4.9. Análisis estadístico de la data recolectada para un rango de temperatura (30-35)°C**

<b>Tiempo de RxN (h)</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Coefficientes de variación (%)</b>
0	0,00	0,00
2	0,144	1,79
4	0,14	2,04
6	0,14	2,59
8	0,00	0,00
10	0,00	0,00
12	0,14	5,41
14	0,00	0,00
16	0,14	6,66
18	0,00	0,00
20	0,00	0,00
22	0,00	0,00
24	0,00	0,00

A continuación se presenta el cálculo de los coeficientes de variación donde se observa que todos los resultados cumplen la condición de ser menores del 5% exceptuando solo el generado para un tiempo de 12 horas y 16 horas como lo describe la tabla anexa; si observamos el origen de las medidas ocurre el mismo evento descrito anteriormente en cuanto a la escala de medición que presenta el equipo.



---

## 4.5 Determinación de las condiciones del sistema para lograr una separación efectiva de los componentes involucrados en la mezcla

### 4.5.1 Ensayos pre-experimentales

Una vez realizados los ensayos pre-experimentales empleando tanto soluciones patrón cuya composición de etanol es la estimada a producir en la fermentación realizada como con muestras del volumen fermentado, se observó que la tecnología que resulta más favorecida es la destilación simple con paso por una columna de relleno y operando sin reflujo. Aunque dicha condición resulta contraria a lo expresado en la literatura especializada, las características de la torre de destilación disponible en el laboratorio de ingeniería química para la realización de este trabajo de investigación arroja como resultados que al realizar una destilación fraccionada con un reflujo obtenido experimentalmente de aproximadamente 1/12 del flujo máximo se obtiene una composición ligeramente inferior que la obtenida cuando se trabaja la torre enviando el etanol condensado directamente a la zona de recolección de destilado sin regresar parte de este a la torre. Esta diferencia de composiciones es debida a que al trabajar la destilación fraccionada y regresar parte del etanol condensado a la torre, esta ocasiona la inundación de la misma, disminuyendo así la composición en el destilado.

En el caso de la destilación extractiva se escogió como disolvente el **etilenglicol** por tener las cualidades necesarias para la separación de los componentes de la mezcla tales como:

- Alta capacidad para disolver ambos componentes de la mezcla (etanol y agua), por ende la mezcla resultante es homogénea.
  - No forma azeótropo con ninguno de los componentes originales, lo que facilita su recuperación.
  - Baja volatilidad, lo cual garantiza que este no se evapore y contamine el producto final (destilado).
-



- 
- No es corrosivo y de toxicidad admisible.
  - Mayor afinidad con el agua, lo cual permite obtener etanol casi puro como producto de tope.

Al realizar las pruebas de destilación extractiva se observó que debido a la corta área de contacto proporcionada por la torre (80 cm), la cual no cuenta con una altura de relleno suficiente, el disolvente no realizaba su función de extraer el agua y aumentar la composición del etanol en el tope y destilado. Por ello, se puede decir que sería necesario contar con una torre más alta que permita el contacto entre las fases presentes en el relleno para poder extraer eficientemente el agua de la mezcla.

Al llevar a cabo una extracción líquido-líquido con hexano para luego destilar la capa orgánica producida en dicha extracción y así separar el hexano del etanol, se determinó que debido a que la cantidad de etanol producida en el proceso fermentativo no es muy significativa en volumen, la capa orgánica formada tampoco lo es y no es viable esta técnica pues no se alcanza un volumen suficiente para destilar.

Es importante señalar que experimentalmente se observó que era necesario acumular los volúmenes destilados de cada reactor fermentado hasta alcanzar un volumen de alimentación de 350 ml para destilarlos nuevamente y así aumentar la composición del producto final obtenido para cada temperatura de fermentación.

Por todo lo expuesto anteriormente se puede decir que las variables a tomar en cuenta durante el proceso de destilación simple son:

- Reflujo igual a cero para la purificación del producto de fermentación.
  - Reflujo igual a  $1/12$  del flujo máximo para la purificación de los volúmenes de destilado acumulados.
-



#### **4.5.2 Desarrollo experimental del proceso de purificación del bioetanol.**

Una vez obtenido el etanol vía fermentativa y establecidas las variables de operación, se procede a la purificación de la mezcla obtenida.

En esta parte de la etapa experimental de la investigación, se ejecutan una serie de ensayos planificados. A partir de esta fase, se obtienen registros válidos sobre el comportamiento y alcance técnico del sistema en funcionamiento.

#### **4.5.3 Proceso de destilación simple por carga**

- ❖ **Descripción del equipo:** la purificación del bioetanol se llevó a cabo en un equipo conformado por un matraz esférico de tres bocas y de 500 ml de capacidad, una manta calefactora, un cabezal de destilación con termómetro acoplado en tapón mono horadado, una columna de relleno, un condensador para enfriamiento (refrigerante), una válvula reguladora del reflujo y accesorios de conexión.
- ❖ **Purificación del etanol:** se lleva a cabo el proceso de destilación bajo la metodología establecida para ello en el capítulo anterior. Es importante señalar que debido a que cada reactor diseñado para la fermentación contenía un volumen de 1300 ml, el proceso de destilación se realiza en tres volúmenes iguales para cada uno de los cuatro reactores, y por supuesto cada destilación se realiza por triplicado.
- ❖ **Caracterización del etanol purificado:** a la muestra de destilado recolectada experimentalmente, se le realizó una evaluación fisicoquímica en la que se midieron las siguientes propiedades: índice de refracción, densidad y se estimó



los grados alcohólicos (gay lussac).

#### **4.5.4 Análisis de los valores de composición molar de etanol obtenidos en el destilado acumulado**

Como se explicó anteriormente debido al diámetro, altura y condiciones del relleno, la torre disponible debía ser operada de forma simple para obtener la composición más alta que permite la columna, es decir, se realizaron múltiples destilaciones sencillas con paso por una columna de relleno pero sin reflujo. Las composiciones obtenidas para dichas destilaciones se observan a continuación:

**Tabla 4.10. Características del producto final para las destilaciones previas**

Reactor	Alícuota	Índice de refracción		Composición del destilado final	
		(30-35)°C	(35-40)°C	(30-35)°C	(35-40)°C
1	1	1,3517	1,3484	0,20	0,18
	2	1,3499	1,3507	0,20	0,21
	3	1,3493	1,3482	0,18	0,17
2	1	1,3503	1,3502	0,17	0,17
	2	1,3504	1,3504	0,19	0,18
	3	1,3498	1,3500	0,17	0,17
3	1	1,3486	1,3487	0,17	0,18
	2	1,3479	1,3479	0,15	0,15
	3	1,3475	1,3490	0,14	0,17
4	1	1,3476	1,3473	0,15	0,13
	2	1,3486	1,3456	0,15	0,12
	3	1,3471	1,3457	0,15	0,12



Cabe destacar que los resultados arriba señalados reflejan el promedio de las composiciones obtenidas para las múltiples destilaciones llevadas a cabo a la largo de la fase experimental. De dichos promedios se puede concluir que los destilados acumulados de estas destilaciones alcanzaron una composición máxima de 20% y una mínima de 14% para el rango menor de temperaturas y una composición máxima de 21% y mínima de 12% para el rango de temperaturas mayor; por ser estas composiciones muy bajas para el grado de pureza necesaria del etanol a obtener, se confirmó que se debía destilar de nuevo dichos acumulados para aumentar el porcentaje de etanol presente en el destilado final. También es conveniente señalar que durante la recolecta de muestras de destilado se obtuvo una composición máxima de 49% para la mayor temperatura y de 53% para la menor.

El volumen de alimentación acumulado para destilar nuevamente la mezcla, fue producto de destilar el jugo de 4 reactores para cada rango de temperatura, logrando acumular 416 ml para la temperatura de (30-35)°C y 350 ml para el rango de (35-40)°C. De la destilación de 350 ml de acumulado para ambos rangos de temperatura se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 4.11. Características del producto final para cada rango de temperatura**

Temperatura de fermentado	Índice de refracción leído	Índice de refracción corregido	Composición del destilado final
(30 – 35)°C	1,3625	1,3649	0,50
	1,3620	1,3647	0,48
	1,3620	1,3646	0,52
(35 – 40)°C	1,3615	1,3645	0,43
	1,3610	1,3644	0,46
	1,3615	1,3645	0,45



Interpretando estos resultados es evidente que para el rango de temperatura comprendido entre (30 – 35)°C se obtienen composiciones de 0,50; 0,48 y 0,52 de etanol en el destilado, resultando esta composición mayor a la obtenida para el rango de (35-40)°C, que fue de 0,43; 0,46 y 0,45. El hecho de obtener a escala de laboratorio una composición máxima de 52% de etanol se debe a que la torre disponible para dicho proceso no era lo suficientemente alta ni posee un área de contacto ideal para obtener una mayor pureza.

Resulta de interés comentar sobre los volúmenes de destilado acumulados obtenidos; al trabajar con el jugo proveniente de la destilación entre (35 – 40)°C se recolectaron 100 ml, 95 ml y 100 ml en cada una de las corridas realizadas respectivamente. Los volúmenes recolectados para el otro rango de temperatura de operación fueron 109 ml, 110 ml y 115 ml de etanol destilado.

Para los autores debido a que el proceso de destilación no conto con un diseño experimental con factores y niveles que analizar, resulto conveniente realizar un estudio estadístico de la data recolectada para determinar su dispersión, el estudio consistió en el cálculo de las desviaciones promedios y los coeficientes de variación.

**Tabla 4.12. Análisis estadístico de la data recolectada**

Reactor	Alícuota	Desviación estándar		Coeficientes de variación	
		(30-35)°C	(35-40)°C	(30-35)°C	(35-40)°C
1	1	0,00197	0,00155	0,14416	0,11370
		0,00879	0,00207	0,64871	0,15360
		0,01175	0,00307	0,87084	0,22839
		0,00097	0,00129	0,41850	0,09647



Tabla 4.12. Análisis estadístico de la data recolectada (continuación)

Reactor	Alícuota	Desviación estándar		Coeficientes de variación	
		(30-35)°C	(35-40)°C	(30-35)°C	(35-40)°C
1	2	0,00155	0,00179	0,11387	0,13109
		0,00319	0,00226	0,23536	0,16656
		0,00177	0,00244	0,13205	0,18147
		0,00097	0,00210	0,07220	0,15726
	3	0,00195	0,00098	0,14331	0,07208
		0,00319	0,00277	0,23536	0,20540
		0,00177	0,00204	0,13205	0,15146
		0,00097	0,00105	0,07220	0,07886
2	1	0,00203	0,00208	0,14887	0,15243
		0,00455	0,00654	0,33588	0,48241
		0,00226	0,00227	0,16773	0,16889
		0,00241	0,00192	0,18019	0,14369
	2	0,00166	0,00136	0,12187	0,10010
		0,00299	0,00364	0,22065	0,26837
		0,00404	0,00443	0,29981	0,32956
		0,00193	0,00119	0,14422	0,08895
	3	0,00213	0,00179	0,15630	0,13133
		0,00388	0,00513	0,28651	0,37902
		0,00185	0,00229	0,13764	0,17002
		0,00120	0,00149	0,08956	0,11132
3	1	0,00194	0,00207	0,14237	0,15186
		0,00381	0,00408	0,28244	0,30224
		0,00305	0,00376	0,22703	0,28022



Tabla 4.12. Análisis estadístico de la data recolectada (continuación)

Reactor	Alícuota	Desviación estándar		Coeficientes de variación		
		(30-35)°C	(35-40)°C	(30-35)°C	(35-40)°C	
3	1	0,00177	0,00123	0,13270	0,09218	
	2	0,00194	0,00169	0,14242	0,12395	
		0,00374	0,00404	0,27688	0,29917	
		0,00361	0,00437	0,26850	0,32565	
		0,00068	0,00134	0,05112	0,10024	
	3	0,00254	0,00242	0,18679	0,17724	
		0,00326	0,00266	0,24160	0,19683	
		0,00163	0,00211	0,12158	0,15692	
		0,00085	0,00116	0,06347	0,08699	
	4	1	0,00202	0,00185	0,14800	0,13601
			0,00522	0,00555	0,38725	0,41082
			0,00322	0,00389	0,23980	0,28889
0,00182			0,00499	0,13650	0,37223	
2		0,00240	0,00179	0,17588	0,13107	
		0,00320	0,00364	0,23661	0,26929	
		0,00062	0,00398	0,04598	0,29671	
		0,00084	0,00058	0,06316	0,04364	
3		0,00142	0,00202	0,10433	0,14859	
		0,00376	0,00471	0,27893	0,34883	
		0,00305	0,00200	0,22735	0,14910	
		0,00122	0,00099	0,09136	0,07378	



Como ya se mencionó la desviación estándar es una medida del grado de dispersión de los datos del valor promedio. Dicho de otra manera, la desviación estándar es simplemente el "promedio" o variación esperada con respecto de la media aritmética. Una desviación estándar grande indica que los puntos están lejos de la media, y una desviación pequeña indica que los datos están agrupados cerca a la media. Mientras el coeficiente de variación es útil para comparar dispersiones a escalas distintas pues es una medida invariante ante cambios de escala. Por ello, es importante que todos los valores sean positivos y su media, por tanto, un valor positivo.

Analizando los valores obtenidos para los coeficientes de variación para ambos rangos de temperatura de fermentado se observa que se cumple con el requerimiento de que sean menores al 5%, lo cual permite concluir que los datos recolectados son correctos y su dispersión esta dentro de un rango aceptable. Los resultados de la desviación estándar permiten asegurar que los datos recolectados están agrupados cerca a la media.

Es importante señalar que las diferencias de pureza y volumen de etanol destilado obtenido no permiten concluir propiamente sobre la efectividad del proceso de destilación efectuado ya que ambas propiedades dependen directamente de la alimentación a la torre y a su vez esta depende del rango de temperatura al cual se opero la fermentación del jugo de piña y no de las variables manipuladas durante la destilación ya que la torre opero siempre bajo las mismas condiciones para cada destilación realizada.



## 4.6 Evaluación técnica y económica de dicho proceso para determinar su factibilidad de implantación.

### 4.6.1 Factibilidad técnica del montaje realizado en el laboratorio

Con este estudio se busca determinar si el proyecto es técnicamente factible. Para ello, y tal como se explicó en el marco metodológico, se efectuó un análisis de los factores que influyen en la eventual implementación del dispositivo diseñado.

**Tabla 4.13. Disponibilidad de los materiales, equipos e instrumentos en el Laboratorio de Ingeniería Química.**

Equipo	Cantidad requerida	Disponible
Baño termostatado	1	0
Reactor	4	0
Sistema de agitación	4	0
Sistema de drenaje (mangueras)	4	0
Molino o triturador	1	0
Refractómetro	1	1
Medidores de temperatura	4	4
Calderín	1	1
Columna de destilación	1	1
Condensador	1	1



**Tabla 4.13. Disponibilidad de los materiales, equipos e instrumentos en el Laboratorio de Ingeniería Química. (Continuación)**

<b>Equipo</b>	<b>Cantidad requerida</b>	<b>Disponible</b>
Medidor de flujo (rotámetro)	1	1
Cintas selladoras	5	0
Levadura	2	0

De la tabla 4.13, se puede notar que el Laboratorio no cuenta con los recursos necesarios para la implementación del sistema propuesto, por lo que es necesaria la complementación de los mismos. Sin embargo, todos estos componentes se encuentran disponibles en el mercado local por lo que su adquisición no representaría problema alguno.

Del análisis de la tabla anterior queda respondida la primera pregunta antes expuesta. En cuanto a la segunda interrogante se puede decir que los conocimientos adquiridos por los autores durante el desarrollo de la carrera en materias como operaciones unitarias, química orgánica, fisicoquímica y laboratorio de ingeniería química entre otras, proporcionan los conocimientos y habilidades necesarias para la realización de esta investigación.

También es importante señalar, que la implementación del sistema propuesto es fácilmente aplicable y puede llevarse a cabo sin ningún inconveniente dentro de las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Química.

De lo anterior, se desprende que no existe ninguna dificultad técnica para la



---

realización de este proyecto a **escala de laboratorio**.

Para determinar si el proceso es factible técnicamente a **escala de planta** se deben contestar las siguientes preguntas:

- ✓ ¿Es posible escalar los equipos empleados en el laboratorio a una escala de planta?
- ✓ ¿Está disponible la cantidad de materia prima necesaria para satisfacer el escalamiento?
- ✓ ¿Existe un mercado en Venezuela para la distribución del etanol a elaborar?
- ✓ ¿El proceso es fácilmente aplicable?
- ✓ ¿Se cuenta en el país con los conocimientos, experiencia y destrezas para el manejo de las tecnologías propuestas?

Para contestar las interrogantes mencionadas se realizaron las investigaciones y consultas pertinentes obteniendo las siguientes resultados:

Para responder la primera interrogante se redimensionaron y diseñaron los equipos principales empleados en el laboratorio según fue necesario y se encontró que dichos equipos se encuentran disponibles en el mercado nacional e internacional.

En cuanto a la disposición de materia prima se encontró que Venezuela produce un promedio de 356.879 toneladas de piña al año y que el 41% de esas toneladas corresponden al desecho de la piña por lo tanto se cuenta con la suficiente cantidad de piña disponible para ser empleada como materia prima para obtener etanol.

Referente al mercado en Venezuela del bioetanol se tiene que debido a la sustitución del metil-butil-éter (MTBE) como oxigenante de la gasolina el país importa

---



---

actualmente de Brasil alrededor de 200 mil barriles diarios de etanol para este fin, por lo tanto producir etanol en el país disminuiría esas importaciones.

Para responder a las últimas dos interrogantes se tiene que el proceso es de fácil operación y que las casas de estudio existentes en el país forman a diario profesionales capacitados para operar los equipos necesarios para la obtención del etanol.

Por todo lo antes expuesto se puede concluir que si es posible el escalamiento del proceso propuesto y que por lo tanto es factible técnicamente la aplicación del mismo.

#### **4.6.2 Factibilidad económica**

##### **4.6.2.1 Estudio de mercado internacional**

Al revisar el mercado global se evidencia que Brasil y Estados Unidos (EUA) lideran la producción de etanol carburante en el ámbito mundial. Estos países se han convertido en los principales productores del mundo mediante el uso de la caña de azúcar y el maíz respectivamente como materia prima. La producción de etanol de caña de Brasil se destina a la exportación y al consumo nacional, mientras que la de los EUA va al consumo interno exclusivamente, ya que la demanda en gasolina sobrepasa los 530 billones de litros por año (350 millones de barriles/año). EUA actualmente sustituye gasolina por etanol en apenas el 2,85% para lo cual se consumen 36 millones de toneladas de maíz y se producen 15 mil millones de etanol al año.

Los países productores en la Unión Europea (UE) de bioetanol son 11 (Alemania, España, Francia, Suecia, Italia, Polonia, Hungría, Lituania, Holanda, República Checa y Letonia), siendo Alemania, España y Francia los grandes productores, con dos tercios

---



del total de la UE y entre los tres España es el mayor productor empleando como materia prima principal remolacha y cereales. Lo expuesto anteriormente se evidencia en la siguiente figura:

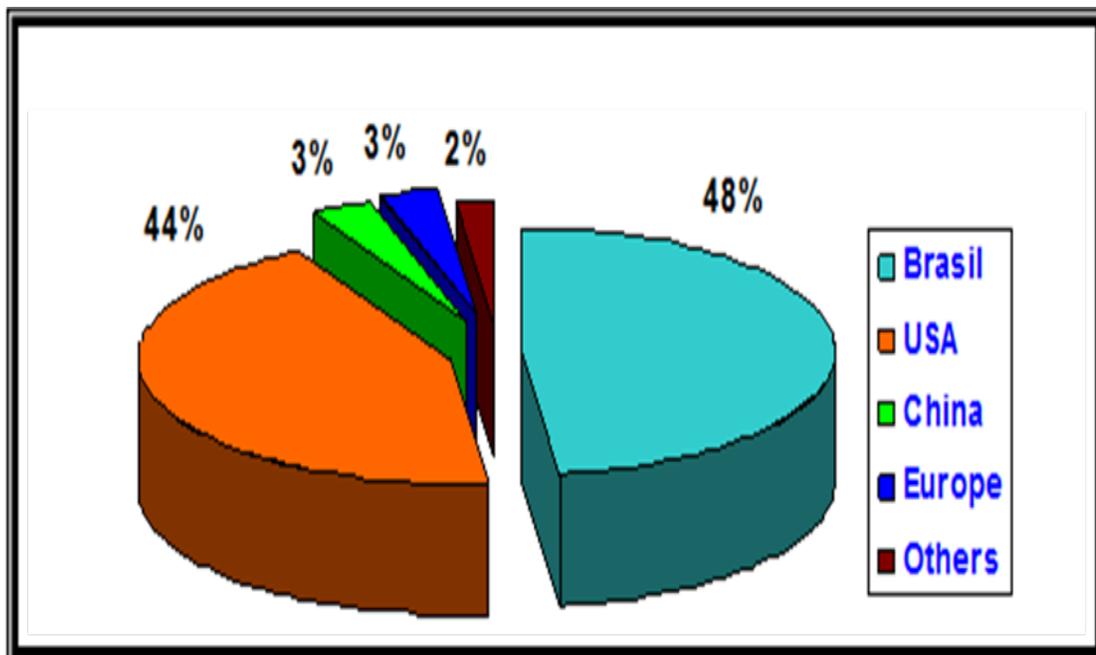


Figura 4.5. Mercado mundial de etanol  
(Fuente: Lozano, 2006)

En términos de cantidades producidas de etanol al año por dichos países se tiene:

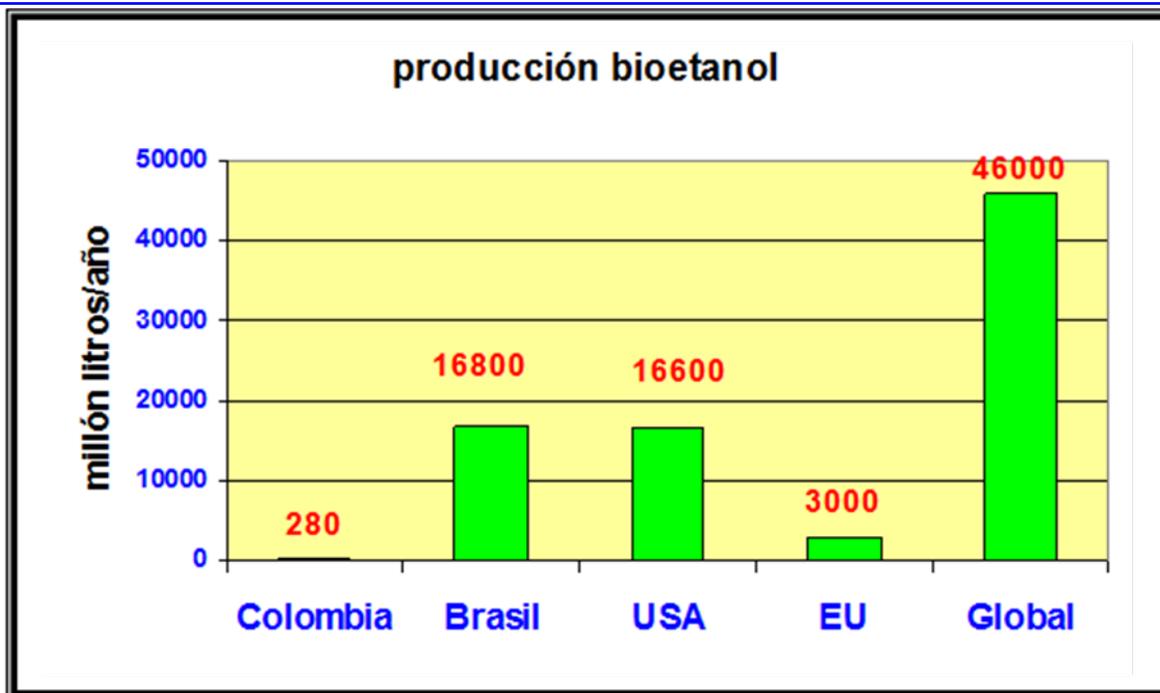


Figura 4.6. Producción mundial de bioetanol  
(Fuente: Lozano, 2006)

De ambas figuras se puede concluir que Brasil es el mayor productor y consumidor mundial de etanol como biocombustible así como también que a la Unión Europea todavía le queda un gran camino por recorrer para aproximarse a la producción de Brasil y Estados Unidos.

El precio de las materias primas para estos países viene regido por el mercado alimenticio, su destino tradicional.

#### 4.6.2.2 Evaluación costo-beneficio del sistema realizado a escala de laboratorio

El costo beneficio es una lógica o razonamiento basado en el principio de obtener los mayores y mejores resultados al menor esfuerzo invertido, tanto por eficiencia técnica como por motivación humana. Se supone que todos los hechos y



---

actos pueden evaluarse bajo esta lógica, aquellos dónde los beneficios superan el coste son exitosos, caso contrario fracasan.

El análisis de costo-beneficio es un término que se refiere tanto a:

- Una disciplina formal (técnica) a utilizarse para evaluar, o ayudar a evaluar, en el caso de un proyecto o propuesta, que en sí es un proceso conocido como evaluación de proyectos.
- Un planteamiento informal para tomar decisiones de algún tipo, por naturaleza inherente a toda acción humana.

Bajo ambas definiciones el proceso involucra, ya sea explícita o implícitamente, un peso total de los gastos previstos en contra del total de los beneficios previstos de una o más acciones con el fin de seleccionar la mejor opción o la más rentable. Muy relacionado, pero ligeramente diferentes, están las técnicas formales que incluyen análisis coste-eficacia y análisis de la eficacia del beneficio.

El análisis costo-beneficio es una técnica importante dentro del ámbito de la teoría de la decisión. Pretende determinar la conveniencia de un proyecto mediante la enumeración y valoración posterior en términos monetarios de todos los costes y beneficios derivados directa e indirectamente de dicho proyecto. Este método se aplica a obras sociales, proyectos colectivos o individuales, empresas privadas, planes de negocios, etc., prestando atención a la importancia y cuantificación de sus consecuencias sociales y/o económicas.

Para el caso de esta investigación se hizo una estimación de la inversión en equipos e implementos que se necesitan para obtener el producto final y en función de factores como tiempo de producción, costo referido a la energía consumida durante el funcionamiento del sistema; se evalúa el beneficio obtenido con el producto terminado



entre otros y a su vez determinar si bajo las condiciones ya expuestas en el laboratorio es rentable la obtención del producto.

A continuación se presentan los costos tanto energéticos como los aunados a equipos y materiales necesarios para llevar a cabo la investigación:

**TABLA 4.14. Costos relacionados a consumo energético**

<b>Equipos</b>	<b>Costos (BsF)</b>
Baño térmico	0,0007632
Manta de calentamiento	0,00000144
Bombas	0,0000002
<b>Total</b>	<b>0,0007648</b>

**TABLA 4.15. Costos relacionados a la compra de equipos e instrumentos necesarios para realizar la investigación**

<b>Equipos</b>	<b>Costos (BsF)</b>
Materia prima	Disponible
Sistema de molino	360
Torre de destilación	Disponible
Reactores	100
Bombas de agitación	112
Sistema de calentamiento	100
Levadura	5
Termómetros	120
otros	100
<b>Total</b>	<b>897</b>

Las magnitudes referidas a los costos energéticos se calcularon con datos nominales de voltaje y amperaje de los equipos tal como se expresa en los apéndices,



estos costos junto con los generados por la adquisición por parte de los investigadores de equipos y materiales necesarios para el desarrollo de la investigación generan una inversión inicial aproximada de 897Bs.f; si se compara este gasto con el producto final que fue un volumen aproximado de 109ml con un porcentaje de pureza del 50% en etanol; se observa claramente que no existe un beneficio rentable si se compara la logística para la implementación de la tecnología con respecto al beneficio; sin contar con la condición de que dicho alcohol va destinado a ser usado como un biocombustible para mezclar con combustible fósil lo que implica que es necesario aplicar procesos adicionales de purificación que logren eliminar por lo menos el 47% del agua presente, por lo tanto, este proceso a escala de laboratorio no resulta rentable. Como consecuencia de este análisis costo beneficio se desea realizar un estudio económico con mayor profundidad; planteando como punto inicial el uso de la misma materia prima y realizando el proceso de purificación necesario para alcanzar las condiciones que debe tener el etanol para ser mezclado con gasolina y así evaluar con indicadores económicos su factibilidad.

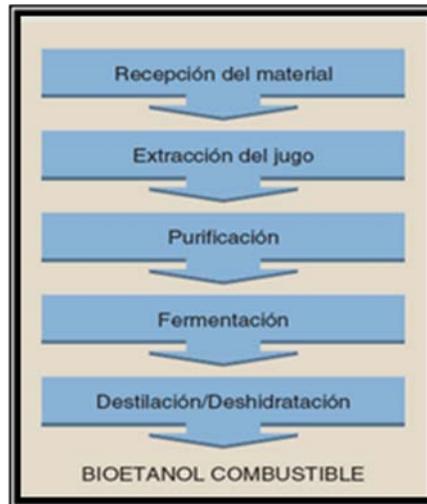
#### ***4.6.2.3 Propuesta para la obtención y purificación del bioetanol***

Tal como se mencionó anteriormente resultó conveniente realizar un estudio del proceso realizado a una escala de planta piloto para determinar si es factible económicamente la obtención de etanol a partir de desechos de piña con el fin de emplearlo como combustible del tipo E10, es decir, una mezcla de 10% etanol + 90% gasolina, mezcla para la cual los motores automotrices no requieren ser modificados de ninguna manera. Con tal fin resulto necesario saber en primer lugar la tecnología usada para obtener tal producto en los principales países productores de bioetanol.

Actualmente los principales productores de bioetanol: Brasil, Estados Unidos y

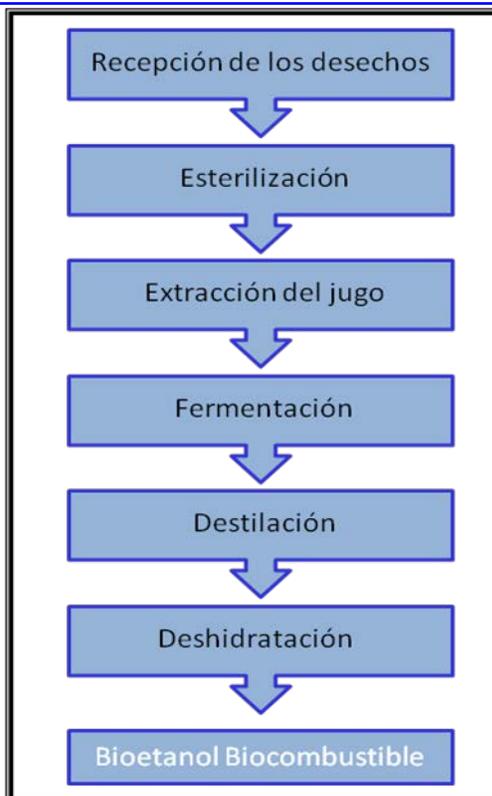


España, desarrollan las siguientes tecnologías para las diferentes materias primas empleadas:



**Figura 4.7. Etapas del proceso de extracción de etanol actual a partir de materias primas azucaradas (Fuente: Ballesteros, 2006)**

Una vez analizados los resultados de esta investigación y hechas todas las consultas bibliográficas y a expertos las tecnologías propuestas por los autores para el conjunto obtención y purificación de etanol a partir de los desechos orgánicos, se pudo comprobar experimentalmente a escala de laboratorio que es posible obtener etanol de los desechos de la piña, concha y corazón, lo que si se debe señalar es que la composición obtenida con dicha escala alcanzo un máximo de 50% en etanol y con ese grado de pureza no puede ser empleado como biocombustible el cual es el fin para el cual se planteo obtener el alcohol en esta investigación, por ello los autores estimamos necesario extrapolar los resultados obtenidos a una escala de planta y recomendar un proceso de deshidratación del alcohol extra al proceso de destilación llevado a cabo. Todo esto se muestra en el siguiente esquema:



**Figura 4.8. Etapas del proceso de extracción de etanol propuesta a partir de materias primas azucaradas (Fuente: propia)**

La etapa de **recepción de desechos** corresponde a la recolección de las conchas de piña provenientes de las empresas procesadoras de frutas de la región.

La etapa de **esterilización** se refiere como se menciono anteriormente a el lavado de los desechos con un bactericida para eliminar en lo posibles bacterias y/o gérmenes que puedan alterar la fermentación.

En la **extracción** se trituran las conchas con la ayuda de un molino y luego se pasa el mosto por un filtro prensa para obtener así el jugo a fermentar.

El jugo obtenido en la etapa anterior pasa a un **fermentador** donde por la acción



---

de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* se convierte el azúcar presente en el jugo en etanol y dióxido de carbono.

La **destilación** comprende un proceso de destilación extractiva del jugo fermentado con un agente disolvente que puede ser un glicol, con el cual se obtendría una pureza entre el 96% y el 98% en etanol.

En la última etapa que es la **deshidratación** se introduce el alcohol proveniente de la etapa anterior previamente calentado por un En esta operación, la mezcla etanol-agua pasa a través de un equipo generalmente cilíndrico que contiene un *tamiz molecular*. Los tamices moleculares son materiales granulares rígidos de forma esférica o cilíndrica elaborados a partir de aluminosilicatos de potasio, estas son zeolitas minerales naturales o sintéticas que deshidratan el gas etanol (elimina todas las restricciones de agua del etanol) capaces de absorber, a la temperatura y presión del proceso, el agua de los vapores alcohólicos elevando la concentración a más del 99,75%.

Debido a la diferencia de afinidad de las moléculas del etanol y del agua con respecto al adsorbente, esta última queda atrapada en el lecho a través de fenómenos de transporte superficial, mientras el etanol pasa a través del mismo aumentando su concentración en la corriente de salida del aparato. El alcohol así obtenido, se enfría y se manda a los tanques del almacén de alcohol para su expedición.

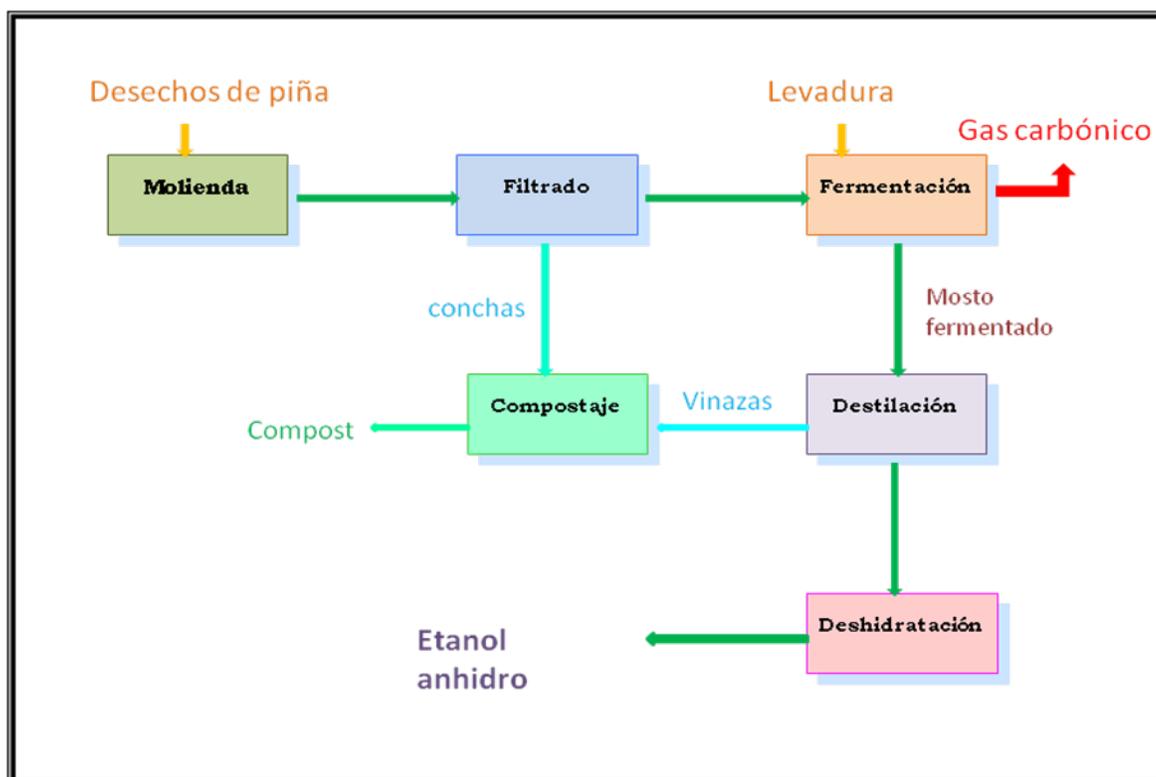
Este proceso está planteado para la producción de gasolina E10, es decir, una mezcla de 90% gasolina y 10% etanol. En este caso se emplea el etanol como un aditivo para la gasolina en sustitución del MTBE.

Cabe destacar que con los subproductos del proceso se podrían obtener ingresos extras, recolectando y vendiendo el CO<sub>2</sub> a las industrias de bebidas

---



carbonatadas por ejemplo y las vinazas resultantes de la destilación en conjunto con los desechos generados en la molienda y filtrado se pueden vender a empresas que fabriquen compost o abono orgánico. A continuación se muestra el diagrama de bloques del proceso:



**Figura 4.9 Diagrama de bloques del proceso propuesto**  
(Fuente: propia)

Las características de los equipos a emplear en el proceso se obtuvieron como ya se mencionó escalando los empleados en el laboratorio, en el caso del proceso de molienda se busco un Biotriturador usado en horticultura y que es capaz de triturar la materia prima empleado y para el filtrado se busco en catálogos digitales el filtro prensa que reuniera las características necesarias para sacar la mayor cantidad de jugo posible sin sólidos de gran tamaño. Para el caso del fermentador se investigo y se



estimaron el volumen que debería tener dicho reactor para producir la cantidad requerida y se encontró en el mercado un fermentador con las características buscadas, mientras para la columna de destilación fue necesario un diseño para determinar las características de la misma y poder cotizarla, que será explicado más adelante. Las características de los equipos finalmente escogidos se esbozan a continuación:

- **Molino:** es un Biotriturador Mini c/Motor 1 ½ modelo TR200 ideal para materia orgánica, que convierte las conchas de piña en un material finamente triturado, con una potencia de 1,5 cv y voltaje 110-220 V.



**Figura 4.10 Molino**

(Fuente: <http://www.torotrac.com/category/583444>)

- **Filtro prensa:** genera un líquido de salida clarificado sin sólidos de suspensión. Marca: eimco shriver filter press modelo: m24fb, 19 placas de polipropileno. (63 x 63 cm.), 2 placas de polipropileno, una para cada cabezal. (63 x 63 cm.), mecanismo de cierre hidráulico, pistón de doble efecto accionado por aire, requerimiento de aire: 100 psig. presión de cierre hidráulico 4600 psig.



**Figura 4.11 Filtro prensa**

(Fuente: <http://www.aguamarket.net>)

- **Fermentador:** son tanques cilíndricos construidos de acero inoxidable de 10000 galones de capacidad, con doble camisa para sistema de control indirecto de la temperatura mediante agua y sistema de agitación.



**Figura 4.12 Fermentador**

(Fuente: <http://www.portaldelaindustria.com>)



- **Torres de destilación:** es un conjunto conformado por dos torres, la primera cuenta con una columna de relleno con anillos raschig y perlas de vidrio pírex de 0,08 cm de altura y diámetro de 0,02m de donde sale una corriente de etanol de aproximadamente un 50% de pureza la cual entra como vapor saturado a la segunda torre, la cual cuenta con una columna con el mismo relleno pero de 9,66 m de altura y 0,02 m de diámetro de donde sale una corriente con una pureza aproximada de 84% en etanol.

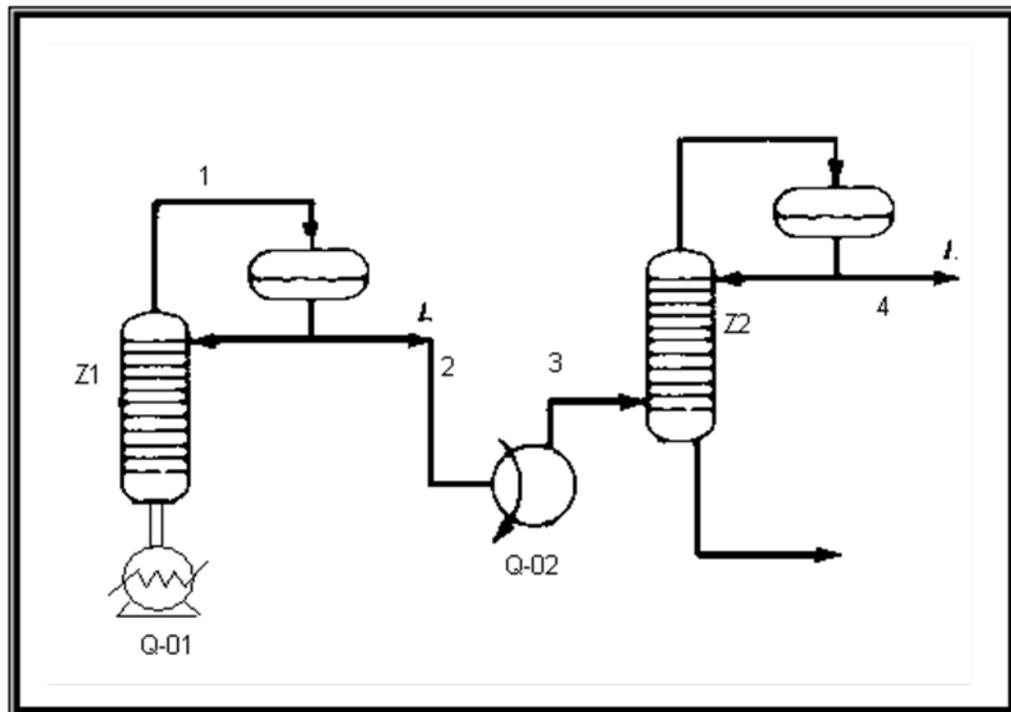


Figura 4.13 Diagrama de Proceso estimado para una mayor purificación del etanol

(Fuente: Hemley & Seader, 2000)

Donde:

T-1: Torre de Rectificación 1

T-2: Torre de Rectificación 2

Q-01: Manta de calentamiento

Z1: Altura de 80cm de relleno de anillos raschig



Z2: Altura de 849,024cm de relleno de anillos raschig

Corriente 1: Vapor saturado con una  $X=0,52$  en etanol

Corriente 2: Líquido saturado con una composición  $X=0,52$  en etanol

Q-02: Manta de calentamiento

Corriente 3: Vapor saturado a la torre de rectificación 2 con una composición  $X=0,52$  en etanol

Corriente 4: Líquido saturado con una composición  $X=0,84$  en etanol

- **Tamiz molecular.** son tanques cilíndricos de acero inoxidable que emplean lechos de zeolita tipo 3A, las cuales son perlas irregulares de color marrón claro, Insoluble en agua con un diámetro de poro igual a 3 Angstroms. Tamaño de partícula: 1,45 – 2,00 mm con densidad aparente de 641 g/l y capacidad de adsorción de  $H_2O$  de 20%.

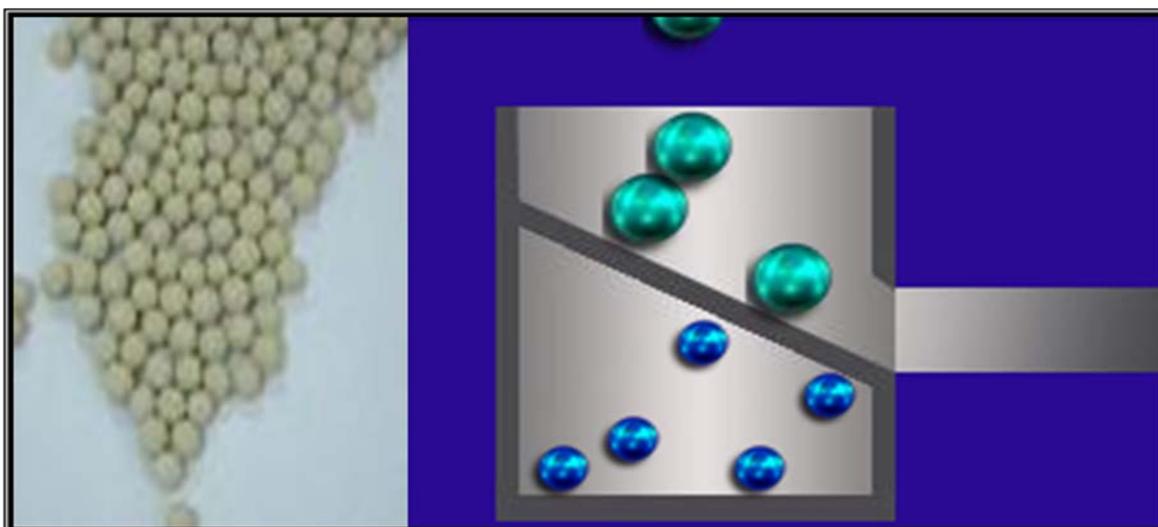


Figura 4.14. Zeolita 3A. Tamiz molecular (Fuente: propia)

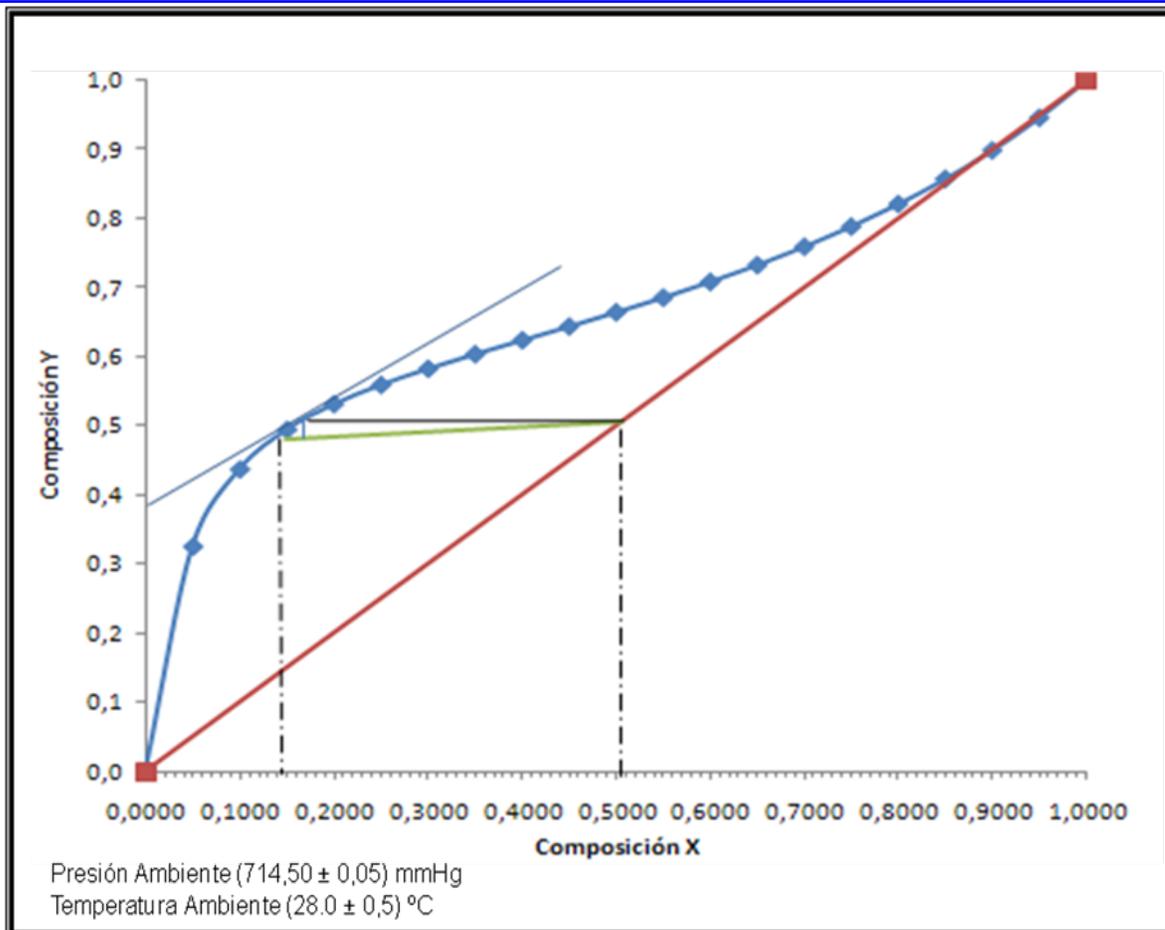
#### 4.6.2.3.a Diseño de la torre de destilación a emplear en la propuesta para la purificación del bioetanol

Como ya se señaló anteriormente, una vez realizado el proceso de purificación



---

de la mezcla etanol – agua solo se pudo obtener a escala de laboratorio una composición de 0,5 de etanol; lo que significa que la torre disponible para dicho proceso no era lo suficientemente alta ni posee un área de contacto ideal para obtener una mayor pureza, por este motivo se debe realizar una estimación de los equipos necesarios para obtener etanol más libre de humedad; hasta aproximadamente un 84% de pureza ya que luego dicha solución es tratada en un tamiz molecular para disminuir el agua contenida en la misma; esto como consecuencia de que la principal característica del etanol como biocarburante es que éste debe estar lo más libre de agua posible ya que puede afectar el proceso de combustión durante su uso como mezcla con gasolina. Cabe destacar que la torre usada para esta investigación usa relleno de anillos raschig de vidrio por lo que se realiza un análisis gráfico para determinar el número de etapas equivalentes referidas a esa altura de lecho; tomando la consideración que la alimentación es de 350ml a una composición de entrada de  $X=0,15$  en etanol y de salida de  $X=0,5$  en etanol. A continuación se presenta este análisis gráficamente:



**Figura 4.15** Numero de etapas equivalentes a la altura de relleno de la torre disponible para el desarrollo de la investigación

En la grafica adjunta se observa que la altura de relleno de forma analítica representa una etapa equivalente, lo cual es algo esperado por los investigadores ya que la purificación obtenida no es muy alta; aparte del bajo rendimiento del equipo cuyas razones fueron explicadas con anterioridad. A su vez se determina los HETP, apéndice B, con las condiciones de operación de la torre del laboratorio con la finalidad de obtener a partir de este valor la altura de relleno equivalente a un plato teórico y luego realizar un escalamiento en cuanto a la cantidad de relleno a usar en el sistema a estimar para lograr la separación deseada ya que una de las consideraciones



realizadas es que dicho proceso adicional debe poseer las características similares a la torre de destilación disponible. Se calculó el número de unidades de transferencia, el valor obtenido fue 1,5076 adim, este valor representa la variación de la concentración del vapor dividida por la fuerza impulsora media del proceso. La altura equivalente de un plato teórico calculada fue de 60,39 cm, esto quiere decir, que cada 60,39 cm de relleno, producen el cambio de concentraciones, que produciría un plato teórico, según esto, entonces la altura del relleno a utilizar es de aproximadamente 9.66 m

**Tabla 4.16. Altura equivalente de un plato teórico y número de unidades de transferencia de masa en la columna de relleno del equipo de rectificación**

<b>Altura Equivalente de un Plato Teórico HETP cm</b>	<b>Número de Unidades de Transferencia de Masa NUT adim</b>
60,39	1,5076

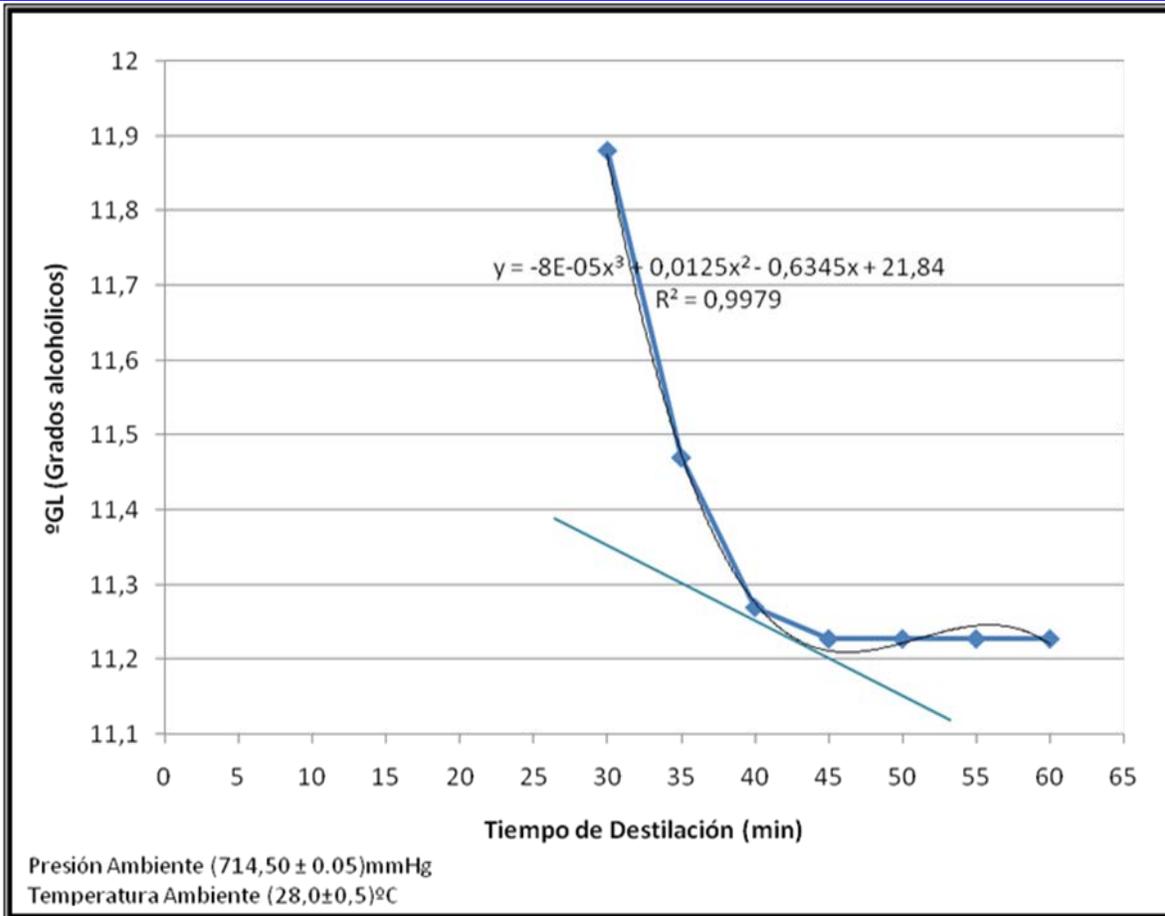
Presión ambiente: (714,50± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

La línea de operación es definida a partir del reflujo de operación tal cual como se expresa el cálculo en los apéndices; dicha magnitud representa una fracción de la corriente de salida por el tope de la torre producto de la destilación para enriquecer el destilado obtenido sin ningún coste adicional, obteniéndose un producto más puro, dicho reflujo posee ciertos comportamientos en cuanto a su magnitud; si al sistema se le adicionan grandes cantidades de energía las volatilidades jugaran el papel más importante en el proceso de destilación al igual que el tipo de mezcla que se quiera separar. En el caso de esta investigación se obtiene un  $R_{op} = 0,08$  esta relación surge del cociente entre los flujos molares de L y D obtenidos por el tope de la torre cuyo cálculo se encuentra en el apéndice B, el cual se intuye ser muy bajo para este tipo de separaciones pero al observar el comportamiento del sistema y tomando en cuenta la



figura 4.15 de la mezcla binaria etanol – agua; se nota que la fuerza impulsora para esta separación es alta justo antes de llegar a la composición del azeótropo y sobre todo en el rango de composiciones en la cual se logró obtener la separación en el laboratorio ya que mientras la curva de equilibrio se encuentre lo más lejano de la línea auxiliar de  $45^\circ$  más rápida será la separación en menor cantidad de etapas; esto se genera por la diferencia de volatilidades relativas lo cual ayuda a la separación de los mismo justo antes del azeótropo y el producto de la destilación posee una pureza aceptable para las condiciones dadas por el equipo. En cuanto a la definición de este reflujo fue determinante el uso de la curva de calibración del rotámetro realizada in situ y a su vez el comportamiento de la torre ya que con una altura en el rotámetro de 3,5 cm esta misma se estabilizaba y no permitía que las tuberías ubicadas en el tope por donde circula el destilado no se llenaran de aire y afectaran el flujo tanto de destilado como de retorno a la torre. Es de suma importancia determinar cuál es el tiempo máximo o el tiempo más eficiente durante el proceso de destilación; esto con la finalidad de obtener mayores porcentajes de pureza en el destilado y evitar gastos de energía innecesarios. Durante los experimentos realizados por los investigadores la composición en el producto final es de  $X=0,5$  en etanol; a continuación se realiza una estimación del tiempo real de destilación para obtener mayor pureza en el destilado; el cual se procede a determinar con los índices de refracción durante la destilación los  $^\circ\text{GL}$  y a partir de la variación de estos en función del tiempo se obtiene la curva mostrada a continuación:



**Figura 4.16 Estimación del mejor tiempo de destilación**

Al observar el comportamiento de la destilación durante el tiempo se puede evidenciar que a partir de un tiempo de 45 min los grados alcohólicos permanecen constantes a una composición de  $X=0,5$ ; por lo tanto, es determinante que justo antes de finalizar el proceso debió existir un tiempo donde el porcentaje de alcohol era el máximo para el proceso. Al trazar una línea tangente en el punto máximo de la curva se obtiene que para un tiempo aproximado de 43min de operación de la torre se obtiene una composición de alcohol de  $X=0,52$ ; por lo que a partir de este tiempo hasta los 60 min que duró la destilación a nivel experimental solo se produjo la volatilización del agua por lo que disminuyó la pureza del producto final. Una vez estimado el tiempo más



---

eficiente del proceso y el volumen recolectado para ese instante de operación se obtiene el flujo molar alimentado a la siguiente rectificadora.

El destilado final usando la torre disponible para la investigación no cumple con los requerimientos mínimos para ser mezclado con gasolina y así realizar la combinación de ambos combustibles, por lo tanto, se procede a realizar una estimación en cuanto al montaje necesario para lograr obtener dichas condiciones del etanol para ser utilizado como mezcla.

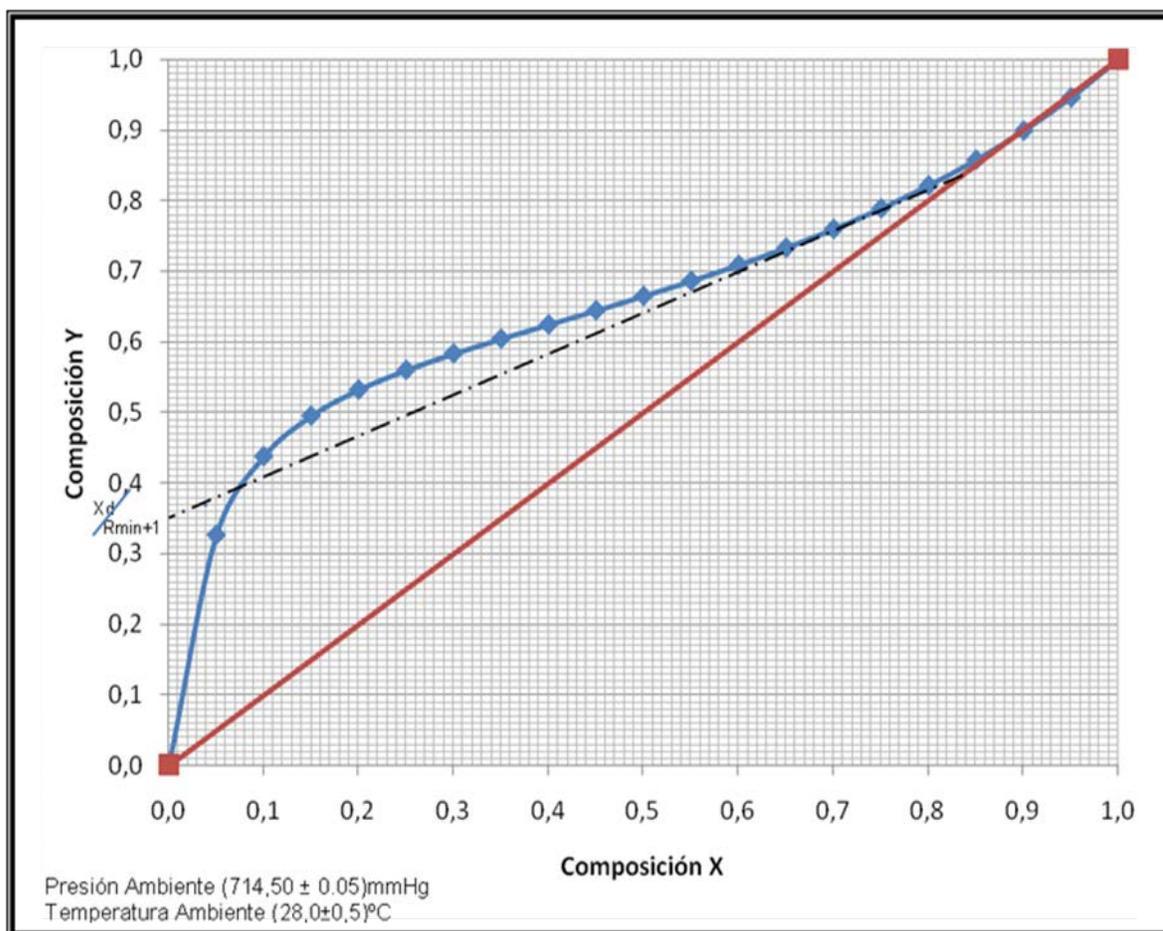
Una breve descripción del sistema mostrado en la figura 4.16 refleja que la corriente 2 de salida del condensador de la torre 1 (T-1) pasa a través de una manta de calentamiento ya que la torre 2 (T-2) es también de rectificación por lo que es preciso alimentar con la solución en fase de vapor saturado, es importante acotar que esta corriente de alimentación a la torre 2 (T-2) es la obtenida para un tiempo máximo de operación de 43min con una composición de  $X=0,52$  y un flujo de  $0,043 \text{ gmol/min}$  estimado anteriormente lo que ofrece más pureza en la alimentación y menor consumo de energía en durante el proceso anterior.

La segunda torre (T-2) opera de forma continua; sus parámetros de operación fueron estimados ya que esta misma no está disponible para realizar la separación deseada, se utilizaron criterios lógicos como por ejemplo; durante la operación de la torre 1 (T-1) los investigadores observaron que al cargar el equipo con un volumen de solución de 350ml la torre no sufrió ninguna inundación y si se alimenta a la segunda torre en forma continua un flujo estimado de  $0,043 \text{ gmol/min}$ , esta cantidad es solo una fracción de líquido proveniente de la torre anterior lo que se estima que si esta misma posee el mismo diámetro de la torre 1 (T-1) es muy poco probable una inundación; para determinar la altura requerida en relleno de la segunda torre se procede a calcular el número de etapas necesarias para lograr la separación deseada. A continuación se presenta la obtención del reflujo mínimo el cual es de 1,4 obtenido a través de la

---



siguiente grafica.



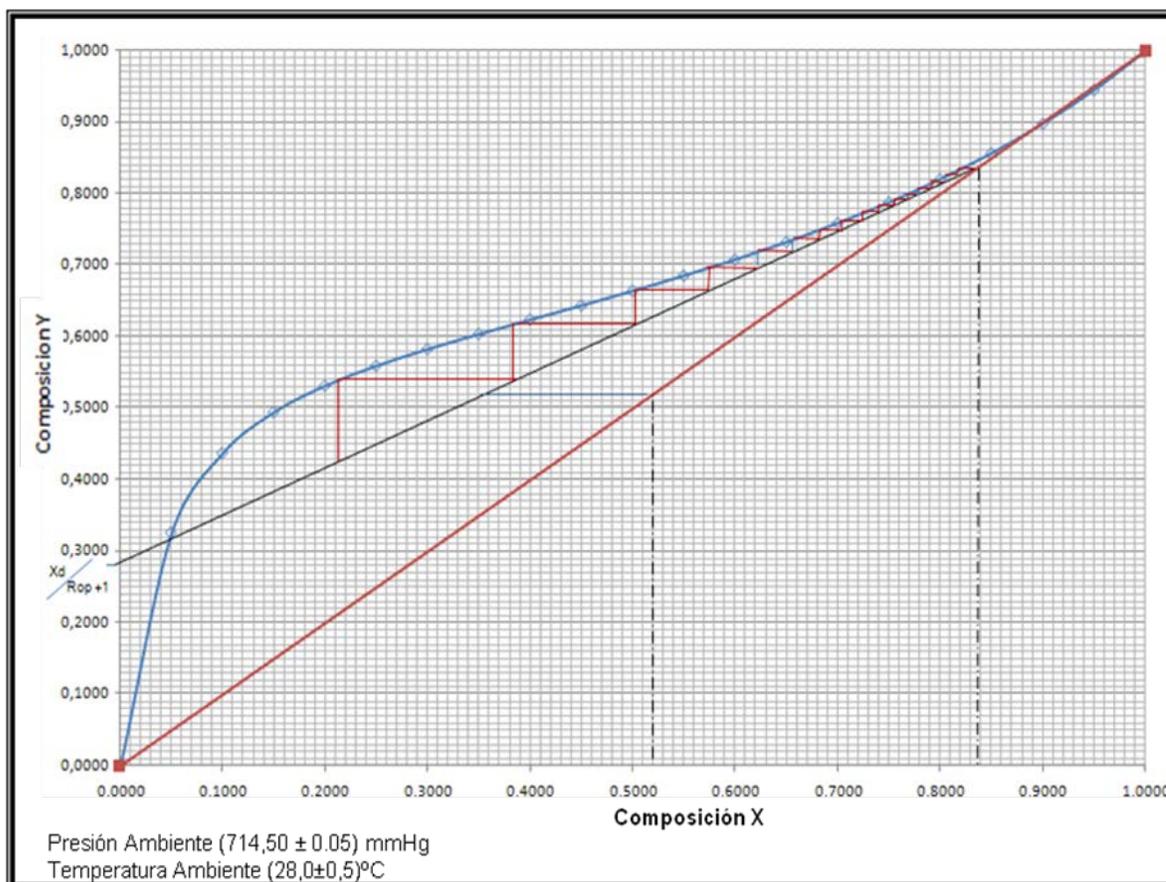
**Figura 4.17. Obtención del Reflujo mínimo para la torre 2 (T-2)**

Una vez obtenido el reflujo mínimo se determina el reflujo de operación el cual tiene un valor de 1,96; una vez definido el  $R_{op}$  se procede a determinar la línea de operación y a su vez el número de etapas necesarias para lograr la separación deseada; estas mismas van en un rango de composiciones de  $X=0,52$  a  $X=0,84$ ; cabe destacar que todos estos cálculos están referidos en el apéndice B.

A continuación se trazan los platos de la torre y se determina el numero de



etapas teóricas necesarias para lograr la separación deseada el cual resulta ser 16 etapas.



**Figura 4.18** Número de Etapas necesarias estimadas para lograr la separación deseada

Una vez estimado el número de etapas para realizar la purificación deseada del etanol este mismo sale a una composición aproximada de  $X = 0,84$  en etanol, como última etapa del proceso de eliminación de humedad de dicha corriente de producto la misma es sometida a un contacto físico con un tamiz molecular el cual está constituido por tierras filtrante a base de zeolita con un tamaño de poro o micra definido para retener las moléculas restantes de la corriente 4 del diagrama de proceso antes



---

mencionado.

#### **4.6.2.4 Evaluación económica de la propuesta realizada para la obtención de etanol a partir de desechos orgánicos**

Conocer los costos e ingresos de una inversión que ocurrirá en un futuro, es uno de los problemas más difíciles que enfrenta un profesional en el desarrollo de un proyecto, en donde, el ingeniero debe tener conocimientos suficientes para poder estimar los costos y determinar si estas condiciones económicas hacen realizable el proyecto, en el cual se invierta una cierta cantidad de dinero para montar una planta y fabricar un determinado producto.

En esta sección se presenta el perfil de entradas y salidas de dinero de la empresa durante el período de análisis económico que fue establecido para 10 años (2008-2018) con el objeto de estudiar y contemplar la variabilidad económica de la actividad productiva y tener concepción de los movimientos monetarios; el mismo viene representado por un balance de flujos (flujo de caja) el cual está representado a continuación:

##### **4.6.2.4.a Estimación de los flujos de ingresos y egresos.**

###### **Flujo de caja**

Es un balance económico que mide diferencias entre entradas y salidas de dinero para determinada actividad productiva, durante un periodo de análisis especificado. La interpretación de los resultados obtenidos sugiere o no la viabilidad del proceso.



---

## Componentes del flujo de caja

- **Horizonte económico:** es el período de tiempo durante el cual se lleva a cabo el balance económico. Para procesos industriales, se considera periodo típico de 10 años con divisiones anuales, como se ha seleccionado en nuestro caso.
- **Ingresos:** Representa toda entrada de dinero que origine actividad productiva en cada una de las divisiones del horizonte económico. Para procesos industriales, se consideran ingresos típicos \$-año.
- **Egresos:** Representan las salidas de dinero originadas por la adecuación de infraestructura, de manufactura, operación de procesos productivos y/o cualquier gasto relacionado.

### 4.6.2.4.b Estructura del flujo de caja.

Se manejan secciones diferentes para ingresos y egresos. El balance económico se plantea para cada división de tiempo.

El flujo de caja obtenido para el proceso de obtención de etanol a partir de los desechos de la piña se presenta en la tabla 4.14.

Es importante señalar que los flujos calculados para cada año recogen el total de ingresos y egresos estimados y en cada caso se observan positivos gracias a que la actividad productiva a desarrollar genera mayor cantidad de ingresos totales que los egresos producidos, excepto del "AÑO 0" donde se realizará la inversión inicial y no se tendrán ingresos por ventas o servicios para este año, por ello se aprecia negativo.



**Tabla 4.17. Flujo de caja del proceso (\$)**

<b>Año</b>	<b>Ingresos</b>	<b>Egresos</b>	<b>Flujo de caja</b>
<b>0</b>	0	1880235,54	-1880235,54
<b>1</b>	828624,67	506767,63	321857,05
<b>2</b>	986565,96	594202,51	392363,46
<b>3</b>	1158462,02	696261,44	462200,57
<b>4</b>	1345325,40	815399,35	529926,06
<b>5</b>	1548235,70	954495,90	593739,80
<b>6</b>	1768343,65	1116916,27	651427,38
<b>7</b>	2006875,66	1306597,70	700277,96
<b>8</b>	2265138,46	1528143,29	736995,18
<b>9</b>	2544524,19	1787017,11	757507,08
<b>10</b>	2846515,64	2089308,47	757207,17

Las premisas consideradas para el cálculo de los ingresos y egresos que integran cada flujo se expondrán en las secciones correspondientes, Por otro lado es de acotarse que la correspondencia del estudio es el año 0 corresponde al 2008, y el año 10 corresponde al 2018.

### **Estimación de ingresos**

Entre los ingresos tenemos las ventas generadas del producto para cada año correspondiente al horizonte económico. Es importante señalar que la demanda de etanol en Venezuela para producir gasolina E10 está determinada por la producción nacional de gasolina, es decir, la demanda de etanol corresponde al 10% de la producción total de gasolina en el país.

Para determinar las ventas en los 10 años de estudio, se empleó el precio promedio (el cual permaneció constante para cada año) y las toneladas métricas



correspondientes al 5% de la demanda nacional de etanol, el cual permaneció constante hasta el 2018.

**Tabla 4.18. Ingresos**

Año		Ingresos (ventas)		
		TM	\$/TM	M\$
0	2008	0	0,753	0
1	2009	82365	0,853	828624,67
2	2010	86566	0,953	986565,96
3	2011	90981	1,053	1158462,02
4	2012	95621	1,153	1345325,40
5	2013	100497	1,253	1548235,70
6	2014	105623	1,353	1768343,65
7	2015	111009	1,453	2006875,66
8	2016	116671	1,553	2265138,46
9	2017	122621	1,653	2544524,19
10	2018	128875	1,753	2846515,64

**Nota:** Para el año 2008 los ingresos equivalen a 0 Bs. ya que es el año de inicio, por lo tanto aun no existe la producción del Etanol.

### Estimación de egresos

Son todas las salidas de dinero relacionadas con evolución de actividad productiva. Se caracterizan por:

- Razón del egreso:
  - ✓ Adecuación de infraestructura
  - ✓ Operación productiva



---

✓ Pago de tributos al gobierno

- Presentación correspondiente con divisiones de horizonte económico.

### Clasificación de los egresos:

1. **Inversión:** dinero requerido para financiar construcción, puesta en operación y estabilización de cualquier actividad productiva. Puede ser única o fraccionada dentro del horizonte económico. Generalmente representa mayor desembolso puntual dentro de egresos.
2. **Costos de producción:** dinero requerido para llevar a cabo procesos de manufactura y/o procesos de distribución en mercados de producto (s) resultantes de la actividad.
3. **Impuestos sobre la renta:** imposición monetaria que realiza el gobierno sobre cualquier actividad productiva

### CAPITAL FIJO:

Dinero necesario para acondicionamiento de la actividad productiva, desde la conceptualización de las ideas hasta los gastos de arranque y puesta en marcha de sistemas. Incluye tanto a elementos tangibles (equipos, terrenos, etc.) como intangibles (estudios, entrenamiento, etc.).

Se determinó que la producción diaria de etanol sería de 1840 barr/día lo que equivale a 261,22 Ton/día de Etanol. Este valor corresponde a la demanda insatisfecha para el año 2012 ya que una sola planta no puede producir el total de la demanda para el 2018.

- a) **Costos de tubería:** Adquisición y montaje de tuberías de procesos. Si se requiere aislante, considerar 15%-25% de incremento en estimación.
- b) **Costo de estudio y proyectos:** Para la estimación de estudios y proyectos se



---

utiliza un 35 % del costo de los equipos.

- c) **Costo de supervisión y entrenamiento:** Para esta estimación se utiliza un rango comprendido entre (2-7) % del costo de los equipos.
- d) **Costo de Arranque pruebas y contingencia:** Previsión por problemas potenciales durante inicio de operaciones productivas.

### **CAPITAL DE TRABAJO:**

Cantidad de dinero que en teoría en cualquier momento se puede recuperar totalmente. Este se puede estimar calculando los costos que se presentan a continuación:

- a) **Costo de inventario de materia prima:** Reserva de dinero para asegurar adquisición de insumos para producción. Valoración al costo de adquisición en planta (tiempo tradicional: 1 mes).
- b) **Costo inventario de producto:** Reserva de dinero para asegurar disponibilidad de producto terminado para atender ventas. Valoración al costo de manufactura, o en su defecto, precio de venta. (tiempo tradicional: 2 meses).
- c) **Costo de inventario de repuestos:** Disponibilidad de piezas o elementos que aseguren continuidad de proceso productivo, vital capacidad de proveedores para responder de forma ágil y precisa.
- d) **Costo por salarios:** Reserva de dinero para gastos de personal.
- e) **Efectivo en caja:** Reserva de dinero para imprevistos.

### **COSTOS DE PRODUCCIÓN:**

Entre los componentes para calcular los costos de producción se tienen:

- a) **Materias primas:** Elementos que conforman producto final. Costo variable. La
-



materia prima utilizada en el proceso son desechos de piña.

- b) **Aditivos y catalizadores:** Elementos introducidos en línea directa de transformación, ayudan a conformar el producto final, pero no forman parte del mismo. Costo variable. El aditivo aplicado al proceso es levadura.
- c) **Operadores de planta:** Beneficio salarial de operadores que laboren directamente en línea de producción. Se debe incluir salarios, bono vacacional, utilidades, prestaciones sociales, etc. Costo fijo
- d) **Supervisor de turno:** Gasto directamente proporcional a complejidad operativa. Costo fijo.
- e) **Materiales mantenimiento:** Gasto por mantenimiento preventivo y correctivo. Incluye materiales y mano de obra. Costo fijo.
- f) **Laboratorio:** Gasto por análisis de muestras para control rutinario de operaciones y/o calidad de producción. Costo fijo.

## COSTOS INDIRECTOS

Costos relacionados indirectamente con línea de producción. Independientes al tamaño de producción (costos fijos).

- a) **Seguros:** Protección de activos, normalmente tarifado (dependiendo de la naturaleza del proyecto).
- b) **Seguridad y protección, servicios médicos, mantenimiento general y gastos otros:** Restante de gastos involucrados en proceso de producción. Costo fijo

## ESTIMACIÓN DE GASTOS GENERALES

Los costos involucrados en actividades periféricas (no medulares de producción),



---

necesarios para supervivencia de actividad productiva se consideran gastos generales.

**Gastos de ventas:** Costos incurridos al comercializar productos. Monto del costo mantiene relación inversa con antigüedad del producto en el mercado. Costo fijo.

## ESTIMACIÓN DEL IMPUESTO SOBRE LA RENTA

Tributos cancelados a entes gubernamentales por ejecutar actividad productiva y lograr enriquecimiento. Uso de unidades tributarias.

El enriquecimiento resultó ser mayor a las 3000 UT por lo que se tomó una tasa de 34 % y un sustraendo igual a 500, como se encuentra referido en la tabla inferior. Se supuso que el dólar tiene un precio de 2,15 BsF y el costo de una unidad tributaria es 46 BsF. (Gaceta oficial N° 38855, Servicio Nacional Integrado de Administración Aduanera y Tributaria (Seniat), (29-09-2008). Los ingresos, costos de producción, el enriquecimiento, el I.S.L.R, flujos monetarios etc., se pueden observar en el anexo a continuación.



Tabla 4.19 Costos fijos

Descripción		Costos (\$)
<b>Equipos principales</b>	Fermentador	360000
	Molino	1488
	Filtro prensa	5500
	Torre de destilación	35000
	Tamiz molecular	1669
Acondicionamiento del terreno		50457,21
Edificaciones		189719,11
Instrumentación y control		52475,50
Servicios industriales		2220914,72
Tuberías		100914,42
Equipos eléctricos		40365,77
Estudio y proyecto		141280,19
Supervisión y entrenamiento		8073,15
Arranque, Pruebas y contingencias		96716,38
<b>Capital fijo (\$)</b>		<b>1305671,11</b>

Tabla 4.20 Capital del trabajo

Descripción	Costo \$
Inventario de materia prima	458120,93
Inventario de producto	248633,12
Inventario de repuestos	40365,77
Salarios	1488,37
Efectivo en caja	49726,23
<b>Capital trabajo (\$)</b>	<b>574564,42</b>

**Tabla 4.21. Capital de producción**

<b>Costos directos</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Costo \$</b>
Materias primas	15270,70
Aditivos	0,0005
Servicios industriales	7,10
Operadores de planta	141492,39
Supervisor de turno	14149,24
Materiales y mantenimiento	65283,56
Laboratorio	15564,16
<b>Costos indirectos</b>	
<i>Seguros</i>	13056,71
<i>Seguridad, protección, etc.</i>	322641,78

**Tabla 4.22 Gastos generales**

<b>Descripción</b>	<b>Costo \$</b>
Administración	56596,95
Manufactura	437570,90
Ventas	9883,36









---

#### 4.6.2.4.c Determinación de la factibilidad y rentabilidad del proceso

Existen varios métodos para expresar numéricamente el rendimiento financiero de un producto. En algunos casos, uno solo de ellos es suficiente, pero en otros casos será necesario más de una de estas expresiones para concluir sobre los estudios de evaluación de un proyecto.

#### Valor Presente Neto (VPN)

Representa la sumatoria de los flujos de cajas, en sus valores equivalentes al primer segmento del Horizonte Económico.

$$VPN = \sum_{x=1}^n \frac{Fx}{(1+I)^{x-1}}$$

De la siguiente expresión matemática podemos concluir que:

VPN < 0 → actividad productiva no recomendada.

VPN = 0 → actividad productiva no atractiva.

VPN > 0 → actividad productiva atractiva.

Sustituyendo los valores del flujo de caja obtenidos para el horizonte económico que fueron calculados anteriormente obtenemos un valor del **VPN** de:

$$VPN = 562745,22 \$$$

Lo que nos indica que estamos en presencia de una actividad productiva atractiva.



---

## Tasa Interna de Retorno (TIR)

Representa la tasa porcentual a la cual la actividad productiva no es atractiva (VPN=0) y se calcula de la siguiente manera:

$$\sum_{x=1}^n \frac{Fx}{(1 + TIR)^{x-1}} = 0$$

De la siguiente expresión matemática podemos concluir que:

$TIR < I \longrightarrow$  actividad productiva no recomendada.

$TIR \geq I \longrightarrow$  actividad productiva atractiva.

Si la TIR es menor que la tasa de interés, el proyecto debe rechazarse.

Es importante señalar que la tasa de interés empleada fue del 17%.

Sustituyendo los valores del flujo de caja que fueron calculados anteriormente obtenemos un valor del **TIR** de:

$$TIR = 22,027 \%$$

Lo que nos indica que estamos en presencia de una actividad productiva atractiva.

Los flujos de caja ayudaron a estudiar la viabilidad del proyecto de inversión, ya que fueron estos mismos flujos de fondo la base del cálculo de los indicadores económicos usados como lo son el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

En consiguiente, el balance económico o flujo de caja aplicado a nuestro

---



---

horizonte económico o período de tiempo durante el cual se llevó a cabo el proceso, resultó positivo desde el segundo año de inversión y resultó negativo en el primer año, sabiendo que este balance mide las diferencias de entradas y salidas respectivamente y en nuestro año cero (inversión inicial) no existió ganancia alguna.

En cuanto a los egresos, se puede concluir que van disminuyendo con el paso de los años, lo cual representa una condición favorable para la inversión del proceso, garantizando así un balance siempre positivo y una factibilidad efectiva.

Vale la pena destacar que para realizar los cálculos se supuso que el gobierno facilitó un préstamo equivalente a la inversión inicial con una tasa fija del 8 % sin límite de tiempo, con la cual se podría sustentar el proceso de producción propuesto, financiando el costo de los equipos y las demás inversiones requeridas.

En cuanto a la factibilidad del proyecto y tomando en cuenta los valores arrojados por los indicadores económicos, se puede concluir que es factible la realización del mismo, ya que ambos valores indicativos resultaron con un valor mayor que 1, dato justo y necesario para tomar alguna decisión al respecto.

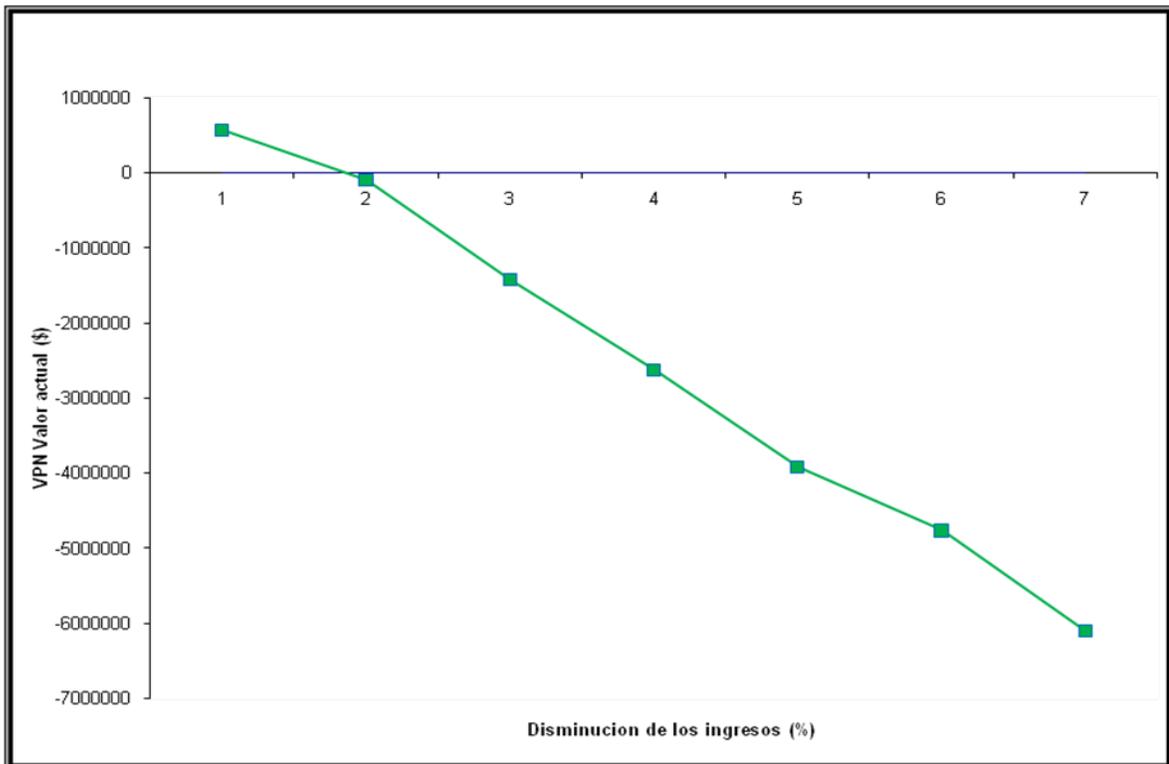
Al estudiar la sensibilidad del proyecto, como se evidencia en las tablas y graficas anexas, se observa que se debería disminuir los ingresos en más de un 10% para que el VPN sea cero y por ende el proyecto deje de ser rentable.

En conclusión se puede decir que el proyecto resulta altamente sensible ante un ligero cambio de los ingresos, es decir, a una disminución mínima del valor de los ingresos calculados.



**Tabla 4.25 sensibilidad ante la disminución progresiva de los ingresos**

% disminución de ingresos	VPN
0	562745,22
10	-96815,37
30	-1433429,10
40	-2637733,36
70	-3933380,73
80	-4774963,44
100	-6111577,17



**Figura 4.19 Estudio de la sensibilidad del proyecto en función de la disminución de los ingresos**



#### 4.6.2.5 Evaluación de rentabilidad respecto a las tecnologías extranjeras

Para determinar si el conjunto de las tecnologías de obtención y purificación de etanol propuestas en esta investigación son rentables frente a las tecnologías ya existentes, se comparan los costos de producción obtenidos anteriormente con lo que le cuesta a países como Brasil y Estados Unidos producir bioetanol.

**Tabla 4.26 Costos de producción de Etanol (\$/L)**

	<b>Brasil (caña de azúcar)</b>	<b>Estados Unidos (maíz)</b>	<b>Europa (trigo)</b>	<b>Venezuela (desechos de piña)</b>
<b>Materia prima</b>	0,18	0,25	0,34	0,07
<b>Conversión</b>	0,05	0,13	0,18	1,65
<b>Costo de producción</b>	0,23	0,39	0,52	1,72

La tabla 4.25 muestra que a Brasil le cuesta 0,23 \$/L producir etanol, ubicándolo como el productor más económico a nivel internacional y resulta claro que la tecnología propuesta por los autores en esta investigación representa una disminución en cuanto al costo de la materia prima por ser esta un desecho, pero el proceso de producción como tal presenta un incremento representativo ante las tecnologías extranjeras y por tanto no representa una ventaja frente a los competidores internacionales.

Cabe destacar que el costo señalado para materia prima en el caso de Brasil, Estados Unidos y Europa representan el costo de los cultivos, recolección y transporte de dicha materia prima para producir un litro de etanol, es decir, que en estos países se emplean cultivos que deberían ser destinados a la alimentación para producir biocombustibles. Caso contrario a la propuesta realizadas por los autores en la presente investigación para Venezuela que emplea desechos alimenticios y por ende el



---

precio señalado para materia prima incluye solo gastos de transporte.

Para determinar si la tecnología propuesta es rentable o no, no solo se debe comparar el costo de producción generado sino el beneficio que genera dicha producción, por ende comparando con Brasil que recibe 0,27 \$/L por concepto de exportación de Etanol a Venezuela, a la planta piloto propuesta en esta investigación se le generaría un beneficio de 2,83 \$/L, lo que quiere decir que se obtiene mayor ganancia con el proceso propuesto.

Por todo lo anteriormente mencionado se puede concluir que el proceso propuesto **es rentable económicamente**, porque a pesar de ser más costoso el proceso de producción, se recupera la inversión para producir 1L de Etanol y además se genera una ganancia de 1,11 \$/L por encima de dicha inversión.

## 4.7 Evaluación ambiental del proceso de obtención de etanol a partir de desechos orgánicos

### 4.7.1 Determinación de impactos ambientales

El termino impacto indica la alteración que la ejecución de un proyecto introduce en el medio. Las descripciones del impacto ambiental son necesarias para predecir los efectos de proyectos específicos sobre áreas definidas y a menudo pequeñas. La interpretación en términos de salud y bienestar humano es lo que define el impacto ambiental. Por lo tanto el concepto de impacto ambiental implica tres procesos consecutivos:

- Modificación de las características del medio.
- Modificación de sus valores o méritos de conservación.
- Significado de dichas modificaciones para la salud y bienestar humano.



Los impactos ambientales que pueden ser ocasionados por el proceso propuesto al medio se enlistan a continuación:

- ✓ Emisión de gases carbónicos.
- ✓ Incremento de nutrientes y sólidos suspendidos en el agua.
- ✓ Generación de empleo.
- ✓ Incrementación de niveles de ruido
- ✓ Afectación a la salud.
- ✓ Vertido de desechos sólidos.
- ✓ Contaminación del aire por olores.
- ✓ Garantiza la seguridad alimentaria.

Fase:

- O = Operación

Etapas del proceso son:

- Molienda
- Fermentación
- Destilación
- Mezclado con gasolina

Los medios seleccionados a estudiar son:

- Medio Físico: agua, aire, suelo.
- Medio Biológico: flora y fauna.
- Medio sociocultural: salud y economía.

Una vez identificados los impactos se procede a determinar el nivel de gravedad o relevancia de los efectos de los mismos, tanto en el área de afectación directa como indirecta, para realizar la evaluación de impacto ambiental



---

correspondiente.

#### **4.7.2 Evaluación de impactos ambientales**

Los impactos generados varían en función a la sensibilidad o fragilidad de la variable ambiental, por lo que un impacto puede ser positivo o negativo, directo o indirecto, reversible o irreversible. En el caso de la presente investigación se estudia solo el impacto ambiental que se produce en la fase de operación del proceso como tal, no se involucra la parte de construcción e instalación de equipos.

Tal como se expuso en el marco metodológico, la evaluación de impactos se ve reflejada en los siguientes formatos:



CÓDIGO F-01	Denominación: Emisión de gas carbónico.	FASE O
<b>Acción desencadenante:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>— Producto de la reacción de fermentación.</li><li>— Producto de los gases de combustión.</li></ul>		
<b>Componente afectado:</b> Medio Físico Natural		
<b>Sitio(s) afectado(s):</b> Instalaciones de la planta y alrededores.		
<b>Efectos asociados:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>— Contaminación del aire.</li><li>— Calentamiento de la atmosfera.</li></ul>		
<b>Indicador de impacto:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>— Concentraciones de dióxido de carbono en el aire.</li></ul>		
<b>Descripción:</b> Por la naturaleza del proceso de fermentación, en la reacción de conversión del azúcar en etanol se produce CO <sub>2</sub> . Por otro lado, para la operación de las maquinarias se requiere el uso de una caldera de la cual se emanan gases de combustión.		
<b>Probabilidad:</b> La probabilidad que tiene de ocurrencia es muy alta, por el hecho de ser un producto de reacción.		10
<b>Intensidad:</b> Su intensidad es alta debido a que el efecto permanecerá por el tiempo que dure la operación de fermentado y causará grandes secuelas en la atmosfera.		8
<b>Duración:</b> La duración es muy larga porque estará presente siempre en la operación de la planta.		10
<b>Extensión:</b> Su extensión es mediana debido a que afecta la zona donde ocurre el proceso y a poblaciones aledañas.		2
<b>Reversibilidad:</b> Este efecto es irreversible, debido a que los efectos no pueden ser restituidos a sus condiciones originales en un tiempo prudencial.		10
<b>Valor de Impacto Ambiental (VIA) y Relevancia del Impacto</b>		<b>8</b>
<b>Impacto normado:</b> SI	<b>Norma que lo rige:</b> Decreto N° 638 Normas sobre calidad del aire y control de la contaminación atmosférica. Protocolo de Kioto.	
<b>Medida/Recomendación:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>— Recolectar el dióxido producido para emplearlo en otros procesos.</li></ul>		



CÓDIGO F-02	Denominación: Incremento de nutrientes y sólidos suspendidos en el agua	FASE O
<b>Acción desencadenante:</b> — Vertido de vinazas al agua		
<b>Componente afectado:</b> Medio Físico Natural		
<b>Sitio(s) afectado(s):</b> Zona costera donde desembocan desagües		
<b>Efectos asociados:</b> — Turbidez del cuerpo de agua. — Eutroficación de algas por exceso de nitrógeno y fosforo en el agua. — Muerte de especies acuáticas por inanición.		
<b>Indicador de impacto:</b> — Cantidad de sólidos suspendidos. — Grado de turbidez.		
<b>Descripción:</b> Al realizar la destilación del mosto fermentado se generan vinazas ricas en nutrientes y sólidos que al llegar por los desagües a las aguas producen la suspensión de partículas sólidas que traen como consecuencia el elevado crecimiento de las algas presentes por la presencia en exceso de nitrógeno y fosforo causando así Eutroficación de las aguas. Así como también la turbidez del agua que impide el paso de luz solar produciendo la interrupción del proceso fotosintético de los productores primarios y por consiguiente la muerte de los peces por inanición.		
<b>Probabilidad:</b> La probabilidad que tiene de ocurrencia es muy alta, por el hecho de ser un producto del proceso.		10
<b>Intensidad:</b> Su intensidad es alta debido a que el efecto permanecerá por el tiempo que dure la operación de producción de etanol y causará grandes secuelas en el equilibrio ecológico marino.		8
<b>Duración:</b> La duración es muy larga porque estará presente siempre en la operación de la planta.		10
<b>Extensión:</b> Su extensión es local debida que afecta a la zona de desagüe y sus adyacencias.		6
<b>Reversibilidad:</b> Este efecto es reversible a largo plazo, debido a que los efectos pueden ser restituidos tratando el área afectada.		8
<b>Valor de Impacto Ambiental (VIA) y Relevancia del Impacto</b>		<b>8,4</b>
<b>Impacto normado:</b> SI	<b>Norma que lo rige:</b> Ley de agua.	
<b>Medida/Recomendación:</b> — Emplear las vinazas para la producción de compost y así no verterlo en los desagües.		
CÓDIGO SC-01	Denominación: Generación de empleos	FASE O



CÓDIGO F-02	Denominación: Incremento de nutrientes y sólidos suspendidos en el agua	FASE O
<b>Acción desencadenante:</b> — Operadores de equipos y supervisores.		
<b>Componente afectado:</b> Medio Socio Cultural		
<b>Sitio(s) afectado(s):</b> Zona urbana donde está ubicada de la planta		
<b>Efectos asociados:</b> — Aumento de las necesidades de servicios. — Disminución del índice de desempleo.		
<b>Indicador de impacto:</b> — Número de plazas de trabajo — Número de solicitudes de empleo. — Índice de desempleo		
<b>Descripción:</b> Por la necesidad propia del proyecto, se requiere personal tanto para la operación del proceso, así como también la generación de empleos indirectos relacionados al transporte, comercio, renovación y ampliación de la prestación de servicios urbanos. Este impacto aunque temporal es de carácter positivo y afecta el Medio Sociocultural de la zona, específicamente las poblaciones aledañas asentadas en la cercanía de la obra.		
<b>Probabilidad:</b> La probabilidad que tiene de ocurrencia es muy alta, por ser imprescindible la creación de plazas de trabajo y contratación de personal.		10
<b>Intensidad:</b> Su intensidad es alta debido a las consecuencias económicas que pudieran generar de forma positiva a los pobladores.		8
<b>Duración:</b> La duración es corta debida a que la creación de plazas de trabajo ocurre en los primeros años de puesta en marcha del proceso.		2
<b>Extensión:</b> Su extensión es mediana debido a que afecta a la zona de construcción y a poblaciones aledañas.		5
<b>Reversibilidad:</b> Este efecto es reversible a mediano plazo porque una vez ocupadas las plazas de trabajo no se generaran nuevos empleos.		6
<b>Valor de Impacto Ambiental (VIA) y Relevancia del Impacto</b>		<b>6,2</b>
<b>Impacto normado:</b> SI	<b>Norma que lo rige:</b> Ley del trabajo Lopcymat	
<b>Medida/Recomendación:</b>		



<b>CÓDIGO</b> F-03	<b>Denominación:</b> Incremento de los niveles de ruido.	<b>FASE</b> O
<b>Acción desencadenante:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>— Traslado en camiones de la materia prima y el producto.</li><li>— Puesta en marcha y funcionamiento de la caldera y el molino.</li></ul>		
<b>Componente afectado:</b>  Medio Físico Natural		
<b>Sitio(s) afectado(s):</b>  Instalaciones de la planta y alrededores.		
<b>Efectos asociados:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>— Contaminación sónica.</li><li>— Efecto a la salud de los pobladores y trabajadores de la obra.</li></ul>		
<b>Indicador de impacto:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>— Decibeles por hora en la zona.</li></ul>		
<b>Descripción:</b> <p>Por la necesidad propia del proceso, se requiere el uso de maquinarias como la caldera y el molino y su funcionamiento produce un incremento en los decibeles. Además del uso de transportes de carga pesada para el traslado de materia prima, que por su funcionamiento y tránsito en las vías ocasionan un incremento en los decibeles. Esto traerá como consecuencia, un cambio brusco de las condiciones de vida de las poblaciones aledañas y posibles daños a la salud, como también a los trabajadores del proceso. Incluye también la pérdida o deterioro de los elementos socioculturales y socioeconómicos.</p>		
<b>Probabilidad:</b> <p>La probabilidad que tiene de ocurrencia es muy alta, debido al hecho de tener que usar maquinarias que producen elevados niveles de ruido.</p>		<b>10</b>
<b>Intensidad:</b> <p>Su intensidad es alta debido a que los niveles de ruido generados son elevados ya que varía según la distancia en que se encuentren los seres afectados.</p>		<b>7</b>
<b>Duración:</b> <p>La duración muy larga ya que existirán durante el tiempo de vida del proceso.</p>		<b>10</b>
<b>Extensión:</b> <p>Su extensión es mediana debida que afecta a la zona de ubicación del proceso y a las poblaciones aledañas.</p>		<b>5</b>
<b>Reversibilidad:</b> <p>Este efecto es reversible, debido a la capacidad del receptor de alcanzar una condición de equilibrio similar a la existencia previa a la intervención.</p>		<b>3</b>
<b>Valor de Impacto Ambiental (VIA) y Relevancia del Impacto</b>		<b>7</b>



CÓDIGO F-03	Denominación: Incremento de los niveles de ruido.	FASE O
<b>Impacto normado:</b> <b>SI</b>	<b>Norma que lo rige:</b> Decreto N°. 2.217 de fecha 23-04-92, por el cual se dictan las normas sobre el control de la contaminación generada por ruidos. Ley Orgánica de Prevención, Condición y Medio Ambiente de Trabajo. (LOPCYMAT).	
<b>Medida/Recomendación:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>— El uso de elementos de seguridad (tapa oídos), por parte de los trabajadores del proyecto y visitantes, en la zona de trabajo.</li><li>— Reducir la exposición directa y continua al ruido de los trabajadores, mediante la rotación de los operarios.</li><li>— Minimizar en fuente la generación de ruidos mediante la aplicación de técnicas de control.</li></ul>		



CÓDIGO SEC-02	Denominación: Afectación de la salud.	FASE O
<b>Acción desencadenante:</b> — Operación de equipos		
<b>Componente afectado:</b> Medio Sociocultural		
<b>Sitio(s) afectado(s):</b> Instalaciones de la planta		
<b>Efectos asociados:</b> — Enfermedades respiratorias e intoxicación producto de los vapores generados. — Posibilidad de ocurrencia de accidentes por paso de transeúntes dentro de las áreas de trabajo. — Enfermedades auditivas por el ruido generado por las diferentes maquinarias y transporte.		
<b>Indicador de impacto:</b> — Decibeles por hora en la zona. — Cantidad de casos reportados por enfermedades en la planta. — Número de accidentes ocurridos dentro del área de trabajo. — Daños al sistema nervioso central, otros órganos incluso daltonismo y ceguera		
<b>Descripción:</b> Por la naturaleza del proceso, en la destilación y deshidratación se pueden presentar riesgos a la salud como resultado de la generación de vapores de etanol con elevada pureza y del ruido producido por los equipos. Por otra parte existe el riesgo de la ocurrencia de accidentes de transeúntes en el área de trabajo.		
<b>Probabilidad:</b> La probabilidad que tiene de ocurrencia es muy alta, debido al hecho de tener que usar maquinaria que aumentan los niveles de ruido, además de los vapores que se pueden presentar.		10
<b>Intensidad:</b> Su intensidad es alta debido a que los niveles de ruido y vapores generados son considerables y varían según la distancia en que se encuentren los afectados.		8
<b>Duración:</b> La duración muy larga ya que existirán durante el tiempo de vida del proceso.		10
<b>Extensión:</b> Su extensión es mediana ya que afecta directamente a los trabajadores de la línea de operación y a la población aledaña		5
<b>Reversibilidad:</b> Este efecto es irreversible, debido a que los efectos no pueden ser restituidos a sus condiciones originales en un tiempo prudencial.		9
<b>Valor de Impacto Ambiental (VIA) y Relevancia del Impacto</b>		<b>8,4</b>
<b>Impacto normado:</b> SI	<b>Norma que lo rige:</b> Decreto N°. 2.217 de fecha 23-04-92, por el cual se dictan las normas sobre el control de la contaminación generada por ruidos. Ley Orgánica de Prevención, Condición y Medio Ambiente de Trabajo. (LOPCYMAT).	



CÓDIGO SEC-02	Denominación: Afectación de la salud.	FASE O
<b>Medida/Recomendación:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>— El uso de elementos de seguridad (tapa oídos y tapa bocas), por parte de los trabajadores y visitantes en la zona de trabajo.</li><li>— Reducir la exposición directa y continua al ruido de los trabajadores, mediante la rotación de los operarios.</li><li>— Minimizar en fuente la generación de ruidos mediante la aplicación de técnicas de control.</li><li>— Colocar cintas de seguridad para impedir el paso de transeúntes.</li></ul>		



CÓDIGO F-04	Denominación: — Vertido de desechos sólidos.	FASE O
<b>Acción desencadenante:</b> — Producción de desechos industriales y domésticos		
<b>Componente afectado:</b> Medio Físico Natural		
<b>Sitio(s) afectado(s):</b> Poblaciones aledañas.		
<b>Efectos asociados:</b> — Disminución de la fauna.		
<b>Indicador de impacto:</b> — Porcentaje de disminución de fauna		
<b>Descripción:</b> Durante la operación de molienda se generan una serie de desechos sólidos que de no ser administrados adecuadamente pueden causar la contaminación del suelo donde sea depositado. Unido a esto está el hecho de verter las vinazas de destilación en el suelo lo que podría generar la lixiviación del exceso de nitrógeno y fósforo al agua pudiendo ocasionar el fenómeno conocido como eutrofización.		
<b>Probabilidad:</b> La probabilidad que tiene es de muy alta ocurrencia, porque siempre se producirán estos desechos.		10
<b>Intensidad:</b> Su intensidad es alta debido a que se generara un volumen considerable de desechos.		8
<b>Duración:</b> La duración es larga porque este efecto perdurará mientras dure la planta en operación.		8
<b>Extensión:</b> Su extensión es local debida que afecta las zonas adyacentes al proceso.		6
<b>Reversibilidad:</b> Este efecto es reversible a largo plazo, debido a que los efectos pueden ser restituidos reforestando y tratando el área afectada.		8
<b>Valor de Impacto Ambiental (VIA) y Relevancia del Impacto</b>		<b>8</b>
<b>Impacto normado:</b> SI	<b>Norma que lo rige:</b> Ley penal de ambiente. Ley de residuos y desechos sólidos.	
<b>Medida/Recomendación:</b> — Plan de manejo de los residuos sólidos generados		
CÓDIGO F-05	Denominación: Contaminación del aire por olores	FASE O



CÓDIGO F-04	Denominación: — Vertido de desechos sólidos.	FASE O
<b>Acción desencadenante:</b> — Descomposición de materia orgánica en los sitios de acumulación de materia prima y desechos.		
<b>Componente afectado:</b> Medio Físico Natural		
<b>Sitio(s) afectado(s):</b> Almacén de materia prima y desechos sólidos.		
<b>Efectos asociados:</b> — Afectaciones a la salud de los habitantes y trabajadores de la planta. — Atracción de insectos.		
<b>Indicador de impacto:</b> — Número de enfermedades reportadas.		
<b>Descripción:</b> Debido a que la materia prima es un desecho orgánico si esta es acumulada por mucho tiempo se descompone y puede causar olores desagradables y atraer insectos que pueden afectar la salud de los trabajadores. La acumulación de los desechos de la molienda si pueden ocasionar el mismo efecto.		
<b>Probabilidad:</b> La probabilidad que tiene es de alta ocurrencia, porque puede suceder muy seguido la acumulación de materia prima y la acumulación de los desechos generados.	8	
<b>Intensidad:</b> Su intensidad es alta debido a que se trabaja con un volumen considerable de materia prima, y dicha cantidad es proporcional a los desechos generados.	8	
<b>Duración:</b> La duración es larga porque este efecto perdurará mientras dure la planta en operación.	8	
<b>Extensión:</b> Su extensión es puntual debido a que afecta las zonas adyacentes al proceso.	6	
<b>Reversibilidad:</b> Este efecto es reversible, debido a que los efectos pueden ser eliminados minimizando el tiempo de almacenaje de materia prima y desechos.	1	
<b>Valor de Impacto Ambiental (VIA) y Relevancia del Impacto</b>		<b>6,2</b>
<b>Impacto normado:</b> SI	<b>Norma que lo rige:</b> Ley de residuos y desechos sólidos. Decreto N° 638 Normas sobre calidad del aire y control de la contaminación atmosférica. Decreto N° 2.216 Normas para el Manejo de los Desechos Sólidos de origen domestico, comercial, industrial o de cualquier naturaleza que no sean peligrosos.	
<b>Medida/Recomendación:</b> — Se puede almacenar la materia prima en un ambiente refrigerado para tratar de minimizar la descomposición. — Destinar los desechos sólidos a la fabricación de compost o abono orgánico.		



<b>CÓDIGO</b> SC-03	<b>Denominación:</b> Garantiza la seguridad alimentaria	<b>FASE</b> O
<b>Acción desencadenante:</b> — Uso de desechos como materia prima		
<b>Componente afectado:</b> Medio Sociocultural		
<b>Sitio(s) afectado(s):</b> Empresas procesadoras de piña		
<b>Efectos asociados:</b> — No requiere el destino de cultivos para la obtención de biocombustibles. — Soluciona el problema de la generación de desechos.		
<b>Indicador de impacto:</b> — Toneladas de desechos empleados para la obtención de bioetanol.		
<b>Descripción:</b> Para la producción de bioetanol actualmente se emplea como materia prima maíz, caña de azúcar, remolacha y cereales entre otras lo cual implica el uso de cultivos que deberían estar destinados a la alimentación. Este proceso no requiere de ello porque procesa los restos de piña después que han sido procesadas para extraer lo necesario para alimentación.		
<b>Probabilidad:</b> La probabilidad que tiene es de muy alta ocurrencia, porque siempre se empleara esta materia prima.		10
<b>Intensidad:</b> Su intensidad es alta debido a que se trabaja con un volumen considerable de materia prima.		8
<b>Duración:</b> La duración es larga porque este efecto perdurará mientras dure la planta en operación.		8
<b>Extensión:</b> Su extensión es regional debido a que afecta a toda la región donde se encuentra ubicado del proceso.		10
<b>Reversibilidad:</b> Es irreversible porque siempre será una solución para los desechos de piña producidos en la región.		9
<b>Valor de Impacto Ambiental (VIA) y Relevancia del Impacto</b>		<b>9</b>
<b>Impacto normado:</b> NO	<b>Norma que lo rige:</b>	
<b>Medida/Recomendación:</b> —		



### 4.7.3 Medidas y recomendaciones ambientales

Las planillas de medidas ambientales para cada medio o ámbito de análisis quedarían como sigue:

Código de la medida: MD-01	
<b>Impactos a los que va dirigida</b>	— Incremento de nutrientes y sólidos suspendidos en el agua — Contaminación de los suelos — Destrucción de la vegetación marina
<b>Carácter</b>	Preventivo
<b>Naturaleza</b>	Alternativa
<b>Duración</b>	Permanente
<b>Etapas de aplicación</b>	Operación
<b>Entes responsables</b>	Operarios de producción
<b>Descripción de la medida</b> Emplear las vinazas producidas en el proceso de destilación y los desechos sólidos producto de la operación de molienda en la fabricación de compost o abono orgánico.	

Código de la medida: MD-02	
<b>Impactos a los que va dirigida</b>	— Contaminación del aire por gas carbónico
<b>Carácter</b>	Preventivo
<b>Naturaleza</b>	Principal
<b>Duración</b>	Permanente
<b>Etapas de aplicación</b>	Operación
<b>Entes responsables</b>	Operarios de producción
<b>Descripción de la medida</b> Recolectar el CO <sub>2</sub> producido en el proceso fermentativo para venderlo a las empresas que lo utilicen como materia prima o elaboren bebidas carbonatadas. También puede ser empleado en la misma planta para algún otro proceso.	



<b>Código de la medida: MD-03</b>	
<b>Impactos a los que va dirigida</b>	— Incremento de Ruido
<b>Carácter</b>	Preventivo
<b>Naturaleza</b>	Principal
<b>Duración</b>	Permanente
<b>Etapas de aplicación</b>	Operación
<b>Entes responsables</b>	Equipos
<b>Descripción de la medida</b> Promover el uso de equipos protectores del sistema auditivo para evitar daños al mismo y al sistema nervioso central así como estar en constante revisión de los equipo para corregir cualquier defecto que intensifique la generación de ruido.	

<b>Código de la medida: MD-04</b>	
<b>Impactos a los que va dirigida</b>	— Afectación de Salud
<b>Carácter</b>	Preventivo
<b>Naturaleza</b>	Principal
<b>Duración</b>	Permanente
<b>Etapas de aplicación</b>	Operación
<b>Entes responsables</b>	Equipos y mano de obra
<b>Descripción de la medida</b> Promover el uso de medidas de seguridad tanto en manejo de equipos así como también el uso de accesorios y herramientas que permitan mantener la salud física y mental en buen estado	

Para la mejor interpretación de lo expuesto en los formatos anexos se realizó una matriz de impactos que no es más que una herramienta que permite identificar de manera sistemática las características de los impactos que ocasión la producción de etanol a partir de desechos de piña en el medio.





Del estudio de impactos ambientales se puede concluir que el impacto más relevante según la evaluación realizada es la garantía de la seguridad alimentaria con un VIA igual a 9 y el cual es un impacto positivo, directo e irreversible. Seguida en orden de relevancia están el incremento de nutrientes y sólidos suspendidos en el agua y la afectación a la salud ambos impactos negativos, indirectos y reversibles con un VIA de 8,4; luego se encuentran el vertido de desechos sólidos y la emisión de gases carbónicos también negativos, indirecto el primero y directo el segundo pero reversibles los dos con un VIA de 8.

Los impactos menos relevantes están constituidos por el incremento de los niveles de ruido con un VIA de 7 y siendo un impacto negativo, indirecto y reversible. Por último se encuentran la contaminación del aire por olores y la generación de empleos ambos con un VIA igual a 6,2 con la salvedad que el primero es un impacto negativo, directo y reversible y el segundo es positivo, directo y reversible.

En base a lo mencionado anteriormente y teniendo en cuenta que el proceso cuenta con solo dos impactos positivos y 6 negativos de los cuales su mayoría pueden prevenirse y mitigarse tal como se observa en la matriz anexa se puede decir que el proyecto **es ambientalmente factible** de implementar.



Tabla 4.23. Préstamo

<b>AÑO</b>	<b>Capital (\$)</b>	<b>Tiempo de pago</b>	<b>Tasa de interés</b>	<b>Cuota (R)</b>	<b>Pago interés (Pi)</b>	<b>Pago del préstamo</b>	<b>Deuda capital</b>
1	940117,77	10	0.08	140105,27	75209,42	64895,85	875221,92
2	875221,92	10	0.08	140105,27	70017,75	70087,52	805134,40
3	805134,40	10	0.08	140105,27	64410,75	75694,52	729439,88
4	729439,88	10	0.08	140105,27	58355,19	81750,08	647689,80
5	647689,80	10	0.08	140105,27	51815,18	88290,09	559399,72
6	559399,72	10	0.08	140105,27	44751,98	95353,29	464046,43
7	464046,43	10	0.08	140105,27	37123,71	102981,56	361064,87
8	361064,87	10	0.08	140105,27	28885,19	111220,08	249844,79
9	249844,79	10	0.08	140105,27	19987,58	120117,69	129727,10
10	129727,10	10	0.08	140105,27	10378,17	129727,10	0



Tabla 4.24. Impuesto Sobre La Renta (I.S.L.R)

<b>Año</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>
<b>Ingresos</b>	788258,91	946200,20	1118096,25	1304959,64	1507869,93
<b>Costo de producción</b>	504051,21	589739,92	689995,71	807294,98	944535,12
<b>Intereses deuda %</b>	75209,42	70017,75	64410,75	58355,19	51815,18
<b>Valor U.T. (\$)</b>	21,40				
<b>Enriquecimiento</b>	9768,40	13388,07	16998,54	20532,94	23907,98
<b>Tasa</b>	0.34				
<b>Sustraendo</b>	500				
<b>I.S.L.R.</b>	2821,26	4051,95	5279,51	6481,20	7628,71



Tabla 4.24. Impuesto Sobre La Renta (I.S.L.R) (continuación)

<b>Año</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
<b>Ingresos</b>	1727977,89	1966509,89	2224772,70	2504158,43	2806149,88
<b>Costo de producción</b>	1105106,09	1292974,13	1512779,73	1769952,29	2070844,17
<b>Intereses deuda %</b>	44751,98	37123,71	28885,19	19987,58	10378,17
<b>Valor U.T. (\$)</b>	21,40				
<b>Enriquecimiento</b>	27020,82	29745,35	31927,86	33381,95	33882,48
<b>Tasa</b>	0.34				
<b>Sustraendo</b>	500				
<b>I.S.L.R.</b>	8687,08	9613,42	10355,47	10849,86	11020,04



Figura 4.20. Matriz cualitativa de impactos

Impacto Ambiental	Fuente	Probabilidad	Intensidad	Duración	Extensión	Reversibilidad	Etapas proceso
Emisiones de gas carbónico	Proceso de fermentación	Muy alta	Alta	Larga	Mediana	Irreversible	Fermentación
Incremento de nutrientes y sólidos suspendidos en el agua	Vertido de vinazas provenientes de la destilación	Muy alta	Alta	Muy larga	Local	Reversible	Destilación
Generación de empleos	Operadores de equipos y supervisores	Muy alta	Alta	Corta	Mediana	Reversible	Todas
Incremento de niveles de ruido	Traslado en camiones de materia prima y producto. Funcionamiento de equipos.	Muy alta	Alta	Muy larga	Mediana	Reversible	Molienda, fermentación
Afectación de la salud	Operación de equipos	Muy alta	Alta	Muy larga	Mediana	Irreversible	Destilación
Vertido de desechos sólidos	Producción de desechos industriales y domésticos.	Muy alta	Alta	Larga	Local	Reversible	Molienda, destilación.
Contaminación del aire por olores	Descomposición de materia orgánica	Alta	Alta	Larga	Puntual	Reversible	Molienda, almacenado.
Garantiza la seguridad alimentaria	Uso de desechos como materia prima	Muy alta	Alta	Muy larga	Regional	Irreversible	Molienda

Impacto positivo    Impacto negativo

## Disponibilidad Bruta de Alimentos (Toneladas - kg/per/año)



FEDEAGRO  
Unidad Técnica:

### Grupo: Frutas

Rubro	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006*
<b>Disponibilidad Bruta Consumo Humano (toneladas)</b>																	
Cambur	974.364	1.013.033	1.004.267	905.882	992.633	754.174	842.671	908.624	753.750	786.642	636.642	612.499	488.683	460.371	438.116	435.757	31.822
Naranja	277.312	293.953	278.695	251.307	322.754	385.398	362.352	317.647	227.115	178.536	320.295	277.919	191.711	182.474	214.925	207.837	10.082
Mango	107.377	109.715	113.227	102.373	109.919	108.072	109.672	111.568	105.933	104.317	106.300	59.756	59.191	54.272	48.804	59.178	59.394
Piña	63.577	63.413	64.234	109.728	129.815	131.769	142.661	154.833	164.093	149.436	293.197	249.349	289.902	284.105	263.867	291.042	97.462
Patilla	49.171	87.986	95.153	149.086	186.386	182.212	185.391	184.782	194.354	205.503	117.060	131.618	161.397	145.298	165.774	224.742	19.038
Aguacate	42.042	44.345	42.514	42.617	32.477	32.622	28.636	30.225	40.322	36.207	41.847	37.224	41.696	38.511	35.112	52.785	19.467
Lechosa	26.348	24.791	22.951	23.050	38.407	55.502	63.088	68.999	69.961	71.413	92.607	105.738	125.215	121.747	127.629	95.641	24.000
Uva	11.446	12.962	14.736	13.364	12.447	12.396	12.403	14.707	17.103	16.949	25.854	25.641	15.807	13.401	12.120	15.526	15.892
Otras frutas frescas	90.427	111.988	127.521	137.291	190.035	203.300	192.122	150.043	185.454	200.614	465.534	535.702	574.201	504.468	494.398	673.156	42.943
/ Pulpas y conservas de frutas	52.746	56.506	73.856	70.649	68.452	67.221	65.322	70.749	76.487	79.830	85.632	112.361	82.268	71.136	81.135	93.063	16.355
<b>Consumo Percápita (kg/per/año)</b>																	
Cambur	50	50,7	49,1	43,3	46,4	34,5	37,8	39,9	32,4	33,2	26,3	24,9	19,4	17,9	16,8	16,4	16,0
Naranja	14,2	14,7	13,6	12	15,1	17,6	16,2	13,9	9,8	7,5	13,3	11,3	7,6	7,1	8,2	7,8	7,8
Mango	5,5	5,5	5,5	4,9	5,1	4,9	4,9	4,9	4,6	4,4	4,4	2,4	2,3	2,1	1,9	2,2	2,2
Piña	3,3	3,2	3,1	5,2	6,1	6	6,4	6,8	7,1	6,3	12,1	10,1	11,5	11,1	10,1	11,0	11,0
Patilla	2,5	4,4	4,7	7,1	8,7	8,3	8,3	8,1	8,4	8,7	4,8	5,3	6,4	5,7	6,3	8,5	4,4
Aguacate	2,2	2,2	2,1	2	1,5	1,5	1,3	1,3	1,7	1,5	1,7	1,5	1,7	1,5	1,3	2,0	1,8
Lechosa	1,4	1,2	1,1	1,1	1,8	2,5	2,8	3	3	3	3,8	4,3	5,0	4,7	4,9	3,6	4,6
Uva	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	1,1	1,0	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6
Otras frutas frescas	4,6	5,6	6,2	6,6	8,9	9,3	8,6	6,6	8	8,5	19,3	22,9	22,8	19,6	18,9	25,3	20,1
/ Pulpas y conservas de frutas	2,7	2,8	3,6	3,4	3,2	3,1	2,9	3,1	3,3	3,4	3,5	4,6	3,3	2,8	3,1	3,5	4,3
<b>Total</b>	<b>86,9</b>	<b>91,1</b>	<b>89,9</b>	<b>86,3</b>	<b>97,5</b>	<b>88,5</b>	<b>89,8</b>	<b>88,3</b>	<b>78,9</b>	<b>77,2</b>	<b>90,4</b>	<b>87,2</b>	<b>80,5</b>	<b>73,1</b>	<b>72,0</b>	<b>80,8</b>	<b>72,7</b>

Fuente: INN - ULA



FEDEAGRO  
Unidad Técnica

## Volumen de Producción (Varias Unidades<sup>a</sup>)

### Grupo: Frutales

Rubro	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006*
Aguacate	51,648	51,811	40,242	41,449	36,282	38,560	41,661	41,467	52,294	44,465	49,895	46,229	52,428	63,109	58,663
Cambur	1,239,480	1,116,143	1,193,163	944,773	1,026,134	1,122,693	812,921	788,332	763,635	735,079	590,847	559,760	463,047	529,714	508,982
Lechosa	34,142	34,166	52,149	72,487	80,559	87,117	97,455	98,948	114,234	130,204	152,738	148,030	131,753	118,063	151,353
Mango	141,750	128,718	137,671	134,582	137,584	143,403	136,257	132,460	130,262	74,982	73,558	68,664	68,582	74,941	74,426
Melón	42,667	49,618	61,725	59,120	64,812	70,230	132,678	125,672	113,011	130,765	181,645	228,516	232,094	293,599	131,573
Naranja	444,580	410,718	499,804	593,497	542,936	513,709	475,023	462,579	496,768	456,495	341,645	333,272	374,419	374,417	377,881
Otras frutas	89,405	97,596	161,126	171,610	166,368	91,502	94,320	102,120	385,989	430,882	460,626	360,310	282,633	327,744	298,357
Patilla	122,815	190,311	236,557	232,010	234,284	236,580	310,862	248,508	149,296	167,921	205,479	183,981	125,931	285,721	150,746
Piña	82,815	133,236	161,225	163,034	175,745	504,109	251,184	298,766	351,078	300,090	347,297	340,221	322,768	349,182	356,879
Plátano	587,510	541,208	535,359	516,086	525,723	189,453	615,095	605,225	847,579	766,704	460,880	438,875	426,298	491,983	335,275
Uva	13,035	11,889	12,456	11,731	11,858	11,034	10,528	11,705	12,960	11,328	12,901	13,636	13,500	14,575	13,137



---

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

*En esta sección se presentan las conclusiones y recomendaciones más importantes a las que se llegaron después del análisis de los objetivos propuestos.*

### CONCLUSIONES

1. La materia prima más adecuada para esta investigación son los desechos de la piña.
2. La tecnología de obtención de etanol seleccionada es la fermentación
3. La tecnología de purificación de etanol que más se adecua a la investigación es la Destilación Simple.
4. Los grados de alcohol más altos obtenidos en el mosto fermentado fueron 4,45 °GL entre (30-35)°C.
5. Los grados de alcohol más altos obtenidos en el mosto fermentado fueron 5,05 °GL entre (35-40)°C.
6. El rango de temperatura más adecuado para fermentar el sustrato escogido es el de (30 – 35)°C.
7. Los coeficientes de variación para la fermentación son menores al 5%.
8. La composición máxima de Etanol obtenida para el rango menor de temperatura fue 0,52%v/v.
9. La composición máxima de Etanol obtenida para el rango mayor de temperatura fue 0,46%v/v.
10. Los coeficientes de variación para la data de destilación son menores al 5%.
11. Los resultados de la desviación estándar permiten asegurar que los datos recolectados están agrupados cerca a la media para la destilación.



- 12.El proceso es factible técnicamente tanto a escala de laboratorio como a escala piloto.
- 13.A escala de laboratorio el proceso no representa una relación costo-beneficio rentable.
- 14.Para aumentar la pureza del etanol es necesaria una torre con una columna de relleno de 9,66 m de altura y 0,02 m de diámetro.
- 15.El VPN calculado para el proceso propuesto es de 562745,22 \$.
- 16.El TIR calculado para el proceso propuesto es de 22,027 \$.
- 17.El proyecto representa una actividad productiva atractiva.
- 18.El proceso propuesto es económicamente factible de implementar.
- 19.El proyecto es sensible a una mínima variación de los ingresos.
- 20.El proceso propuesto es rentable económicamente frente a las tecnologías extranjeras.
- 21.El impacto ambiental más relevante es la garantía de la seguridad alimentaria con un VIA igual a 9 y el cual es un impacto positivo, directo e irreversible.
- 22.El proceso propuesto es ambientalmente factible de implementar.

## RECOMENDACIONES

1. Para emplear el etanol obtenido como combustible mezclado con el 90% de gasolina sin aditivos, es necesario elevar su pureza por encima del 97%.
2. A pesar de ser un proceso factible económicamente se puede inferir por los resultados de estudios realizados internacionalmente, que su aplicabilidad se ve más favorecida cuando ocurre un aumento desproporcionado de los precios del crudo.



---

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Albanese, A. (2007). ***Etanol ¿Por qué invertir en Argentina?***. [Presentación on line]. Instituto de Planeamiento Estratégico. Argentina. Disponible: [www.agendaestrategica.com.ar/EtanolMonteBuey.ppt](http://www.agendaestrategica.com.ar/EtanolMonteBuey.ppt)
2. Amerine, M., Berg, H. (1982). ***The technology of wine making***. [Paper digital]. 4<sup>th</sup> ed. AVI Publishing Company Inc. Connecticut. 794. Disponible: Biblioteca Universidad Simon Bolivar.
3. Ballesteros, M., (Febrero, 2007). ***Biocarburantes de segunda generación***. [Presentación]. Unidad de biomasa. Division de energias renovables CIEMAT. Madrid España. [Consulta: 2007, Agosto 01].
4. Ballesteros, M., (Noviembre, 2006). ***Carburantes sin petróleo Bioetanol***. [Presentación]. Revista investigación y ciencia. Madrid España. [Consulta: 2008, Agosto 09].
5. Bazaco, E., (2008). ***Planta de bioalcohol***. [Paper digital]. España. Disponible: <http://html.rincondelvago.com/planta-de-bioalcohol.html> [Consulta: 2008, Septiembre 18].
6. Copa Rivera E., Costa A. (2006). ***Evaluation of optimization techniques for parameter estimation: Application to ethanol fermentation considering the effect of temperature***. [Paper digital]. Laboratorio de diseño, optimización y control. Escuela de Ingeniería Química. Universidad de Campinas. Brasil. Disponible: Biblioteca del IVIC.
7. Delgado A., Lozada L. (Diciembre, 2005). ***Evaluación y propuesta de una alternativa para la destilación de una mezcla binaria-azeotrópica en la torre de rectificación del laboratorio de ingeniería química***. Trabajo especial de



- 
- grado no publicado. Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Venezuela.
8. Gonzales. (Enero, 2008). **Evaluación de impactos ambientales**. Consultora CESEL Ingenieros. Valencia, Venezuela.
  9. Grisales P., Ríos L., Triana M. (2000). **Diseño de un proceso de producción de etanol anhidro a partir de jugo de caña**. [Artículo en línea]. Revista Virtualpro edición Diciembre 2006. [Revista en línea]. Escuela de Ingeniería Química - Universidad del Valle. Cali Colombia. Disponible: <http://www.revistavirtualpro.com/vpnew/intro/userindex.php>. [Consulta: 2007, Octubre 30].
  10. Grohmann K., Widmer B., (2004). **Etanol carburante a partir de desechos de naranja**. [Artículo en línea] Laboratorio de Frutas Cítricas y Productos Subtropicales. Winter Haven, Florida. Disponible en: <http://www.ars.usda.gov/is/espanol/kids/transportation/story1/sp.biofuelframe.htm> [Consulta: 2007, Agosto 05].
  11. Hemley & Seader. (2000). **Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química**. Editorial Reverté. México.
  12. Levitus, G. (2004). **Los Biocombustibles**. [Artículo en línea]. El cuaderno de por qué biotecnología. Edición N° 58 [Revista en línea]. Argentina. Disponible: [http://www.porquebiotecnologia.com.ar/educacion/cuaderno/ec\\_58.asp?cuaderno=58](http://www.porquebiotecnologia.com.ar/educacion/cuaderno/ec_58.asp?cuaderno=58). [Consulta: 2007, Junio 29].
  13. Lezcano, P. Mora, L. (2006). **Las vinazas de destilería de alcohol. Contaminación ambiental o tratamiento para evitarlo**. [Paper digital]. Instituto de ciencia animal. La Habana Cuba. Disponible: <http://www>. [Consulta: 2007, Agosto 05].
  14. Lozano, R., (2006). **Bioenergía: sus desafíos y promesas, tecnologías y tendencias**. [Publicación en línea]. GEA Global Engineering Alliance. Brasil. Disponible: [www.geagrop.com](http://www.geagrop.com). [Consulta: 2008, Septiembre 02].
-



- 
15. Marino, A. (Marzo, 1997). **Mejora del rendimiento del proceso de fermentación de melaza para la producción de alcohol etílico**. Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Venezuela.
  16. McCabe, W. y SMITH, J. (1978). **Operaciones Básicas de Ingeniería Química**. Volumen II. Editorial Reverté, S.A. España.
  17. Monsalve J., Medina I. (2005). **Producción de etanol a partir de la cáscara de banano y almidón de yuca**. [Artículo en línea]. Revista Virtualpro edición Diciembre 2006. [Revista en línea]. Grupo de Bioprocesos-Grupo de Combustibles alternativos. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Disponible: <http://www.revistavirtualpro.com/vpnew/intro/userindex.php> [Consulta: 2007, Julio 04].
  18. Montgomery, D. (2004). **Diseño y análisis de experimentos**. (2ª edición). Limusa Wiley. México.
  19. Murray, D. (Julio 2005). **El potencial del etanol: mirando más allá del maíz**. [Artículo en línea]. Earth Policy Institute. Disponible: [http://www.elpotencialdel-etanolmirandomásalládelmaíz-Terra\\_org.mht](http://www.elpotencialdel-etanolmirandomásalládelmaíz-Terra_org.mht). [Consulta: 2007, Julio 15].
  20. Perry R. (1992). **Manual del Ingeniero Químico**. (6ª edición). Mc Graw-Hill. México.
  21. Prasad, S., Joshi, H.C. (2006). **Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial and urban residues**. [Paper digital]. Instituto de ciencia ambiental – Nueva Delhi, India. Disponible: Biblioteca del IVIC.
  22. Quintero, R. (Abril, 2007). **Maíz/Etanol “lo que viene”**. [Presentación on line]. Unidad Cuajimalpa. México D.F. Disponible: [www.prdleg.diputados.gob.mx/trabajo/temas/te04/pps/ponenciabioenergeticos](http://www.prdleg.diputados.gob.mx/trabajo/temas/te04/pps/ponenciabioenergeticos)
  23. Rivero, J. (Marzo, 1987). **Diseño de una planta para obtener alcohol etílico a partir de la pulpa de piña**. Trabajo especial de grado no publicado. Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Venezuela.
-



- 
24. Ronghou, L., Shen, F. (2006). **Impacts of main factors on bioethanol fermentation from stalk juice of sweet sorghum by immobilized *Saccharomyces cerevisiae***. [Paper digital]. Centro de investigaciones de ingeniería y energía de biomasa. Escuela de agricultura y biología. Universidad de Shanghai. República de China. Disponible: Biblioteca del IVIC.
  25. TREYBAL, Robert. (1980). **Operaciones de Transferencia de Masa**. Segunda Edición. Editorial McGraw-Hill. México.
  26. Uyazán, A., Gil, I. (Abril 2006). **Producción de alcohol carburante por destilación extractiva: simulación del proceso con glicerol**. Universidad Nacional de Colombia. Revista Ingeniería e investigación [Revista en línea]. Vol. 26 No. 1. México. Disponible: <http://redalyc.uaemex.mx> [Consulta: 2007, Diciembre 15].
  27. <http://www.aguamarket.net>
  28. <http://www.analitica.com/va/politica/opinion/6259358.asp>
  29. <http://www.aporrea.org/actualidad/a29793.html>
  30. [http://www.cervezas-argentinas.com.ar/tabla\\_de\\_conversion\\_densidad\\_a\\_brix\\_alcohol](http://www.cervezas-argentinas.com.ar/tabla_de_conversion_densidad_a_brix_alcohol)
  31. <http://www.cosmos.com.mx/b/bdox.htm>
  32. <http://www.fedeagro.org>
  33. <http://www.matche.com>
  34. [http://www.minci.gob.ve/noticias-prensa-presidencial/28/13328/10\\_por\\_ciento.html](http://www.minci.gob.ve/noticias-prensa-presidencial/28/13328/10_por_ciento.html)
  35. <http://www.portaldelaindustria.com>
  36. <http://www.quiminet.com.mx/pr4/Columnas+destilacion.htm>
  37. <http://www.torotraco.com/category/583444>
  38. [http://es.wikipedia.org/wiki/Saccharomyces\\_cerevisiae](http://es.wikipedia.org/wiki/Saccharomyces_cerevisiae)
-



---

---

## TABLAS DE DATOS

**TABLA A.1**

**VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA DETERMINACIÓN DE LAS MEJORES  
CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL PROCESO FERMENTATIVO**

Temperatura: (35 – 40) °C

Grados Brix jugo inicial: 9,5 °B

<b>Tiempo (t ± 0,01)</b>	<b>Nº de reactor</b>	<b>Grados Brix (°B ± 0,25)</b>	<b>ph (ph ± 0,5)</b>
4 horas	1	8,25	4,0
8 horas	1	6,50	4,0
12 horas	1	4,75	4,0
16 horas	2	4,25	4,0
20 horas	2	4,00	4,0
24 horas	2	3,25	4,0
28 horas	3	3,00	4,0
32 horas	3	2,50	4,0
36 horas	3	2,25	4,0
40 horas	4	2,00	4,0
44 horas	4	2,00	4,0
48 horas	4	2,00	4,0



**TABLA A.2**

**VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA DETERMINACIÓN DE LAS MEJORES  
CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL PROCESO FERMENTATIVO (duplicado)**

Temperatura: (35 – 40) °C  
Grados Brix jugo inicial: 9,5 °B

<b>Tiempo (t ± 0,01)</b>	<b>Nº de reactor</b>	<b>Grados Brix (°B ± 0,25)</b>	<b>ph (ph ± 0,5)</b>
4 horas	1	8,75	4,0
8 horas	1	7,00	4,0
12 horas	1	5,00	4,0
16 horas	2	4,50	4,0
20 horas	2	4,00	4,0
24 horas	2	3,50	4,0
28 horas	3	3,25	4,0
32 horas	3	2,75	4,0
36 horas	3	2,25	4,0
40 horas	4	2,00	4,0
44 horas	4	2,00	4,0
48 horas	4	2,00	4,0



**TABLA A.3**

**VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA DETERMINACIÓN DE LAS MEJORES  
CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL PROCESO FERMENTATIVO (triplicado)**

Temperatura: (35 – 40) °C  
Grados Brix jugo inicial: 9,5 °B

<b>Tiempo (t ± 0,01)</b>	<b>Nº de reactor</b>	<b>Grados Brix (°B ± 0,25)</b>	<b>ph (ph ± 0,5)</b>
4 horas	1	8,50	4,0
8 horas	1	7,00	4,0
12 horas	1	5,25	4,0
16 horas	2	4,25	4,0
20 horas	2	4,00	4,0
24 horas	2	3,50	4,0
28 horas	3	3,25	4,0
32 horas	3	2,50	4,0
36 horas	3	2,25	4,0
40 horas	4	2,00	4,0
44 horas	4	2,00	4,0
48 horas	4	2,00	4,0



**TABLA A.4**

**VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA DETERMINACIÓN DE LAS MEJORES  
CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL PROCESO FERMENTATIVO**

Temperatura: (30 – 35) °C  
Grados Brix jugo inicial: 9,5 °B

<b>Tiempo (t ± 0,01)</b>	<b>Nº de reactor</b>	<b>Grados Brix (°B ± 0,25)</b>	<b>ph (ph ± 0,5)</b>
2 horas	1	8,00	4,0
4 horas	1	7,00	4,0
6 horas	1	5,50	4,0
8 horas	2	3,75	4,0
10 horas	2	3,00	4,0
12 horas	2	2,75	4,0
14 horas	3	2,50	4,0
16 horas	3	2,00	4,0
18 horas	3	1,75	4,0
20 horas	4	1,00	4,0
22 horas	4	1,00	4,0
24 horas	4	1,00	4,0



**TABLA A.5**

**VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA DETERMINACIÓN DE LAS MEJORES  
CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL PROCESO FERMENTATIVO (duplicado)**

Temperatura: (30 – 35) °C  
Grados Brix jugo inicial: 9,5 °B

<b>Tiempo (t ± 0,01)</b>	<b>Nº de reactor</b>	<b>Grados Brix (°B ± 0,25)</b>	<b>ph (ph ± 0,5)</b>
2 horas	1	8,25	4,0
4 horas	1	7,25	4,0
6 horas	1	5,75	4,0
8 horas	2	3,75	4,0
10 horas	2	3,00	4,0
12 horas	2	2,50	4,0
14 horas	3	2,50	4,0
16 horas	3	2,25	4,0
18 horas	3	1,75	4,0
20 horas	4	1,00	4,0
22 horas	4	1,00	4,0
24 horas	4	1,00	4,0



**TABLA A.6**

**VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA DETERMINACIÓN DE LAS MEJORES CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL PROCESO FERMENTATIVO (triplicado)**

Temperatura: (30 – 35) °C

Grados Brix jugo inicial: 9,5 °B

<b>Tiempo (t ± 0,01)</b>	<b>Nº de reactor</b>	<b>Grados Brix (°B ± 0,25)</b>	<b>ph (ph ± 0,5)</b>
2 horas	1	8,00	4,0
4 horas	1	7,00	4,0
6 horas	1	5,50	4,0
8 horas	2	3,75	4,0
10 horas	2	3,00	4,0
12 horas	2	2,75	4,0
14 horas	3	2,50	4,0
16 horas	3	2,25	4,0
18 horas	3	1,75	4,0
20 horas	4	1,00	4,0
22 horas	4	1,00	4,0
24 horas	4	1,00	4,0



**TABLA A.7**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN DE UNA**  
**MEZCLA PATRON ENSAYOS PRE-EXPERIMENTALES CON 80 mL**  
**DE ETILENGLICOL COMO DISOLVENTE**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0005) adim		Índice de refracción de destilado (η ± 0,0005) adim
	Calderín	Tope	Tope	Calderín	
35:00	96,0	85,0	1,3595	1,3490	(I D) (F D) 1,3805
1:20:00	97,0	86,0	1,3570	1,3480	
1:41:00	97,0	87,0	1,3575	1,3395	
2:31:00	97,0	87,0	1,3580	1,3370	
3:31:00	97,0	88,0	1,3585	1,3365	

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Tipo de relleno: anillos raschig

Reflujo de operación: 1/12

**TABLA A.8**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN DE UNA**  
**MEZCLA PATRON ENSAYOS PRE-EXPERIMENTALES CON 80 mL**  
**DE ETILENGLICOL COMO DISOLVENTE (replica)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0005) adim		Índice de refracción de destilado (η ± 0,0005) adim
	Calderín	Tope	Tope	Calderín	
30:00	96,0	85,0	1,3605	1,3495	(I D) (F D) 1,3810
35:00	97,0	86,0	1,3605	1,3480	
43:00	97,0	87,0	1,3610	1,3405	
2:31:00	97,0	87,0	1,3630	1,3380	
2:40:00	97,0	88,0	1,3630	1,3350	

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Tipo de relleno: anillos raschig

Reflujo de operación: 1/12



**TABLA A.9**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN DE LA MEZCLA**  
**FERMENTADA ENSAYOS PRE-EXPERIMENTALES CON REFLUJO**  
**EXPERIMENTAL Y 80 mL DE ETILENGLICOL**  
**COMO DISOLVENTE**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0005) adim	Índice de refracción de destilado (η ± 0,0005) adim
	Calderín	Tope	Tope	
1:20:00	97,0	82,0	1,3505	(I D) (F D) 1,3500 1,3405
1:48:00	97,0	82,0	1,3530	
2:02:00	97,0	82,0	1,3515	
3:02:00	98,0	85,0	1,3500	
3:22:00	98,0	86,0	1,3405	

Presión ambiente:(708,32 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Temperatura de fermentación:(35–40)°C

Tipo de relleno: anillos raschig

Reflujo de estabilización: 1/3

Reflujo de operación: 1/12

**TABLA A.10**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN DE LA MEZCLA**  
**FERMENTADA ENSAYOS PRE-EXPERIMENTALES CON REFLUJO**  
**EXPERIMENTAL Y 80 mL DE ETILENGLICOL**  
**COMO DISOLVENTE (replica)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0005) adim	Índice de refracción de destilado (η ± 0,0005) adim
	Calderín	Tope	Tope	
1:05:00	96,0	82,0	1,3580	(I D) (F D) 1,3485
1:15:00	96,0	82,0	1,3485	
1:30:00	97,0	83,0	1,3520	
2:04:00	97,0	84,0	1,3495	
2:25:00	98,0	84,0	1,3495	

Presión ambiente:(708,32 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Temperatura de fermentación:(35–40)°C

Tipo de relleno: anillos raschig

Reflujo de estabilización: 1/3

Reflujo de operación: 1/12



**TABLA A.11**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN DE LA**  
**MEZCLA FERMENTADA ENSAYOS PRE-EXPERIMENTALES**  
**SIN REFLUJO Y SIN DISOLVENTE**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0005) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) MI
	Calderín	Tope	Destilado	
35:00	96,0	85,0	1,3595	6,00
1:12:00	97,0	86,0	1,3540	5,00
1:43:00	97,0	87,0	1,3460	5,00
2:10:00	97,0	87,0	1,3380	4,00
2:20:00	97,0	87,0	1,3430	5,00

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig

**TABLA A.12**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN DE LA MEZCLA**  
**FERMENTADA ENSAYOS PRE-EXPERIMENTALES**  
**SIN REFLUJO Y SIN DISOLVENTE (replica)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0005) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	95,0	85,0	1,3610	5,00
1:00:00	96,0	86,0	1,3470	4,00
1:28:00	96,0	87,0	1,3450	4,00
1:48:00	96,0	90,0	1,3440	4,00
2:40:00	96,0	90,0	1,3420	5,00

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig



**TABLA A.13**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN DE LA MEZCLA**  
**FERMENTADA REACTOR 1**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
28:00	96,0	91,0	1,3642	11,00
39:00	97,0	91,0	1,3476	9,00
45:00	97,0	91,0	1,3437	8,00
48:00	97,0	91,0	1,3391	10,00 (N A)

Presión ambiente: (708,23 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C

Tipo de relleno: anillos raschig

N A: no acumulado

**TABLA A.14**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN DE LA MEZCLA**  
**FERMENTADA REACTOR 1**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
27:00	96,0	91,0	1,3621	9,00
38:00	97,0	91,0	1,3456	10,00
46:00	97,0	91,0	1,3417	9,00
50:00	97,0	91,0	1,3367	9,00 (N A)

Presión ambiente: (708,23 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C

Tipo de relleno: anillos raschig

N A: no acumulado



**TABLA A.15**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN DE LA MEZCLA**  
**FERMENTADA REACTOR 1**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
28:00	96,0	91,0	1,3651	12,00
39:00	97,0	91,0	1,3497	7,00
45:00	97,0	91,0	1,3477	9,00
48:00	97,0	91,0	1,3372	9,00 (N A)

Presión ambiente: (708,23 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.16**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 1 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	95,0	85,0	1,3622	12,00
38:00	96,0	86,0	1,3567	9,00
45:00	96,0	87,0	1,3486	6,00
49:00	96,0	90,0	1,3407	5,00 (N A)

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig



**TABLA A.17**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 1 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	95,0	85,0	1,3641	12,00
37:00	96,0	86,0	1,3522	9,00
43:00	96,0	87,0	1,3447	6,00
48:00	96,0	90,0	1,3377	7,00 (N A)

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C

Tipo de relleno: anillos raschig

**TABLA A.18**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 1 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
28:00	95,0	85,0	1,3657	11,00
35:00	96,0	86,0	1,3547	9,00
44:00	96,0	86,0	1,3441	8,00
49:00	96,0	91,0	1,3366	6,00 (N A)

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C

Tipo de relleno: anillos raschig



**TABLA A.19**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 1 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
31:00	96,0	89,0	1,3637	11,00
36:00	96,0	90,0	1,3482	9,00
44:00	97,0	91,0	1,3437	8,00
49:00	97,0	91,0	1,3381	7,00 (N A)

Presión ambiente: (708,23 ± 0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado

**TABLA A.20**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 1 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
32:00	96,0	89,0	1,3646	10,00
33:00	96,0	90,0	1,3502	10,00
43:00	97,0	91,0	1,3457	8,00
50:00	97,0	91,0	1,3387	6,00 (N A)

Presión ambiente: (708,23 ± 0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado



**TABLA A.21**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 1 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	96,0	89,0	1,3627	11,00
38:00	96,0	90,0	1,3447	9,00
44:00	97,0	91,0	1,3417	8,00
48:00	97,0	91,0	1,3366	7,00 (N A)

Presión ambiente: (708,23 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.22**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
34:00	95,0	77,0	1,3644	10,00
40:00	95,0	92,0	1,3614	9,00
45:00	95,0	92,0	1,3464	8,00
49:00	96,0	94,0	1,3390	8,00 (N A)

Presión ambiente: (708,88 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.23**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
32:00	95,0	77,0	1,3614	11,00
39:00	95,0	87,0	1,3564	10,00
46:00	95,0	92,0	1,3490	8,00
51:00	96,0	94,0	1,3354	8,00 (N A)

Presión ambiente: (708,88 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C

Tipo de relleno: anillos raschig

N A: no acumulado

**TABLA A.24**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
33:00	95,0	78,0	1,3604	12,00
41:00	95,0	91,0	1,3485	8,00
48:00	95,0	92,0	1,3444	7,00
53:00	96,0	95,0	1,3359	9,00 (N A)

Presión ambiente: (708,88 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C

Tipo de relleno: anillos raschig

N A: no acumulado



**TABLA A.25**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2 (duplicado)**

Tiempo ( $t \pm 0,005$ ) s	Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C		Índice de refracción ( $\eta \pm 0,0003$ ) adim	Volumen recolectado del destilado ( $V_A \pm 0,05$ ) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
31:00	95,0	80,0	1,3629	10,00
42:00	96,0	93,0	1,3590	12,00
51:00	96,0	93,0	1,3426	1000
1:00:00	96,0	93,0	1,3366	12,00 (N A)

Presión ambiente:  $(708,88 \pm 0,05)$  mmHg  
Temperatura ambiente:  $(28,0 \pm 0,5)$  °C  
Temperatura de fermentación:  $(35 - 40)$ °C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado

**TABLA A.26**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2 (duplicado)**

Tiempo ( $t \pm 0,005$ ) s	Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C		Índice de refracción ( $\eta \pm 0,0003$ ) adim	Volumen recolectado del destilado ( $V_A \pm 0,05$ ) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
31:00	95,0	84,0	1,3645	9,00
42:00	96,0	92,0	1,3576	14,00
51:00	96,0	93,0	1,3501	12,00
1:00:00	96,0	94,0	1,3387	12,00 (N A)

Presión ambiente:  $(708,88 \pm 0,05)$  mmHg  
Temperatura ambiente:  $(28,0 \pm 0,5)$  °C  
Temperatura de fermentación:  $(35 - 40)$ °C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado



**TABLA A.27**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
31:00	95,0	84,0	1,3617	10,00
42:00	96,0	93,0	1,3521	14,00
51:00	96,0	93,0	1,3422	12,00
1:00:00	96,0	93,0	1,3367	12,00 (N A)

Presión ambiente: (708,88 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.28**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
25:00	95,0	85,0	1,3641	8,00
49:00	96,0	92,0	1,3596	13,00
56:00	96,0	94,0	1,3481	10,00
1:01:00	96,0	94,0	1,3396	14,00 (N A)

Presión ambiente: (708,88 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.29**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
25:00	95,0	85,0	1,3626	9,00
49:00	96,0	92,0	1,3526	13,00
56:00	96,0	94,0	1,3461	7,00
1:01:00	96,0	94,0	1,3376	12,00 (N A)

Presión ambiente: (708,88 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.30**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
29:00	95,0	83,0	1,3606	8,00
45:00	96,0	91,0	1,3496	10,00
56:00	96,0	94,0	1,3436	10,00
1:04:00	96,0	95,0	1,3366	10,00 (N A)

Presión ambiente: (708,88 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.31**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
41:00	96,0	84,0	1,3639	12,00
50:00	96,0	94,0	1,3504	12,00
54:00	96,0	94,0	1,3410	9,00
1:03:00	96,0	94,0	1,3370	9,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.32**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
37:00	96,0	85,0	1,3617	9,00
48:00	96,0	93,0	1,3472	13,00
54:00	96,0	94,0	1,3407	12,00
1:01:00	96,0	94,0	1,3383	7,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.33**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
41:00	96,0	85,0	1,3658	11,00
50:00	96,0	94,0	1,3553	12,00
54:00	96,0	94,0	1,3474	11,00
1:03:00	96,0	94,0	1,3358	9,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.34**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
36:00	96,0	92,0	1,3620	14,00
43:00	96,0	93,0	1,3475	12,00
46:00	96,0	93,0	1,3385	7,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.35**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
36:00	96,0	92,0	1,3642	14,00
43:00	96,0	93,0	1,3541	12,00
46:00	96,0	93,0	1,3472	7,00 (N A)
			1,3377	

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado

**TABLA A.36**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
40:00	96,0	92,0	1,3608	13,00
47:00	96,0	93,0	1,3468	13,00
52:00	96,0	93,0	1,3438	9,00 (N A)
			1,3358	

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado



**TABLA A.37**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
40:00	96,0	90,0	1,3638	8,00
48:00	96,0	93,0	1,3548	17,00
58:00	97,0	95,0	1,3428	15,00
1:05:00	97,0	95,0	1,3390	14,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.38**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
37:00	96,0	90,0	1,3604	10,00
45:00	96,0	94,0	1,3499	15,00
55:00	97,0	94,0	1,3457	15,00
1:00:00	97,0	95,0	1,3377	12,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.39**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
40:00	96,0	90,0	1,3651	8,00
48:00	96,0	93,0	1,3506	17,00
58:00	97,0	95,0	1,3416	15,00
1:05:00	97,0	95,0	1,3366	14,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.40**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
35:00	96,0	85,0	1,3617	6,00
42:00	97,0	86,0	1,3563	10,00
49:00	97,0	87,0	1,3483	8,00
55:00	97,0	87,0	1,3453	5,00
1:02:00	97,0	87,0	1,3403	10,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.41**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4**

Tiempo ( $t \pm 0,005$ ) s	Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C		Índice de refracción ( $\eta \pm 0,0003$ ) adim	Volumen recolectado del destilado ( $V_A \pm 0,05$ ) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
35:00	96,0	84,0	1,3618	8,00
42:00	97,0	86,0	1,3453	10,00
49:00	97,0	88,0	1,3412	8,00
55:00	97,0	89,0	1,3363	7,00 (N.A)

Presión ambiente: (709,38  $\pm$  0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (25,9  $\pm$  0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado

**TABLA A.42**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4**

Tiempo ( $t \pm 0,005$ ) s	Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C		Índice de refracción ( $\eta \pm 0,0003$ ) adim	Volumen recolectado del destilado ( $V_A \pm 0,05$ ) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
35:00	96,0	85,0	1,3650	6,00
41:00	97,0	86,0	1,3495	10,00
48:00	97,0	87,0	1,3476	10,00
53:00	97,0	87,0	1,3371	5,00 (N.A)

Presión ambiente: (709,38  $\pm$  0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (25,9  $\pm$  0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado



**TABLA A.43**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
33:00	95,0	90,0	1,3630	13,00
45:00	96,0	91,0	1,3470	10,00
52:00	97,0	91,0	1,3370	8,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.44**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
36:00	95,0	90,0	1,3635	13,00
48:00	96,0	91,0	1,3500	10,00
54:00	97,0	92,0	1,3440	7,00
1:01:00	97,0	93,0	1,3371	8,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.45**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
35:00	95,0	90,0	1,3602	12,00
47:00	96,0	91,0	1,3542	10,00
52:00	97,0	91,0	1,3437	7,00
1:00:00	97,0	93,0	1,3362	8,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado

**TABLA A.46**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
39:00	95,0	90,0	1,3626	8,00
48:00	96,0	92,0	1,3541	10,00
55:00	97,0	93,0	1,3431	11,00
1:00:00	97,0	93,0	1,3381	9,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado



**TABLA A.47**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
39:00	95,0	90,0	1,3648	8,00
48:00	96,0	92,0	1,3503	7,00
55:00	97,0	93,0	1,3457	10,00
1:00:00	97,0	93,0	1,3387	9,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado

**TABLA A.48**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
35:00	95,0	90,0	1,3608	9,00
44:00	96,0	92,0	1,3447	8,00
51:00	97,0	94,0	1,3418	10,00
58:00	97,0	94,0	1,3368	10,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado



**TABLA A.49**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DEL DESTILADO ACUMULADO**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0005) adim		Índice de refracción de destilado (η ± 0,0005) adim
	Calderín	Tope	Tope	Calderín	
32:00	82,0	75,0	1,3633	1,3508	1,3638
40:00	83,0	75,0	1,3638	1,3493	1,3638
45:00	83,0	75,0	1,3638	1,3493	1,3638
50:00	83,0	75,0	1,3638	1,3478	1,3638
55:00	85,0	75,0	1,3638	1,3453	1,3638
58:00	90,0	75,0	1,3638	1,3438	1,3638
1:07:00	90,0	75,0	1,3639	1,3434	1,3639
1:15:00	96,0	75,0	1,3639	1,3374	1,3634

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05)mmHg

Tipo de relleno: anillos raschig

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Reflujo de operación: 1/12

Temperatura de fermentación (35–40)°C

Volumen de destilado: 100 mL

**TABLA A.50**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DEL DESTILADO ACUMULADO (DUPLICADO)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0005) adim		Índice de refracción de destilado (η ± 0,0005) adim
	Calderín	Tope	Tope	Calderín	
31:00	81,0	75,0	1,3637	1,3517	1,3642
39:00	82,0	75,0	1,3642	1,3502	1,3642
44:00	83,0	75,0	1,3642	1,3497	1,3642
49:00	83,0	75,0	1,3642	1,3467	1,3642
54:00	86,0	75,0	1,3642	1,3462	1,3642
59:00	90,0	75,0	1,3642	1,3442	1,3642
1:04:00	92,0	75,0	1,3642	1,3402	1,3642
1:12:00	96,0	75,0	1,3642	1,3362	1,3642

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05)mmHg

Tipo de relleno: anillos raschig

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Reflujo de operación: 1/12

Temperatura de fermentación:(35–40)°C

Volumen de destilado: 95 mL



**TABLA A.51**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DEL DESTILADO ACUMULADO (TRIPLICADO)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0005) adim		Índice de refracción de destilado (η ± 0,0005) adim
	Calderín	Tope	Tope	Calderín	
30:00	81,0	75,0	1,3640	1,3525	1,3645
40:00	82,0	75,0	1,3634	1,3499	1,3644
45:00	83,0	75,0	1,3635	1,3495	1,3640
50:00	83,0	75,0	1,3635	1,3475	1,3640
55:00	85,0	75,0	1,3635	1,3460	1,3640
58:00	90,0	75,0	1,3635	1,3435	1,3640
1:07:00	93,0	75,0	1,3634	1,3384	1,3639
1:12:00	96,0	75,0	1,3634	1,3364	1,3639

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Temperatura de fermentación: (35-40)°C

Volumen de destilado: 100 mL

Tipo de relleno: anillos raschig

Reflujo de operación: 1/12

**TABLA A.52**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN DE LA MEZCLA**  
**FERMENTADA REACTOR 1**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	95,0	74,0	1,3647	8,00
35:00	96,0	90,0	1,3647	14,00
41:00	96,0	94,0	1,3622	12,00
49:00	96,0	94,0	1,3462	14,00
55:00	97,0	94,0	1,3382	9,00 (N A)

Presión ambiente: (708,23 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Temperatura de fermentación: (30 – 35)°C

Tipo de relleno: anillos raschig

N A: no acumulado



**TABLA A.53**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 1**

Tiempo ( $t \pm 0,005$ ) s	Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C		Índice de refracción ( $\eta \pm 0,0003$ ) adim	Volumen recolectado de destilado ( $V_A \pm 0,05$ ) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
32:00	95,0	74,0	1,3612	7,00
37:00	96,0	89,0	1,3482	11,00
42:00	96,0	93,0	1,3407	12,00
48:00	96,0	94,0	1,3362	14,00 (N.A)

Presión ambiente: (708,23  $\pm$  0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (28,0  $\pm$  0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (30 – 35)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado

**TABLA A.54**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 1**

Tiempo ( $t \pm 0,005$ ) s	Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C		Índice de refracción ( $\eta \pm 0,0003$ ) adim	Volumen recolectado de destilado ( $V_A \pm 0,05$ ) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	95,0	74,0	1,3644	9,00
35:00	96,0	90,0	1,3513	12,00
41:00	96,0	94,0	1,3433	11,00
49:00	96,0	94,0	1,3368	11,00 (N.A)

Presión ambiente: (708,23  $\pm$  0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (28,0  $\pm$  0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (30 – 35)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado



**TABLA A.55**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 1 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
33:00	95,0	90,0	1,3641	12,00
38:00	95,0	92,0	1,3531	12,00
44:00	95,0	94,0	1,3441	8,00
50:00	96,0	95,0	1,3386	9,00 (N A)

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.56**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 1 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
32:00	95,0	90,0	1,3626	10,00
40:00	95,0	92,0	1,3516	10,00
45:00	96,0	94,0	1,3452	9,00
51:00	96,0	94,0	1,3377	7,00 (N A)

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.57**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 1 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
35:00	95,0	89,0	1,3657	10,00
40:00	95,0	92,0	1,3577	12,00
45:00	95,0	94,0	1,3417	9,00
51:00	96,0	95,0	1,3367	8,00 (N A)

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.58**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 1 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	95,0	85,0	1,3642	8,00
35:00	95,0	92,0	1,3566	10,00
40:00	96,0	94,0	1,3461	9,00
45:00	96,0	95,0	1,3399	10,00 (N A)

Presión ambiente: (708,23 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.59**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 1 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	95,0	85,0	1,3656	8,00
35:00	95,0	92,0	1,3501	10,00
40:00	96,0	94,0	1,3457	9,00
45:00	96,0	95,0	1,3388	10,00 (N A)

Presión ambiente: (708,23 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.60**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 1 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
32:00	95,0	85,0	1,3617	1000
37:00	95,0	92,0	1,3446	10,00
42:00	96,0	94,0	1,3417	8,00
47:00	96,0	94,0	1,3367	8,00 (N A)

Presión ambiente: (708,23 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.61**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
34:00	95,0	86,0	1,3648	8,00
39:00	95,0	90,0	1,3568	9,00
44:00	96,0	93,0	1,3463	9,00
49:00	96,0	94,0	1,3403	9,00
54:00	96,0	95,0	1,3368	10,00 (N A)

Presión ambiente: (708,88 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.62**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
34:00	95,0	86,0	1,3619	8,00
39:00	95,0	90,0	1,3569	9,00
44:00	96,0	93,0	1,3494	9,00
49:00	96,0	94,0	1,3359	9,00 (N.A)

Presión ambiente: (708,88 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.63**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
34:00	95,0	86,0	1,3609	9,00
39:00	95,0	90,0	1,3489	9,00
44:00	96,0	93,0	1,3450	10,00
49:00	97,0	97,0	1,3364	7,00 (N.A)

Presión ambiente: (708,88 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.64**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
32:00	95,0	85,0	1,3642	8,00
37:00	96,0	90,0	1,3572	10,00
42:00	96,0	93,0	1,3468	9,00
47:00	96,0	94,0	1,3403	9,00
52:00	96,0	95,0	1,3363	9,00 (N A)

Presión ambiente: (708,88 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.65**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2 (duplicado)**

Tiempo ( $t \pm 0,005$ ) s	Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C		Índice de refracción ( $\eta \pm 0,0003$ ) adim	Volumen recolectado del destilado ( $V_A \pm 0,05$ ) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
32:00	95,0	85,0	1,3643	9,00
37:00	96,0	90,0	1,3522	10,00
42:00	96,0	93,0	1,3498	10,00
47:00	96,0	94,0	1,3383	9,00 (N.A)

Presión ambiente: (708,88  $\pm$  0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (28,0  $\pm$  0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado

**TABLA A.66**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2 (duplicado)**

Tiempo ( $t \pm 0,005$ ) s	Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C		Índice de refracción ( $\eta \pm 0,0003$ ) adim	Volumen recolectado del destilado ( $V_A \pm 0,05$ ) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
34:00	95,0	87,0	1,3614	11,00
39:00	96,0	90,0	1,3518	10,00
44:00	96,0	93,0	1,3418	10,00
49:00	96,0	95,0	1,3364	9,00 (N.A)

Presión ambiente: (708,88  $\pm$  0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (28,0  $\pm$  0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado



**TABLA A.67**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	95,0	86,0	1,3641	8,00
35:00	95,0	92,0	1,3581	9,00
40:00	96,0	94,0	1,3471	10,00
45:00	96,0	94,0	1,3389	9,00
50:00	96,0	95,0	1,3363	11,00 (N A)

Presión ambiente: (708,88 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.68**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	95,0	86,0	1,3631	8,00
35:00	95,0	92,0	1,3526	9,00
40:00	96,0	94,0	1,3461	10,00
45:00	96,0	94,0	1,3371	9,00 (N.A)

Presión ambiente: (708,88 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.69**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 2 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
32:00	95,0	86,0	1,3600	7,00
37:00	95,0	92,0	1,3506	9,00
42:00	96,0	93,0	1,3435	12,00
47:00	96,0	93,0	1,3366	8,00 (N.A)

Presión ambiente: (708,88 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.70**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
34:00	95,0	87,0	1,3641	9,00
39:00	95,0	91,0	1,3541	10,0
44:00	96,0	93,0	1,3441	9,00
49:00	96,0	94,0	1,3386	11,00
54:00	96,0	95,0	1,3351	10,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.71**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
34:00	95,0	87,0	1,3610	9,00
39:00	95,0	91,0	1,3465	10,0
44:00	96,0	93,0	1,3405	9,00
49:00	96,0	94,0	1,3375	11,00 (N.A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C

Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C

Tipo de relleno: anillos raschig

N A: no acumulado

**TABLA A.72**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
35:00	95,0	88,0	1,3646	11,00
40:00	95,0	92,0	1,3511	10,0
45:00	96,0	93,0	1,3466	8,00
50:00	97,0	95,0	1,3351	11,00 (N.A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C

Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C

Tipo de relleno: anillos raschig

N A: no acumulado



**TABLA A.73**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
35:00	96,0	91,0	1,3635	12,00
40:00	96,0	93,0	1,3501	11,00
45:00	96,0	95,0	1,3393	8,00
50:00	97,0	96,0	1,3368	8,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado

**TABLA A.74**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
35:00	96,0	90,0	1,3634	10,00
40:00	96,0	93,0	1,3535	11,00
45:00	96,0	94,0	1,3465	7,00
50:00	96,0	95,0	1,3366	10,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado



**TABLA A.75**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
35:00	96,0	90,0	1,3601	12,00
40:00	96,0	93,0	1,3460	11,00
45:00	96,0	94,0	1,3431	8,00
50:00	96,0	95,0	1,3355	9,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado

**TABLA A.76**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	95,0	88,0	1,3634	9,00
35:00	96,0	92,0	1,3509	11,00
40:00	96,0	94,0	1,3421	11,00
45:00	96,0	95,0	1,3368	10,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado



**TABLA A.77**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
31:00	95,0	88,0	1,3594	10,00
36:00	96,0	91,0	1,3490	10,00
43:00	96,0	94,0	1,3446	9,00
48:00	96,0	95,0	1,3376	10,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado

**TABLA A.78**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 3 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	95,0	88,0	1,3641	10,00
35:00	96,0	92,0	1,3446	9,00
40:00	96,0	93,0	1,3416	12,00
46:00	96,0	95,0	1,3359	8,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
Tipo de relleno: anillos raschig  
N A: no acumulado



**TABLA A.79**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
37:00	95,0	89,0	1,3640	11,00
42:00	95,0	92,0	1,3541	8,00
47:00	95,0	93,0	1,3446	7,00
52:00	96,0	94,0	1,3381	11,00
57:00	96,0	95,0	1,3343	7,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.80**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
37:00	95,0	89,0	1,3602	11,00
42:00	95,0	92,0	1,3437	9,00
47:00	95,0	93,0	1,3397	7,00
52:00	96,0	94,0	1,3347	11,00 (N.A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado



**TABLA A.81**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
37:00	95,0	89,0	1,3633	11,00
42:00	95,0	91,0	1,3478	8,00
47:00	95,0	93,0	1,3458	8,00
52:00	96,0	95,0	1,3353	10,00 (N.A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C  
 Tipo de relleno: anillos raschig  
 N A: no acumulado

**TABLA A.82**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4 (duplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectad o del destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
32:00	95,0	90,0	1,3641	10,00
37:00	95,0	91,0	1,3556	7,00
42:00	95,0	93,0	1,3441	9,00
47:00	96,0	94,0	1,3372	13,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg  
 Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C



Tipo de relleno: anillos raschig

N A: no acumulado

**TABLA A.83**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4 (duplicado)**

Tiempo ( $t \pm 0,005$ ) s	Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C		Índice de refracción ( $\eta \pm 0,0003$ ) adim Destilado	Volumen recolectado del destilado ( $V_A \pm 0,05$ ) mL
	Calderín	Tope		
32:00	95,0	89,0	1,3627	12,00
38:00	95,0	91,0	1,3493	7,00
42:00	95,0	93,0	1,3432	9,00
47:00	96,0	94,0	1,3362	11,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38  $\pm$  0,05) mmHgTemperatura ambiente: (25,9  $\pm$  0,5) °C

Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C

Tipo de relleno: anillos raschig

N A: no acumulado

**TABLA A.84**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4 (duplicado)**

Tiempo ( $t \pm 0,005$ ) s	Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C		Índice de refracción ( $\eta \pm 0,0003$ ) adim Destilado	Volumen recolectado del destilado ( $V_A \pm 0,05$ ) mL
	Calderín	Tope		
33:00	95,0	90,0	1,3594	11,00
38:00	95,0	91,0	1,3534	9,00
44:00	95,0	93,0	1,3429	8,00
49:00	96,0	93,0	1,3355	13,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38  $\pm$  0,05) mmHgTemperatura ambiente: (25,9  $\pm$  0,5) °C

Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C

Tipo de relleno: anillos raschig

N A: no acumulado



**TABLA A.85**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4 (triplicado)**

Tiempo ( $t \pm 0,005$ ) s	Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C		Índice de refracción ( $\eta \pm 0,0003$ ) adim	Volumen recolectado de destilado ( $V_A \pm 0,05$ ) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	95,0	88,0	1,3637	10,00
36:00	95,0	93,0	1,3500	12,00
41:00	96,0	94,0	1,3401	11,00
46:00	96,0	94,0	1,3366	8,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38  $\pm$  0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (25,9  $\pm$  0,5) °C

Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C

Tipo de relleno: anillos raschig

N A: no acumulado

**TABLA A.86**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4 (triplicado)**

Tiempo ( $t \pm 0,005$ ) s	Temperatura ( $T \pm 0,5$ ) °C		Índice de refracción ( $\eta \pm 0,0003$ ) adim	Volumen recolectado de destilado ( $V_A \pm 0,05$ ) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	95,0	88,0	1,3634	8,00
36:00	95,0	93,0	1,3490	14,00
41:00	96,0	94,0	1,3451	14,00
46:00	97,0	95,0	1,3381	10,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38  $\pm$  0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (25,9  $\pm$  0,5) °C

Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C



Tipo de relleno: anillos raschig

N A: no acumulado

**TABLA A.87**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DE LA MEZCLA FERMENTADA REACTOR 4 (triplicado)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0003) adim	Volumen recolectado de destilado (V <sub>A</sub> ± 0,05) mL
	Calderín	Tope	Destilado	
30:00	95,0	88,0	1,3611	11,00
36:00	95,0	93,0	1,3431	12,00
41:00	96,0	94,0	1,3396	12,00
46:00	96,0	94,0	1,3356	10,00 (N A)

Presión ambiente: (709,38 ± 0,05) mmHg

Temperatura ambiente: (25,9 ± 0,5) °C

Temperatura de fermentación: (35 – 40)°C

Tipo de relleno: anillos raschig

N A: no acumulado

**TABLA A.88**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DEL DESTILADO ACUMULADO**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0005) adim		Índice de refracción de destilado (η ± 0,0005) adim
	Calderín	Tope	Tope	Calderín	
30:00	82,0	75,0	1,3649	1,3519	1,3649
34:00	83,0	75,0	1,3649	1,3514	1,3649
39:00	83,0	75,0	1,3649	1,3514	1,3649
44:00	85,0	75,0	1,3649	1,3514	1,3649
49:00	87,0	75,0	1,3644	1,3429	1,3649
55:00	90,0	75,0	1,3642	1,3377	1,3647
1:00:00	93,0	75,0	1,3646	1,3366	1,3646

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05)mmHg

Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C

Temperatura de fermentación: (30 – 35)°C



Tipo de relleno: anillos raschig  
 Reflujo de operación: 1/12  
 Volumen de destilado: 109 mL

**TABLA A.89**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DEL DESTILADO ACUMULADO (DUPLICADO)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0005) adim		Índice de refracción de destilado (η ± 0,0005) adim
	Calderín	Tope	Tope	Calderín	
30:00	82,0	75,0	1,3648	1,3523	1,3648
34:00	83,0	75,0	1,3648	1,3508	1,3648
38:00	84,0	75,0	1,3643	1,3503	1,3648
44:00	85,0	75,0	1,3643	1,3498	1,3643
49:00	87,0	75,0	1,3643	1,3433	1,3643
54:00	92,0	75,0	1,3643	1,3388	1,3643
59:00	94,0	75,0	1,3638	1,3358	1,3643

Presión ambiente: (708,32 ± 0,05)mmHg  
 Temperatura ambiente: (28,0 ± 0,5) °C  
 Temperatura de fermentación:(30–35)°C

Tipo de relleno: anillos raschig  
 Reflujo de operación: 1/12  
 Volumen de destilado: 110 mL

**TABLA A.90**  
**FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE PURIFICACIÓN**  
**DEL DESTILADO ACUMULADO (TRIPLICADO)**

Tiempo (t ± 0,005) s	Temperatura (T ± 0,5) °C		Índice de refracción (η ± 0,0005) adim		Índice de refracción de destilado (η ± 0,0005) adim
	Calderín	Tope	Tope	Calderín	
30:00	81,0	75,0	1,3650	1,3535	1,3650
35:00	82,0	75,0	1,3640	1,3500	1,3650
30:00	83,0	75,0	1,3635	1,3500	1,3650
45:00	85,0	75,0	1,3634	1,3489	1,3649
50:00	88,0	75,0	1,3634	1,3449	1,3649
55:00	90,0	75,0	1,3634	1,3394	1,3649
1:00:00	930	75,0	1,3634	1,3369	1,3649



Presión ambiente:  $(708,32 \pm 0,05)$  mmHg  
Temperatura ambiente:  $(28,0 \pm 0,5)$  °C  
Temperatura de fermentación:  $(30-35)$  °C

Tipo de relleno: anillos raschig  
Reflujo de operación: 1/12  
Volumen de destilado: 115 mL

**TABLA A.91**  
**TIEMPOS DE RECOLECCIÓN DE UN VOLUMEN DE MEZCLA BINARIA**  
**NECESARIA PARA LA CALIBRACIÓN DEL ROTÁMETRO**  
**INSTALADO EN LA TORRE DE RECTIFICACIÓN**

Lectura del rotámetro ( $L_r \pm 0,05$ ) adim	Tiempo de recolección ( $t \pm 0,01$ ) s
15	9.35
	7.65
	8.37
11	19.65
	19.29
	20.12
5	1'10"84
	1'22"62
	1'15"20

Presión ambiente:  $(714,54 \pm 0,05)$  mmHg  
Temperatura ambiente:  $(28,0 \pm 0,5)$  °C  
Volumen de líquido a recolectar:  $(5,00 \pm 0,05)$  mL  
Altura máxima del rotámetro:  $(15,0 \pm 0,5)$  cm



- Cálculo de las potencias referida al baño térmico del sistema de fermentación y a la manta de calentamiento de la torre de destilación:

Potencia referida al baño térmico del sistema de fermentación:

$$P = \frac{V * A * fp}{f1 * t} \quad \text{(Claments, 1994) (B.I)}$$

Donde:

P: potencia en Kw/h

V: Voltaje Nominal de la resistencia (V)

A: Amperaje Nominal referido a la resistencia (A)

Fp: Factor de potencia de la resistencia (adim)

F1: Factor de conversión de W a Kw

t: Tiempo (h)

Sustituyendo los valores correspondientes en la Ecuación (A.I):

$$P = \frac{120V * 10,6A * 1}{1000 * 6h} = 7,632 \frac{Kw}{h}$$

De igual forma se procede con la manta de calentamiento de la torre de destilación.

Sustituyendo los valores correspondientes en la Ecuación (B.I):

$$P = \frac{94V * 2,8A * 1}{1000 * 18,23h} = 0,014 \frac{Kw}{h}$$

Potencias de las bombas de agitación:



$$P = \frac{Pn}{f1*t} * n \quad (\text{Claments, 1994}) \text{ (B.II)}$$

Donde:

Pn: Potencia nominal de la bomba (W)

N: Número de bombas

Sustituyendo los valores correspondientes se obtiene:

$$P = \frac{6w}{1000 * 12h} * 4 = 0,002 \frac{Kw}{h}$$

Potencia referida al molino eléctrico:

$$P = \frac{1,12kw}{0,5h} = 2,24 \frac{Kw}{h}$$

➤ Cálculo de Costos referidos al consumo eléctrico:

Costos energéticos referidos al baño térmico del sistema de fermentación:

$$C_E = \frac{P*CB}{f1} \quad (\text{Propia, 2008}) \text{ (B.III)}$$

Donde:

CB: Costo en Bolívares por cada Kw consumido en el tiempo

Sustituyendo los valores correspondientes se obtiene:

$$C_E = \frac{\left(0,002 \frac{Kw}{h}\right) * 0,0001 \frac{Bs.F * h}{w}}{1000} = 0,0007632Bs.F$$

A continuación se presentan los costos energéticos referidos a la manta de



calentamiento de la torre de destilación así como las bombas de agitación y el molino eléctrico:

Costos energéticos referidos a la manta de calentamiento:

$$C_E = \frac{0,0144 \frac{Kw}{h}}{1000} * 0,0001 \frac{Bs.F * h}{w} = 0,000001444Bs.F$$

Costos energéticos referidos a las bombas de agitación:

$$C_E = \frac{0,002 \frac{Kw}{h}}{1000} * 0,0001 \frac{Bs.F * h}{w} = 0,0000002Bs.F$$

Costos energéticos referidos al molino eléctrico:

$$C_E = \frac{2,24 \frac{Kw}{h}}{1000} * 0,0001 \frac{Bs.F * h}{w} = 0,000000224Bs.F$$

Costos totales:

$$C_T = \sum C_E = 0,0000009888Bs.F$$

➤ Cálculo del Reflujo de operación

$$R_{op} = \frac{Q_L}{Q_D} \quad (\text{Mc.Cabe, 1991}) \quad (\text{B.IV})$$

Obtención del flujo molar de destilado (D):



$$Q_D = \frac{V_D * \rho}{t_R * PM} \quad (\text{Propia, 2008}) \text{ (B.V)}$$

Donde:

$Q_D$ : Flujo molar de destilado (mol/s)

$V_D$ : Volumen de destilado recolectado (mL)

$\rho$ : Densidad de la mezcla (g/mL)

$t_R$ : Tiempo de recolección de volumen de destilado (s)

PM: Peso molecular de la mezcla (g/mol)

Sustituyendo los valores en la ecuación se obtiene:

$$Q_D = \frac{109\text{mL} * 0,82 \frac{\text{g}}{\text{mL}}}{300\text{s} * 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,0093\text{mol/s}$$

Obtención del flujo molar de (L):

Se construyó una curva de calibración del rotámetro donde a distintas alturas de este mismo se calcularon distintos flujos volumétricos haciendo extracciones de líquido por medio de la válvula tres vías ubicada en el tope de la torre. Dicha grafica se encuentra en los apéndices C.

Una vez obtenida la curva de calibración y con la altura del rotámetro obtenida durante el desarrollo de la investigación el valor de  $Q_L = 0,02936\text{mL/s} = 0,0007524\text{mol/s}$ .

Sustituyendo los valores en la ecuación (B.IV) se obtiene:

$$R_{op} = \frac{0,0007524 \frac{\text{mol}}{\text{s}}}{0,0093 \frac{\text{mol}}{\text{s}}} = 0,08$$



Con este valor obtenido se procede a construir la línea de operación de la Figura 4.17 para definir el número de etapas equivalentes al relleno de la torre disponible para realizar la investigación:

$$y = \frac{R_{op}}{R_{op}+1} * x + \frac{X_D}{R_{op}+1} \quad (\text{Mc. Cabe, 1991}) \quad (\text{B.VI})$$

Con esta ecuación y sustituyendo valores de composición se define la línea de operación buscada.

### Cálculo del número de unidades de transferencia

$$NUT = \int_{y_B}^{y_D} \frac{1}{y^* - y} dy \quad (\text{B.VII}) \quad (\text{Mc Cabe-Smith, 1991})$$

Donde:

$y^*$  = composición molar del vapor en el equilibrio (adim)

$y$  = composición molar del vapor en la línea de operación (adim)

$y_B$  = composición molar del vapor en el fondo de la columna (adim)

$y_D$  = composición molar del vapor en el tope (adim)

Empleando el método de los trapecios para determinar el valor de la integral como el área bajo la curva, leyendo los valores  $y^*$  e  $y$  sobre la línea de equilibrio y de operación respectivamente, para un intervalo comprendido entre  $y_B$  e  $y_D$ , con un paso de 0,05 y un último paso de 0,02 se tiene:

$$NUT = 1,5076 \quad (\text{adim})$$

### Cálculo de la altura de una unidad de transferencia



---

$$HUT = \frac{Z}{NUT} \quad (\text{B.VIII}) \quad (\text{Mc Cabe-Smith, 1991})$$

Donde:

HUT = altura equivalente de una unidad de transferencia (cm)

Z = altura total del relleno en la torre (cm)

Sustituyendo el valor del NUT calculado previamente y la altura de la torre reportada en la tabla 4.16, se tiene:

$$HUT = \frac{80\text{cm}}{1,5076} = 53,064 \text{ cm}$$

#### **Cálculo de la pendiente del plato teórico de la torre 1 (T-1)**

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \quad (\text{B.IX}) \quad (\text{Navarro, 1992})$$

Donde:

m: Pendiente de la recta

X<sub>i</sub>: abcisa del punto "i" perteneciente a la recta

Y<sub>i</sub>: Ordenada del punto "i" perteneciente a la recta

Trazando una recta Tangente a los datos de equilibrio en el plato de la Figura 4.17, y leyendo las coordenadas del punto de tangencia y del intercepto con el eje Y se tiene:

$$X_1=0 \quad Y_1=0,38$$

$$X_2=0,17 \quad Y_2=0,5$$



Sustituyendo los datos leídos se tiene:

$$m = \frac{0,5 - 0,38}{0,17 - 0}$$

$$m = 0,71$$

### Cálculo de la relación V/L

$$\frac{V}{L} = \frac{R_{op} + 1}{R_{op}} \quad (\text{B.X}) \text{ (Mc Cabe-Smith, 1991)}$$

Donde:

R<sub>op</sub>: Reflujo de operación

Sustituyendo R=0.08 se tiene:

$$\frac{V}{L} = 1,08$$

### Cálculo de la altura equivalente a un plato teórico

$$HETP = \frac{HUT * \ln\left(m * \frac{V}{L}\right)}{\left(M * \frac{V}{L}\right) - 1} \quad (\text{B.XI}) \text{ (Perry, 2003)}$$

Donde:

HETP = altura equivalente de un plato teórico (cm)



Sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene:

$$HETP = \frac{53,064cm * Ln(0,71 * 1,08)}{(0,71 * 1,08) - 1}$$

$$HETP = 60,3931cm$$

Una vez obtenido este valor se procede a realizar un escalamiento con la finalidad de determinar la altura en relleno necesaria para la torre adicional

$$HETP \text{ (Torre 2)} = HETP * (\text{Núm. de etapas teóricas (torre 2)})$$

$$HETP \text{ (Torre 2)} = 60,3931cm * 16 = \text{aproximadamente } 966,29cm$$

Esta es la altura equivalente de relleno que requiere la segunda torre para alcanzar la pureza deseada del producto final

*En la presente sección, se muestran los cálculos típicos necesarios para la determinación de los modelos financieros que hacen posible la factibilidad del proyecto.*

### **Estructura del flujo de caja:**

$$[Balance]añox = [INGRESOS - EGRESOS]añox \quad (B.XII) \text{ (Gómez Núñez, 2004)}$$

Tomando como referencia el último año 2018 tenemos y sustituyendo los valores en la ecuación se obtiene:

$$[Balance]año2018 = (6120008,632 - 4492013,22)\$$$



---

$$[Balance]_{\text{año}2018} = 1627995,412\$$$

$$[INGRESOS_{VENTAS_x}]$$

Donde:

$año_x$  = Año de estudio dentro del horizonte económico.

**Estimación de ingresos:**

$$[INGRESOS_{VENTAS_x}] = \left[ \sum_I \sum_J (Unidad_{producto} * Precio_{inicial}) \right]_{ij}$$

(B.XIII)(Gómez Núñez, 2004)

Donde:

X: División del Horizonte Económico

i: Mercado

j: Cliente

Sustituyendo los calores en la ecuación se obtiene:

$$[INGRESOS_{VENTAS_x}] = 6,12000863 * 1000000 = 6120008,632\$$$

**a) Costo de tuberías**

$$COSTOS_{tuberias} = [15 - 25]\% * [COSTOS_{Equipos}] \quad (B.XIV) \text{ (Gómez Núñez, 2004)}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación se obtiene:



---

$$[COSTOS_{tuberias} = 0,25 * 867864] = 216966Bs.F = 100914,4186\$$$

**b) Costo de Estudios y Proyectos:**

$$COSTOS_{Estudios-Proyectos} = 35\% * COSTOS_{Equipos} \quad (B.XV) \text{ (Gómez Núñez, 2004)}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación se obtiene:

$$[COSTOS_{Estudios-Proyectos}] = 0,35 * 867864 = 303752,40Bs.F = 141280,186\$$$

**c) Costo de Supervisión y Entrenamiento:**

$$[COSTOS_{Supervisión-Entrenamiento}] = (2\% - 7\%) * COSTOS_{Equipos}$$

(B.XVI) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores en la ecuación se obtiene:

$$[COSTOS_{Supervisión-Entrenamiento}] = 0,02 * 867864 = 17357,28Bs.F = 8073,153\$$$

**d) Costo de Arranque , Pruebas y Contingencias:**

$$COSTOS_{Arranque-Prueba-Contingencia} = (8 - 10)\% * \sum (a \rightarrow b)$$

(B.XVII) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$COSTOS_{Arranque-Prueba-Contingencia} = \dots$$



$$\dots = 0,08 * \left( 108483 + 407896,08 + 112822,32 + 477325,2 + 216966 + 86786,4 \right) \\ + 303752,4 + 17357,28 + 867864$$

$$COSTOS_{Arranque-Prueba-Contingencia} = 207940,21Bs. F = 96716.37\$$$

### Capital Fijo

$$CapitalFijo = \sum_a^d (Costo_{CapitalFijo}) \quad (B.XVIII) \text{ (Gómez Núñez, 2004)}$$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$Capital Fijo = 108483 + 407896,08 + 112822,32 + 477325,2 + 216966 + 86786,4 \dots$$

$$\dots 303752,4 + 17357,28 + 207940,21 = 2807192,89Bs. F = 1305671,11\$$$

### Capital de Trabajo:

#### a) Costo inventario de Materias Primas:

$$COSTO_{Inventario-Materia prima} = \sum_i 30 * \left( \frac{TM_{consumo}}{Dia} * \frac{Costo}{TM} \right)$$

(B.XIX) (Gómez Núñez, 2004)

Donde:

$i$  = Materia Prima

Sustituyendo los valores se obtiene:



$$\begin{aligned} \text{COSTO}_{\text{Inventario-Materia prima}} &= 30 * \frac{54,72}{261,22} * 261,22 * 600 = 984960,00 \text{Bs. F} \\ &= 458120,9302\$ \end{aligned}$$

**b) Costo Inventario de Producto**

$$\text{COSTO}_{\text{Inventario-Producto}} = \sum_j 30 * \left( \frac{TM_{\text{Producida}}}{\text{Dia}} * \frac{\text{PRECIO}}{\text{Dia}} \right)$$

(B.XX) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$\text{COSTO}_{\text{Inventario-Producto}} = 30 * 261,22 * 6,82128761 = 53455,70 \text{Bs. F} = 24863,116\$$$

**c) Costo Inventario Repuestos:**

$$\text{COSTOS}_{\text{Inventario-Repuestos}} = (10 - 15)\% * \text{COSTOS}_{\text{equipos}}$$

(B.XXI) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$\text{COSTOS}_{\text{Inventario-Repuestos}} = 0,1 * 867864 = 86786,40 \text{Bs. F} = 40365,767\$$$

**d) Costo por Salarios:**

$$\text{Costo}_{\text{Salario}} = \left( \frac{\text{Sueldo}}{\text{gal}} * \text{Gal}_{\text{producción}} \right)_i * 2 \quad (\text{B.XXII}) \text{ (Gómez Núñez, 2004)}$$

Sustituyendo los valores se obtiene:



---

$$COSTO_{Salario} = 2 * (800 * 2) = 3200,00Bs.F = 1488,37\$$$

**e) Efectivo en Caja:**

$$EFECTIVO_{caja} = 60 * \left( \frac{TM_{Producida}}{Dia} * \frac{PRECIO}{TM} \right)$$

(B.XXIII) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$EFECTIVO_{caja} = 60 * 261,22 * 6,82128764 = 106911,40Bs.F = 49726,232\$$$

$$CAPITAL_{TRABAJO} = \sum_b^a (COSTOS_{Capital-Trabajo})$$

(B.XXIV) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$CAPITAL_{TRABAJO} = 984960 + 53455,70 + 86786,4 + 3200 + 106911,4 = 1235313,51Bs.F$$
$$= 574564,42\$$$

$$Inversión = Capital_{Fijo} + Capital_{Trabajo} \quad (B.XXV) \text{ (Gómez Núñez, 2004)}$$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$INVERSIÓN = 2807192,89 + 1235313,51 = 4042506,4Bs.F = 1880235,54\$$$



---

**Costos Directos:****a) Materia Primas:**

$$MATERIAS_{PRIMAS} = \sum_{I:MP} (TM_{producto}) * COSTO$$

(B.XXVI) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$MATERIAS_{PRIMAS} = \left( \frac{54,72}{261,22} * 261,22 * 600 \right) = 32832,00Bs. F = 15270,697\$$$

**b) Operadores de Planta:**

$$\text{Operadores} = \frac{t * \text{Equipos} * (TMD)^{0,24}}{8}$$

(B.XXVII) (Gómez Núñez, 2004)

Donde:

t: Operaciones control automatizado

Equipos: Número de equipos principales

Sustituyendo los valores en la ecuación anterior se obtiene:

$$\text{Operadores}_{Planta} = \frac{10 * 5 * (261,22^{0,24})}{8} = 23,766Bs. F = 11053,953\$$$



$$Beneficio_{Año} = (16 - 21) * Salario_{Tesis}$$

(B.XXVIII) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$Beneficio_{Año} = 16 * 800 = 12800Bs.F = 5953,488\$$$

**c) Supervisor Turno:**

$$COSTO_{Supervisor-Turno} = (10 - 15)\% * COSTO_{Operadores}$$

(B.XXIX) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$COSTO_{Supervisor-Turno} = 0,1 * 304208,63 = 30420,863Bs.F = 14149,238\$$$

**d) Materiales y Mantenimiento:**

$$COSTO_{Materiales-Mantenimiento} = (Materiales + Mano de Obra) * Capital_{Fijo}$$

(B.XXX) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$\begin{aligned} COSTO_{Materiales-Mantenimiento} &= (0,03 + 0,02) * 2807192,89 = 140359,64Bs.F \\ &= 65283,553\$ \end{aligned}$$

**e) Laboratorio:**



$$COSTOS_{Laboratorio} = (10 - 20)\% * (COSTOS_{OPERADORES} + COSTOS_{SUPERVISORES})$$

(B.XXXI) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$COSTOS_{Laboratorio} = 0,1 * (304208,63 + 30420,86) = 33462,95Bs.F=15564,162\$$$

### Costos Indirectos:

#### a) Seguros:

$$Costo_{Seguros} = 1\% * Capital_{Fijo}$$

(B.XXXII) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$COSTOS_{Seguros} = 0,01 * 2807192,89 = 28071,9289Bs.F = 13056,711\$$$

#### b) Seguridad y Protección , Servicios Médicos , Mantenimiento General Y gastos Otros:

$$COSTOS_{Seguridad-Protección} = (50 - 70)\% * COSTOS_{Materiales-Mantenimeinto}$$

(B.XXXIII) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$COSTOS_{Seguridad-Protección} = 0,5 * 140359,64 = 70179,822Bs.F = 32641,777\$$$



---

## Estimación de Gastos Generales

### a) Gastos de Ventas:

$$Gasto_{Ventas} = (2\% - 20\%) * Costo_{Manufactura} \quad (B.XXXIV) \text{ (Gómez Núñez, 2004)}$$

$$Gastos_{Ventas} = 0,2 * (121683,45 + 940777,440) = 21249,22Bs. F = 9883,358\$$$

$$Costo_{Manufactura} = Costo_{Directo} + Costo_{Indirecto} \quad (B.XXXV) \text{ (Gómez Núñez, 2004)}$$

$$Costo_{Manufactura} = 399478,08 + 541299,36 = 940777,440Bs. = 437570,902\$.$$

$$Costo_{Producción} = Costo_{Manufactura} + Gasto_{Generales} \quad (B.XXXVI) \text{ (Gómez Núñez, 2004)}$$

$$Costos_{Produccion} = 940777,440 + 142932,67 = 1083710,110Bs. F = 504051,214\$$$

### Estimación del Impuesto sobre la Renta (I.S.L.R.):

$$Enriq = \frac{(Ingresos - Costo_{producción} - Intereses_{deuda})}{Valor_{UT}} \quad (B.XXXVII) \text{ (Gómez Núñez, 2004)}$$

$$Enriq = \frac{9913213,60 - 4452314,98 - 22313,06}{46} = 118230,12$$

$$I.S.L.R. = Tasa * (E) - Sustraendo \quad (B.XXXVIII) \text{ (Gómez Núñez, 2004)}$$



---

$$I.S.L.R = 0.34 * 118230,12 - 500 = 39698,24Bs.F = 18464,297\$$$

## Calculo de la Deuda

### **Cuota**

**Capital: 2021253,20Bs.F = 940117.767\$**

$$R = \frac{\text{Capital} * (\text{tasa de interes} * (1 + \text{tasa de interes}^{\text{tiempo de pago}}))}{(1 + \text{tasa de interes}^{\text{tiempo de pago}}) - 1}$$

(B.XXXIX) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$R = \frac{2021253.2 * (0.08 * (1 + 0.08^{10}))}{(1 + 0.08^{10}) - 1} = 301226,33Bs.F = 140105,269\$$$

### **Pago de Interés**

$$Pi = \text{tasa de interes} * \text{capital}$$

(B.XL) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$Pi = 0.08 * 2021253.2 = 161700.26Bs.F = 75209,423\$$$

### **Pago del préstamo**



---

$$Pp = R - Pi$$

(B.XLI) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$Pp = 301226,33 - 161700,26 = 139526,07 Bs. F = 64895,846\$$$

### **Deuda Capital**

$$Dc = Capital - Pp$$

(B.XLII) (Gómez Núñez, 2004)

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$Dc = 2021253,20 - 64895,846 = 1956357,354 = 909933,653\$$$

### **Determinación de la Factibilidad del proyecto:**

Para obtener este indicador de factibilidad se utilizan indicadores económicos como el TIR y el VPN

### **Cálculo del Valor Presente Neto (VPN):**

$$VPN = \sum_{x=1}^n \frac{Fx}{(1+I)^{x-1}} \quad (B.XLIII) \text{ (Gómez Núñez, 2004)}$$

Sustituyendo los valores se obtiene:



---

$$\begin{aligned} VPN = & \frac{-4042506,40}{(1 + 0.17)^{-0}} + \frac{691992,65}{(1 + 0.17)^1} + \frac{843581,44}{(1 + 0.17)^2} + \frac{993731,23}{(1 + 0.17)^3} + \frac{1139341,02}{(1 + 0.17)^4} \\ & + \frac{1276540,58}{(1 + 0.17)^5} + \frac{1400568,88}{(1 + 0.17)^6} + \frac{1505597,61}{(1 + 0.17)^7} + \frac{1584839,63}{(1 + 0.17)^8} \\ & + \frac{1628640,23}{(1 + 0.17)^9} + \frac{1627995,42}{(1 + 0.17)^{10}} = 1209902,23 Bs. F. = 562745,222\$ \end{aligned}$$

### Cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR)

El calculo de este parámetro económico se determino utilizando la estimación por las tablas tal ubicadas en los anexos usando esta metodología se calculan todos los parámetros entre un  $i = 2$  hasta un  $i = 100$  justo cuando existe un cambio de pendiente se obtiene el valor de la Tasa interna de Retorno cuyo valor es:  $47,3589 Bs.F = 22,02\$$



Densidad	°Baumé	°Brix	°Alcohol
1012	1.70	0.20	0.11
1013	1.84	0.47	0.23
1014	1.98	0.73	0.43
1015	2.12	1.10	0.59
1016	2.27	1.26	0.70
1017	2.41	1.53	0.88
1018	2.55	1.80	1.06
1019	2.68	2.06	1.18
1020	2.82	2.33	1.35
1021	2.91	2.59	1.47
1022	3.10	2.86	1.65
1023	3.24	3.13	1.82
1024	3.37	3.39	1.94

Tabla C.3 Tablas de conversión



1025	3.51	3.66	2.21
1026	3.65	3.92	2.30
1027	3.79	4.19	2.41
1028	3.92	4.46	2.69
1029	4.06	4.72	2.77
1030	4.20	5.00	2.95
1031	4.33	5.27	3.06
1032	4.47	5.54	3.24
1033	4.60	5.80	3.42
1034	4.74	6.07	3.54
1035	4.88	6.33	3.71
1036	5.01	6.6	3.7
1037	5.15	6.9	4.0
1038	5.28	7.2	4.2
1039	5.41	7.4	4.4

Tabla C.3 Tablas de conversión (continuación)



1040	5.50	7.6	4.5
1041	5.68	8.0	4.7
1042	5.81	8.2	4.8
1043	5.95	8.4	5.0
1044	6.08	8.7	5.1
1045	6.21	9.0	5.3
1046	6.34	9.2	5.4
1047	6.48	9.5	5.6
1048	6.61	9.8	5.7
1049	6.74	10.0	5.9
1050	6.87	10.3	6.0
1051	7.00	10.6	6.2
1052	7.13	10.8	6.3
1053	7.26	11.1	6.5
1054	7.39	11.4	6.7
1055	7.52	11.6	6.8

Tabla C.3 Tablas de conversión (continuación)



Sacarosa % (m/m)	Índice de refracción a 20 °C	Masa volúmica a 20 °C	Azúcar en g/l	Azúcar en g/kg	Grado alcohólico % vol a 20 °C
10.0	1.34781	1.0390	82.3	79.2	4,89
10.1	1.34798	1.0394	83.4	80.2	4,95
10.2	1.34814	1.0398	84.5	81.3	5,02
10.3	1.34830	1.0402	85.6	82.2	5,09
10.4	1.34845	1.0406	86.6	83.2	5,14
10.5	1.34860	1.0410	87.6	84.1	5,20
10.6	1.34875	1.0414	88.6	85.1	5,26
10.7	1.34890	1.0419	89.7	86.1	5,33
10.8	1.34906	1.0423	90.8	87.1	5,39
10.9	1.34921	1.0427	91.8	88.1	5,45
11.0	1.34936	1.0431	92.9	89.1	5,52
11.1	1.34952	1.0435	94.0	90.0	5,58
11.2	1.34968	1.0439	95.0	91.0	5,64
11.3	1.34984	1.0443	96.1	92.0	5,71
11.4	1.34999	1.0447	97.1	92.9	5,77
11.5	1.35015	1.0452	98.2	94.0	5,83
11.6	1.35031	1.0456	99.3	95.0	5,90
11.7	1.35046	1.0460	100.3	95.9	5,96
11.8	1.35062	1.0464	101.4	96.9	6,02
11.9	1.35077	1.0468	102.5	97.9	6,09
12.0	1.35092	1.0473	103.6	98.9	6,15
12.1	1.35108	1.0477	104.7	99.9	6,22
12.2	1.35124	1.0481	105.7	100.8	6,28
12.3	1.35140	1.0485	106.8	101.9	6,35
12.4	1.35156	1.0489	107.9	102.9	6,41
12.5	1.35172	1.0494	109.0	103.8	6,47
12.6	1.35187	1.0498	110.0	104.8	6,53
12.7	1.35203	1.0502	111.1	105.8	6,60
12.8	1.35219	1.0506	112.2	106.8	6,66
12.9	1.35234	1.0510	113.2	107.8	6,73
13.0	1.35249	1.0514	114.3	108.7	6,79
13.1	1.35266	1.0519	115.4	109.7	6,86
13.2	1.35282	1.0523	116.5	110.7	6,92
13.3	1.35298	1.0527	117.6	111.7	6,99
13.4	1.35313	1.0531	118.6	112.6	7,05
13.5	1.35329	1.0536	119.7	113.6	7,11
13.6	1.35345	1.0540	120.8	114.6	7,18
13.7	1.35360	1.0544	121.8	115.6	7,24
13.8	1.35376	1.0548	122.9	116.5	7,30
13.9	1.35391	1.0552	124.0	117.5	7,37
14.0	1.35407	1.0557	125.1	118.5	7,43
14.1	1.35424	1.0561	126.2	119.5	7,50
14.2	1.35440	1.0565	127.3	120.5	7,56
14.3	1.35456	1.0569	128.4	121.5	7,63
14.4	1.35472	1.0574	129.5	122.5	7,69
14.5	1.35488	1.0578	130.6	123.4	7,76
14.6	1.35503	1.0582	131.6	124.4	7,82
14.7	1.35519	1.0586	132.7	125.4	7,88
14.8	1.35535	1.0591	133.8	126.3	7,95
14.9	1.35551	1.0595	134.9	127.3	8,01

Tabla C4 Tablas de conversión grados de alcohol



Sacarosa % (m/m)	Índice de refracción a 20 °C	Masa volúmica a 20 °C	Azúcar en g/l	Azúcar en g/kg	Grado alcohólico % vol a 20 °C
15.0	1.35567	1.0599	136.0	128.3	8,08
15.1	1.35583	1.0603	137.1	129.3	8,15
15.2	1.35599	1.0608	138.2	130.3	8,21
15.3	1.35615	1.0612	139.3	131.3	8,27
15.4	1.35631	1.0616	140.4	132.3	8,34
15.5	1.35648	1.0621	141.5	133.2	8,41
15.6	1.35664	1.0625	142.6	134.2	8,47
15.7	1.35680	1.0629	143.7	135.2	8,54
15.8	1.35696	1.0633	144.8	136.2	8,60
15.9	1.35712	1.0638	145.9	137.2	8,67
16.0	1.35728	1.0642	147.0	138.1	8,73
16.1	1.35744	1.0646	148.1	139.1	8,80
16.2	1.35760	1.0651	149.2	140.1	8,86
16.3	1.35776	1.0655	150.3	141.1	8,93
16.4	1.35793	1.0660	151.5	142.1	9,00
16.5	1.35809	1.0664	152.6	143.1	9,06
16.6	1.35825	1.0668	153.7	144.1	9,13
16.7	1.35842	1.0672	154.8	145.0	9,20
16.8	1.35858	1.0677	155.9	146.0	9,26
16.9	1.35874	1.0681	157.0	147.0	9,33
17.0	1.35890	1.0685	158.1	148.0	9,39
17.1	1.35907	1.0690	159.3	149.0	9,46
17.2	1.35923	1.0694	160.4	150.0	9,53
17.3	1.35939	1.0699	161.5	151.0	9,59
17.4	1.35955	1.0703	162.6	151.9	9,66
17.5	1.35972	1.0707	163.7	152.9	9,73
17.6	1.35988	1.0711	164.8	153.9	9,79
17.7	1.36004	1.0716	165.9	154.8	9,86
17.8	1.36020	1.0720	167.0	155.8	9,92
17.9	1.36036	1.0724	168.1	156.8	9,99
18.0	1.36053	1.0729	169.3	157.8	10,06
18.1	1.36070	1.0733	170.4	158.8	10,12
18.2	1.36086	1.0738	171.5	159.7	10,19
18.3	1.36102	1.0742	172.6	160.7	10,25
18.4	1.36119	1.0746	173.7	161.6	10,32
18.5	1.36136	1.0751	174.9	162.6	10,39
18.6	1.36152	1.0755	176.0	163.6	10,46
18.7	1.36169	1.0760	177.2	164.6	10,53
18.8	1.36185	1.0764	178.3	165.6	10,59
18.9	1.36201	1.0768	179.4	166.6	10,66
19.0	1.36217	1.0773	180.5	167.6	10,72
19.1	1.36234	1.0777	181.7	168.6	10,80
19.2	1.36251	1.0782	182.8	169.5	10,86
19.3	1.36267	1.0786	183.9	170.5	10,93
19.4	1.36284	1.0791	185.1	171.5	11,00
19.5	1.36301	1.0795	186.3	172.5	11,07
19.6	1.36318	1.0800	187.4	173.5	11,13
19.7	1.36335	1.0804	188.6	174.5	11,21
19.8	1.36351	1.0809	189.7	175.5	11,27
19.9	1.36367	1.0813	190.8	176.5	11,34

Tabla C4 Tablas de conversión grados de alcohol (continuación)



Sacarosa % (m/m)	Índice de refracción a 20 °C	Masa volúmica a 20 °C	Azúcar en g/l	Azúcar en g/kg	Grado alcohólico % vol a 20 °C
20.0	1.36383	1.0817	191.9	177.4	11,40
20.1	1.36400	1.0822	193.1	178.4	11,47
20.2	1.36417	1.0826	194.2	179.4	11,54
20.3	1.36434	1.0831	195.3	180.4	11,60
20.4	1.36451	1.0835	196.5	181.4	11,67
20.5	1.36468	1.0840	197.7	182.3	11,75
20.6	1.36484	1.0844	198.8	183.3	11,81
20.7	1.36501	1.0849	200.0	184.3	11,88
20.8	1.36518	1.0853	201.1	185.3	11,96
20.9	1.36534	1.0857	202.2	186.2	12,01
21.0	1.36550	1.0862	203.3	187.2	12,08
21.1	1.36568	1.0866	204.5	188.2	12,15
21.2	1.36585	1.0871	205.7	189.2	12,22
21.3	1.36601	1.0875	206.8	190.2	12,29
21.4	1.36618	1.0880	207.9	191.1	12,35
21.5	1.36635	1.0884	209.1	192.1	12,42
21.6	1.36652	1.0889	210.3	193.1	12,49
21.7	1.36669	1.0893	211.4	194.1	12,56
21.8	1.36685	1.0897	212.5	195.0	12,63
21.9	1.36702	1.0902	213.6	196.0	12,69
22.0	1.36719	1.0906	214.8	196.9	12,76
22.1	1.36736	1.0911	216.0	198.0	12,83
22.2	1.36753	1.0916	217.2	199.0	12,90
22.3	1.36770	1.0920	218.3	199.9	12,97
22.4	1.36787	1.0925	219.5	200.9	13,04
22.5	1.36804	1.0929	220.6	201.8	13,11
22.6	1.36820	1.0933	221.7	202.8	13,17
22.7	1.36837	1.0938	222.9	203.8	13,24
22.8	1.36854	1.0943	224.1	204.8	13,31
22.9	1.36871	1.0947	225.2	205.8	13,38
23.0	1.36888	1.0952	226.4	206.7	13,45
23.1	1.36905	1.0956	227.6	207.7	13,52
23.2	1.36922	1.0961	228.7	208.7	13,59
23.3	1.36939	1.0965	229.9	209.7	13,66
23.4	1.36956	1.0970	231.1	210.7	13,73
23.5	1.36973	1.0975	232.3	211.6	13,80
23.6	1.36991	1.0979	233.4	212.6	13,87
23.7	1.37008	1.0984	234.6	213.6	13,94
23.8	1.37025	1.0988	235.8	214.6	14,01
23.9	1.37042	1.0993	237.0	215.6	14,08
24.0	1.37059	1.0998	238.2	216.6	14,15
24.1	1.37076	1.1007	239.3	217.4	14,22
24.2	1.37093	1.1011	240.3	218.2	14,28
24.3	1.37110	1.1016	241.6	219.4	14,35
24.4	1.37128	1.1022	243.0	220.5	14,44
24.5	1.37145	1.1026	244.0	221.3	14,50
24.6	1.37162	1.1030	245.0	222.1	14,56
24.7	1.37180	1.1035	246.4	223.2	14,64
24.8	1.37197	1.1041	247.7	224.4	14,72
24.9	1.37214	1.1045	248.7	225.2	14,78

Tabla C4 Tablas de conversión grados de alcohol (continuación)

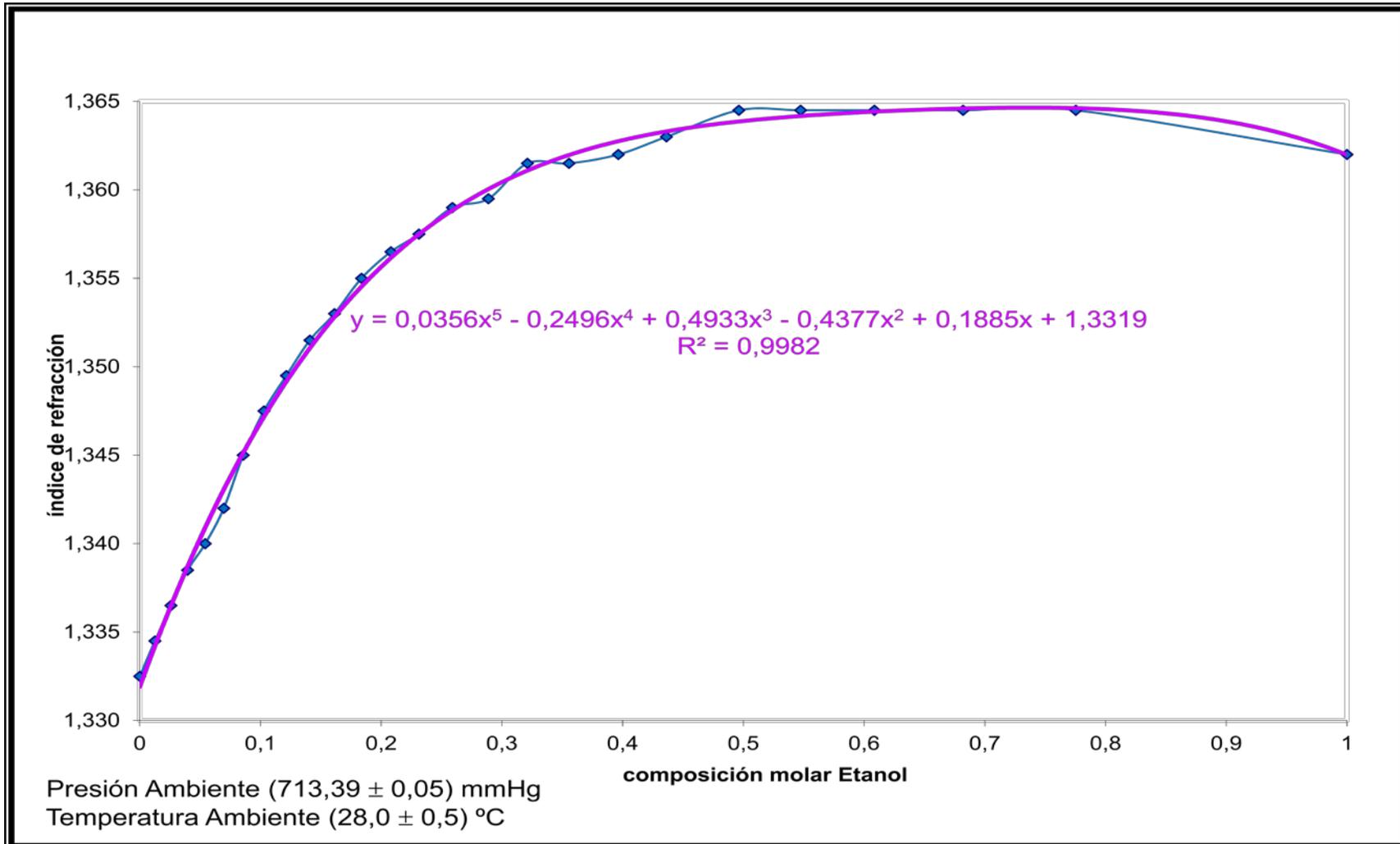


Figura D.1 Curva de la composición molar de Etanol en función del índice de refracción a 20°C

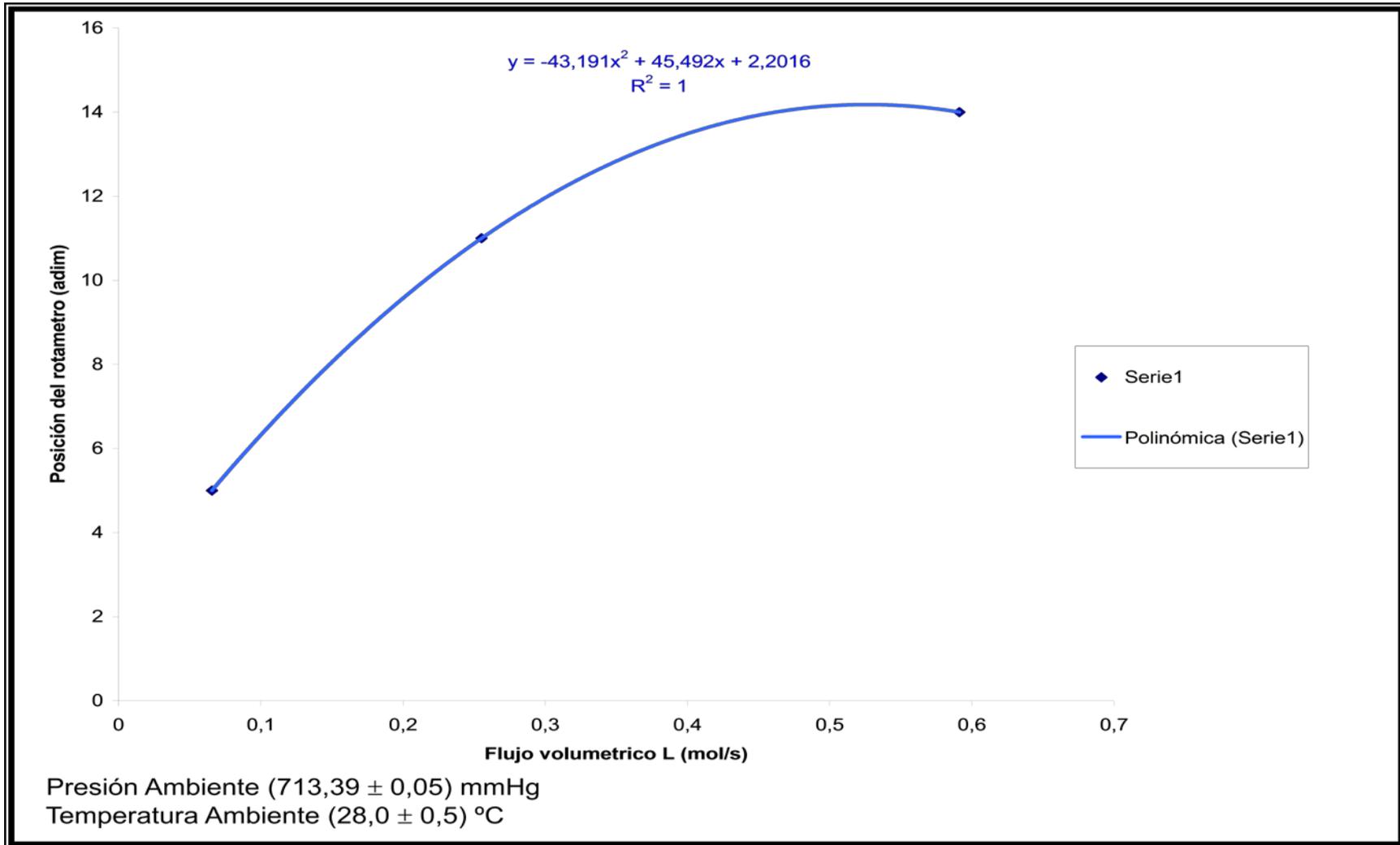


Figura D.2 Curva de calibración del rotámetro de la torre de Rectificación del Laboratorio de Ingeniería Química.

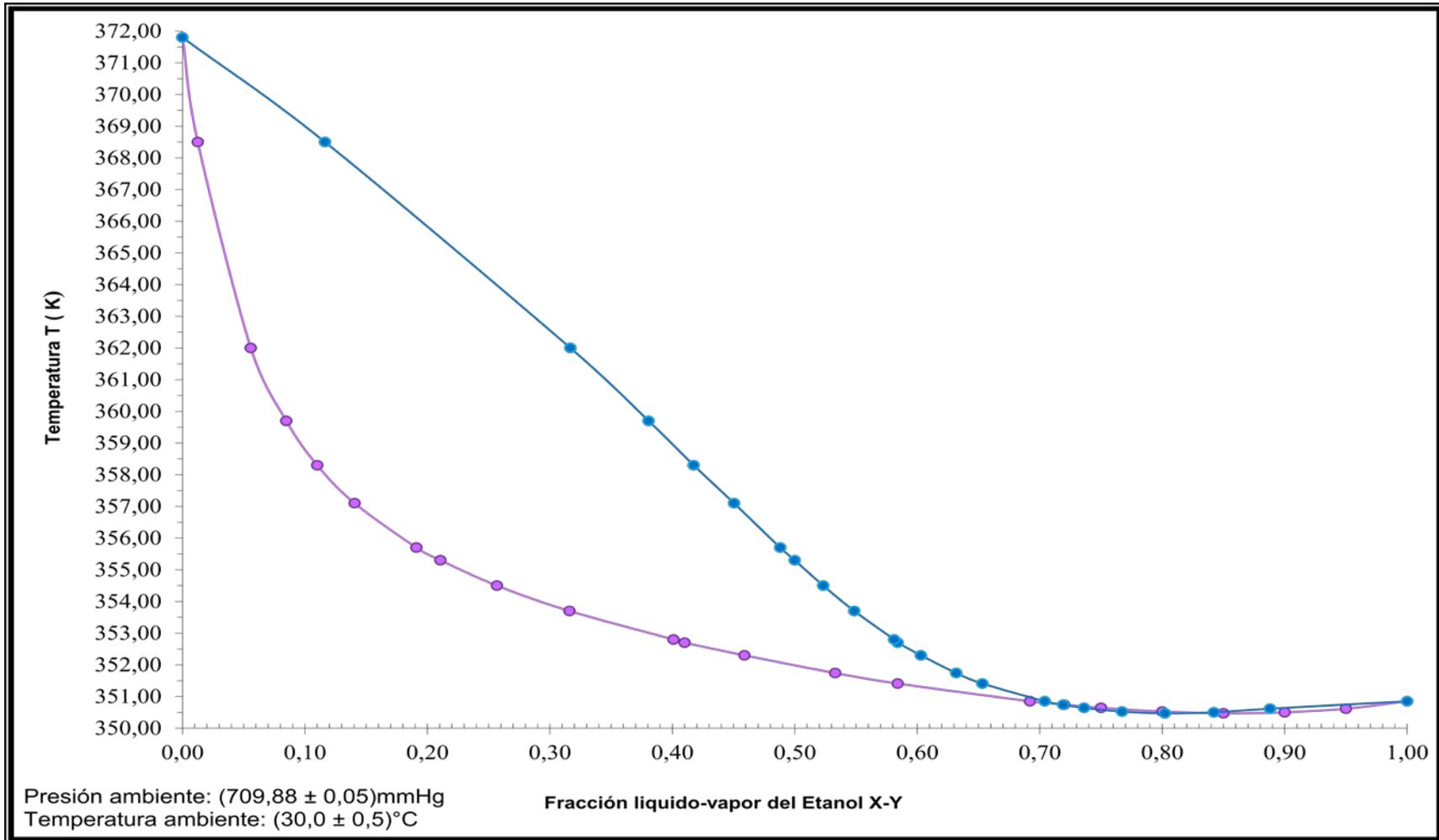


Figura D.3 Diagrama de equilibrio de Líquido-Vapor del sistema binario Etanol-Agua a presión ambiente