



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

ESTUDIO EXPLORATORIO DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL Y DE COPRODUCTOS DE BIOREFINERÍA A PARTIR DE RESIDUOS DE EUCALIPTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA

ROBERTO CARLOS SOTOMAYOR ARAVENA

PROFESOR GUÍA

MARÍA ELENA LIENQUEO CONTRERAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

RODRIGO DONOSO HEDERRA

GERARDO DÍAZ RODENAS

ORIANA SALAZAR AGUIRRE

RENÉ CARMONA CERDA

SANTIAGO DE CHILE

ENERO 2010

*A mis padres, hermana y
amigos incondicionales.*

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA
E INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL.
POR: ROBERTO SOTOMAYOR ARAVENA.
FECHA: 17/03/2010
PROF. GUÍA: SRA. MARÍA ELENA LIENQUEO.

Estudio exploratorio de producción de bioetanol y de coproductos de biorefinería a partir de residuos de eucalipto.

El presente documento reporta el resultado del estudio técnico-económico, a nivel exploratorio, del diseño de una biorefinería para producir bioetanol y los siguientes coproductos: furfural, lignina glioxalada y residuos de levadura. Estos coproductos fueron introducidos en el proceso a evaluar, para ver si la producción de bioetanol, junto a la generación de otros productos, es sustentable económicamente.

Las constantes variaciones en el precio del petróleo, lo altos niveles de CO₂ que contribuyen a la crisis ambiental y el agotamiento inevitable de los recursos fósiles en el futuro, han impulsado la búsqueda de nuevas fuentes que permitan diversificar la matriz energética en Chile. Es así como surge la idea de estudiar el potencial uso del bioetanol, que es un biocombustible que tiene la capacidad de sustituir la gasolina tradicional. La ley en Chile permitirá una mezcla E5 de combustible que estará libre de impuestos, que significa 5% de bioetanol y 95% de gasolina tradicional.

En este trabajo se seleccionó como materia prima el residuo de eucalipto por su potencial y versatilidad de adaptación al suelo chileno. Además, se determinó la región favorable para la instalación de la biorefinería, la cual estará ubicada en la comuna de Angol en la IX Región del país.

La planta podría procesar anualmente 420 mil toneladas de residuos de eucalipto, con la cual se podría producir cerca de 80 mil m³ de bioetanol, que representa un 48% de la demanda estimada para el 2010 en Chile suponiendo un combustible E5. Además el balance de masa muestra que se producen 51 mil toneladas de furfural, 570 mil de lignina glioxalada, 78 mil de residuo de levadura y 85 mil de CO₂. El diseño conceptual de la biorefinería se efectuó usando como pretratamiento la explosión a vapor por poseer mejores rendimientos industrialmente, superiores al 80%. Para la detoxificación se ocupa hidróxido de calcio, compuesto que logra la precipitación de inhibidores normalmente producidos en el pretratamiento. Para la fermentación se escogió el método de sacarificación y fermentación simultánea ocupando la cepa industrial de *Saccharomyces cerevisiae* Red Star. Para la sacarificación se ocupa kit de celulasa comercial. El proceso tiene un rendimiento de 200 lt de bioetanol por tonelada de materia prima que se obtiene a 80 horas de fermentación y a una temperatura de 37 ° C. Para esta etapa se ocuparán 24 fermentadores (reactores batch) de 200 m³ cada uno. Para la destilación del bioetanol se ocupa 2 torres de destilación de 39 platos cada una, en donde en la primera se elimina la mayor cantidad de CO₂, y en la segunda se retira agua obteniendo bioetanol al 95,4%.

Del estudio técnico-económico resultó una inversión inicial de US\$140 MM. El proyecto fue evaluado en un plazo de 20 años, con una tasa de descuento del 15% y bajo dos modos de financiamiento. El primer modo de financiamiento en donde la inversión es hecha en un 100% por interesados, mostró que el precio del bioetanol al que se debe vender para obtener un VAN igual a cero, es de 1.255 US\$/m³, precio que es mayor al que se estima que se venderá el bioetanol en Chile (1.150 US\$/m³), por ende este modelo no tendría ganancias. El otro modelo evaluado consistió en un financiamiento hecho con un 40% por préstamo bancario. En este modelo se obtuvo un precio del bioetanol igual a 1.055 US\$/m³ para obtener un VAN igual a cero, una TIR del 15% y un periodo de recuperación de capital de 7 años. Este precio se considera poco rentable ya que es ligeramente menor al precio al cual se vendería el bioetanol en Chile (1.150 US\$/m³), con lo que el VAN no sería superior a US\$36 MM con una TIR del 20%.

El modelo de biorefinería presentado parece no tener atractivos económicos para los inversionistas, pero bajo condiciones distintas como un alza importante en el precio del petróleo, una baja en el precio de las enzimas, pueden ser cruciales para obtener beneficios económicos importantes. Finalmente se recomienda profundizar la elección de los

coproductos y de las tecnologías involucradas en el proceso con el fin de poder encontrar una configuración económica interesante.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Luis Sotomayor y Lytiz Aravena por brindar siempre el apoyo incondicional.

A mi hermana Alejandra que compartimos tantas cosas.

Gracias a todos por creer en mí.

Padre gracias por escuchar mis oraciones y darme recogimiento.

A mis amigos de toda la vida, Klein, Vero Lelu, Orla, Chio y Ro. Gracias por tanto recuerdo imborrable. Y a los chicos de la pastoral de mi ex-colegio.

A mis amigos de carrera Cami, Sergin, Diega, Jano, Panky, Ale, Marce, Lillo, Carlitos. Gracias por hacer la vida más fácil.

A mis amigos de primer año, Wolfito, Mati, Kraus, Moreno, Felfen, Soto Alto, Soto Chico y Tonijua.

Gracias por hacer que Plan Común sea una simple anécdota.

A Sofi por ayudarme a corregir mi memoria y a Consuelo por su aporte como ingeniera de la madera.

Especialmente a los profesores Dra. María Elena Lienqueo y Dr. Rodrigo Donoso, por estar siempre para todas mis dudas, y por otorgar el apoyo necesario para terminar una muy importante etapa en mi vida.

A los profesores que me formaron más allá de lo académico. El Dr. Jaime San Martín por esa palabra inesperada de ánimo y al profesor Jaime Alee, que fue fundamental para aprender a levantarse una vez que se tiene todo perdido o no se encuentra el rumbo.

A los funcionarios del depto de BT por resolver todos los cachitos (Gina, Irene, Erika y Patricia).

Al Programa Domeyko-Universidad de Chile -“Optimización del Proceso de Tratamiento de Lignocelulosas para obtener Bioetanol” y al Proyecto de Investigación Conjunta en Energías Renovables no Convencionales Chile/Finlandia Conicyt-AKA CFF05 -“Procesos óptimos para el tratamiento de materiales lignocelulósicos para la producción de bioetanol”, por ofrecer ideas y técnicas nuevas.

A la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, por darme un millón penas, alegrías, fracasos, éxitos y por darme un parte de lo que soy como persona.

A Celia.

A cuanto error que cometí. Errores, gracias por darme la oportunidad de enmendar.

Y finalmente a todos aquellos que estuvieron a lo largo de este sacrificado pero hermoso camino.

Y no menos importante, a ti café, y a ti mi perro, por esas interminables noches de estudio.

Amada cerveza que ayudaste en la terraza a pasar los tragos amargos.

Imposible olvidarme de ti. Gracias Cotito por todo, gracias Coto.

A todos, nos vemos pronto...pero nunca tan pronto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XIV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES GENERALES.....	1
1.2. MARCO TEÓRICO.....	3
1.2.1. Biocombustible.....	3
1.2.2. Ventajas y desventajas del uso de bioetanol.....	5
1.2.3. Biorefinería.....	6
1.3. OBJETIVOS.....	7
1.3.1. Objetivo general.....	7
1.3.2. Objetivos específicos.....	7
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	8
1.5. METODOLOGÍA.....	9
1.6. ALCANCES.....	10
2. ESTUDIO DE MERCADO.....	11
2.1. ESCENARIO MUNDIAL.....	11
2.2. EMISIONES DE CO₂ A NIVEL INTERNACIONAL.....	13
2.3. BIOETANOL EN EL MUNDO.....	15
2.4. PRECIO DEL BIOETANOL.....	16
2.5. PLANTAS DE BIOETANOL.....	18
2.6. ESCENARIO ENERGÉTICO NACIONAL.....	19
2.7. BIOCOMBUSTIBLE A NIVEL LOCAL.....	21

3. ESTUDIO LEGAL	23
3.1. ESCENARIO INTERNACIONAL	23
3.2. ESCENARIO NACIONAL	24
3.2.1. Marco legislativo.....	24
3.2.2. Procedimiento tributario.....	25
3.2.3. Especificaciones técnicas.....	25
3.2.4. Impacto ambiental.....	26
4. ESTUDIO TÉCNICO	27
4.1. BIOETANOL	27
4.1.1. Propiedades.....	27
4.2. MATERIA PRIMA	28
4.2.1. Caracterización del bosque chileno.	30
4.2.2. Especie a utilizar.....	32
4.2.3. Caracterización del eucalipto.....	33
4.2.4. Tipos de residuos	34
4.2.5. Cantidad de desecho de eucalipto.....	35
4.3. UBICACIÓN.	36
4.4. PROCESO	39
4.4.1. Producción de bioetanol	39
4.4.2. Coproductos a producir.....	40
4.4.2.1. Furfural.....	42
4.4.2.2. Lignina glioxalada.....	43
4.4.2.3. Levadura.....	45
4.4.2.4. CO ₂	46
4.5. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	47
4.5.1. Molienda.....	47
4.5.2. Pretratamiento	48
4.5.3. Separación sólido/líquido.....	50
4.5.4. Neutralización y detoxificación.....	50
4.5.5. Centrifugación.....	52
4.5.6. Separación triple de celulosa, hemicelulosa y lignina.....	52
4.5.7. Hidrólisis enzimática y fermentación simultánea (SFS).....	52
4.5.8. Separación de levadura	55
4.5.9. Destilación	55
4.5.10. Deshidratación	56
4.5.11. Producción de furfural.....	56
4.5.12. Producción de lignina glioxalada.....	57
4.5.13. Recolección de RILes y RISes.....	57
4.6. BALANCES DE MASA.	57
4.6.1. Lavado	58
4.6.2. Molienda.....	58

4.6.3. Pretratamiento por explosión a vapor.	60
4.6.4. Detoxificación.	61
4.6.5. Separación de celulosa, hemicelulosa y lignina.	62
4.6.6. SFS.	63
4.6.7. Destilación de bioetanol.	64
4.6.8. Deshidratación de bioetanol.	66
4.6.9. Producción de furfural.	66
4.6.10. Producción de lignina glioxalada.	67
4.6.11. Tratamiento de aguas residuales.	68
4.6.12. Resumen de balance de masa de los productos.	68
4.7. ENERGÍA DEL PROCESO	69
4.8. CAPACIDAD DE LA PLANTA	70
4.9. DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS	71
4.9.1. Equipos del proceso.	71
4.9.1.1. Fermentadores.	73
4.9.1.2. Destilador de etanol.	75
4.9.2. Diseño de tanques de almacenaje.	77
4.10. LAYOUT DE LA PLANTA	78
5. ESTUDIO ECONÓMICO	80
5.1. PROCEDIMIENTO	80
5.1.1. Procedimiento según el producto de biorefinería.	80
5.2. COSTO DE EQUIPOS	81
5.2.1. Comparación de costos de equipos con plantas similares.	85
5.3. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	86
5.3.1. Costos fijos.	86
5.4. COSTOS OPERACIONALES	87
5.4.1. Costos variables de operación.	87
5.4.2. Costos fijos de operación.	89
5.4.2.1. Planilla de sueldos.	89
5.4.2.2. Costos de mantención de equipos y suministros de oficina.	90
5.5. CAPITAL DE TRABAJO	91
5.6. FLUJO DE CAJA	92
5.6.1. Flujo de caja con inversión externa sin financiamiento.	92
5.6.1.1. Horizonte de tiempo.	95
5.6.1.2. Tasa de descuento e impuesto de primera categoría.	95
5.6.1.3. Depreciación de equipos y tanques de almacenamiento.	96
5.6.2. Flujo de caja con inversión financiada externamente.	96
5.6.2.1. Financiamiento.	98

5.7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	99
5.7.1. Análisis de sensibilidad del precio de venta del bioetanol.....	100
5.7.2. Análisis de sensibilidad del precio de la materia prima.....	101
5.7.3. Análisis de sensibilidad a la venta de lignina pura, no como lignina glioxalada.....	102
5.7.4. Análisis de sensibilidad del precio de la enzima.....	102
5.7.5. Análisis de sensibilidad a la inversión.....	102
5.7.6. Análisis de sensibilidad sin la venta de CO2.....	104
6. ESCENARIO FUTURO	105
6.1. PROYECCIONES EN EL MUNDO	105
6.2. PROYECCIONES EN CHILE	106
7. CONCLUSIONES	108
8. BIBLIOGRAFÍA	110
10. ANEXOS	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proyecciones de consumo y descubrimiento de petróleo mundialmente.	2
Figura 2: Ciclo de fijación del CO ₂	4
Figura 3: Demanda de energía primaria mundial.....	12
Figura 4: Precio del petróleo v/s producción mundial de bioetanol.....	16
Figura 5: Brasil: Exportación de bioetanol.....	17
Figura 6: Legislación sobre biocombustibles en Latinoamérica.....	23
Figura 7: Composición de una pared celular.....	29
Figura 8: Monómeros que conforman la lignina.....	29
Figura 9: Ubicación de la planta.....	38
Figura 10: Diagrama simplificado de la producción de bioetanol.....	40
Figura 11: Derivados posibles de biomasa.....	41
Figura 12: Molécula de furfural.....	42
Figura 13: Diagrama de bloques del proceso de producción de etanol y subproductos.....	51
Figura 14: Hidrólisis de celulosa.....	53
Figura 15: Fermentación de pentosas y hexosas.....	53
Figura 16: Diagrama de flujos.....	59
Figura 17: Dimensiones de un reactor.....	75

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Participación mundial en la producción de bioetanol.	3
Gráfico 2: Matriz energética mundial en el año 2007.	11
Gráfico 3: Consumo de combustible por regiones.	12
Gráfico 4: Emisiones de CO ₂ por tipo de energía.	13
Gráfico 5: Distribución global de emisiones de CO ₂	14
Gráfico 6: Emisiones de CO ₂ por sector industrial.	14
Gráfico 7: Producción de bioetanol en la Unión Europea.	15
Gráfico 8: Precio FOB del bioetanol en Brasil.	16
Gráfico 9: Matriz energética nacional al 2006.	19
Gráfico 10: Dependencia externa de la matriz energética.	19
Gráfico 11: Demanda de gasolina en Chile.	21
Gráfico 12: Repartición bosque chileno.	30
Gráfico 13: Especies nativas.	31
Gráfico 14: Plantación total por regiones.	31
Gráfico 15: Distribución de especies plantadas.	32
Gráfico 16: Capacidad de producción de paneles de Arauco.	44
Gráfico 17: Análisis de sensibilidad.	100
Gráfico 18: Evolución del precio de las celulasas.	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Plantas de bioetanol en el mundo.....	18
Tabla 2: Paridad de importación en el año 2006.....	22
Tabla 3: Propiedades del etanol en relación a gasolina y petróleo.....	27
Tabla 4: Composición química de residuo de Eucaliptus globulus Labill.	34
Tabla 5: Desecho por tipo de bosque	35
Tabla 6: Estimación de residuos de eucalipto	36
Tabla 7: Resumen de residuo a captar por región y distancia a Laja y Angol respectivamente... 37	
Tabla 8: Producción de furfural y alcohol furfuril en China el 2005.....	42
Tabla 9: Composición de lignina glioxilada.	43
Tabla 10: Método de los principales pretratamientos.	49
Tabla 11: Composición de la agua de lavado.....	58
Tabla 12: Composición específica de la corriente de entrada a la molienda.	60
Tabla 13: Composición de inhibidores.....	61
Tabla 14: Composición de la corriente sólida de entrada a la triple separación.	62
Tabla 15: Composición a la salida de la triple separación.	62
Tabla 16: Composición de enzimas, nutrientes y levadura.....	63
Tabla 17: Composición a la salida del fermentador.	64
Tabla 18: Composición de la mezcla que sale como líquido del destilador.....	65
Tabla 19: Composición de la rectificación.....	65
Tabla 20: Composición de la destilación de bioetanol.	65
Tabla 21: Composición final del bioetanol.	66
Tabla 22: Composición final de furfural.....	67
Tabla 23: Composición final de lignina glioxalada.....	67
Tabla 24: Composición de las aguas residuales a tratar.	68
Tabla 25: Resumen nivel de producción.	68
Tabla 26: Capacidad de planta.	70
Tabla 27: Equipo por etapa de producción.	72
Tabla 28: Resumen de características de equipos.....	74
Tabla 29: Flujos molares.....	76
Tabla 30: Fracciones molares	76
Tabla 31: Razones de proporción de tanques de almacenamiento.	77
Tabla 32: Dimensionamiento de tanques de almacenamiento.	78
Tabla 33: Costos de equipos.....	82
Tabla 34: Costo equipos	84
Tabla 35: Costos total de equipos y almacenamiento.....	85
Tabla 36: Comparación en costos de equipos con plantas similares.	85
Tabla 37: Costos de equipos instalados.	86
Tabla 38: Costo de inversión.	86
Tabla 39: Costos de insumos.	88
Tabla 40: Resumen plana de sueldo anual por área.....	90
Tabla 41: Costos de mantención y suministros.....	91

Tabla 42: Capital de trabajo.	91
Tabla 43: Producción y ganancia anuales.	93
Tabla 44: Flujo caja con financiamiento y un VAN=0. Valores en millones de US\$.	94
Tabla 45: Condiciones del flujo de caja.	95
Tabla 46: Flujo caja con financiamiento y un VAN=0. Valores en millones de US\$.	97
Tabla 47: Condiciones de préstamos.	98
Tabla 48: Clasificación Moody.	99
Tabla 49: Conversiones usadas.	114
Tabla 50: Propiedades de compuestos químicos importantes.	115

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Especificación de calidad para bioetanol	116
Anexo 2: Puntos del D.S.N 995 de 2001 a la cual está sometido este estudio.	117
Anexo 3: Composición del bosque nativo por regiones.	118
Anexo 4: Composición de plantaciones por regiones.....	119
Anexo 5: Residuos de eucalipto de la VIII región y distancia relativa a Laja y Angol.	120
Anexo 6: Residuos de eucalipto de la IX región y distancia relativa a Laja y Angol.	122
Anexo 7: Memoria de cálculo del balance de masa para SFS.	123
Anexo 8: Resumen balance de masa.	126
Anexo 9: Ecuaciones de diseño de equipos.	130
Anexo 10: Curva equilibrio etanol-agua.....	131
Anexo 11: Diagrama McCabe-Thiele.....	132
Anexo 12: Layout de la planta.	133
Anexo 13: Costos tanques de almacenamiento.	134
Anexo 14: Memoria de cálculo de electricidad consumida.	135
Anexo 15: Plana de sueldos.....	136
Anexo 16: TIR del análisis de sensibilidad.	137
Anexo 17: Flujo caja. Precio venta bioetanol =1.150 US\$/m ³ . Valores en millones de US\$.	138
Anexo 18: Flujo caja. Precio venta bioetanol = 650 US\$/m ³ . Valores en millones de US\$.	139
Anexo 19: Flujo caja. Precio venta bioetanol =1.300US\$/m ³ . Valores en millones de US\$.	141
Anexo 20: Flujo caja. Precio biomazas triplicado y VAN = 0. Valores en millones de US\$.	142
Anexo 21: Flujo caja. Precio lignina 1US\$/kg y VAN=0. Valores en millones de US\$.	143
Anexo 22: Flujo de caja. Precio enzima un décimo del valor actual y VAN =0. Valores en millones de US\$.	144
Anexo 23: Flujo caja. Capacidad de producción de planta de 162 mil m ³ y VAN =0. Valores en millones de US\$.	145
Anexo 24: Flujo caja sin venta de CO ₂ . Valores en millones de US\$.	146

1. INTRODUCCIÓN

Los tiempos en que la energía tenía un precio accesible para todos y la extracción de petróleo estaba asegurada para satisfacer la demanda, se han ido; nunca más volveremos a tener la seguridad absoluta que vamos a poder ocupar energía en el momento que se desee, es por este que se deben buscar nuevas fuentes de energías, energías que no contaminen y que perduren en el tiempo. La biomasa puede ser una posible solución al problema antes señalado, la biomasa además de ser una fuente directa de energía (electricidad y calor), puede ser transformada, en otros productos como biomateriales y biocombustibles [1].

Estos biomateriales y biocombustibles pueden reemplazar directamente a los productos derivados del petróleo, como son plásticos, nylon, combustibles, entre otros. La interrogante es ¿qué pasará cuando se hayan agotado el petróleo?, ¿de dónde se obtendrán estos productos que son esenciales para la vida?. Una posible respuesta sea una biorefinería de biomasa, que a partir de material lignocelulósico se pueden obtener diversos tipos compuestos, como los que se extinguirán cuando las fuentes de petróleo se agoten. Son por estas razones que el estudio que se presenta a continuación, pretende dar una solución al problema mundial de la crisis energética.

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

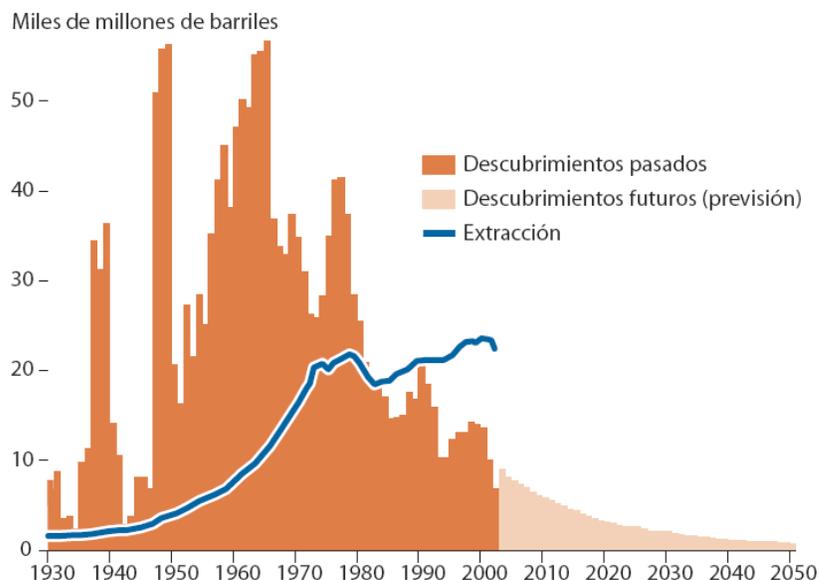
Actualmente, en Chile existe una clara dependencia de energías provenientes del medio exterior (petróleo, gas natural y carbón). Esta situación que se ve acentuada por factores como las constantes fluctuaciones de los precios del petróleo [2]¹ y del gas, por la creciente preocupación por el medio ambiente y el inevitable agotamiento de los recursos no renovables (Figura 1) [3]. Todo esto ha llevado a que el país tome conciencia de la necesidad del desarrollo de energías renovables y por del uso eficiente de éstas, sugiriendo así la idea de producir biocombustibles capaces de sustituir parcialmente el uso de combustibles fósiles.

Los biocombustibles se enmarcan dentro de las llamadas energías renovables no convencionales (ERNC); su desarrollo causa un impacto directo en la sociedad y en las economías locales, haciendo que éstas no sean tan dependientes de la importación de combustible.

¹ Los números entre paréntesis de corchete corresponden a referencias bibliográficas que aparecen en la parte final del estudio.

Tal como lo muestra la Figura 1, se observa un aumento progresivo en el consumo de petróleo. Esta situación es preocupante si se considera que se estima que hacia el 2030 habrá aumentado en un 50% la demanda de energía con respecto a la actual (1,6% promedio anual), debido al crecimiento sostenido de la necesidad de energía. Se calcula, además, que un 65% de esta demanda provendrá de países en desarrollo, en donde el crecimiento económico y de la población es mayor [4].

Figura 1: Proyecciones de consumo y descubrimiento de petróleo mundialmente.



Fuente: ASPO, marzo 2004.

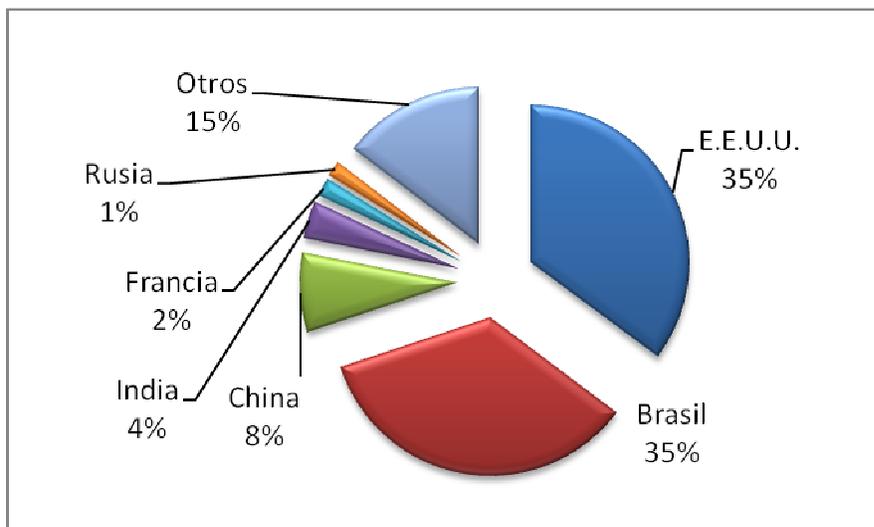
En este escenario, los biocombustibles resultan relevantes porque reducen los efectos que causa el transporte sobre el medioambiente, debido a que el CO₂ liberado al ambiente es captado por la biomasa que será utilizada para producir este biocombustible.

Actualmente todos los automóviles con convertidor catalítico pueden operar con una mezcla de 90% de gasolina y 10% de etanol (biocombustible), sin tener que adaptar el motor. Existe una nueva tecnología en motores de autos que es capaz de funcionar con mezclas de combustibles hasta un 85% de etanol (Flex-Fuel) [5]. Brasil es pionero en esta materia en donde desde el 2003, se ha introducido esta nueva tecnología teniendo ya en el mercado más de 60 modelos distintos que pueden funcionar con gasolina normal o con etanol [6].

En la actualidad los principales productores de bioetanol son Brasil y Estados Unidos y en conjunto producen sobre un 70% de la producción mundial (Gráfico 1).

En el año 2005 la producción total fue de 36,9 millones de toneladas de etanol, 13% más que al año anterior [4]. El etanol producido proviene principalmente de caña de azúcar (Brasil) y de maíz (Estados Unidos) [7].

Gráfico 1: Participación mundial en la producción de bioetanol.



Fuente: Almada, 2006.

El costo de producir etanol oscila en un rango amplio de valores. Por ejemplo, en Brasil cuesta entre 14-19 US\$/GJ (Gigajoule) y en Estados Unidos entre 20-24 US\$/GJ, pero se proyecta que se reduzca el precio a 6,5-14 US\$/GJ y 6,5-16 respectivamente, si se logra integrar procesos, reducir el costos de enzimas involucradas en la generación de etanol, y si se usan los residuos generados en la producción de bioetanol de manera eficiente [3].

1.2. MARCO TEÓRICO

1.2.1. Biocombustible

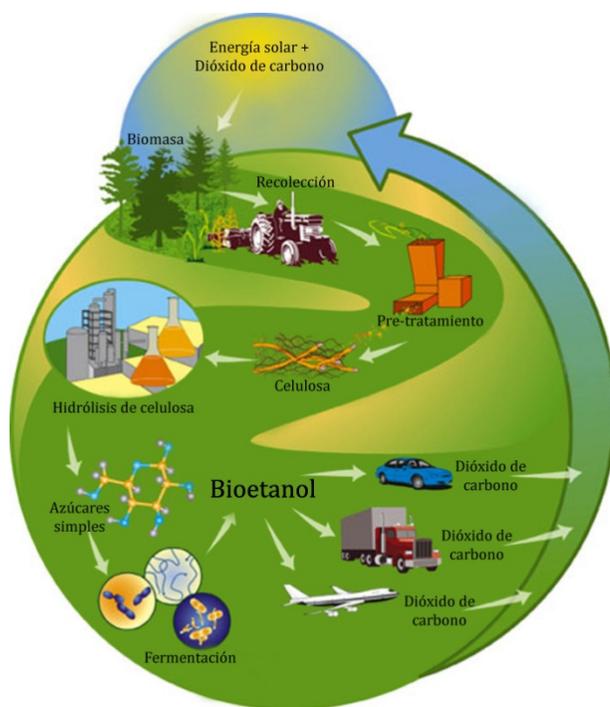
Se llama biocombustible a cualquier combustible derivado de biomasa. Es una fuente de energía renovable, en donde la energía solar es reconvertida a energía química por las plantas. Esta energía química queda almacenada en forma de distintos azúcares como lo son la glucosa, manosa, xilosa y arabinosa[8].

Existen tres tipos de biocombustibles que son: bioetanol, biodiesel y biogás. El primero puede ser generado a partir de maíz o caña de azúcar (primera generación²), residuos agrícolas y forestales (material lignocelulósico, es decir, segunda generación³). El segundo tipo de biocombustible puede ser producido a partir de microalgas y aceites o lípidos usados o sin usar; finalmente el tercero que es una mezcla de metano (CH_4) con dióxido de carbono (CO_2) y con monóxido de carbono (CO) [9].

El porqué del uso de los biocombustibles viene dado por el ciclo de fijación de CO_2 que se genera con el uso de este tipo de energía renovable, no así en el consumo de combustible fósil común, como se explica a continuación.

Este ciclo de fijación de CO_2 consiste en que el CO_2 generado en la combustión de bioetanol (combustión en el motor de un vehículo), es captado por las plantas en el proceso de fotosíntesis, plantas o biomasa que serán utilizadas para producir bioetanol (Figura 2).

Figura 2: Ciclo de fijación del CO_2



Fuente: Blog de química [10].

² Los biocombustibles de primera generación utilizan materias primas de uso alimentario (como el maíz, la caña de azúcar o la soja) y tecnologías de proceso como la fermentación (para el etanol) y la transesterificación (para el biodiésel).

³ Los biocombustibles de segunda generación se obtienen a partir de materias primas que no tienen usos alimentarios.

Cuando se produce bioetanol el balance de dióxido de carbono en el medio ambiente es neutro [11], debido a que no se produce acumulación de éste en la atmósfera. En cambio con combustibles fósiles, el dióxido de carbono que se genera no se vuelve a captar debido a que el petróleo se extrae directamente del suelo terrestre, con la consiguiente acumulación de CO₂ en la atmósfera. Esta acumulación de CO₂, se produce porque el suelo no es capaz de captar el CO₂ como si lo hacen las plantas, esta es la diferencia principal en el ciclo de fijación del dióxido de carbono.

Cerca del 91% de la producción mundial de etanol se hace a través del proceso de fermentar compuestos orgánicos, el restante 9% ha sido obtenido vía hidratación del etileno [12].

1.2.2. Ventajas y desventajas del uso de bioetanol.

El bioetanol posee ventajas comparativas importantes frente a las gasolinas normales, como por ejemplo que es una fuente limpia de energía, que puede ser mezclado con gasolina, logrando que no se necesite EMTB (éter metil tert-butílico) como aditivo en los combustibles. Además, mejora el índice de octanaje del combustible, tiene un mayor calor de vaporización, lo que se traduce en un funcionamiento más eficiente del motor [12]. Al mismo tiempo la combustión de bioetanol genera CO₂ y agua (en el motor de un automóvil) que pueden ser captados por la biomasa [13].

Junto a estas ventajas, el bioetanol también posee aspectos negativos como por ejemplo que tiene un calor de combustión menor al de la gasolina, lo que se traduce en un rendimiento de kilómetros por litro menor al que se puede obtener con la gasolina normal.

Otra desventaja está asociada a la producción misma de bioetanol, debido a su elevado costo de producción que viene dado por el uso de enzimas en la hidrólisis enzimática, y por los requerimientos de insumos necesarios para llevar a cabo la fermentación del bioetanol. Este punto es crucial en el análisis del trabajo, ya que si los costos de producción de gasolina fueran más altos que los del etanol, el uso de enzimas costosas no sería una desventaja.

El bioetanol es el biocombustible más utilizado entre los tres tipos mencionados anteriormente. Los motores convencionales pueden funcionar con mezclas de combustible con etanol. Por ejemplo E5, que es una mezcla de 95% gasolina y 5% de etanol [12], puede funcionar en autos normales sin dañar el motor o causar inconvenientes en la combustión de la mezcla.

Este tipo de mezclas se está usando en países como Brasil y Estados Unidos, principales productores de bioetanol a nivel mundial. En Brasil, por ejemplo, ya se ha cambiado la

tecnología de combustión de los motores, a tal nivel que se permite el uso de combustibles E85-E95.

Actualmente los altos costos de producción de bioetanol de segunda generación, han hecho que se busquen nuevos procesos y formas de obtener este recurso. Es por esto que ha surgido con fuerza el concepto de bioetanol de segunda generación que corresponde al bioetanol que se produce a partir de material lignocelulósico (resto agrícola o forestal). La producción de este nuevo combustible tiene la ventaja que no compite por tierras cultivables para su elaboración ya que no genera impacto en el uso del suelo como lo hace la caña de azúcar y el maíz. Es el caso de Estados Unidos y Brasil en donde el precio de los alimentos (maíz y caña de azúcar respectivamente) han subido, debido a su utilización para fabricar bioetanol.

1.2.3. Biorefinería

El concepto de biorefinería no está muy claro aún, ya que la literatura lo usa hace poco tiempo. Por esto es difícil dar una definición exacta de que es una biorefinería, pero sí se puede mencionar con exactitud que este concepto viene a dar una posible solución al problema de cómo hacer viable la producción de biocombustibles.

El término biorefinería viene del concepto de refinería de petróleo, en la cual, a partir de petróleo se puede obtener otros productos derivados. En el caso de biorefinería es lo mismo, en el cual a partir de biomasa se pueden desarrollar otros subproductos, además de biocombustibles, como son biomateriales, energía y productos químicos [1].

El biocombustible de segunda generación aún tiene costos asociados mayores que la producción de gasolina a partir del petróleo, pero surge como respuesta a la escasez de éste y al agotamiento inevitable del recurso fósil. Los costos de producción de bioetanol están directamente asociados al tipo de materia prima usada y al tipo de proceso utilizado.

Es por esto que también se investiga líneas alternativas de desarrollo de coproductos generados del mismo proceso de producción de bioetanol, que hagan que los costos disminuyan (o que los ingresos aumenten) y que se generen incentivos reales a construir plantas de producción de etanol a partir de material lignocelulósico. Esta co-generación se enmarca dentro de la línea de biorefinería, es decir, que se generan productos secundarios a partir de las corrientes no utilizadas en la producción de etanol.

Actualmente el principal uso dado a este tipo de corrientes es como fuente de energía, que producen gas que es usado en calderas y generación de electricidad. Además, existen otros

productos que pueden ser elaborados de estas corrientes no utilizadas como son productos furanos provenientes de xilosas, adhesivos naturales, provenientes de lignina y biofertilizantes los que se originan del tratamiento de RISes⁴ y RILes⁵ [14].

Un ejemplo de lo expuesto es lo que ocurre en Örnsköldsvik, Suecia, donde se encuentra actualmente operando una planta piloto que produce etanol a partir de madera. En esta planta se hacen variaciones de la cadena de proceso para encontrar la configuración óptima que asegure eficiencia y bajos costos. Otros modelos de plantas lo son Iogen (planta biotecnológica canadiense) que utiliza residuos agrícolas para generar etanol, una planta que depende de DOE (Departamento de Energía de Estados Unidos) que produce biocombustible a partir de material lignocelulósico, BCI (BC International) planta estadounidense que posee licencia para fermentar otras azúcares de seis carbonos diferentes de glucosa⁶, entre otras [15].

1.3. OBJETIVOS

Los objetivos de la presente memoria se detallan a continuación.

1.3.1. Objetivo general

Realizar un estudio exploratorio de producción de bioetanol y de coproductos de biorefinería a partir de residuos de eucalipto.

1.3.2. Objetivos específicos

- Estudiar del mercado internacional y nacional del bioetanol.
- Estudiar las características y disponibilidad de residuos de eucalipto como materia prima. Identificando las regiones favorables para la instalación de una planta de producción de bioetanol a partir de eucalipto.
- Estudiar los procesos involucrados en la producción de bioetanol y de coproductos, para diseñar conceptualmente una biorefinería.
- Investigar y seleccionar los productos provenientes de biorefinería que sean factibles de producir.

⁴ RISes: Residuos Industriales Sólidos.

⁵ RILes: Residuos Industriales Líquidos.

⁶ La glucosa es un azúcar de 6 carbonos.

- Elaborar balances de masas del proceso productivo, para dimensionar equipos y tanques de almacenamiento.
- Estimar la inversión de planta, los costos asociados a la producción del biocombustible, para valuación de viabilidad económica de producción de bioetanol y coproductos realizando estudios de sensibilidad.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El trabajo consiste en realizar un estudio exploratorio de la producción de bioetanol y de productos de biorefinería a partir de residuos de eucalipto en Chile. Lo que se quiere lograr es encontrar una manera viable, para que la producción de bioetanol sea un proyecto rentable. Para esto se evaluó el diseño de una biorefinería como una posible solución.

El uso de bioetanol como combustible, es una opción de la escasa gama de posibilidades de combustibles que no generan impacto ambiental negativo, y a las exiguas vía de reemplazo del petróleo como principal fuente de energía para el transporte. Es por ello, que el desarrollo de tecnologías y de estudios con respecto a esta materia, son imprescindibles y fundamentales para lograr la diversificación de la matriz energética en Chile.

El desarrollo de nuevas tecnologías en el ámbito de la producción de biocombustible y la creación de biorefinerías darán pie a que se desarrollen y se formen instituciones dedicadas a generar conocimiento en cuanto a la producción de bioetanol. Un ejemplo de ello es el Consorcio Bioenercel⁷, consorcio chileno formado por universidades y empresas privadas, que se dedica al estudio y al posicionamiento de la bioenergía en Chile a partir de material lignocelulósico.

Además, el diseño de una biorefinería es de suma importancia, ya que este tipo de proyectos son totalmente nuevos y no existe suficiente información que detalle cómo funciona una biorefinería. Es por esto que se requiere que se investigue más sobre este tema, para ver si esta forma de producción hace que un proyecto de generación de bioetanol de segunda generación sea sustentable económicamente.

⁷ Consorcio creado entre CMP, Masisa, Arauco, Fundación Chile, la Universidad de Concepción y la Universidad Católica de Valparaíso. Dedicado a la generación de conocimiento y creación de plantas de bioetanol en Chile, además de proteger y comercializar logros obtenidos.

1.5. METODOLOGÍA

El trabajo se realizó en base a una búsqueda bibliográfica del material disponible tanto en internet, como en publicaciones que se relacione con las técnicas, procesos y las proyecciones de bioetanol producido a partir de material lignocelulósico. En forma específica se buscó información y literatura que apunten al desarrollo de los procesos en forma industrial, ya que éstos otorgarán el real conocimiento que se necesita.

Cabe señalar que, además de la búsqueda bibliográfica, este trabajo cuenta con información recopilada de estudios realizados en forma previa por alumnos del Departamento de Ingeniería Civil Industrial de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y basado en los resultados de experimentos que se han desarrollado en el Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología de la misma casa de estudios en el 2009. La información que se obtenga de ambos Departamentos originó las condiciones iniciales que ayuden a dar comienzo a la investigación, como por ejemplo, la composición de las materias primas, y el panorama global de la situación del mercado de bioetanol en Chile.

Otro punto de suma importancia son las entrevistas que se realizaron con expertos en el tema, sobre todo en el ámbito de desarrollo de nuevos productos y de nuevos conceptos en torno a las biorefinerías. Es así como se puede mencionar a:

1. Dra. Mercedes Ballesteros: perteneciente al CIEMAT⁸, experta en bioetanol de segunda generación, quien orientó sobre separaciones de componentes de biomasa.
2. Rodrigo Caro: ingeniero civil químico que trabaja en CMPC, quien otorgó un panorama amplio de los tipos y costos de los residuos madereros en Chile.
3. José Valdés: ingeniero de planta de CMPC, quien respondió aspectos técnicos de la madera y de la logística de transporte de la cosecha del bosque a la planta de proceso.
4. Rodrigo Torres: encargado de importaciones de Ecu Line, empresa de transporte naviero y aéreo. Torres ayudó a calcular los precios de importación de los equipos diseñados para la biorefinería.

Además, fueron claves la asistencia a congresos y seminarios en que se habló de este tema, en especial porque ayudaron a realizar los contactos antes mencionados. En particular se asistió a un seminario sobre energías renovables realizado en Santiago en el mes de Agosto del presente año 2009 y a un taller de biocombustibles organizado por BioTop en la Pontificia Universidad

⁸ Centro de Investigación Energética, Medioambientales y Tecnológicas. España.

Católica de Valparaíso, durante Septiembre del año en curso. BioTop es una asociación entre la Unión Europea y Latinoamérica que tiene por objetivo maximizar las sinergias técnicas y necesidades de América Latina [16].

1.6. ALCANCES

El estudio permitirá adquirir una visión preliminar de la problemática existente en la producción de bioetanol a partir de residuos de eucalipto. Los problemas que se pueden comprender en este estudio abarcan desde los pretratamientos que debe tener la materia prima (desechos forestales) hasta los co-productos que se generarán en la biorefinería para hacer que el proceso sea viable económicamente. Además, se entenderá de mejor manera la situación actual de Chile con respecto a la situación energética y a la cantidad de materia prima disponible.

En este estudio no se incluirá temas de post cadena de producción, como por ejemplo la distribución de bioetanol producido o de los subproductos, ni tampoco se abordará temas relacionados a un plan de negocio para la comercialización de los elementos obtenidos.

Tampoco se incluirán temas financieros con respecto a implementación del proyecto. Si bien el estudio puede arrojar resultados que pudiesen incentivar la construcción de una planta, en este estudio sólo se llegará hasta la evaluación técnica-económica del proyecto.

Asimismo, temas sobre el impacto social y ambiental que pueden causar una planta de bioetanol tampoco serán analizados.

Cabe señalar que esta memoria permitirá saber qué coproductos de biorefinería pueden ser elaborados además de bioetanol, para que el proyecto en su totalidad genere incentivos económicos a futuros inversores.

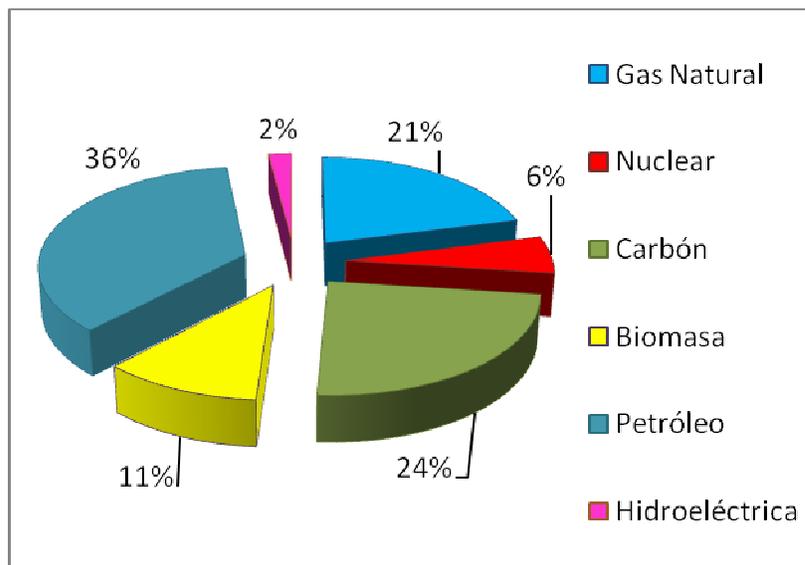
Por último y no menos importante, este trabajo no contempla evaluar externalidades sociales que tenga o cause el proyecto. Esto último dado la condición de pugna de tierras que ocurren en la novena región por parte de comuneros Mapuche. Este territorio que se ha transformado en los últimos años en una zona de conflicto entre el Estado y los pueblos originarios. Si bien éstos no ocurren precisamente en el lugar de instalación de la planta, pueden afectar el traslado de camiones o de abastecimiento de materias primas. Este tema será tratado en mayor profundidad en el capítulo de ubicación de la planta.

2. ESTUDIO DE MERCADO

2.1. ESCENARIO MUNDIAL

El escenario internacional presenta una fuerte inclinación por el uso del petróleo, seguido del uso del carbón, siendo éstas las principales fuente de energía (ver Gráfico 2). Esto demuestra que los recursos no renovables son la fuente primordial de energía utilizada.

Gráfico 2: Matriz energética mundial en el año 2007.



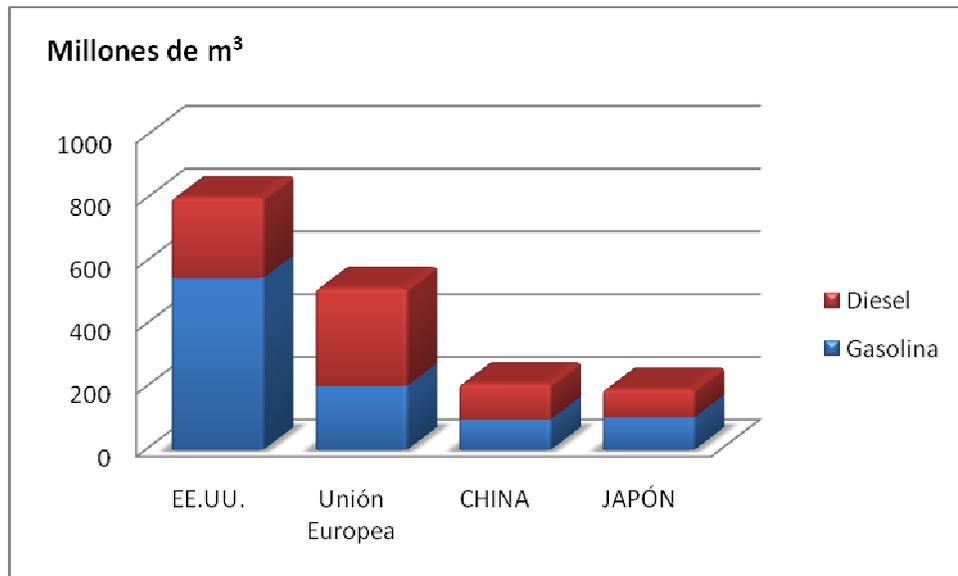
Fuente: World Energy.

El agotamiento del recurso no renovable es inminente; estimaciones hechas revelan que el petróleo podría agotarse para el 2030 si no se encuentran nuevas fuentes de este material fósil [17].

Al observar el uso de combustibles por regiones (Gráfico 3), se puede observar que Estados Unidos es el principal consumidor, seguido de la Comunidad Europea, es decir, existe una correlación positiva entre consumo de combustibles y desarrollo de la región.

Si se fija la mirada en la proyección de la demanda de energía para los próximos años mundialmente, se concluye que existe una real necesidad de ampliar la matriz energética; a la vez se puede apreciar que las energías renovables (eólica, solar, hidroeléctricas entre otras) van adquiriendo una mayor importancia (Figura 3).

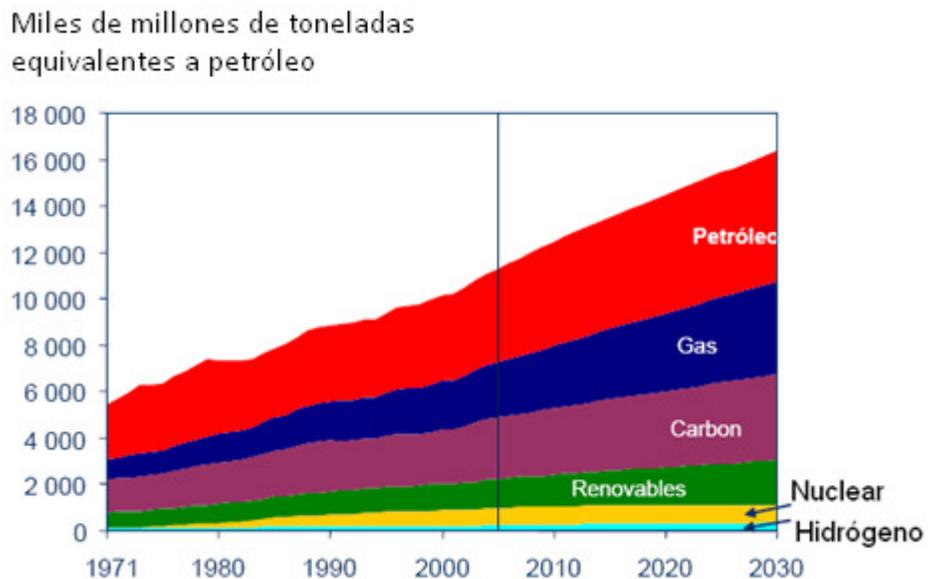
Gráfico 3: Consumo de combustible por regiones.



Fuente: Grain and Feed Division Foreign Agricultural Service, USDA. 2005.

Según estimaciones de la Agencia Internacional de Energía, petróleo, gas y carbón representarán el 83% del crecimiento esperado de la demanda de energía desde la fecha al 2030.

Figura 3: Demanda de energía primaria mundial.

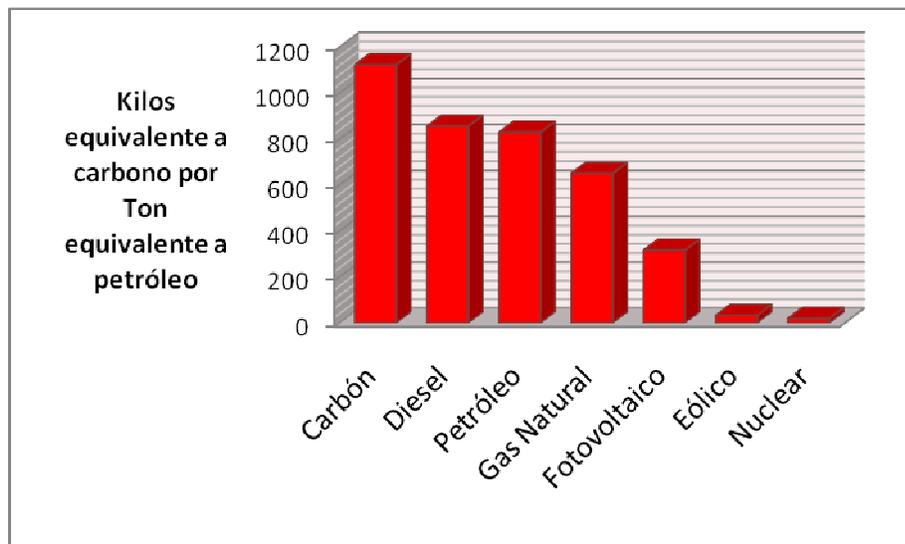


Fuente: IEA (Agencia Internacional de la Energía 2005).

2.2. EMISIONES DE CO₂ A NIVEL INTERNACIONAL.

El Gráfico 4 muestra la cantidad de emisiones de CO₂ por tipo de energía, reflejando los reales problemas que causa el uso de recursos fósiles como lo son el carbón y el petróleo. La acumulación de dióxido de carbono en la atmósfera tiene estrecha relación con el efecto invernadero⁹ y con los graves daños ambientales que sufren los ecosistemas a causa del desequilibrio en la composición atmosférica.

Gráfico 4: Emisiones de CO₂ por tipo de energía.



Fuente: Cheyre, 2008.

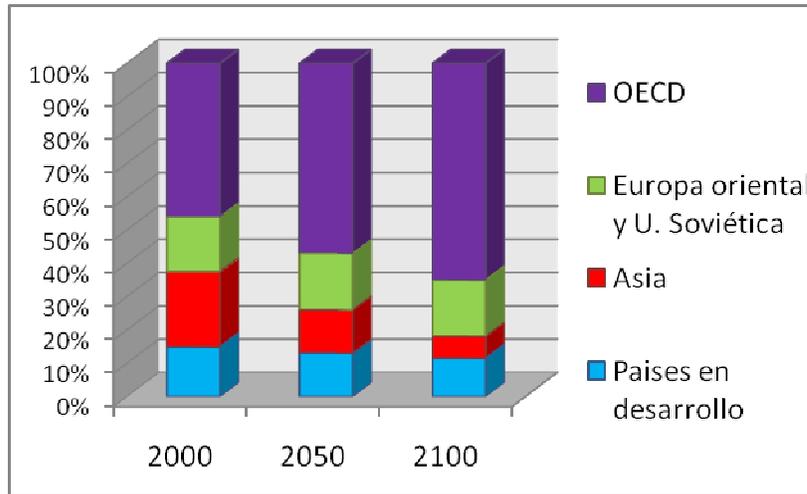
Si se observa las regiones que emiten CO₂ (ver Gráfico 5), se puede apreciar que existe una directa relación entre los países desarrollados y la cantidad de dióxido de carbono que producen. Entre más desarrollo económico tiene un país mayor es la cantidad de CO₂ que libera al medio ambiente.

Esta situación es conocida a nivel internacional, es por esto que países como España han impulsado políticas que apuntan a reducir el nivel de emisiones de CO₂, a través del cambio en su matriz energética. Para el 2015 España deberá haber cambiado su matriz energética a un 20% en energías renovables no convencionales [18]¹⁰.

⁹ Fenómeno por el cual determinados gases, que son componentes de la atmósfera, retienen la energía que el suelo terrestre emite y una parte de la misma la reemiten a la superficie de la Tierra.

¹⁰ Expresado por Fernando Sánchez, director técnico del CENER (Centro Nacional de Energías Renovables), España.

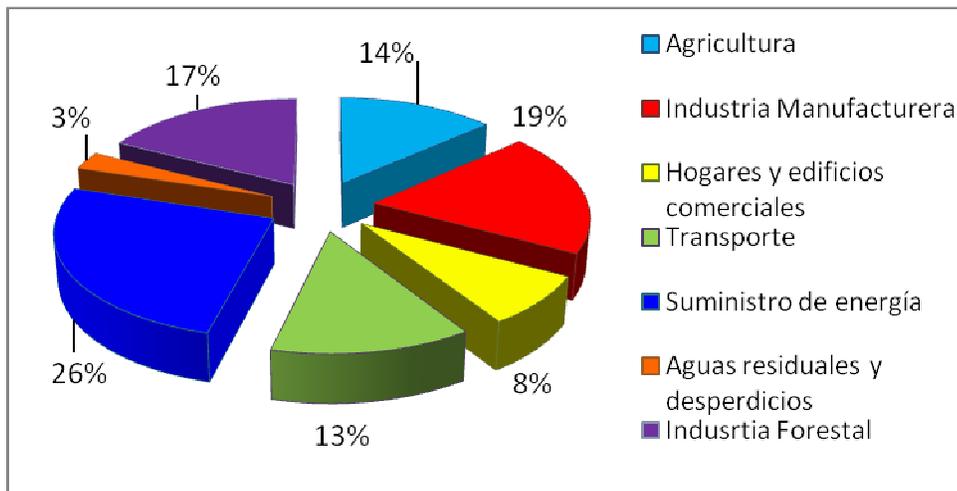
Gráfico 5: Distribución global de emisiones de CO₂.



Fuente: Zero Emission Resource Organization. ¹¹

Cerca de un 40% del total de las emisiones proviene del transporte y de la generación de energía (Gráfico 6). Cabe señalar que el 80% de las emisiones viene dado por el uso de energía fósil, energía que principalmente es usada para el transporte y la industria.

Gráfico 6: Emisiones de CO₂ por sector industrial.



¹¹ OECD: Organización para la cooperación y el desarrollo económicos. Países Integrantes: Canadá , Estados Unidos, México, Alemania, Austria, Dinamarca, España, Finlandia , Francia, Grecia, Hungría ,Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo ,Noruega ,Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, República Eslovaca, Suecia, Suiza, Turquía, Australia, Japón, Nueva Zelandia, República de Corea. Chile en el 2009 firmó el acuerdo que lo hace pertenecer a esta organización.

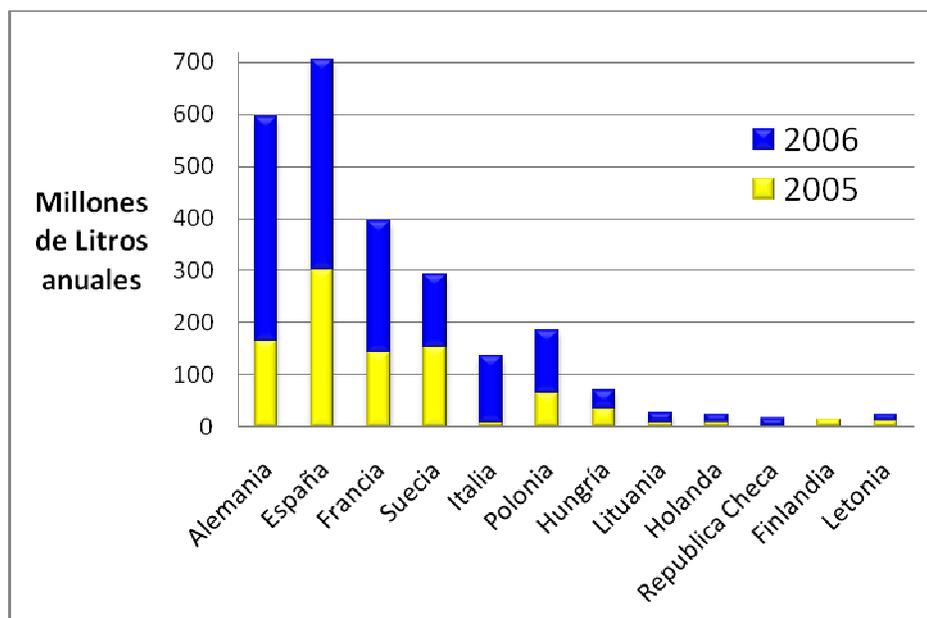
Fuente: Organización Recurso Cero emisión

2.3. BIOETANOL EN EL MUNDO.

Como se mencionó con anterioridad, los principales productores de bioetanol a nivel mundial (Gráfico 1) son Estados Unidos y Brasil, con un 35% cada uno.

Se observa como los principales productores de bioetanol se encuentran en América (Gráfico 1), pero la Comunidad Europea en el paso de los años ha ido incrementando la producción de este producto (Gráfico 7).

Gráfico 7: Producción de bioetanol en la Unión Europea.

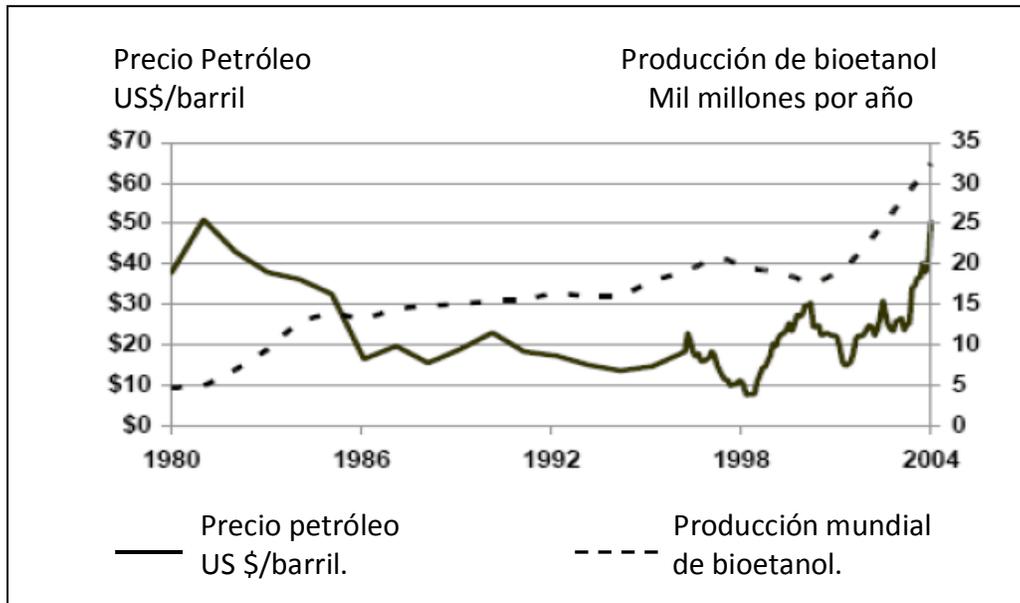


Fuente: Barómetro Biocombustibles. Energies-renouvelables.org

La producción de bioetanol está directamente relacionada con el precio del petróleo, debido a que el bioetanol aparece como elemento sustituyente del combustible; es por eso que a mayor precio de petróleo se puede ver que la producción de bioetanol aumenta (Figura 4) a partir de 1999.

Desde el 2004 la producción de bioetanol se ve altamente favorecida, dada las constantes fluctuaciones en el precio del crudo y al alza sostenida del precio que se mantuvo en dicho periodo hasta mediados del 2008 [19].

Figura 4: Precio del petróleo v/s producción mundial de bioetanol.

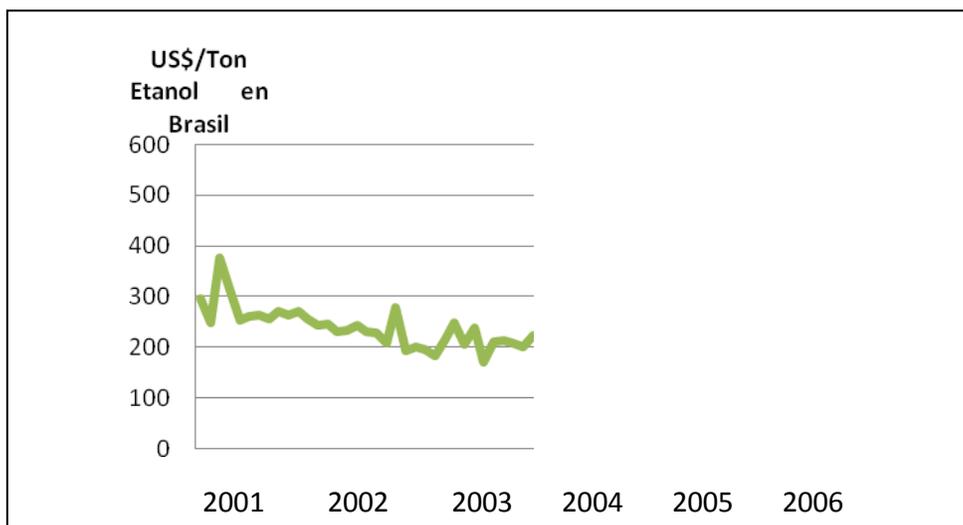


Fuente: Biomasa y biocombustibles. Organización Recurso Cero emisión.

2.4. PRECIO DEL BIOETANOL.

El precio del bioetanol ha sufrido variaciones a lo largo de los años como se muestra a continuación (Gráfico 8).

Gráfico 8: Precio FOB¹² del bioetanol en Brasil.



¹² FOB: Free On Board. El comprador responde por fletes, seguro, y riesgos en el transporte.

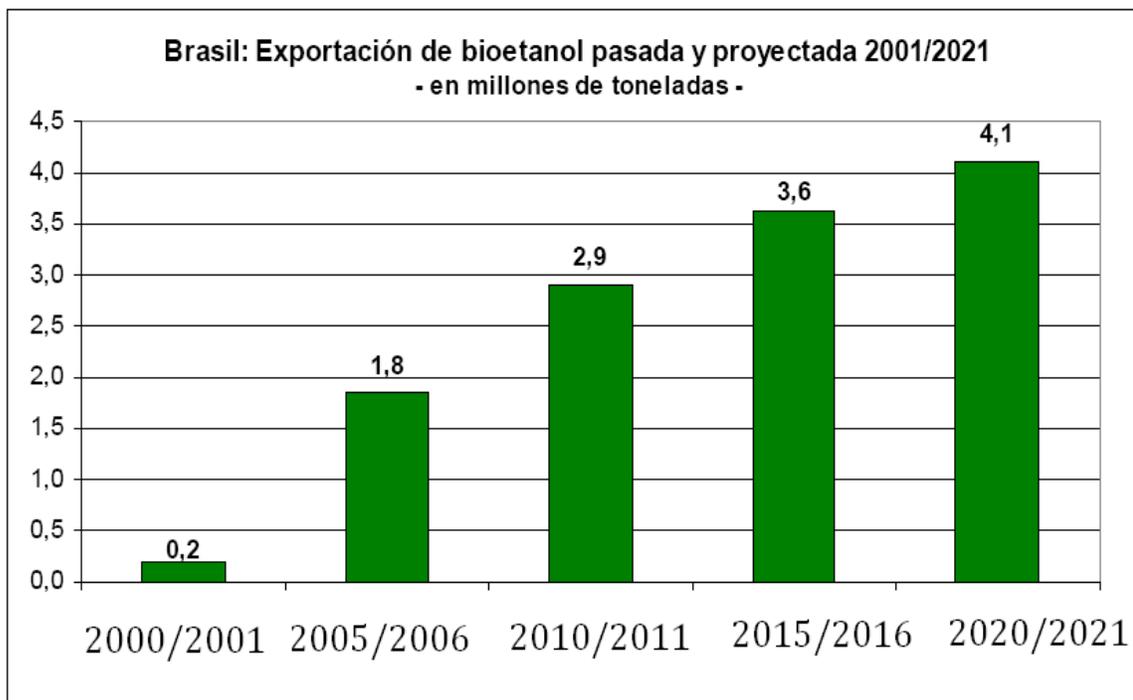
Fuente: MAPA, MDIC, UNICA e CEPEA

Esta variación en el precio se debe a dos factores primordiales:

1. Alza en los precios de materias primas. En Brasil la explotación de la caña de azúcar ha hecho que el precio de esta materia prima haya experimentado un aumento, debido a la disputa por tierra cultivable para la agricultura y a la alta cotización de esta materia prima en el mercado internacional [20].
2. Aumento de la demanda por bioetanol. El alza en el precio del petróleo incentiva la búsqueda de sustituyentes como lo es el bioetanol. Es por esta razón que se ha experimentado un alza de la demanda de esta energía renovable[21].

En Brasil estiman que la producción de bioteanol para el futuro puede llegar a duplicarse, debido a las ventajas que posee ante la gasolina normal. Es así como se estima que para el 2020 se exportarán cerca de 4,1 millones de toneladas de este biocombustible (Figura 5).

Figura 5: Brasil: Exportación de bioetanol.



Fuente: Almada, 2006.

2.5. PLANTAS DE BIOETANOL

Alrededor del mundo hay variadas plantas capaces de producir bioetanol, las que varían por el proceso que utilizan, por la materia prima que es usada como insumo y por las capacidades de producción [22].

Tabla 1: Plantas de bioetanol en el mundo.

Compañía	Localización	Materia Prima	Producción anual m ³	Inicio (año)
BC Internacional	Jenning, Lousiana, USA.	Bagazo y arroz	80.000	2002
BCI Collins Pine	Chester, California, USA.	Residuos de madera	80.000	2002
BCI Gridley	Oroville, California, USA.	Paja de arroz	80.000	2002
Arkenol-Sacto	Sacramento, California, USA.	Paja de arroz	15.000	2001
Ethanol Partners Masada	Middletown, Nueva York, USA.	Residuos urbanos	25.000	2001
Ethanol Partners Masada	Birmingham, Alabama, USA.	Residuos urbanos	51.000	2002
Sealaska	South East Region, Arkansas, USA.	Residuos de maderas blandas	30.000	2003
logen Corp-Shell-VW2	Alemania	Paja de trigo	Desconocida	2008/2010
Abengoa Bioenergía	Salamanca, España.	Residuos agrícolas	5.000	2006
BCI4	Dedham, Massachusets, USA.	Bagazo	75.600	2002
logen	Ottawa, Canadá.	Residuos agrícolas	378.000	2004
PureVision Technology	Ft. Lupton, Colorado, USA.	Madera	Piloto	2002
ETEK	Suecia	Residuos de maderas blandas	183.000	2015

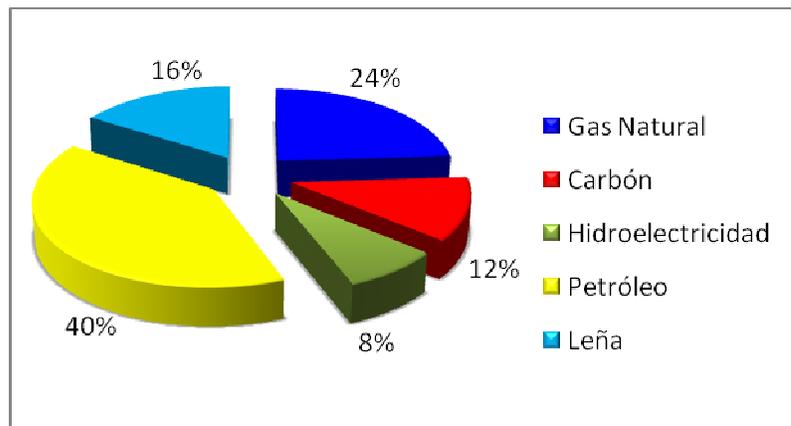
Fuente: Patrouilleau, 2006. Correa, 2008.

Cabe destacar que la primera planta que produce bioetanol a partir de material lignocelulósico a gran escala es la planta logen ubicada en Ottawa, Canada, con una producción anual de 378.000 m³ de bioetanol. Su materia prima es residuo agrícola y tiene un rendimiento promedio de 27 lt. de bioetanol por tonelada de insumo [15].

2.6. ESCENARIO ENERGÉTICO NACIONAL.

En Chile el desarrollo de biocombustibles y el desarrollo de energías renovables no convencionales son fundamentales para contrarrestar la gran dependencia que se tiene de las energías provenientes del exterior. La matriz energética chilena se basa primordialmente en el uso del petróleo, con un 40%, seguido del gas natural, con un 24% (Gráfico 9).

Gráfico 9: Matriz energética nacional al 2006.



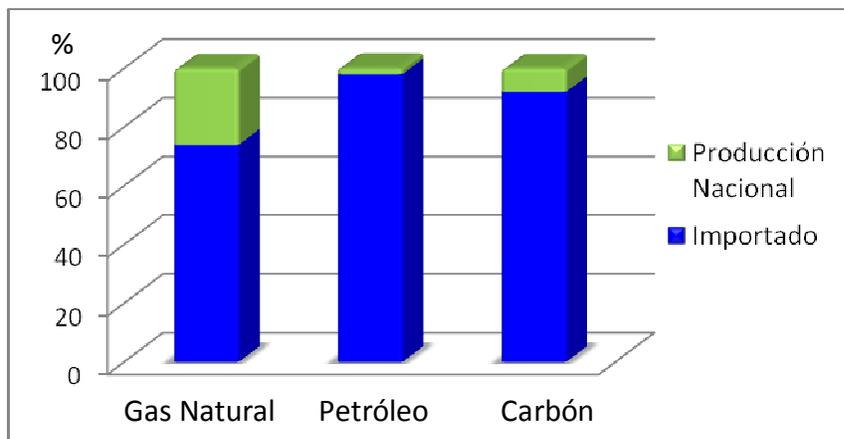
Fuente: Balance energía CNE¹³.

Más de dos tercios de la energía primaria es importada, lo que nos deja como país en una situación totalmente dependiente del medio externo [23]. Es por esta situación que estamos sujetos a las fluctuaciones en el precio del petróleo y a los cortes de gas natural importado¹⁴.

Gráfico 10: Dependencia externa de la matriz energética.

¹³ CNE: Comisión Nacional de Energía.

¹⁴ En el momento en que se realizó el estudio, aún no estaba en funcionamiento la planta Generadora de Gas Natural Licuado de Quintero (GNL).



Fuente: Balance energía CNE.

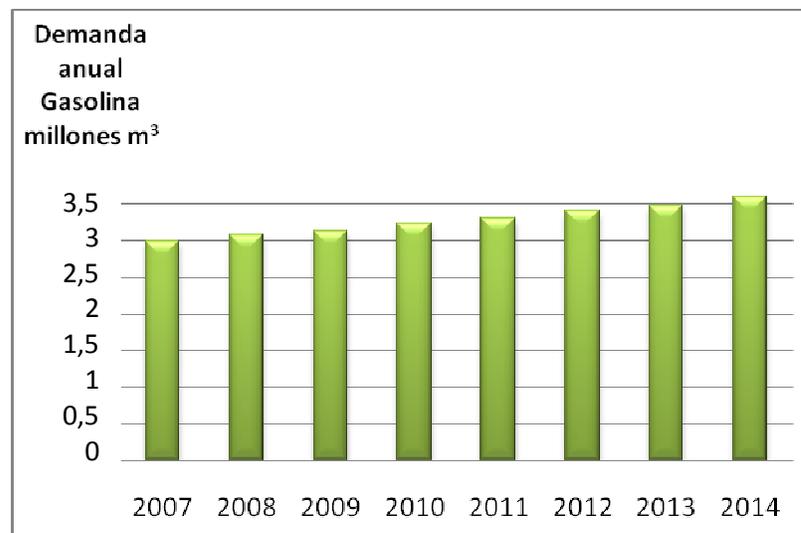
En Chile solo se produce un 2% del total de petróleo que se consume, dejando un 98% en manos extranjeras. En cuanto al gas natural, Chile importa alrededor del 74% de total que se consume (Gráfico 10). Esta dependencia casi total de energía se podría solucionar logrando una diversificación de la matriz energética apuntando hacia tecnologías no convencionales, como lo son las celdas fotovoltaicas, agrogeneradores, aspas eólicas y biocombustibles.

2.7. BIOCOMBUSTIBLE A NIVEL LOCAL.

El biocombustible bioetanol aún no ha llegado a Chile, pero se estima que con el ingreso de Petrobras¹⁵ al mercado chileno, éste puede aparecer una vez que la empresa haya adquirido un posicionamiento importante en el sector. Petrobras espera lograr una participación del 20% del mercado, trayendo a Chile no sólo los combustibles tradicionales, sino además biocombustibles, derivados de bioetanol y biodiesel [24].

Se estima que la demanda de gasolina en Chile para el 2010 será de 3.232.000 m³ anual (Gráfico 11).

Gráfico 11: Demanda de gasolina en Chile



Fuente: Universidad Técnica Federico Santa María, 2006 [25].

En Chile estará permitida la mezcla E5, que significa 5% bioetanol y 95% gasolina tradicional. Este 5% de bioetanol de la mezcla estará libre de tributo, por lo que si se tiene una demanda de

¹⁵ Empresa estatal proveniente de Brasil, que explota y comercializa petróleo y derivados de este. Creada en 1953 se convirtió en la octava empresa a nivel mundial que desarrolla el negocio de combustibles.

3,2 m³ millones de gasolina, se puede extrapolar que se tendrá una demanda de etanol de 162.000 m³ para el 2010, que equivale al 5% de la demanda total de combustible para dicho año.

El precio con que llegaría a Chile puede ser estimado a través de la paridad del precio de importación.

Tabla 2: Paridad de importación en el año 2006.

	Gasolina Texas US\$/m³	Etanol Brasil US\$/m³
Precio FOB (promedio 2006)	521	435
Flete	30	30
Precio FOB + Flete	552	466
Seguro, gastos de importación, recepción y transporte	21	21
Precio paridad de importación	573	487

Fuente: Almada, 2006 [26].

En la Tabla 2 se aprecia la paridad del precio del etanol versus el precio de la gasolina en el año 2006. Se observa cómo esta paridad es favorable al precio del etanol al ser más bajo que el de la gasolina. En la actualidad -noviembre del 2009- el precio de la gasolina bordea los \$570 por litro con lo que el precio de paridad es de US\$ 543,33/m³ [27] versus US\$500/m³ el de etanol, aproximadamente [15].

La producción de etanol será viable en la medida que el precio de paridad de importación sea favorable hacia el etanol, es decir, si el precio de las gasolinas es mayor al de bioetanol. Este precio de paridad es una referencia para estimar el precio con que puede llegar el bioetanol a Chile si es importado por alguna empresa del sector de combustibles.

3. ESTUDIO LEGAL

3.1. ESCENARIO INTERNACIONAL

Todos los países que han desarrollado la industria de los biocombustibles, como condición primera, han dictado una Ley Nacional de Promoción de los Biocombustibles basado en 3 pilares [7]:

1. Político: Vinculado a responder la interrogante ¿qué se desea obtener al promover una iniciativa de uso y/o producción de de biocombustibles?
2. Institucionalidad: importancia de la existencia de un organismo con autoridad suficiente que vele y se haga responsable de esta política.
3. Instrumentos: normas destinadas a promover la industria de los biocombustibles

La participación del Estado ha sido fundamental para establecer las condiciones económicas, técnicas, sociales y ambientales para iniciar el proceso de producción de biocombustibles.

Cabe señalar que en Latinoamérica la gran mayoría de los países poseen una ley atingente que aborda en tema de los biocombustibles, como lo muestra la Figura 6.

Figura 6:
Legislación sobre biocombustibles en

Legislación sobre
Latinoamérica.



Fuente: Ramos, 2008.

3.2. ESCENARIO NACIONAL

El gobierno actual de la presidenta Michelle Bachellet Jeria, muestra una clara preocupación por el desarrollo de este tipo de energías renovables como son los biocombustibles. En seminarios y congresos, representantes del gobierno han expuesto como el tema de los biocombustibles como una alternativa de gobierno que apunta a la diversificación de la matriz energética. En reiteradas ocasiones se ha expresado la voluntad de plantear leyes que regulen y promuevan el uso de los biocombustibles. Estas son algunas citas de representantes de gobierno en el año 2006:

- “Chile ha resuelto definir una política en relación a los biocombustibles en particular, y hacia las energías renovables en general...”
- “...Durante el 2008 debería existir una propuesta seria y fundada en torno al marco regulatorio que permita del desarrollo de la industria de los biocombustibles en Chile”.
- “...La agroenergía y los biocombustibles constituyen un ámbito de la mayor relevancia...”¹⁶

Desde el año 2006 hasta ahora se han obtenido logros importantes en materia de legislación, como por ejemplo:

- Creación de la Comisión Asesora Interministerial, presidida por el Ministro de Energía.
- Decreto que autoriza el uso de biocombustibles en vehículos motorizados.
- Definición tributaria de exención del impuesto específico.
- Norma de calidad para Bioetanol y Biodiesel.
- Creación de consorcios tecnológicos para la investigación de biocombustibles de material lignocelulósico y de algas [28].

3.2.1. Marco legislativo¹⁷

En Chile aún no existe una ley que regule la producción de biocombustibles, pero sí hay normas que controlan la calidad del bioetanol a producir y decretos que dejan libre al bioetanol en impuesto específico a los combustibles.

¹⁶ Seminario Internacional Agroenergía y Biocombustibles, Julio 2006.

¹⁷ Todo el marco legislativo fue obtenido de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

La Ley nº 18.502 “Establecimiento de Impuestos a los combustibles”[29], expresa cuales son los impuestos de primera categoría para gasolinas automotrices y señala como se debe calcular este tributo en caso que corresponda. Esta ley no se aplica al caso de los biocombustibles debido a que éstos no son derivados de petróleo. Situación similar es la que ocurre con la Ley 19.030 “Fondo de estabilización de precios del petróleo”, que aplica solo a derivados del petróleo como son las gasolinas automotrices, kerosene doméstico, petróleo diesel y gas licuado, expresado en el artículo 5 de dicha Ley.

El decreto nº 128 del 12 de agosto del 2008 “Comisión asesora interministerial en materia de biocombustibles en Chile”[29]. Este decreto establece las bases para crear una comisión que promueva y fomente el desarrollo de los biocombustibles; los expone como política fundamental en temas de energía y los posiciona como vitales en el presente y en el futuro de los combustibles.

3.2.2. Procedimiento tributario.

La circular nº 30 del 19 de mayo del 2007 [29], “Instruye sobre tratamiento tributario de los biocombustibles denominados biodiesel y bioetanol”. En esta circular queda expresado que el bioetanol queda libre de tributo al tratarse de un combustible que no es derivado de petróleo, y que no es hidrocarburo volátil.

De la mezcla permitida por la legislación chilena, es el 5% de bioetanol es el que queda libre de impuesto.

3.2.3. Especificaciones técnicas

El decreto nº 11 del 9 de mayo del 2008 “Aprueba definiciones y especificaciones de calidad para la producción, importación, transporte, almacenamiento, distribución y comercialización de bioetanol y biodiesel”[29].

Las especificaciones de calidad para el bioetanol, se encuentran en el Anexo 1. Estas especificaciones permitirán la producción, el transporte, la comercialización y distribución de bioetanol.

3.2.4. Impacto ambiental.

La Ley 19.300 “Bases Generales del Medio Ambiente”, dictada en 1994, especifica que proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental¹⁸ deberán someterse a un Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Los proyectos deberán presentar uno de los siguientes documentos [30]:

1. Declaración de Impacto Ambiental: documento descriptivo de una actividad o proyecto que se pretende realizar, o de las modificaciones que se le introducirán, otorgado bajo juramento por el respectivo titular. El contenido de este documento permitirá al organismo competente evaluar si su impacto ambiental se ajusta a las normas ambientales vigentes.

2. Estudio de Impacto Ambiental: documento que describe pormenorizadamente las características de un proyecto o actividad que se pretenda llevar a cabo o su modificación. Debe proporcionar antecedentes fundados para la predicción, identificación e interpretación de su impacto ambiental y describir la o las acciones que ejecutará para impedir o minimizar sus efectos significativamente adversos.

Para determinar si un proyecto ingresa o no al SEIA, se debe analizar el artículo 3 del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, D. S . N ° 95 de 2001, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

Una planta productora de bioetanol se identifica con los puntos de dicho artículo, como lo muestra el Anexo 2.

Por lo tanto, debido a que el proyecto de instalación de una planta productora de bioetanol se encuentra dentro de una de estas categorías de actividades susceptibles de causar impacto ambiental (bastaría sólo una), debe someterse al SEIA y realizar un estudio de impacto ambiental.

¹⁸ En la Ley 19.300, se entiende por impacto ambiental la alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada.

4. ESTUDIO TÉCNICO

Para lograr el diseño conceptual de una biorefinería, se necesita conocer un número de parámetros no despreciable, parámetros que abarcan desde las características de la materia prima, pasando por los procesos que están involucrados, hasta el dimensionamiento mismo de los equipos. Estos parámetros fue lo que se estudió en este capítulo.

4.1. BIOETANOL

4.1.1. Propiedades

El bioetanol ha sido reconocido como uno de los mejores biocombustibles y de más alta calidad para el transporte. Puede ser usado mezclándolo en pequeños o en altos porcentajes con gasolina. En caso de mezclas bajas no se necesita modificar el funcionamiento de un motor. Esto viene dado por las características particulares que posee y por las ventajas que tiene ante otros combustibles (Tabla 3) [31].

Tabla 3: Propiedades del etanol en relación a gasolina y petróleo

Propiedades	Etanol	Gasolina	Petróleo
Punto de ebullición	172-173	80-437	375-630
Densidad [gr/cm ³]	0,719	0,12-0,779	8,15-8,75
Presión de mezclado [psi]	18-22	8-15	0
Calor de vaporización [BTU/lb]	362-400	140-170	100-260
Punto de autoignición [° C]	365-425		203,1-260
Limite de flamabilidad [%]	3,3-19	1-8	0,6-5,5
Temperatura de llama [°C]	1930	1977	2054
Calor de combustión [BTU/gal]	75.700- 76.000	109.000- 119.000	128.700- 130.000
Número de octanaje	96-113	85-96	NA

Fuente: Bailey, 1996.

La densidad volumétrica y el peso del etanol es un 1% menor que el de la gasolina, lo que se traduce en menor peso para el estanque y mayor capacidad del mismo. El calor de vaporización

es 230 BTU/lb mayor que el de gasolina (considerando los valores máximos) y 140 BTU/lb mayor que el de petróleo (considerando los valores máximos) lo que produce un aumento en el poder de combustión y a la vez baja la temperatura de combustión.

Una menor temperatura de llama hace que se pierda menos calor y a la vez aumenta la eficiencia termal del motor. Finalmente un mayor número de octanaje permite una mayor compresión, causando mayor eficiencia en motores de combustión interna¹⁹ [31].

Cabe señalar que también posee un calor de combustión 3/4 menor que el de la gasolina, lo que se traduce en un menor rendimiento de km/lt²⁰ en el motor. Sin embargo en mezclas no superiores del 10% de etanol y 90% de gasolina, el rendimiento disminuiría en un 1,5% como máximo [15].

4.2. MATERIA PRIMA

La materia prima que pueden ser usadas para la producción de bioetanol puede ser cualquier masa vegetal que contenga azúcares de cinco o seis carbonos, como lo es el maíz, la caña de azúcar, rastrojos agrícolas, residuos forestales, cereales y cualquier tipo de material lignocelulósico.

Este material lignocelulósico posee características particulares que sólo comprendiendo de buena manera, se puede obtener un aprovechamiento total del recurso que ofrecen [32]. Son los compuestos orgánicos más abundantes en la biosfera, llegando a ser un 50% del total de biomasa terrestre. Están compuestos por fibras vegetales y polisacáridos (celulosa, hemicelulosa). Estos componentes están asociados a través de la lignina que puede llegar a ser un 25% del vegetal (ver Figura 7)[33].

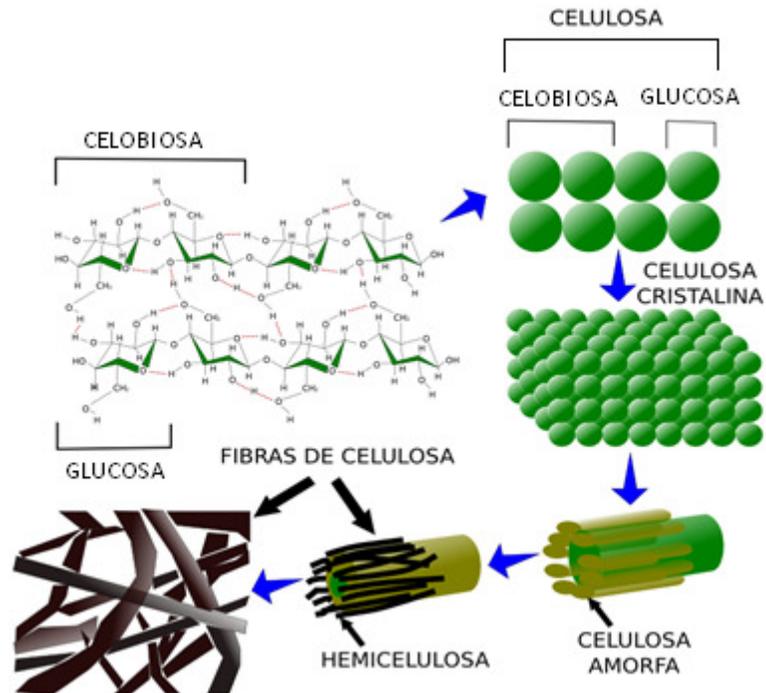
La celulosa es un polisacárido de cadena lineal y plana que forma enlaces β -1,4 D-glucosa²¹. La celobiosa es un disacárido formado por la unión de dos glucosas [33]. La hemicelulosa son polisacáridos de cadenas ramificadas, más cortas que la celulosa, está conformada por heteropolisacáridos como xilosas y arabinosas que son cadenas de 5 carbonos y por manosas y galactomanosa que pertenecen a la familia de 6 carbonos, además de glucosa [34].

¹⁹ Un motor de combustión interna es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por un combustible que arde dentro de una cámara de combustión, que es la parte principal del motor.

²⁰ Km/lt (kilometro/litro): medida de rendimiento de un motor.

²¹ Enlaces alfa y beta, corresponde a la posición del hidrógeno en el primer carbono de la molécula. En el enlace alfa se representa hacia arriba, y en el beta hacia abajo.

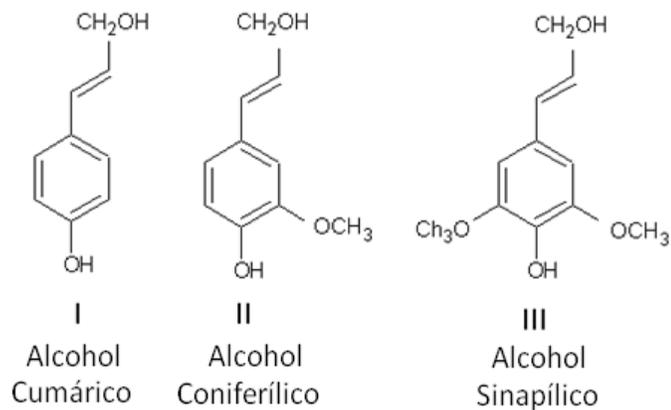
Figura 7: Composición de una pared celular.



Fuente: Atlas de Histología Vegetal y Animal. La célula

La lignina es una macromolécula compuesta principalmente por la polimerización de 3 monómeros que son: I Alcohol cumárico, II Alcohol coniferílico y III Alcohol sinapílico. La lignina es la responsable de darle la rigidez a la pared celular, actúa como un pegamento natural que mantiene unidas las fibras de celulosa [33] (Figura 8).

Figura 8: Monómeros que conforman la lignina



Fuente: Pereira, 2008.

Dentro de los principales tipos de material lignocelulósico podemos encontrar los residuos generados en las industrias forestales, estos residuos son generados a partir de la fabricación de productos de la madera (tablas, tablones, planchas, postes, etc) y de celulosa (industria del papel).

4.2.1. Caracterización del bosque chileno.

La superficie forestal de Chile está dividido en dos grandes grupos: bosques nativos y plantaciones, con un 86 y 13% respectivamente (Gráfico 12)[35].

Gráfico 12: Repartición bosque chileno.

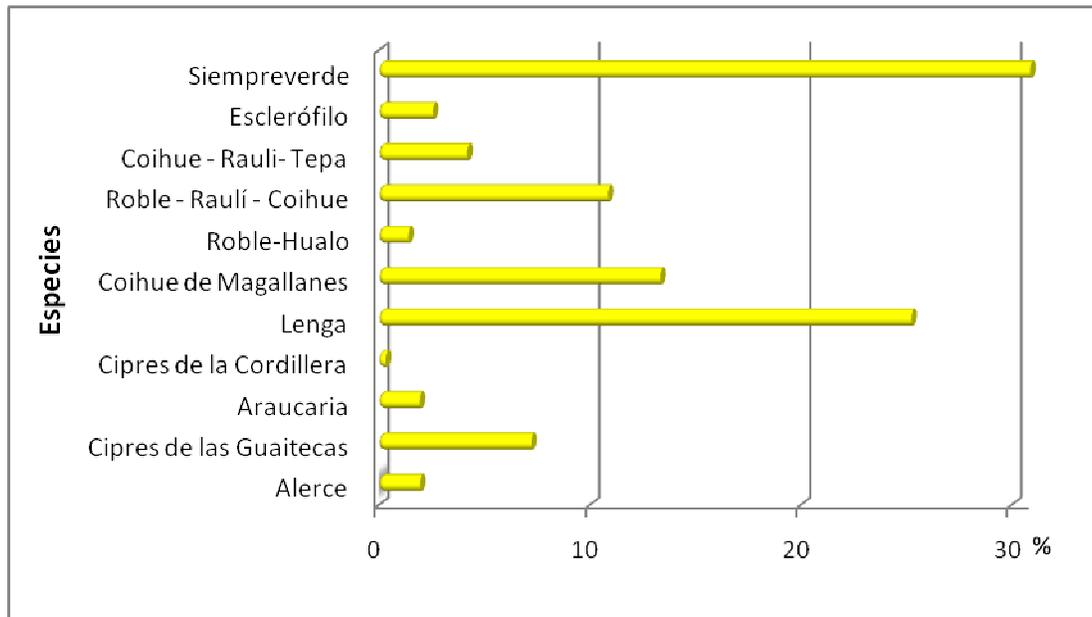


Fuente: INFOR, 2006.

Dentro de los bosques nativos (Gráfico 13) las especies predominantes son Siempre Verde con un 30,9% y Lenga con un 25,3%, que en total suman un 56,1% del total de bosque chileno [35] (ver Anexo 3).

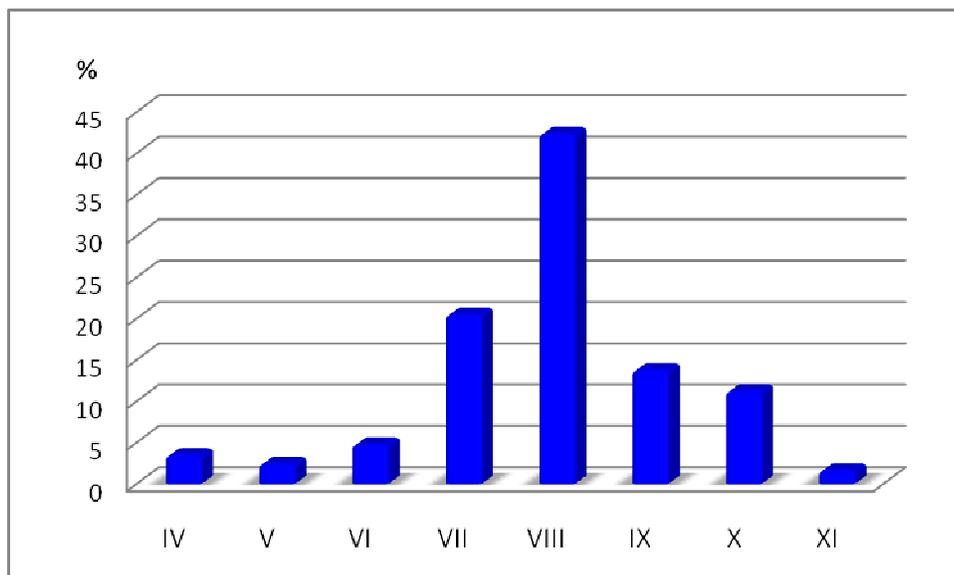
Al referirse a plantaciones (Gráfico 14) se puede observar que la región del Biobío tiene la mayor participación en cuanto a hectáreas plantadas con un 42,3%, seguido de la séptima región con un 20,5% [36] (ver Anexo 4).

Gráfico 13: Especies nativas



Fuente: INFOR, 2006.

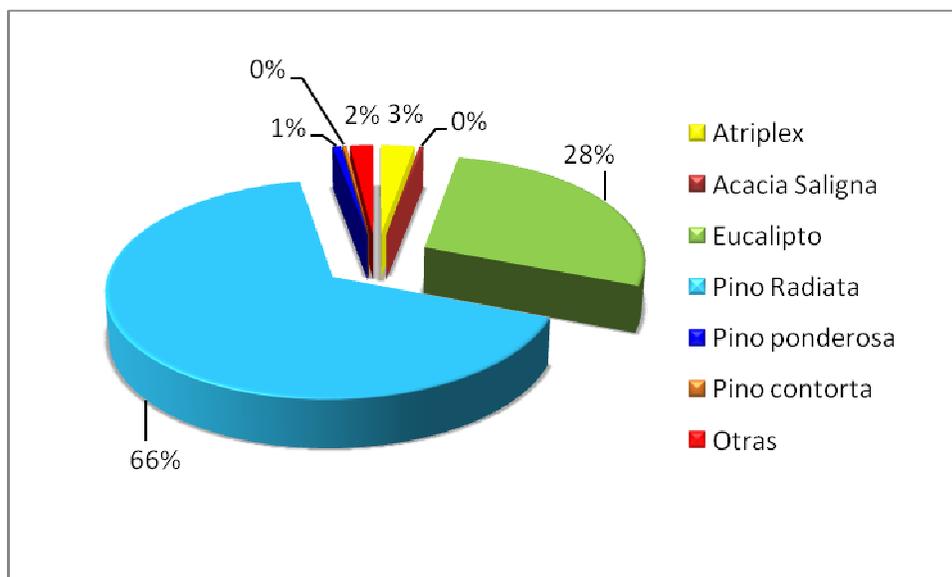
Gráfico 14: Plantación total por regiones.



Fuente: INFOR, 2006.

Al hablar de plantaciones se observa con claridad que las principales materias primas son Pino Radiata (66%) y Eucalipto (28%) dada su importancia económica y características que los hacen ser las principales especies plantadas en Chile, con un 94% en conjunto (Gráfico 15) [36].

Gráfico 15: Distribución de especies plantadas.



Fuente: INFOR, 2006.

4.2.2. Especie a utilizar.

Para identificar el resto o desecho de especie a utilizar, se utilizará el escenario mostrado anteriormente. Las variables a considerar son: disponibilidad real de desecho forestal, y uso comercial de la especie.

Según el escenario mostrado anteriormente (Gráfico 14), en donde se muestra la importancia de plantaciones de pino y eucalipto en las VII, VIII y IX regiones, se ha decidido que se trabajará con este último. La razón principal está vinculada con el valor comercial de las materias, siendo el pino radiata más costoso que el del eucalipto. El pino es usado en varias formas [34]:

- I. Madera libres de nudos: consiste en madera de pino insigne, se encuentra libre de nudos y proviene de la parte exterior de rollizos de bosques. Se utiliza principalmente en la fabricación de muebles, molduras sólidas y ventanas, además de elementos y piezas decorativas.

- II. Madera estructural: es madera de pino insigne que se destina principalmente a la construcción de viviendas, fabricación de vigas de piso, techumbres y pie derechos.
- III. Madera con nudos: es madera que puede ser destinada a diferentes usos, como materia prima para la producción de puertas, ventanas y muebles o en la industria de la construcción, como revestimiento de espacios interiores y construcciones especiales, o como revestimiento exterior.
- IV. Postes: consisten en trozos de madera de pino verde y se destinan principalmente a uso para tendido eléctrico y telefónicos.

El eucalipto es usado casi exclusivamente para la industria de la celulosa, que posee un valor comercial inferior en el mercado de la madera [34]. Es por esta razón que se utilizará eucalipto como materia prima para la producción de bioetanol.

Como se mencionó anteriormente el eucalipto tiene un costo de oportunidad menor que el pino, ya que el pino se puede ocupar de variadas formas. Este costo menor hace que el precio al cual se puede acceder a comprar los restos de eucalipto sea menor que el precio del residuo de pino, lo que sin duda es crucial para la evaluación económica del proyecto.

El residuo de pino tiene un costo mayor al del eucalipto, debido a que ya existen plantas energéticamente autosustentable, que ocupan como principal materia prima el desecho de pino para producir energía.

4.2.3. Caracterización del eucalipto.

Pertenciente a la orden de las angiospermas²², catalogado como madera dura²³, de origen australiano, existen más de 600 especies, posee una adaptabilidad al clima y al suelo chileno incomparables y es por esta razón que las plantaciones de eucaliptos han prosperado en la región.

²² Angiospermas significa semillas envasadas.

²³ Madera dura: es la clasificación taxonómica para especies angiospermas. Tienen flores pero no tienen fruto. Ejemplo Pinus Radiata.

Madera blanda: es la clasificación taxonómica para especies gimnospermas, se caracterizan por ser arboles longevos con hojas simples y numerosas, en su mayoría aciculares, que están cubiertas de una cutícula que las protege de la pérdida de agua.

Árbol de rápido crecimiento (10-14 años) que puede alcanzar los 60 m. de altura, con la corteza blanquecina que se desprende en tiras en los ejemplares adultos, además de ser la única especie arbórea que posee el cono o fruto solitario en etapas maduras [37]. La textura de las hojas es algo coriácea y de color verde oscuro, con la nerviación marcada. Flores axilares, solitarias o en grupos de 2 o 3, de hasta 3 cm de diámetro, con numerosos estambres de color blanco [34]. La densidad de plantación más utilizada es 1.111 árbol/há, lo que implica plantar a 3 m x 3 m [34].

En cuanto a su composición química, la metodología²⁴ usada entregó que, un 43,61% corresponde a α -celulosa, y que un 39,63% a hemicelulosa, lo que se traduce en que un 83,24% es fermentable para producir bioetanol (Tabla 4)[38]. Además contiene un 19,3% de lignina, que si bien no es fermentable para producir etanol, se puede utilizar para generar adhesivos naturales, pellets y energía [38].

Tabla 4: Composición química de residuo de *Eucalyptus globulus* Labill.

Eucaliptus		
	% Teórico	% Experimental
Lignina	17-20	19,3
Holocelulosa²⁵	75-85	83,24
α-Celulosa²⁶	40-50	43,61
Hemicelulosa²⁷		39,63
Extraíble	2-6	5,25
Ceniza	1	0,16

Fuente: Santibáñez 2009.

4.2.4. Tipos de residuos

Existen tres vías principales que originan distintos tipos de residuos. Los provenientes de la industria de la madera (RAE²⁸), de la industria de la celulosa y de la explotación del bosque nativo.

²⁴ Los Extraíbles se expresan en base a madera anhidra, en cambio los resultados de Celulosa y Lignina se expresan en base a madera libre de Extraíbles, por lo tanto el cálculo considera a un 100% a un material que en realidad es un porcentaje menor. Por otro lado para la determinación de Holocelulosa, pueden quedar fracciones de Lignina ligadas a la Celulosa y Hemicelulosa. Esto mismo pasa con la determinación de Lignina, donde pueden existir fracciones de azúcares que no lograron ser disueltos.

²⁵ Holocelulosa corresponde a la suma de la hemicelulosa y α -celulosa.

²⁶ α -celulosa: fracción de la holocelulosa altamente cristalina e insoluble en compuestos alcalinos.

²⁷ Hemicelulosa: compuesta por varios tipos de polisacáridos que corresponden en una mayor parte a xilanos (cadenas ramificadas de residuos de xilosa).

Se observa en la Tabla 5 que el principal residuo de eucalipto, se genera en la cosecha de éste, es decir, en las podas (eliminación parcial de las ramas inferiores, para que la madera quede libre de nudos), raleos (extracción de arboles defectuosos, con el fin de nutrir el suelo) [34] y corta final.

Tabla 5: Desecho por tipo de bosque

Tipo de bosque	Manejo forestal	Industria para cada tipo de bosque	Desecho
Pino Radiata	Desecho de podas	Aserrío	Corteza
	Desecho de raleo		Aserrín Verde
	Desecho de corta final		Tapas y cantonera
		Remanufacturaciones	Aserrín seco
			Virutas
			Despunte
			Polvo del lijado
Eucalipto	Desecho de podas	Aserrío	Corteza
	Desecho de raleo		Aserrín verde
	Desecho de corta final		Tapas y cantonera
		Celulosa	Corteza
	Desecho de corta final	Aserrío	Corteza
Bosque nativo			Aserrín verde
			Tapas y cantonera
		Confeción de leña	

Fuente: Beltrán, 2008. Potencial Biomasa Forestal [39].

4.2.5. Cantidad de desecho de eucalipto.

Para la estimación de la cantidad de residuo de eucalipto disponible, solo se consideró el generado en la cosecha de éste (corta final), a través de la siguiente expresión [39]:

$$\text{Volumen extraído} * (\text{Factor de expansión} - 1) = \text{Volumen de residuos}$$

En donde el

²⁸ RAE: Residuos Aprovechable Energéticamente.

Volumen extraído: corresponde al volumen de cosecha estimado por el simulador Radiata²⁹ utilizado los criterios de disponibilidad que entrega el INFOR.

Factor de expansión: las estimaciones de volumen de un árbol se hacen sobre la base de la madera comercial que contiene. El factor de expansión estima el volumen total del árbol incluyendo las ramas, hojas y corteza. Estos últimos parámetros son calculados en relación al volumen fustal³⁰ [39].

La cantidad estimada de residuos para la octava región es de 1.091 millones m³ sin corteza (s.s.c.) y de 817 millones de m³ para la novena región en el año 2010 (Tabla 6).

Tabla 6: Estimación de residuos de eucalipto

Año	Regiones [miles de m ³ s.s.c]				
	VI	VII	VIII	IX	X
2008	120	76	947	817	495
2009	120	80	1.085	817	508
2010	121	84	1.091	817	526
2011	121	87	1.114	830	526

Fuente: Beltrán, 2008. Potencial Biomasa Forestal [39].

Es claro observar como existe una correlación directa entre la cantidad de superficie plantada por regiones, y la cantidad de residuos que éstas pueden generar.

4.3. UBICACIÓN.

La Región del Biobío (VIII región de Chile) alberga la mayor cantidad de residuos de eucalipto que se pueda encontrar en territorio chileno, seguido de la IX Región. Es por esto que se ha decidido establecer la planta entre estas dos regiones. Pero además de considerar la cantidad de residuo que se puede obtener, es necesario considerar el lugar en donde se encuentran estos residuos para así obtener mejor ubicación, en donde el total de la distancia de traslado de material sea el mínimo.

²⁹ Simulador de crecimiento y rendimiento de árbol individual, independiente de la distancia para plantaciones de Pinus radiata.

³⁰ Los árboles tienen más de 20 cm. de diámetro normal; el número de pies es inferior a los estados anteriores y, en este estado, el crecimiento se evidencia en diámetro cesando el crecimiento en altura. Se divide en fustal bajo o fustal joven cuando los diámetros son de 20 a 35 cm., y fustal viejo o fustal alto cuando los diámetros pasan de los 50 cm.

Para esto se elaboró una tabla que contiene, por comunas en ambas regiones, la cantidad de residuos disponibles y la distancia que hay hacia dos puntos posibles de ubicación de la planta. Los puntos a estudiar corresponden a la comuna de Laja en la provincia del Bío Bío y la comuna de Angol en la provincia de Malleco (Anexo 5 y Anexo 6).

Se ha elegido estos dos puntos porque en el sector de Laja se encuentra una planta de celulosa de la empresa CMPC, que explota solo eucalipto y se puede aprovechar su logística de carreteras y camiones. Se ha estudiado el sector de Angol porque en sus cercanías existe considerable cantidad de residuos de eucalipto.

Finalmente, se ha elegido instalar la planta en el sector de Angol (Figura 9), IX Región de la Araucanía, dado que se puede obtener igual cantidad de eucalipto que en Laja, pero con un ahorro de casi 800 kilómetros entre el lugar en donde se encuentra el residuo y la planta (Tabla 7).

Tabla 7: Resumen de residuo a captar por región y distancia a Laja y Angol respectivamente³¹.

Región	Eucalipto [Há]	Total Residuos [m ³]	Suma distancia total a Laja desde fuente de residuos [23]	Suma distancia total a Angol desde fuente de residuos [23]
VIII	211.150	561	5.909	7.417
IX	95.744	458	1.226	496
Total	306.894	1.019	7.135	7.914

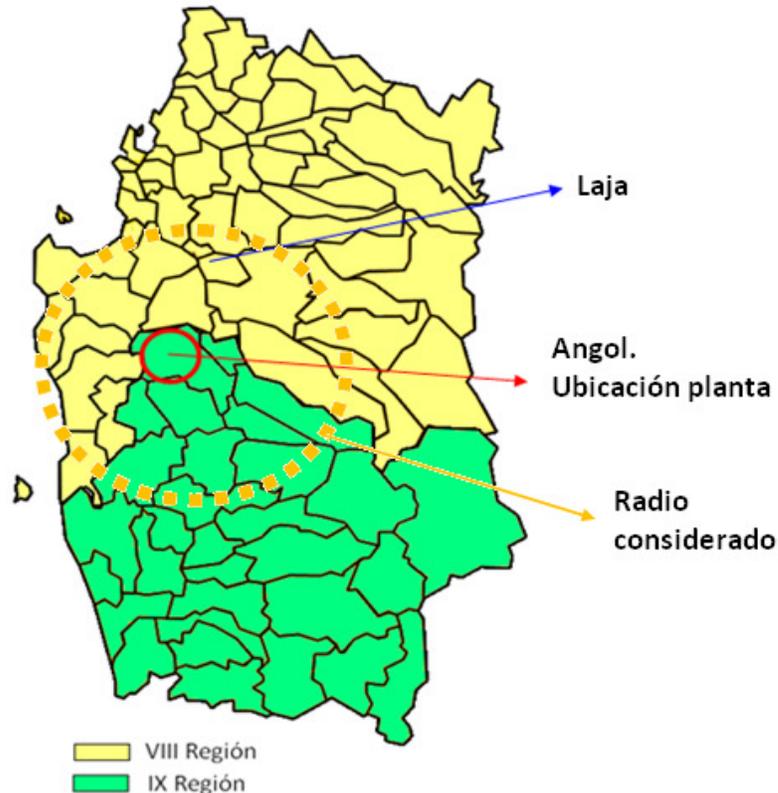
Fuente: Elaboración propia basado en INFOR.

Cabe señalar que no se utilizará el 100% del material disponible de cada región, debido a que si se desea captar todo el material, se debe incurrir en costos de traslados mayores que no se justifican en zonas alejadas y que poseen poco residuo. Es el caso por ejemplo de Antuco que se encuentra a 125 km de Angol y posee solo 0,16 m³ de residuo de eucalipto.

Otro parámetro que se consideró al seleccionar la ubicación de los puntos favorables, fue la accesibilidad y la existencia de un sistema de carreteras bien definido, ya que ayuda considerablemente a que los costos no se eleven por inaccesibilidad desde el lugar de la cosecha.

³¹ En el anexo 5 y 6 las comunas ennegrecidas y en cursiva son las seleccionadas que aportarán los residuos forestales.

Figura 9: Ubicación de la planta.



Fuente: Elaboración propia en base a mapa cartográfico de Chile.

Se debe tener en cuenta que el costo de traslado de la materia prima está determinado por dos factores: distancia entre la ubicación en la cual se obtiene el insumo y la planta de proceso y la cantidad de material trasladado. Es por este racionamiento, que bajo la misma cantidad de insumo disponible entre la octava y novena región, se optó por determinar la ubicación en donde se tuviese un menor kilometraje de traslado de los residuos de eucalipto.

Además, no se puede obviar el hecho que en la Región de la Araucanía existen constantes pugnas por tierras por parte de comunidades Mapuche del país. Estos conflictos se ubican principalmente en la zona de pre-cordillera (Collipulli, Curacautín), y en localidades más al sur como Traiguén, Victoria y en zonas centrales como Ercilla, que está cerca de Angol.

Estos incidentes se han ido trasladando cada vez más hacia el sur, es así como Valdivia también ha tenido que soportar los embates de la peleas por tierras. Si bien estos incidentes son aislados, deben ser considerados correctamente y extrapolados para ver qué pasará en 5 o 10 años más.

Angol se presenta como una zona enriquecida con materia prima, pero que tiene aspectos sociales a ser considerados. Se plantea esta zona por ser la principal fuente de residuo de

eucalipto en Chile y por poseer una viabilidad adecuada para el proyecto. El aspecto social no fue considerado por no ser parte del tema (ver capítulo de Alcances).

Finalmente, cabe señalar que la ubicación escogida tiene en sus cercanías una extensión del río Biobío, lo que permitirá poder tener una toma de agua necesaria para la planta.

4.4. PROCESO

El proceso para producir bioetanol a partir de residuos forestales varía en función del tipo de madera (madera dura o blanda) y de la escala a la cual se está trabajando (diseño laboratorio, planta piloto o industrial). Se ha decidido realizar el diseño conceptual de una planta industrial, es por esto que el proceso se debe escalar de tal manera que existan economías de escala y que los procesos sean viables industrialmente.

A escala de laboratorio se pueden realizar ensayos con muy buenos resultados, pero a escalas mayores no se reproducen los mismos resultados. Es el caso de los pretratamientos, en que los costos asociados son importantes. Si éstos son llevados a escalas mayores, pueden resultar determinantes a la hora de evaluar económicamente una planta de proceso de bioetanol.

Es importante señalar que el proceso se detallará en capítulos posteriores, en donde se podrá observar todas las corrientes del proceso y como éstas generan los coproductos.

4.4.1. Producción de bioetanol

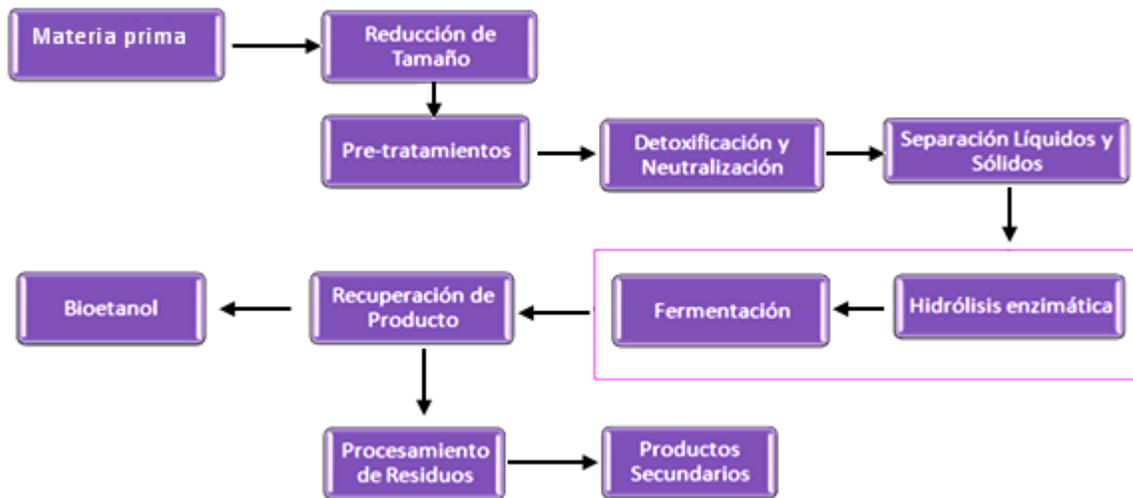
El proceso (Figura 10) comienza con la llegada de la materia prima (residuo de eucalipto), luego ésta es tratada para reducir su tamaño, después del pretratamiento la parte líquida pasa por un proceso de neutralización de inhibidores generados en el pre-tratamiento, seguido pasa por un proceso de separación sólido-líquido. Posteriormente a la separación de sólidos y líquidos, la corriente entra en el reactor donde se produce la fermentación generando bioetanol. Éste es separado a través de una destilación y luego concentrado para obtener el producto final. De las corrientes no usada se obtienen productos secundarios mediante el procesamiento de estos residuos [40].

En este proceso existen corrientes que no son ocupadas para la producción de bioetanol. Las corrientes de desechos son generadas en etapas de separación y tienen como principales componentes hemicelulosa, lignina, inhibidores y agua. De estas corrientes se pueden generar

nuevos productos (productos de biorefinería) que en conjunto con el etanol pueden hacer que el proceso completo sea sustentable económicamente [41].

Los productos secundarios tienen la ventaja de la economía de escala al pertenecer a la línea general de producción, por ende ellos pueden ser un parte importante del balance económico.

Figura 10: Diagrama simplificado de la producción de bioetanol



Fuente: Cortinez, 2008.

Los rendimientos encontrados en la literatura indican que por tonelada de residuo forestal que entra en el proceso se puede obtener alrededor de 300 lt. de etanol [32, 42]. Este tema se desarrollará con mayor profundidad en el capítulo de balance de masa.

4.4.2. Coproductos a producir.

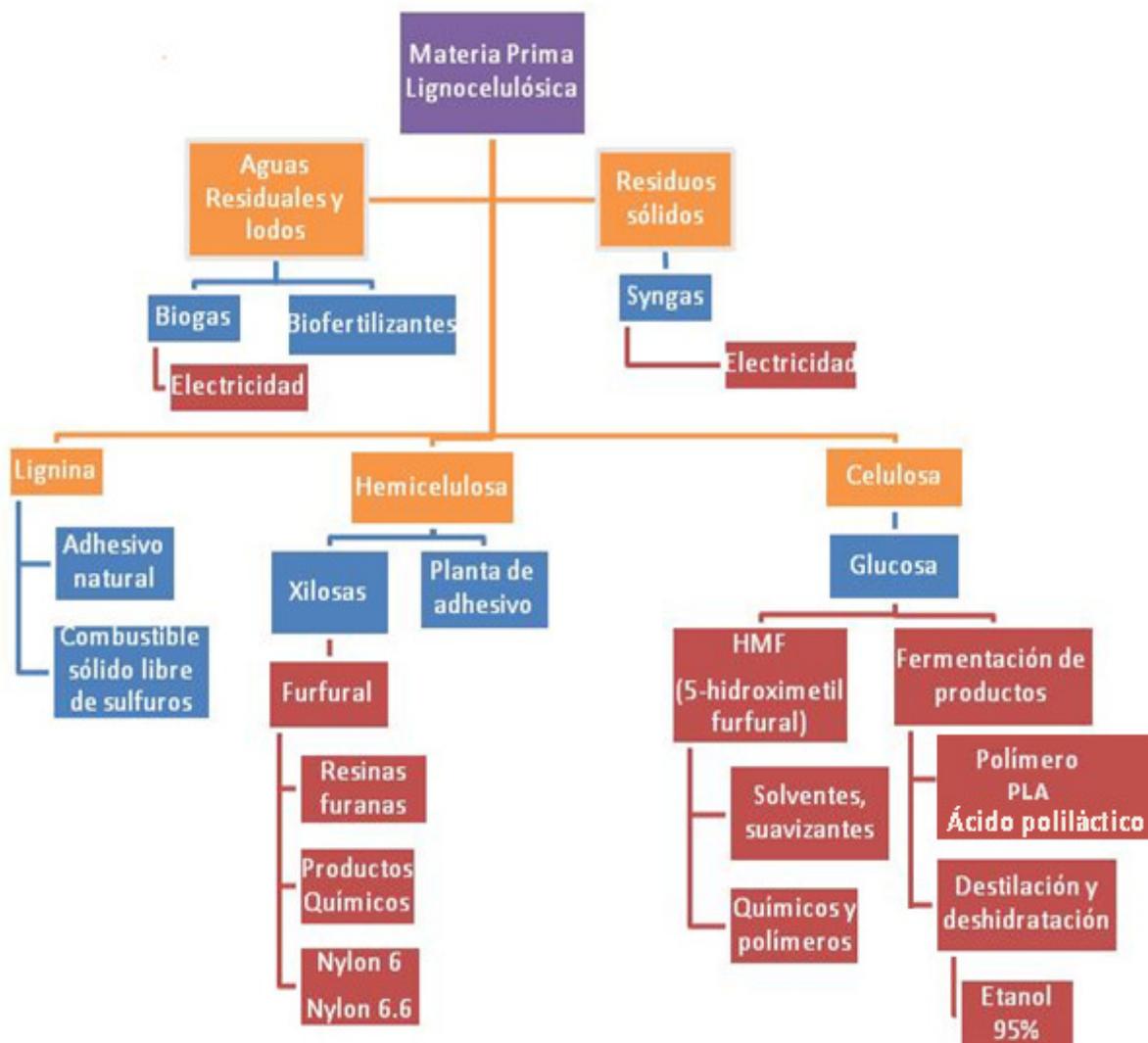
Los productos a elaborar están bajo el concepto de biorefinería, es decir, se obtendrán distintos compuestos químicos que provienen del mismo proceso para producir bioetanol, pero que se diferencian en su proceso final de obtención.

Existe una variada gama de coproductos a producir a partir de biomasa como lo muestra la

Figura 11. De estos se han seleccionado furfural, adhesivo natural (lignina glicoxalada). De las corrientes de residuo se ha seleccionado la levadura que se vende como DDGS32 y el CO2. Para esto se ocuparán las corrientes de desechos que contienen lignina, monosacáridos como la xilosa (5 carbonos).

La selección se basó principalmente usando como criterio la cantidad de información que se poseía. Así, se va a diseñar la planta con aquellos coproductos de los cuales se tenía mayor cantidad de referencias y datos concretos, que ayudarán a tener una visión más completa sobre la biorefinería.

Figura 11: Derivados posibles de biomasa.



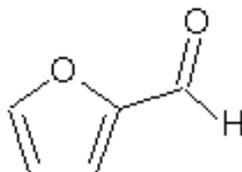
Fuente: Elaboración propia en base a Kamm, 2004 [14].

³² DDGS: Granos Secos Solubles.

4.4.2.1. Furfural

Producto derivado de xilosa, es un aldehído utilizado en la industria del plástico y del vidrio, es base química para fungicidas e insecticidas. Es un compuesto farmacéutico de gran valor comercial, polimeriza con urea, fenol, cetonas y consigo mismo (Figura 12). Un derivado de éste es el furfural-mercaptan que le da el aroma característico al café torrado³³ [43].

Figura 12: Molécula de furfural



Fuente: Lee, 2008.

No existe una forma sintética de producir furfural. Por esta razón se desea diseñar la cadena de producción a partir de material lignocelulósico. En la literatura se describe un rendimiento de entre 150-170 kg por tonelada de biomasa lignocelulósica proveniente de madera dura[43].

El mercado mundial de este producto está estimado entre 200.000-210.000 tpa³⁴, entre un 60-62% es usado para la producción de alcohol furfuril³⁵.

Tabla 8: Producción de furfural y alcohol furfuril en China el 2005.

Provincia	Producción en miles de toneladas anuales	
	Furfural	Alcohol furfuril
Norte-este de China e interior de Mangolia	100	15
Shandong	30	110
Henan	30	30

Fuente: Lee, 2008

³³ El café torrado o café torrefacto es una variedad de café que se obtiene tras someter al grano a un proceso especial de tostadura.

³⁴ tpa: toneladas por año.

³⁵ Alcohol furfuril: es un líquido sin color o color amarillo claro, cambia color a marrón o rojo oscuro en el aire y sol. Es tóxico, inflamable, se disuelve en agua, en el agua es muy inestable; se disuelve fácil en los solventes orgánicos como alcohol y éter, reacciona fuertemente con ácido, produce resinas que no se fusionan entre sí. Usado principalmente en la industria cohetera y como insumo en fundiciones.

China es el principal productor de furfural y de alcohol de furfural (Tabla 8), llegando a producir cerca de 315.000 toneladas entre ambos compuestos en 2005 [43].

El precio de furfural ha sufrido bruscas variaciones, debido a la existencia de productores intermedios que no transan sus productos en el mercado abierto, lo que se traduce en variaciones en el precio entre 290 a 880 US \$/ton desde el año 2001[43].

4.4.2.2. Lignina glioxalada

La lignina es mezclada con glioxal³⁶, agua e hidróxido de sodio (Tabla 9), produciendo una pasta espesa y concentrada que tiene la característica de ser un adhesivo. Tiene la denominación de adhesivo natural, porque su principal componente, que es lignina, es de origen vegetal [44].

Tabla 9: Composición de lignina glioxilada.

Compuesto	Composición %
Lignina	28,50
Glioxal 40% en agua	16,91
Hidróxido de sodio (30%)	17,49
Agua	37,10

Fuente: Pizzi, 2006.

Derivado directamente de la lignina, la lignina glioxalada es usada ampliamente en industrias donde se necesita comprimir materiales, es así como puede ser utilizada en cerámicas, pellets para alimentos de animales, supresor de polvo, estabilizador de suelos, fertilizante, herbicida y para producir paneles de astillas prensadas [45].

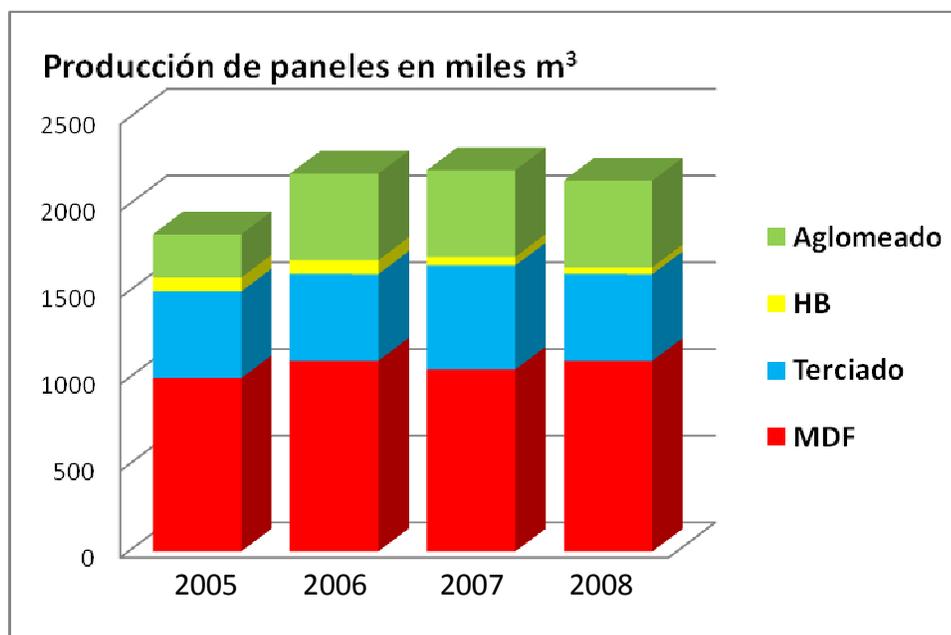
Los paneles son planchas de astillas, virutas o laminas de madera, orientadas en forma de capas cruzadas para aumentar su fortaleza y rigidez, unidas entre sí mediante adhesivos químicos aplicados bajo alta presión y temperatura [46]. Los paneles pueden ser de cuatro tipos: aglomerado (aserrín presando), HB (hardboard, tablero de fibra de alta densidad entre 0,80 Kg/dm³ y 1,2 Kg/dm³), terciado (es un tablero de pino radiata, de gran simpleza, fabricado con resina fenol formaldehído) y MDF (panel fabricado con fibra de mediana densidad, son paneles homogéneos debido a la ausencia de nudos³⁷)

³⁶ Glioxal: compuesto orgánico de fórmula OCHCHO, que tiene un aspecto de cristales amarillos o líquido amarillo pálido, viran a blanco por exposición a bajas temperaturas. Es inodoro. Reacciona violentamente al mezclarlo con agua.

³⁷ Nudos, se refiere a los nudos de la corteza que puede tener un árbol.

Durante los últimos años se ha incrementado la producción de paneles (Gráfico 16), debido a su versatilidad, propiedades termo-físicas y menor precio de la madera [47].

Gráfico 16: Capacidad de producción de paneles de Arauco.



Fuente: Elaboración propia en base a Memoria anual 2008 de Arauco.

Arauco fabrica cerca del 50%, de total de paneles que se produce en Chile, por ello si Arauco fabrica alrededor de 510 mil m³ de MDF y 750 mil m³ de terciado, la producción en Chile alcanzaría a los 2,5 MM de m³ de paneles en total.

Por cada m³ de panel construido se necesitan cercan de 70 kg de adhesivo o resina, dato señalado por ingeniero químico del rubro³⁸. Con esta información se tiene que en total se necesitan 175 mil toneladas anuales para la construcción de paneles.

Los paneles están sujetos a ciertas normas de calidad, por ejemplo, para que un panel pueda ser vendido en Europa, tiene que cumplir con E1³⁹ señalada por la FIEM⁴⁰. El mercado europeo representa el 9%. En Estados Unidos deben cumplir con la norma CARB⁴¹; mercado que representa cerca de un 15%. El resto de clientes lo compone Latinoamérica con un 72% y un 4% otros países, que no poseen una norma que regule la cantidad de formaldehído en los paneles.

³⁸ No se dan más datos por confidencialidad.

³⁹ E1: norma europea que establece el contenido de formaldehído en paneles.

⁴⁰ FIEM: Federación Española de la Industria Maderera.

⁴¹ CARB: norma que mide las concentraciones de formaldehído tóxico en el aire.

El adhesivo químico usado en la fabricación de paneles puede ser reemplazado por lignina glioxalada. Esta última tiene la ventaja de ser una resina natural libre de productos tóxicos como es el fenol formaldehído (PF)[44].

Si se considera que, un 25% del mercado de paneles está bajo regulación estricta (Europa y Estados Unidos), éste puede ser el posible mercado para la lignina glioxalada. Es decir existiría una demanda de 43,5 mil toneladas anuales de lignina glioxalada. En Chile el uso de este tipo de adhesivo natural no tendría una buena proyección dado a que económicamente no sería rentable. Esto último viene dado porque en Chile no hay una regulación, como la que tiene Europa o Estados Unidos, que especifique la cantidad de formaldehído en los paneles y porque el precio de este adhesivo es superior al precio de la resina que se ocupa en Chile.

Otro factor a considerar es el precio de las resinas o de adhesivos, el cual varía a nivel mundial. Por ejemplo la resina usada en MDF tiene un valor que varía entre los 590 - 450 US\$/ton. En cambio como la lignina glioxalada está clasificada como resina de origen celulósico y el precio de éste tipo de resina está en un promedio a 1.800 US\$/ton [48]. La diferencia en precio entre estas dos tipos de resinas es de 1.300 US\$/ton, claramente la resina que posee formaldehído es más barata, es por esto que el mercado de la lignina glioxalada puede ser en aquellas parte en donde este normado el uso de resinas.

El precio de la lignina puede estar entre los 90 a 4.400 US\$/ton, esto depende del grado de pureza que la lignina tenga. Se observa como al producir lignina glioxalada, la lignina adquiere un valor agregado que antes no tenía. En el capítulo sobre Análisis de sensibilidad se habla sobre cómo afecta este precio al proyecto.

4.4.2.3. Levadura

La levadura que proviene del caldo fermentado (DDGS) generado en el proceso para producir bioetanol, se puede utilizar como producto para cosmetología o como alimento para animales.

En el caso de este proyecto, la levadura que se va reproduciendo y creciendo en la fermentación es una levadura transgénica⁴², por lo que sólo se puede ocupar para la industria cosmetológica [49]. El DDGS también es usado como suplemento alimenticio para animales y aves[50].

⁴² Ser vivo, que tiene incorporado algún gen exógeno, o más de uno, a fin de modificar algunas de sus cualidades o propiedades.

Para calcular el precio del DDGS, es importante saber el origen del producto del cual se va a generar este DDGS; si la materia prima que produce bioetanol fuese maíz o cereal, el precio del DDGS se calcularía de la siguiente manera⁴³:

$$\text{Precio DDGS} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{Ton}} \right] = 42,52 + 21,98 \cdot \text{Precio Maíz} \left[\frac{\text{US\$}}{\text{bushel}} \right]$$

En el caso de este proyecto el DDGS se venderá para uso exclusivo en cosmetología, el precio va depender de la oferta-demanda de éste. Se tiene por registro que el kilo de DDGS se vende a un precio de 1,5 US \$/kg [49], [51].

4.4.2.4. CO₂

En la fermentación se producen principalmente, bioetanol y CO₂. El CO₂ tiene variados usos como por ejemplo: ser agente extintor, eliminando el oxígeno para apagar el fuego; en la industria alimenticia se utiliza para dar efervescencia a las bebidas carbonatadas. Se puede ocupar además en refrigeración, como liquido congelante en máquinas frigoríficas. [52].

La producción industrial de CO₂ puede causar desequilibrios en el medio ambiente, debido a que la acumulación de estos causa el efecto invernadero, y si se quiere almacenar, puede causar el efecto de ausencia de CO₂ en el medio con lo que evitará la fotosíntesis⁴⁴ en forma normal. El almacenaje de cantidades industriales de dióxido de carbono no es fácil porque requiere de una gran inversión en cuanto a instalaciones se trata, además de los espacios necesarios para su almacenamiento y la percepción social negativa que tiene [53].

Se ha optado ocupar el CO₂ como efervescente de bebidas carbonatadas, dado las razones anteriormente señaladas. Se desea vender sólo una parte de dióxido de carbono producido y el resto liberarlo al medio ambiente para que esté disponible para la fotosíntesis. El transporte de éste, no será tratado por ser un tema anexo al estudio.

⁴³ Calculo desarrollado por el Departamento de Economías Agrícolas de la Universidad de Purdue de Estados Unidos.

⁴⁴ Proceso mediante el cual las plantas, algas y algunas bacterias captan y utilizan la energía de la luz para transformar la materia inorgánica de su medio externo en materia orgánica que utilizarán para su crecimiento y desarrollo.

El precio del CO₂ se ha visto afectado severamente en la última década con la firma del protocolo de Tokio⁴⁵[54]. La producción de CO₂ a nivel mundial ha decrecido considerablemente y con esto su precio. El precio promedio estimado en el mercado en la Unión Europea y Chicago tiene un valor de 17 US \$/ton de dióxido de carbono [55].

4.5. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El proceso productivo se lleva a cabo en una serie de pasos, que incluyen desde la manipulación inicial del material lignocelulósico, pasando por separaciones, fermentaciones y destilaciones hasta llegar a la obtención del producto final, etanol. A continuación se describe cada uno de los pasos del proceso (ver Figura 13).

El proceso que se presenta a continuación no es la única alternativa para la producción de bioetanol. Existen variantes del proceso, según la etapa del proceso. Por ejemplo, para el pretratamiento, existen métodos como hidrólisis ácida diluida, AFEX⁴⁶, hidrólisis alcalina, explosión con líquido caliente, explosión a vapor, entre otras. Para la etapa de fermentación existen variadas formas que se tratan en capítulos posteriores.

Los parámetros y condiciones de operación de cada una de las etapas del proceso se encuentran especificados en el Balance de masa del sistema.

4.5.1. Molienda

El objetivo de esta etapa es poder aumentar la superficie de contacto entre la biomasa y los reactivos, solventes y enzimas que se usarán en etapas posteriores. Se busca que el material lignocelulósico se empiece a separar entre sus componentes (lignina-hemicelulosa-celulosa), para que posteriormente se reduzcan los tiempos de tratamiento y se incremente la zona de contacto entre reactivos y los componentes del material lignocelulósico.

Esta es la primera etapa en que a la materia prima (residuo de eucalipto) se le reduce el tamaño (tratamiento físico). Este proceso se desarrolla en dos fases: la primera corresponde a un molino de bolas en el cual se reduce el tamaño del material desde su estado inicial a 50 mm; luego pasa

⁴⁵ El Protocolo de Kioto sobre el cambio climático es un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases que causan el calentamiento global

⁴⁶ AFEX: explosión de fibra mediante amoníaco.

a una segunda trituradora, en la cual con otro molino de bolas se logra un tamaño de 2 mm [32].

Cabe señalar que para poder calcular una estimación de los costos de esta etapa hay varios factores a considerar, como el nivel de molienda necesario, el tipo de residuos que está entrando al proceso (desfibrar) y el tratamiento que viene a continuación. En la primera etapa el consumo de energía es menor, cercano a los 50 Wh/kg, en cambio en la segunda, en donde el tratamiento es más fino, se puede llegar a consumir entre 150-700 Wh/kg [42].

4.5.2. Pretratamiento

En esta etapa el principal objetivo es poder dejar expuesta la celulosa para que sea atacada en etapas posteriores, en las cuales enzimas y microorganismos producirán etanol. En la literatura existen variados tipos de pretratamientos como pueden ser: físicos, biológicos, químico, mecánicos y mezclas de ellos. Se observa en la Tabla 10 las características principales de los distintos métodos.

Considerando que se desea diseñar una planta de biorefinería, en donde los costos industriales son relevantes. Además de que se necesita una alta recuperación de pentosas para producir furfural, y que se desea aumentar la eficiencia de la hidrólisis enzimática que ocurre en etapas posteriores, se decidió utilizar explosión a vapor catalizada. Además que es uno de los pretratamientos que usa menos recursos químicos, consume menos energía y genera furfural [56].

Se descarta el pretratamiento de hidrólisis ácida por varias razones. En primer lugar, porque genera demasiados residuos tóxicos, como son vapores de ácido sulfúrico; además posee un mayor gasto energético, lo que se traduce en mayores costos económicos (mayor tiempo de operación que explosión a vapor). Además para lograr los efectos que se muestran en la Tabla 10 se necesita usar una razón de 3:1 en peso de ácido sulfúrico respecto a la materia prima, con el consiguiente gasto excesivo en ácido.

El reemplazo de la hidrólisis ácida por otro método, causa que las eficiencias del proceso sean distintas. Con hidrólisis ácida la recuperación de pentosas (pentosas libres de ser transformadas) es superior al 80% y la reducción de tamaño que se consigue es alta (ver Tabla 10).

La explosión a vapor catalizada consta de dos etapas. La primera corresponde a la impregnación del material que ha salido de la molienda toda una noche con ácido sulfúrico (H_2SO_4) en condiciones ambientales normales (presión atmosférica y temperatura ambiental). Luego el

exceso de ácido es descartado [57]. También se puede usar dióxido de azufre (SO₂) pero los costos son mayores. La segunda etapa corresponde propiamente tal a la explosión con vapor.

La explosión a vapor puede realizarse de dos formas. La primera es a una temperatura alta por poco tiempo (205 °C por 5 a 6 min [58],) y la segunda a una temperatura más baja pero por un mayor tiempo (190°C por 10 min [59]). Ambas etapas ocurren a una presión constante de 2 atm. En nuestro caso se eligió la segunda alternativa, dado un consumo menor de energía y los rendimientos en cuanto a la reducción de tamaño son casi los mismos [60].

Tabla 10: Método de los principales pretratamientos.

Característica	Métodos de pretratamiento			
	Explosión a Vapor	Explosión a vapor catalizada	Hidrólisis acida	Termo-hidrólisis
Condiciones de Operación	Batch ⁴⁷ o continuo 190-270 °C 1 a 10 min.	Batch o continuo 160-200°C 1 a 10 min.	Batch o continuo 150-180°C 5 a 30 min.	Batch 170-230°C 5 a 60 min.
Consumo de compuestos químicos	NO	SI	SI	NO
Recuperación de pentosas	45 a 65%	>80%	>80%	>80%
Formación de inhibidores	SI, bajo estrictas condiciones	SI, bajo estrictas condiciones	SI, bajo estrictas condiciones	Poco
Reducción del tamaño de partículas	Medio	Medio	Alto	Medio
Eficiencia en la hidrólisis enzimática	>70%	>80%	>90%	>80%
Generación de residuos	Insignificantes	Moderado	Importante	Insignificantes
Corrosividad al medio	Alto	Moderado a alto	Moderado	No evaluado
Uso	Planta piloto	Planta piloto	Plantas pilotos demostrativas	Laboratorio

Fuente: Pereira, 2008 [32].

⁴⁷ Batch: proceso que ocurre en lotes

El método escogido genera inhibidores de la levadura. Las levaduras son usadas en la fermentación para la producción directa de etanol. Más de 35 inhibidores potenciales se han identificado en el proceso, entre ellos se ve que existen compuestos aromáticos⁴⁸, furanos[59] (producidos por la degradación de pentosas), y aldehídos alifáticos⁴⁹ [61].

La importancia de estos inhibidores radica en que si no son controlados, los rendimientos en la etapa de fermentación pueden ser bajos, debido a que la levadura no es capaz de consumir la glucosa para transformarla en etanol.

4.5.3. Separación sólido/líquido.

En esta etapa se separa los compuestos provenientes del proceso de pretratamiento en dos corrientes, una sólida y una líquida. Los sólidos son enviados a una etapa de separación triple de celulosa, hemicelulosa y lignina. El líquido que contiene hemicelulosa, azúcares de 5 y 6 carbonos y los inhibidores, es llevado a la etapa de neutralización y detoxificación.

Esta etapa se realizará con filtro rotatorio, tema que se tratará más adelante en el capítulo que hace referencia al dimensionamiento de equipo.

4.5.4. Neutralización y detoxificación.

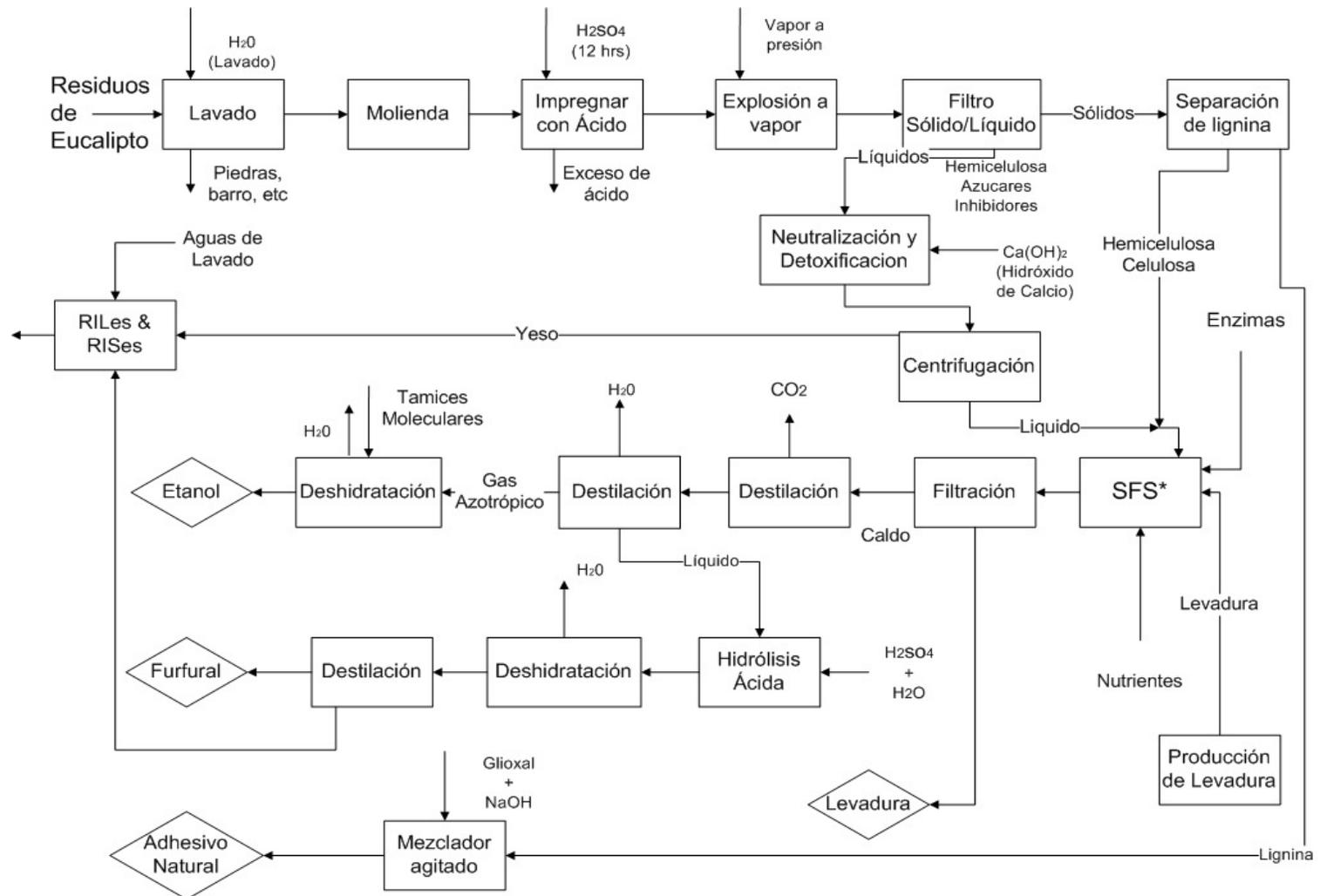
En esta etapa los inhibidores son neutralizados y para tal efecto existen varios métodos, pero el más usado por sus bajos costos, es aquel en el cual se agrega hidróxido de calcio Ca(OH)_2 . Otros métodos pueden ser extracción con solventes orgánicos, intercambio iónico, tamices moleculares y destilación [62].

En este proceso el Ca(OH)_2 se une a los inhibidores, haciendo que estos precipiten, lo que hace que se puedan separar de manera fácil con una centrifuga tubular.

⁴⁸ Compuesto aromáticos: compuestos que tiene anillos fenólicos (6 carbonos que forman un ciclo).

⁴⁹ Son compuesto lineales abiertos conformados por carbono e hidrógeno que poseen el grupo funcional aldehído (CHO).

Figura 13: Diagrama de bloques del proceso de producción de etanol y subproductos.



Fuente: Elaboración propia en base a bibliografía recopilada.

*SFS: Sacarificación y Fermentación Simultánea.

4.5.5. Centrifugación

Ocurre en una centrifuga tubular que soporta un flujo de entrada entre 8-100 lt/min, que tiene una eficiencia del 80%, que puede separar entre 0,1-200 micras. La torta generada es sólida, permitiendo una remoción de ésta completamente[63]. Esta torta corresponde a yeso, que es enviada a las piscinas de acopio de RILes y RISes. La fase líquida se junta con la fase sólida proveniente de la primera separación sólido/líquido en el fermentador.

4.5.6. Separación triple de celulosa, hemicelulosa y lignina.

A esta etapa llega la corriente sólida proveniente de la separación sólido/líquido, la cual es sometida a un proceso de separación en donde se generan tres corrientes. La celulosa, hemicelulosa y lignina son separadas satisfactoriamente en un proceso continuo, que no dura más de 10 min. Esta separación se realizará por el método patentado de PureVison Technology.

A su vez, este fraccionamiento de biomasa consiste en dos etapas. En la primera etapa se convierte la hemicelulosa a azúcares de hemicelulosa, dejando la celulosa y la lignina intacta en forma sólida. En la segunda etapa se fracciona el sólido dejando un licor que contiene lignina de alta calidad, con trazas de hemicelulosa que quedaron como remanente de la primera etapa. De esta manera se logra concentrar la celulosa hasta un 90 - 97% de pureza [64].

La corriente de hemicelulosa y de celulosa es enviada directamente al fermentador en donde ocurrirá la hidrólisis enzimática y la fermentación en simultáneo (SFS⁵⁰).

4.5.7. Hidrólisis enzimática y fermentación simultánea (SFS).

La hidrólisis enzimática es el proceso en el cual la celulosa es convertida a glucosa mediante el uso de enzimas. Estas enzimas (celulasas) pueden ser de tres tipos:

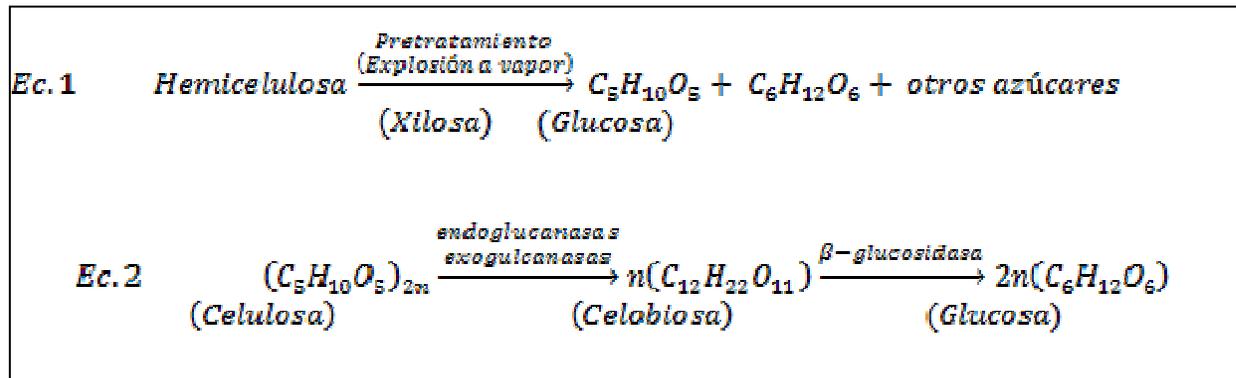
- a) Endoglucanasas que atacan las regiones en donde la fibra de la celulosa tiene baja cristalinidad, creando extremos libres.
- b) Exoglucanasas o celobiohidrolasas que degradan la fibra removiendo unidades de celobiosa de las cadenas libres antes formadas.

⁵⁰ SFS: Sacarificación y Fermentación Simultánea.

c) β -glucosidasas que hidrolizan la celobiosa y deja la glucosa como monómero (Ec. 2).

Además existen otras enzimas que atacan a la hemicelulosa como las glucoronidasa y xilanasas, entre otras [65].

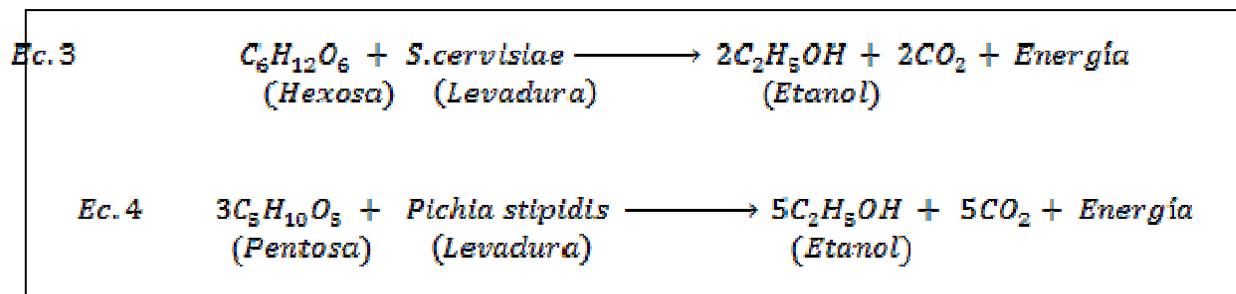
Figura 14: Hidrólisis de celulosa.



Fuente: Sánchez, 2005 [66]

La fermentación es el proceso en el cual los azúcares son transformados en bioetanol liberando CO₂. Este proceso es mediado por microorganismos como levaduras. En particular se tiene que *Saccharomyces cerevisiae* es capaz transformar la glucosa (Ec. 3) y *Pichia Stipidis* (Ec. 4) tiene la habilidad para transformar pentosas como xilosas y arabinosa (Figura 15).

Figura 15: Fermentación de pentosas y hexosas.



Fuente: Sánchez, 2005[66]

Para esta etapa existen variadas alternativas que pueden implementarse [33]:

I. HFS (hidrólisis enzimática y fermentación separadas)

Es la más antigua de todas, en donde la hidrólisis enzimática (HE) se lleva a cabo en reactores separados de la fermentación de 5 y 6 carbonos, y es la menos eficiente debido a que los

inhibidores generados en la HE⁵¹ pasan a la siguiente etapa, por consiguiente hay un baja actividad de fermentación.

II. SFS (sacarificación⁵² y fermentación simultánea)

En este métodos la HE⁵³ y la fermentación de azúcares de 6 carbonos se realizan en el mismo reactor; la fermentación de los azúcares de 5 carbonos se realiza en otra etapa.

III. SCFS (sacarificación y co-fermentación simultánea)

En este método la HE y la fermentación de azúcares de 5 y 6 carbonos se realizan en el mismo reactor.

IV. BPC (Bioproceso consolidado)

En este método, tanto la HE como la fermentación de azúcares de 5 y 6 carbonos son realizados en conjunto, pero además en el interior del reactor se produce las enzimas que actúan en la HE.

Al comparar las primeras dos opciones se observa que con HFS se generan inhibidores que con SFS no se producen, dado que se forman y se consumen los azúcares de manera simultánea (la hidrólisis los genera y la fermentación los consume). Como en SFS los dos procesos ocurren en un mismo reactor, los costos de implementación son menores que en HFS, además al no existir una separación de la glucosa y lignina, se evita el perder producto debido a la degradación de azúcares y con esto se aumenta el rendimiento de etanol [67]. Sin embargo, HFS tiene ventajas como por ejemplo que se puede recuperar la levadura utilizada ya que en SFS se trabaja con la fracción sólida que tiene problemas para separarse debido a la presencia de lignina; es decir, en SFS no se podría recuperar la levadura.

Otra ventaja de HFS es que se puede alcanzar la temperatura óptima para la hidrólisis enzimática independientemente de la temperatura óptima que necesita la levadura para trabajar. En cambio en SFS se trabaja con una temperatura intermedia[68].

Las últimas dos configuraciones (SCFS y BPC) apuntan a sistemas completamente integrados, en donde se requiere de técnicas de la ingeniería genética que modifiquen microorganismos para que sean capaces de fermentar azúcares de 5 y 6 carbonos en forma simultánea[3].

Para el desarrollo de este trabajo se ha decido utilizar SFS, dado que no se desea fermentar las pentosas, xilosa en particular. Estas serán utilizadas para la producción de furfural. Asimismo, el costo elevado de implementar HFS es razón para optar por otro método. Por último, la razón de

⁵¹ HE: Hidrólisis Enzimática.

⁵² Conversión de sustancias en azúcar vía hidratación.

mayor peso en la decisión, es que con SFS los rendimientos de etanol (gr. de etanol / lt. de caldo fermentado⁵⁴) son mayores, lo que da alicientes a ocupar esta tecnología. El valor de conversión que se uso es de 0,43 gr/gr, es decir, por cada gramo de glucosa se obtiene 43 gramos de bioetanol.

Se trabajará con *Saccharomyces cerevisiae* Red Star, cepa industrial de levadura que no degrada pentosas. Si bien es más lenta la producción de bioetanol que en otras cepas, permite que las xilosas no sean transformadas y pasen a la siguiente etapa sin sufrir degradación alguna.

La fermentación se realizará por 80 horas a 37 °C, condiciones en que experimentalmente se han obtenido 15 gr/lt de concentración de etanol [68]. Para la hidrólisis enzimática se ocuparán celulasas comerciales que no tengan costos tan elevados. Por ejemplo si se disminuye un 50% del precio de una enzima (enzima de más baja calidad) se consigue un tiempo de residencia mayor en un 6 a 7% superior (la enzima es más lenta en la hidrólisis de la celulosa), lo que indica que el precio puede dar ventajas considerables a la hora de hacer sustentable el proyecto económicamente dejando tiempos de residencia mayores [62].

4.5.8. Separación de levadura

Luego del proceso de sacarificación y fermentación simultánea (SFS), se pasa el caldo fermentado a un centrífuga que separa las levaduras de la fracción líquida. Una parte del total de levaduras son llevadas a las piscinas de RISes, mientras que la otra se almacena y se deja como co-producto final del proceso.

Posteriormente el caldo sin levaduras pasa directamente a dos destiladores en serie en donde se extraerá el etanol.

4.5.9. Destilación

Se lleva a cabo en dos destiladores ubicados en serie. En el primero se logra extraer la mayor cantidad de CO₂ y agua proveniente de la etapa anterior, y en el segundo se logra extraer el etanol [69]. El etanol que saldrá de esta etapa vendrá con 4% de agua (mezcla azeotrópica) por lo que necesita una etapa posterior para alcanzar un estado más puro.

⁵⁴ Caldo fermentado: caldo generado en la fermentación, que por lo general está compuesto de etanol, nutrientes, medio de cultivo y el microorganismo que fermenta los azúcares.

Ambas columnas trabajarán a menos de 2 atm de presión [69] cada una. La cantidad de platos y diseño de estos se tratará en el capítulo de dimensionamiento de equipos.

4.5.10. Deshidratación

En esta etapa el etanol 96% puro, es concentrado hasta 99,5%. Para lograr esta alta concentración el destilado pasa a través de tamices moleculares. Los tamices moleculares son materiales que contiene pequeños poros de un tamaño preciso y uniforme que se usa como agente adsorbente para gases y líquidos[70]. En este caso se usará un tamiz molecular llamado 3Å⁵⁵ que retendrá el agua en sus poros.

La deshidratación se llevará a cabo en dos tamices moleculares que están conectados en serie. En la operación mientras uno esta adsorbiendo el agua, el otro está desadsorbiendo el agua que ya entró en el poro.

4.5.11. Producción de furfural

Las corrientes provenientes de los destiladores están compuestas por pentosas, lignina, agua, inhibidores y restos del caldo fermentado. Para producir furfural es necesario hacer en una primera instancia hidrólisis ácida (H_2SO_4) de los compuestos que aún no se han separado en monómeros, como son los xilanos (polímeros de xilosa). Esta hidrólisis ácida además tiene la función de deshidratar las xilosas, para generar furfural.

Como segundo paso, el hidrolizado pasa por una deshidratación hecha en tamices moleculares similares a los del proceso para concentrar etanol. Estos tamices también son del tipo 3 Å y actúan en serie.

Finalmente se termina con la destilación de la corriente proveniente de los tamices moleculares, en donde el furfural se concentra a los niveles requeridos [43].

⁵⁵ 3Å: 3 Amstrong.

4.5.12. Producción de lignina glioxalada.

La corriente que contiene lignina sólida generada en la triple separación de hemicelulosa, celulosa y lignina, es mezclada con glioxal, hidróxido de sodio y agua en un reactor agitado. Esta mezcla forma una pasta consistente que dará origen a un adhesivo natural. El reactor opera condiciones normales (temperatura ambiente y presión atmosférica), con un tiempo de residencia de 30 minutos.

4.5.13. Recolección de RILes y RISes

Todas las corrientes residuales generadas en alguna etapa, tanto RILes y RISes, son almacenados en piscinas de concreto para su posterior retiro de la planta, ya que el tratamiento de aguas será subcontratado; este costo se incluye en el análisis económico.

Las corrientes que se unen en las piscinas corresponden a las generadas en la centrifugación después de la neutralización y detoxificación de inhibidores, a las corrientes con nutrientes, enzimas y medio de cultivo que quedan después de la destilación de furfural, y aquellas corrientes que contienen los excedentes de la etapa de pretratamiento. Luego, empresas del rubro de tratamiento de aguas como son EcoRiles, BravoEnergy y Riles ESSBIO, se encargan de ir a buscar los desechos y luego tratarlos. En particular se tiene que Riles ESSBIO está ubicada en la octava región del país, lo que facilita el traslado de las aguas y sólidos.

4.6. BALANCES DE MASA.

El balance de masa se realizó en base a datos encontrados en la bibliografía y bajo supuestos que se detallarán en cada etapa. Se analizaron las corrientes principales de proceso para producir bioetanol y productos de biorefinería.

Los cálculos se realizaron dando una base de una tonelada que entra al proceso, sin considerar la etapa de lavado y sin considerar pérdidas de masas importantes en cada proceso.

El resumen de la composición másica de todas las corrientes del balance de masa se encuentra en el Anexo 8 al igual que la simbología de cada una de las corrientes del proceso en el Figura 16.

Es de vital importancia tener un balance masa. Con éste se pueden calcular la cantidad de insumos requeridos por etapas, a la vez permite el dimensionamiento de equipos para así obtener costos asociados al diseño de la planta.

4.6.1. Lavado

La materia prima que entra al proceso contiene aproximadamente un 13% en peso de piedras y lodo. Estos residuos son retirados mediante la operación de lavado. Por lo tanto, si entra una tonelada al siguiente proceso de molienda, es claro que el proceso comenzó con 1,13 toneladas de materia prima. El agua proveniente de esta etapa se puede reciclar de tal manera que se ocupe para los siguientes lavados de materia prima, de esta manera esta agua de lavado no se acumularía en las piscinas de RILes. Además la reutilización genera ahorro en el costo del agua.

La cantidad de lodo y piedra al final de esta etapa esta dado en la Tabla 11.

Tabla 11: Composición de las agua de lavado.

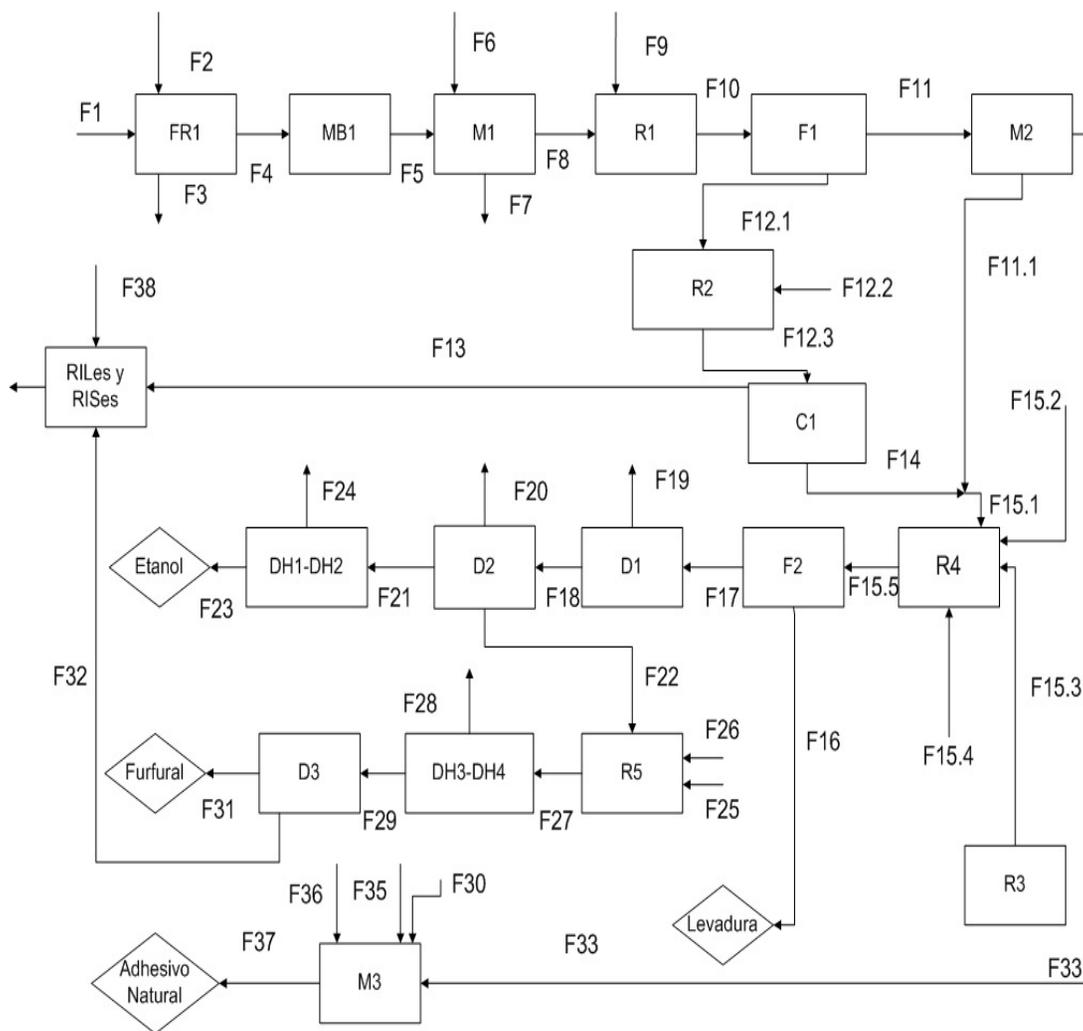
Compuesto	Masa aprox. [kg]/tonelada
Agua	900
Lodo + Piedras	150

Fuente: Elaboración propia en base al balance de masa realizado.

4.6.2. Molienda

Considerando que entra 1 tonelada de materia prima limpia a esta etapa y teniendo en cuenta la composición química del material, se puede calcular la masa que está entrando de los compuestos principales (Tabla 12). Estos resultados son extrapolados de datos de molienda de álamos que son arboles de madera dura al igual que lo es el eucalipto.

Figura 16: Diagrama de flujos.



Nombre Equipo	Código
Filtro rotatorio con lavado	FR1
Molino de bolas vibratoria	MB1
Mezclador	M1
Reactor explosión a vapor	R1
Filtro rotatorio	F1
Mezclador	M2
Reactor	R2
Centrifuga tubular de tazón sólido	C1
Reactor Inoculo	R3
Fermentador batch	R4
Filtro prensa	F2
Columna de destilación de CO ₂	D1
Columna de destilación de etanol	D2
Columnas de deshidratación de etanol	DH1, DH2
Reactor	R5
Columna de destilación de furfural	D3
Columnas de deshidratación de furfural	DH3, DH4
Mezclador	M3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12: Composición específica de la corriente de entrada a la molienda.

Compuesto	%	Masa aprox. [kg]/tonelada
Xilosa	22,9	229
Arabinosa	2,02	20
Galactosa	3,2	32
Manosa	3,56	36
Celulosa	43,61	436
Lignina	19,3	193
Cenizas	0,16	2
Extraíble	5,25	53

Fuente: Oliva, 2003[60].

Después de la molienda, se supone que las cantidades por compuesto se conservan (Ley de conservación de masa⁵⁶). Además, se sabe muy bien que la madera tiene la capacidad de absorber agua; de hecho, se considera que un 10% de la tonelada de materia que entró es agua [71].

Se ha considerado una pérdida del 2% de material en esta etapa debido a que es prácticamente imposible recuperar todo el material tratado, ya que tiene un tamaño cercano a los 2 mm⁵⁷.

4.6.3. Pretratamiento por explosión a vapor.

En esta etapa se considera la impregnación del ácido sulfúrico durante una noche y la adición de vapor de agua, como corrientes importantes, además de la corriente que ingresa a esta etapa proveniente de la molienda.

El impregnado con ácido sulfúrico diluido al 1% v/v⁵⁸, se realiza a una razón tal, que después que toda la madera absorbió el ácido, el peso total sea el triple del inicial [40]. De esta forma por cada tonelada que entra al comienzo del proceso es necesario agregar 22 kg del ácido en casi 2.800 litros de agua.

El flujo de vapor que se agrega al reactor en la explosión a vapor, es un dato del cual aún no se posee una información acabada que permita saber en forma precisa cuanto es lo que se debe

⁵⁶ En toda reacción química la masa se conserva, es decir, la masa consumida de los reactivos es igual a la masa obtenida de los productos.

⁵⁷ mm: milímetro.

⁵⁸ v/v: volumen del compuesto/volumen de solución.

agregar, pero si se tiene un rango que varía desde una razón 1:1 (1 tonelada de vapor de agua por 1 ton de materia prima) a una razón de 3:1 (3 tonelada de vapor de agua por 1 ton de materia prima). La literatura muestra que este tipo de proceso está sometido a constantes repeticiones de bombeo de vapor a presión al interior del reactor, hasta llegar al resultado que se desee, sin la medición de cuanto vapor se ha gastado en el proceso [60].

En esta etapa la generación de inhibidores producidos en la explosión a vapor, corresponden a un flujo importante de compuestos químicos. En la Tabla 13 se muestra el tipo de compuesto del cual se origina el inhibidor, su composición en la corriente con su correspondiente cantidad másica. El total de inhibidores no es superior al 3,4% del total de la solución.

Tabla 13: Composición de inhibidores.

Inhibidor formado	Origen	%	Masa aprox. [kg]/tonelada
Ácido acético	Grupo funcional hemiacetal ⁵⁹	2,1	68
Ácido fórmico	Furfural y HMF ⁶⁰	0,46	45
Furfural	Pentosas	0,62	67
HMF	Hexosas	0,12	14
Ácido 4 hidrobenzoico	Lignina	0,1	35

Fuente: Oliva, 2003.

Luego de esta etapa, el flujo pasa por un filtro rotatorio que generará dos corrientes, una líquida que se irá hacia la detoxificación y una sólida que irá hacia la triple separación de hemicelulosa, celulosa y lignina.

4.6.4. Detoxificación.

En esta etapa la corriente proveniente de la separación sólido/líquido está compuesta principalmente por pentosas, hexosas, celulosa soluble, inhibidores y agua (39% del total de materia prima). Estos inhibidores son fatales en la fermentación, debido a que afectan negativamente al rendimiento de la levadura, por esto es fundamental detoxificar la solución.

⁵⁹ Un hemiacetal es una molécula que contiene un grupo -OH y un residuo -OR unidos a un mismo átomo de carbono. Se forma por reacción de una cetona o un aldehído con un alcohol.

⁶⁰ HMF: Hidroximetilfurfural

Como detoxificante se usará hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)⁶¹, que hará que los inhibidores precipiten. Se debe agregar 2 kg (1,2%) [56] de hidróxido de calcio por cada 1 ton de materia prima que ingresa a la detoxificación. Esta cantidad es baja debido a que solo un 3,4% corresponde a inhibidores. No se necesita una cantidad excesiva de cal para poder lograr la precipitación total de los inhibidores.

4.6.5. Separación de celulosa, hemicelulosa y lignina.

La corriente sólida generada en la separación sólido/líquido, llega a esta etapa con un 61% del total de materia prima (Tabla 14). Suponemos que el proceso de separación triple no genera pérdidas, por lo que cada corriente a la salida está compuesta como lo indica la Tabla 15.

Tabla 14: Composición de la corriente sólida de entrada a la triple separación.

Compuesto	Masa aprox. [kg]/tonelada
Lignina	115
Celulosa	353
Hemicelulosa	236
Extraíble	32
Ceniza	0,9
Agua	69
Ácido sulfúrico	18

Fuente: Elaboración propia en base al balance de masa realizado.

Tabla 15: Composición a la salida de la triple separación.

Compuesto	Masa aprox. [kg]/tonelada
Lignina	115
Celulosa	353
Hemicelulosa	236

Fuente: Elaboración propia en base al balance de masa realizado.

⁶¹ Hidróxido de calcio, también conocido como cal muerta y/o cal apagada. Es un cristal incoloro o polvo blanco, obtenido al reaccionar óxido de calcio con agua.

4.6.6. SFS⁶².

En esta etapa se juntan las corrientes que provienen de la triple separación, exceptuando la de lignina, con la corriente que proviene de la detoxificación (ver Figura 16).

Se debe agregar las enzimas necesarias que actuarán en la hidrólisis, las levaduras que a través de la fermentación producirán bioetanol y los nutrientes necesarios para que la levadura pueda crecer (ver Anexo 7).

La cantidad de levadura está determinada por el crecimiento⁶³ que ésta tenga. Se posee un valor de literatura de 0,4 gr/lit de fermentado [72], que viene dado por un crecimiento máximo (μ_{\max}) de 0,2625 hr⁻¹.

Para calcular la cantidad necesaria de enzimas (celulasas comerciales) se usa la actividad enzimática (FPU⁶⁴) como parámetro de diseño. Para nuestro caso se tiene un valor de 15 FPU/gr de sustrato [72].

La cantidad de nutriente se calculó en base a medios tradicionales de cultivo. Extracto de levadura 10 gr/lit, peptona 20 gr/lit, agar 20gr/lit [61].

La fermentación se lleva a cabo con una relación % peso/volumen del 10% [56, 62]. Es decir un 10% del volumen total del batch, corresponde al peso total del sustrato.

La Tabla 16 muestra las cantidades másicas necesarias para fermentar 1 tonelada de materia prima que entra a la molienda.

Tabla 16: Composición de enzimas, nutrientes y levadura.

Compuesto	Masa aprox. [kg]/tonelada
Levadura	0,1
Nutrientes	16
Celulasa comercial	94

Fuente: Elaboración propia en base a Luo, 2002[61].

⁶² SFS: sacarificación y fermentación simultánea.

⁶³ El crecimiento de la levadura está determinado por la cinética que ésta tenga. En nuestro caso se usa la cinética clásica de Monod con un μ_{\max} de 0,2526 hr⁻¹. Datos otorgados por Tomas Niklitschek memorista del Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología

⁶⁴ FPU: Filter Paper Units.

Al final de haber ocurrido la fermentación por 80 hrs a 37° C, se obtiene una composición como lo muestra la Tabla 17.

Tabla 17: Composición a la salida del fermentador.

Compuesto	Masa aprox. [kg]/tonelada
Xilosa	111
Arabinosa	3,2
Galactosa	5
Manosa	11
Lignina	382
Agua	402
Levadura	187
Enzima	23
Ácido acético	69
Furfural	19
HMF	11,5
Etanol	154
Nutrientes	3,2
CO ₂	204

Fuente: Elaboración propia en base al balance de masa realizado.

Para el rendimiento de la producción de alcohol se ocupó como referencia un 0,43 p/p⁶⁵ [68], es decir que por cada gramo de glucosa se obtiene 0,43 gramos de bioetanol. Se ocupa un nivel de consumo de nutrientes del 80% [72].

4.6.7. Destilación de bioetanol.

La destilación de etanol se produce en dos etapas: en una primera columna se saca la mayor cantidad de CO₂ y algo de agua, y en la segunda se destila el etanol que queda en una mezcla azeotrópica con el agua.

En la Tabla 18 se muestra cómo sale la composición de elementos después de la primera destilación por el “bottom”⁶⁶ de la columna.

⁶⁵ p/p: peso del compuesto (gr)/peso de solución (gr).

⁶⁶ Bottom: sección de la columna de destilación en el cual la mezcla está en estado líquido.

Tabla 18: Composición de la mezcla que sale como líquido del destilador.

Composición	Masa aprox. [kg]/tonelada
Xilosa	111
Arabinosa	3,2
Galactosa	5
Manosa	11
Agua	100
Ácido Acético	69
Furfural	19
HMF	11,5
Etanol	154
Nutrientes	3,2

Fuente: Elaboración propia en base al balance de masa realizado.

En la Tabla 19 se muestra la composición de compuestos en la rectificación⁶⁷ de la columna.

Tabla 19: Composición de la rectificación.

Composición	Masa aprox. [kg]/tonelada
Vapor de Agua	385
CO₂	205

Fuente: Elaboración propia en base al balance de masa realizado.

Cabe acotar que en la zona de rectificación se destila la mayor cantidad de CO₂ posible, cantidad que corresponde a la masa de dióxido de carbono que será comercializada.

En la segunda columna de destilación se obtiene el etanol con una mezcla de agua como lo muestra la Tabla 20.

Tabla 20: Composición de la destilación de bioetanol.

Composición	Masa aprox. [kg]/tonelada	%
Agua	15,2	9,5
Bioetanol	154,3	90,5

Fuente: Elaboración propia en base al balance de masa realizado.

⁶⁷ Rectificación: zona de la columna de destilación en la cual la mezcla está en estado gaseoso.

4.6.8. Deshidratación de bioetanol.

Para esta etapa se ocupan tamices moleculares que adsorben el agua que queda en la mezcla del destilado. En la Tabla 21 se muestra el resultado final de la deshidratación.

Tabla 21: Composición final del bioetanol.

Composición	Masa aprox. [kg]/tonelada	%
Agua	6,2	4,6
Etanol	154,3	95,4

Fuente Elaboración propia en base a estudio de la NREL⁶⁸ [69]

Es importante señalar que los rendimientos que se obtienen en este estudio (aproximadamente 200 lt. de bioetanol por tonelada de materia prima) son menores a los que se han encontrado en la literatura (250 -300 lt. de bioetanol por tonelada de materia prima), debido a que solo se fermenta la glucosa y no otros azúcares como xilosa, manosa, entre otros. Si se desea aumentar el rendimiento de la fermentación, una forma es fermentando la mayor cantidad de compuestos que sea posible, y para lograr esto último tal vez sea necesario ocupar otra cepa de levadura u otro microorganismo que pueda fermentar una mayor cantidad de tipos de azúcares.

4.6.9. Producción de furfural.

Se realiza en varios pasos consecutivos, en donde las corrientes importantes corresponden al ácido sulfúrico adicionado para la hidrólisis ácida y la corriente de composición final de furfural generada en la torre de destilación.

Para la hidrólisis ácida se ocupan los mismos supuestos que para la impregnación con ácido, es decir, que la masa final una vez hecha la hidrólisis es el triple a la inicial. Con esto, la cantidad de ácido sulfúrico diluido al 1% v/v que hay que agregar es de aproximadamente 1.230 kg en 39.700 kg de agua.

La composición final de la corriente de rectificación de la columna de destilación se muestra a continuación (Tabla 22).

⁶⁸ NREL: National Renewable Energy Laboratory.

Tabla 22: Composición final de furfural.

Composición	Masa aprox. [kg]/tonelada	%
Vapor de Agua	16	11
Furfural	123	89

Fuente: Elaboración propia en base a Lee 2008 [43].

4.6.10. Producción de lignina glioxalada.

Esta etapa se realiza en un reactor agitado en donde se genera el producto de características adhesivas. Su composición viene dada en la Tabla 23

Tabla 23: Composición final de lignina glioxalada.

Composición	Masa [kg]/tonelada	%
Agua	505	37,2
Glioxal	232	17,1
Lignina	382	28,1
NaOH⁶⁹	238	17,6
	1.357	100

Fuente: Elaboración propia en base a Pizzi, 2007[44].

Se obtiene 1,3 toneladas de lignina glioxalada por tonelada de materia prima que ingresa, hay que recalcar que la producción de este adhesivo se genera por la mezcla de los compuestos que aparecen en la Tabla 23.

Se tiene como principal supuesto la conservación de las masas al interior del reactor, debido que se modelo con una mezcla.

Un alumno de ingeniería en madera⁷⁰ comentó las razones del porque la lignina se puede usar como base de adhesivo y como ésta reacciona. Se debe considerar que la lignina posee una estructura 3D enorme, los grupos alcoholes (OH) de las unidades fenilpropano que conforman este cuerpo enorme, son los encargados de formar enlaces con el glioxal. Éste enlace generado es de gran fuerza, lo que deriva en un alto grado de polimerización de la molécula, y es ésta propiedad que le otorga a la lignina glioxalada ser usado como un adhesivo natural.

⁶⁹ NaOH: hidróxido de sodio.

⁷⁰ Consuelo Fritz

4.6.11. Tratamiento de aguas residuales.

En esta última etapa es donde se unen todas las corrientes sobrantes del proceso que no son utilizadas para generar algún coproducto. La composición de las aguas a tratar está en la Tabla 24.

Tabla 24: Composición de las aguas residuales a tratar.

Composición	Masa aprox. [kg]/tonelada
Xilosa	7,1
Arabinosa	3,2
Agua	7.100
Vapor de agua	900
Enzima	84
Ca(OH) ₂ ⁷¹	9
H ₂ SO ₄	165
Ácido Acético	69
Ácido fórmico	8,9
HMF	11,5
Nutrientes	3,3

Fuente: Elaboración propia en base al balance de masa realizado.

Esta agua es recolectada y almacenada en piscinas para que luego sean recogidas por camiones que llevaran las aguas a su tratamiento encargado a terceros.

4.6.12. Resumen de balance de masa de los productos.

El nivel de producción de bioetanol y de coproductos por tonelada de materia prima que ingresa al proceso se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25: Resumen nivel de producción.

Producto	Producción [kg /tonelada de materia prima]
Bioetanol	154
Furfural	123
Lignina glioxalada	1.357

⁷¹ Ca(OH)₂:hidróxido de calcio. Conocido comúnmente como Cal muerta.

CO ₂	204
Levadura (DDGS)	187

Fuente: Elaboración propia en base al balance de masa realizado.

Cabe recalcar que al final del balance de masa, la cantidad total de lignina glioxalada es superior a la masa de entrada de materia prima, debido a que la lignina glioxalada se genera de la mezcla de lignina, agua, NaOH (hidróxido de sodio) y glioxal.

4.7. ENERGÍA DEL PROCESO

Los balances de energía del proceso no se incluyen en esta investigación. Cabe señalar que la integración energética es fundamental en plantas industriales en donde se ocupan cantidades de energía considerable. La integración energética es una interacción de la energía entre las etapas del proceso. Por ejemplo si una etapa libera energía, ésta puede ir a satisfacer el uso de energía de alguna otra etapa.

En particular, este estudio posee un alto requerimiento de energía en las etapas de pretratamiento (explosión a vapor) y en las etapa de destilación del bioetanol y furfural.

En la explosión a vapor la energía se usa principalmente para calentar el agua al punto de ebullición (agua en forma de vapor), para que una vez que llegue a este estado sea inyectada a presión en el reactor.

Los destiladores son equipos especializados en la separación de compuestos que poseen una diferencia de punto de ebullición importante. Para lograr esta separación las corrientes son calentadas a temperaturas tales, que uno de los compuestos alcanza su estado de evaporación y sube por la columna para ser separado.

Es recomendable realizar un estudio de integración energética, estudio que ayudará a comprender el gasto energético de la planta y a la vez a encontrar ahorros económicos usando la energía liberada en alguna etapa, en otro proceso que necesite de energía.

4.8. CAPACIDAD DE LA PLANTA.

La demanda proyectada de bioetanol para el año 2010 corresponderá a 162.000 m³. Esta demanda se calculó pensando en que para esa fecha la demanda de etanol será de un 5% del total de gasolina que el país consume. Esto dado la legislación atinente que deja libre de tributo éste 5% de etanol. La mezcla corresponderá a lo llamado E5, que es 5% etanol y 95% gasolina.

La biorefinería que se ha diseñado es para una capacidad máxima de 421.000 toneladas anuales de residuo de eucalipto. Este residuo se obtendrá de la VIII y IX regiones del país. Las comunas seleccionadas de cada región están en el Anexo 5 y Anexo 6 (tema tratado en la Ubicación de la planta).

Con 421.000 toneladas de residuo se alcanza una producción máxima de etanol de 78.200 m³. En la Tabla 26 se muestra que los 78.200 m³ alcanzan para cubrir un 48% de la demanda total. Para alcanzar el 100% de los que el país necesitará para el 2010, se debe tener una cantidad de 873.000 toneladas de residuos anuales. Esta cantidad se puede alcanzar si y solo si, se reúne el total de residuos existente de las regiones antes señaladas.

Tabla 26: Capacidad de planta.

Región	Residuo [ton] anuales	m ³ de bioetanol anuales	% cubierto
VIII	421.000	78.200	48
VIII + IX	873.000	162.000	100

Fuente: Elaboración propia en base al balance de masa realizado.

Este último escenario hace elevar los costos de traslado, ya que hay zonas de la octava región que están a gran distancia de la ubicación de la planta, y que poseen poco residuo disponible. Ya que este residuo sería imprescindible para cubrir la demanda del 100% de etanol, se tendría que incurrir en los costos antes mencionados.

Con la cantidad de bioetanol que se producirá anualmente solo considerando la VIII región, se alcanzaría cubrir una demanda de mezcla de gasolina denominada E2, es decir, 2% de etanol y 98% de gasolina normal.

Con las 421.000 toneladas anuales de residuo que se tiene y bajo un funcionamiento de 335 días al año y 24 horas diarias de producción, se obtiene un procesamiento diario de

aproximadamente 52 toneladas por hora. Se ha dejado 1 mes completo del año para la mantención de la planta.

Es importante resaltar que la capacidad depende exclusivamente de la disponibilidad de materia prima que se tenga, es por esto que es fundamental conocer la época de cosecha del eucalipto. En conversaciones con alumnos de ingeniería forestal, comentan que solo en épocas del año en que llueve mucho, puede bajar un poco la cantidad de residuo disponible y que en gran parte depende a la maquinaria con que se cosecha, por ejemplo, existen cosechadoras que pueden trabajar en cualquier condición climática, en cambio maquinaria más antigua no lo puede hacer.

Se planteó que el promedio mensual de residuos durante el año puede ser muy similar, lo que garantiza la existencia de materia prima durante todo el año.

4.9. DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS.

Con las condiciones de operación señaladas en la sección anterior, se han diseñado los equipos y estanques para el proceso de producción proyectado.

4.9.1. Equipos del proceso.

Los equipos que están involucrados en el proceso son los que aparecen en la Tabla 27.

La selección de los equipos fue hecha pensando siempre en procesos industriales. En el lavado y en la separación sólido/líquido la selección del filtro rotario con lavado viene dado, porque la torta que se acumula en el filtro puede ser retirada con facilidad y permite un autolavado del filtro.

El molino de bolas vibratoria fue escogido por su capacidad para generar los diámetros de materia prima que se necesitan en el proceso.

Para impregnar con ácido sulfúrico, para la separación triple y para la producción de lignina glioxalada, sólo es necesario mezcladores que permitan que los elementos formen sistemas homogéneos. Se ocupan mezcladores y no reactores debido a que en estas etapas no hay reacciones químicas involucradas.

Para el pretratamiento es necesario usar un reactor que sea adiabático⁷², en el cual se pueda contralar la presión y la temperatura del interior.

Para aquellas etapas en donde si hay reacciones químicas, como la neutralización y detoxificación, la fermentación y producción de furfural, es necesario el uso de reactores que posean sensores de presión, temperatura, oxígeno y pH.

Para las etapas en donde es necesario separar componentes por volatilidades se ocuparon destiladores, es el caso de la destilación del bioetanol y del furfural.

Por último para poder concentrar el producto se eligieron tamices moleculares, que son capaces de adsorber el agua de una solución.

Tabla 27: Equipo por etapa de producción.

Etapas del Proceso	Nombre Equipo	Código equipo
Lavado	Filtro rotatorio con lavado	FR1
Reducción de tamaño	Molino de bolas vibratoria	MB1
Impregnar con ácido	Mezclador	M1
Pretratamiento	Reactor explosión a vapor	R1
Separación sólido/líquido	Filtro rotatorio	F1
Separación triple de componentes	Mezclador	M2
Neutralización y detoxificación	Reactor	R2
Fermentación	Centrifuga tubular de tazón sólido	C1
	Reactor Inoculo	R3
	Fermentador batch	R4
Destilación de bioetanol	Filtro prensa	F2
	Columna de destilación de CO ₂	D1
	Columna de destilación de etanol	D2
Deshidratación de bioetanol	Columnas de deshidratación de etanol	DH1-DH2
Producción de furfural	Reactor	R5
	Columna de destilación de furfural	D3
	Columnas de deshidratación de furfural	DH3-DH4
Producción de lignina glioxalada	Mezclador	M3

Fuente: Elaboración propia en base a Perry's Chemical Engineers' Handbook[73].

En este capítulo se presenta dos de los equipos principales del proceso: los reactores de la fermentación y la columna de destilación para separar el bioetanol.

⁷² Reactor adiabático: reactor que no permite la transferencia de calor en el medio externo y el interno.

Las características de los equipos se encuentran en la Tabla 28. En el Anexo 9 se encuentran las ecuaciones de diseño de cada uno de los equipos.

4.9.1.1. Fermentadores.

Los reactores son los equipos encargados de contener las reacciones químicas que ocurran en las determinadas etapas del proceso. Suelen ser tanques cilíndricos que contienen de agitadores, baffles⁷³, sensores de pH, de temperatura, presión, etc.

Pueden ser de distintos tipos; en el caso de este proyecto todos corresponden a reactores tipo batch⁷⁴. El proceso está diseñado de tal manera, que una vez que entran los reactivos al reactor, éstos no salen del proceso hasta haber acabado el tiempo de corrida o haya ocurrido la reacción. Luego de esto, se vacía el tanque hasta para comenzar un nuevo ciclo.

El tamaño de los fermentadores se dejó fijo en 200 m³, este valor se obtuvo a través de la opinión de un experto en el tema, que comentó que para tamaños superiores es más difícil poder mantener una mezcla homogénea.

Para calcular la cantidad de fermentadores basta con tener el total del volumen a procesar y luego dividir por los 200 m³ de cada tanque. Para calcular el volumen total a procesar es necesario conocer el tiempo de operación de cada batch; se tiene que éste tiempo es de 80 horas[68].

Del balance de masa se puede obtener cuanta masa es tratada por cada tonelada de materia prima que ingresa al proceso y como se sabe que la capacidad de la planta es de 52 toneladas por hora, se puede obtener la masa total a tratar en una hora. Si eso se multiplica por las 80 horas que corre el batch (80 horas que 1 tanque no va poder ser usado en otro proceso), se obtiene la masa total a ser procesada. Con la densidad de la mezcla, se puede obtener finalmente el volumen que total que será procesado.

$$\frac{\text{Volumen total a ser procesado}}{200} = N^{\circ} \text{ de fermentadores batch}$$

Con los datos obtenidos y los cálculos realizados, se obtiene que el número total de fermentadores para procesar 52 toneladas por hora de materia prima, es de 24 reactores.

⁷³Instrumento que regula el flujo circular de la solución al interior del reactor y que evita la generación de vortex. Vortex: torbellino turbulento de solución en forma de cono que se produce al interior del reactor.

⁷⁴ Es un reactor que tiene por característica particular, que opera por un tiempo dado fijo, en donde se carga el tanque y después de haber concluido ese tiempo dado, se descarga completamente.

Tabla 28: Resumen de características de equipos.

Nombre Equipo	Código	Nº	Entrada [m ³]	Área [m ²]	Diámetro [m]	Longitud [m]	Altura [m]	Tiempo Operación [hr]	Característica particular	Valor
Filtro rotatorio con lavado	FR1	1	46	1,4	0,6	0,8		1		
Molino de bolas vibratoria	MB1	1	98		1,1	1,4		1	Diámetro bola [mm]	0,2
Mezclador	M1	2	171		4,2		12,5	7		
Reactor explosión a vapor	R1	2	43		2,6		7,9	1	RPM	150
Filtro rotatorio	F1	1	96	2,9	0,6	1,6		1	Tiempo Lavado [hr]	0,7
Mezclador	M2	1	58		3,3		10,0	1,5	Temperatura [°C]	220
Reactor	R2	4	31		2,4		7,1	2	RPM	170
Centrifuga tubular de tazón sólido	C1	1	47		1,2		1,0	1	Eficiencia η	120
Reactor Inoculo	R3	2	6		1,4		4,1	10		
Fermentador batch	R4	24	205		4,4		13,3	90		
Filtro prensa	F2	1	82	23,0	2,5	3,3		1	Cantidad de placas	15
Columna de destilación de CO ₂	D1	1	154		2,5		19,8		Alimentación	Liquido Saturado
Columna de destilación de etanol	D2	1	154		2,5		19,8		Alimentación	Liquido Saturado
Columnas de deshidratación de etanol	DH1, DH2	2	1		0,9		2,7	0,1	Masa de Tamiz Requerido [kg]	905
Reactor	R5	4	6		1,4		4,2	0,5		
Columna de destilación de furfural	D3	1	6		2,5		19,8		Alimentación	Liquido Saturado
Columnas de deshidratación de furfural	DH3, DH4	2	5		1,4		4,1	0,1	Masa de Tamiz Requerido [kg]	3.300
Mezclador	M3	2	4		1,2		3,6	0,5	RPM	50

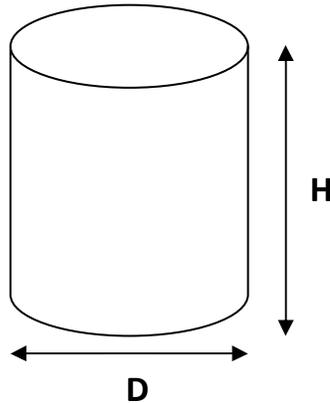
Fuente: Elaboración propia en base a Perry's Chemical Engineer's Handbook.

Para el diseño de las dimensiones se utilizó [74]:

$$H = 3 * D$$

en donde H: altura del reactor y D: diámetro del reactor como lo muestra la Figura 17.

Figura 17: Dimensiones de un reactor



Fuente: Elaboración propia en base a Améstica 2007.

4.9.1.2. Destilador de etanol.

El destilador es el equipo encargado de separar el etanol del resto del caldo proveniente del fermentador. Para poder separar los compuestos se ocupan las diferencias de temperaturas de ebullición de los éstos. La temperatura de ebullición del etanol, está entre los 78-79 °C a presión atmosférica.

La entrada de la alimentación (caldo proveniente de la fermentación una vez que pasó por la destilación del CO₂) que viene como líquido saturado, es hecha en platos intermedios. La zona inferior de la columna se llama agotamiento (cola), mientras tanto la zona superior se llama enriquecimiento (cabeza).

Para el diseño de la columna, se ocupó el método McCabe-Thiele, que es un método gráfico que da una muy buena aproximación de la cantidad de platos que deberá tener la columna. Éste consiste en trazar primero las curvas que modelaran la destilación, para esto se traza la curva de equilibrio etanol-agua (ver Anexo 10) que es la curva que relaciona la cantidad de vapor de etanol con la cantidad de etanol líquido existe en el medio. Seguido se traza la curva de operación de la zona de agotamiento y enriquecimiento. Para comenzar a dibujar los platos es necesario ubicar el punto de partida que corresponde a la fracción molar de etanol en la cola de

la destilación (ver Tabla 30). De este punto sale una línea horizontal que sube hasta el 70% de la altura total que existe entre este punto y la curva de equilibrio. Luego para completar el plato se debe dibujar una línea horizontal que comienza en el punto antes señalado hasta que intercepte la curva de operación, una vez hecho esto, se tiene el primer plato dibujado. Para continuar con el resto de los platos se debe repetir los pasos antes mencionado hasta llegar al punto final que corresponde a la fracción molar de etanol en la cabeza de la torres de destilación (ver Tabla 30).

Para poder ocupar este método es necesario conocer la composición de la corriente de entrada y de salida de ambas zonas (agotamiento y enriquecimiento), además de los flujos molares de las corrientes de entrada y salida y la curva de equilibrio de fases de los elementos a separar.

Para este diseño, se simplificó la cantidad de componentes a destilar. Es así como sólo se modeló la destilación de etanol-agua.

Los flujos molares correspondientes a la entrada y a las salidas están en la Tabla 29.

Tabla 29: Flujos molares

Corriente	Flujo molar [mol/sg]
Alimentación (F)	342
Producto Cabeza (d)	50,5
Producto Cola (b)	291

Fuente: Elaboración propia en base a balance de masa realizado.

Los valores de la fracción molar a la entrada y salida del destilador están en la Tabla 30.

Tabla 30: Fracciones molares

	Fracción molar [mol/sg]		
	Alimentación (z_f)	Producto Cabeza (χ_d)	Producto Cola (χ_b)
Agua	0,86	0,12	0,99
Etanol	0,14	0,88	0,01

Fuente: Elaboración propia en base a balance de masa realizado.

Las condiciones de operación de la columna son de 97 °C, 2 atmósferas de presión y una eficiencia del 70% de cada plato [69].

El resultado de diseñar la columna según el método planteado anteriormente es una columna de 39 platos (ver Anexo 11), con una separación entre ellos de 0,5 metros, con lo que se tiene una columna de casi 20 metros de altura. El diámetro de la columna es de 2,5 metros [75].

Cabe señalar que en el Anexo 11, no se puede apreciar con claridad la cantidad de platos obtenidos, debido a que en la última parte del diagrama la curva de operación y de equilibrio se encuentra cercanas una de la otra, para poder ver de mejor manera este resultado se recomienda ir a los archivos adjuntados en el CD de este estudio.

4.9.2. Diseño de tanques de almacenaje.

Los tamaños o dimensiones de tanques de almacenaje de materia prima, insumos químicos y de productos terminados, fueron determinados bajo ecuaciones de diseños similares a las usadas para el diseño de los reactores. La diferencia radica en la razón entre diámetro y altura de algunos compuestos como lo muestra la Tabla 31. El resto de los compuestos mantiene la relación:

$$H = 3 * D$$

Tabla 31: Razones de proporción de tanques de almacenamiento.

Compuesto	Razón H ⁷⁵ : D ⁷⁶	Forma
CO ₂	3 : 1	Cilíndrico, horizontal
Bioetanol	1 : 2	Cilíndrico , vertical
Agua	1 : 2	Cilíndrico , vertical

Fuente: Elaboración propia.

La razón de la diferencia entre las razones, viene dada por la estructura que debe contener a los gases. Los gases se deben contener en estructuras cilíndricas para que las fuerzas que se ejercen sobre la superficie, no se concentren en un punto en específico, como puede ser una arista o una esquina de un recipiente. En el caso particular del CO₂, se diseñó un estanque cilíndrico horizontal que permite un mejor traslado en camiones.

Las dimensiones y especificaciones de todos los tanques que se necesitan en el proceso, se encuentran en la Tabla 32.

⁷⁵ H: altura.

⁷⁶ D: diámetro.

Tabla 32: Dimensionamiento de tanques de almacenamiento.

Nombre	Código	Nº	Entrada [m ³]	Diámetro [m]	Longitud [m]	Altura [m]	Días de independencia operativa
Ácido sulfúrico	T1	3	39	3	7		7
Inoculo levaduras	T2	2	0,1	0		1	15
Nutrientes	T3	2	24	2		6	7
CO ₂	T4	4	148	4	12		4
Etanol deshidratado	PS1	4	364	10		5	5
Lignina glioxilada	T5	16	242	5		12	5
Furfural	T6	3	265	5	13		5
Enzimas	T7	4	106	4		8	3
Levadura DDGS	T8	3	3	1		3	7
Agua	PS2	2	4074	22		11	2
Hidróxido de calcio	T9	2	43	3		7	15
RILes y RISes	PS3, PS4	10	123	4	4	10	1

Fuente: Elaboración propia en base al balance de masa realizado.

Cabe señalar que la materia prima (residuos de eucalipto) no se almacenará, por lo que no se contempla la construcción de un silo. La razón viene dada por un experto [63] en el tema, quien aconseja que la madera quede a la intemperie y así ésta se pueda humedecer con el ambiente y evitar incendios.

4.10. LAYOUT DE LA PLANTA.

Para tener un diseño conceptual de la planta, se esboza un layout (ver Anexo 12) que representa la vista área de la planta.

El layout se realizó pensando en separar las áreas de producción, de administración y de almacenaje, para no tener inconvenientes entre el tráfico de camiones y la gente que trabaja en el sector de oficinas.

En el sector administrativo se encuentran oficinas, laboratorios de control de calidad, casino, estacionamientos y zona de entretenimiento. Esta zona posee una entrada lateral que sólo permite el acceso de autos pequeños.

La zona de producción consta de las instalaciones para todas las etapas del proceso. Además cuenta con una entrada frontal para el ingreso de los camiones con insumos químicos y materia prima. Esta zona además cuenta con las bodegas en donde se almacenarán estos insumos.

La zona de almacenaje, corresponde a la zona donde están los estanques con los productos finales; ésta zona posee una entrada posterior que permite el libre paso de los camiones hacia los estanques de almacenaje.

La planta tiene dimensiones de 220 m. de ancho por 165 m. de profundidad que ocupará un área aproximada de 4 hectáreas.

5. ESTUDIO ECONÓMICO

En este capítulo se tratará de dar una visión económica de una biorefinería. Para eso se expondrá el nivel de inversión asociado a la planta y los costos de producción relacionados a los productos seleccionados a manufacturar.

Además se termina el capítulo mostrando las proyecciones económicas en el flujo de caja, seguido del análisis de sensibilidad de las variables más relevantes del proyecto, como es los costos de materia prima, enzimas, escala de planta y precio de etanol.

5.1. PROCEDIMIENTO

Para poder calcular la inversión inicial del proyecto es necesario conocer los costos fijos y variables que éste tenga, además de los costos de los equipos y de su instalación. Para esta parte se basó en el estudio de la NREL⁷⁷, en donde se plantea una metodología que ayuda a calcular los costos de la inversión teniendo como primera parte los costos de los equipos ya calculados.

El estudio se realizó en base a un dólar igual a 525 pesos chilenos, dado que ese fue el valor que se tenía en noviembre del 2009.

5.1.1. Procedimiento según el producto de biorefinería.

Para calcular el precio del bioetanol que hace que el proyecto sea rentable económicamente, se han fijado los precios de los otros coproductos de biorefinería (furfural, lignina glioxalada, DDGS, CO₂) y se ha hecho que el VAN⁷⁸ sea cero. Con esto se obtiene el precio al cual el proyecto retorna lo mismo que se invirtió.

Para calcular el precio de los coproductos se ocupó índices de mercados globales de ellos. Para el precio de la materia prima (residuos de eucalipto), se tiene la evaluación de un experto⁷⁹ que expresa firmemente que el precio del residuo puede variar fuertemente, llegando hasta triplicar su precio actual. Esta condición sobre la materia prima será analizada en el estudio de sensibilidad.

⁷⁷ NREL: National Renewable Energy Laboratory

⁷⁸ VAN (VPN): Valor Actual Neto (Valor Presente Neto)

⁷⁹ José Valdés, ingeniero de planta de CMPC

También se realizó una estimación de los flujos económicos, sin producir lignina glioxalada (adhesivo natural), dado que el precio de esta resina aún no tiene un valor importante. Además se realizó una estimación de los flujos económicos sin incluir la venta de CO₂.

5.2. COSTO DE EQUIPOS

Los costos de los equipos fueron consultados en la página web de Matche⁸⁰ [76]. Estos corresponden a precio 2007, por lo que fue necesario actualizarlos a precio 2009. Esto se realizó a través del método de los índices de Marshall & Stevens. Este método relaciona el precio de un equipo en cierta fecha con el precio del mismo equipo en otra fecha, para esto se ocupan índices que actualizan los precios en función del los años. Éstos índices aparecen publicados semanalmente en la revista Chemical Engineering⁸¹

La metodología se expresa mediante la siguiente relación:

$$\left(\frac{C_{ib}}{C_{ia}}\right) = \left(\frac{I_b}{I_a}\right)$$

Donde C_{ib}: costos del equipo i en el año b

C_{ia}: costos del equipo i en el año a

I_b: índice de Marshall en el año b

I_a: índice de Marshall en el año a

Si consideramos que el índice de Marshall para el año 2007 fue de 1373,3 y para el año 2009 es de 1477,7 se pueden calcular los precios que valen los equipos actualmente con el siguiente término:

$$C_{i2009} = \left(\frac{1477,7}{1373,3}\right) * C_{i2007}$$

El detalle de los equipos y de los costos finales se encuentra en la Tabla 33.

⁸⁰ Matche: empresa estadounidense encargada del desarrollo de equipos y tecnología aplicadas a la industria química.

⁸¹ Chemical Engineering, revista especialista del rubro químico-industrial.

Tabla 33: Costos de equipos.

Nombre Equipo	Código	Cantidad	Material	Precio unitario 2007 US\$ FOB	Precio unitario 2009 US\$ FOB	Precio total 2009 US\$ CIF
Filtro rotatorio con lavado	FR1	1	Carbon Steel	121.800	131.059	170.377
Molino de bolas vibratoria	MB1	1	Carbon Steel	152.500	164.093	213.321
Mezclador	M1	2	Stainless Steel, 304	890.000	1.915.318	2.489.913
Reactor explosión a vapor	R1	2	Stainless Steel, 304	1.682.500	3.620.812	4.707.055
Filtro rotatorio	F1	1	Stainless Steel, 304	152.300	163.878	213.041
Mezclador	M2	1	Stainless Steel, 304	505.900	544.359	707.667
Reactor	R2	4	Stainless Steel, 304	1.095.700	4.715.986	6.130.782
Centrifuga tubular de tazón sólido	C1	1	Stainless Steel, 304	159.100	171.195	222.553
Reactor Inoculo	R3	2	Stainless Steel	92.500	199.064	258.783
Fermentador batch	R4	24	Stainless Steel, 304	784.800	20.267.076	26.347.198
Filtro prensa	F2	1	Stainless Steel, 304	205.400	221.015	287.319
Columna de destilación de CO ₂	D1	1		229.333	493.535	641.596
Columna de destilación de etanol	D2	1	Stainless Steel, 304	229.333	493.535	641.596
Columnas de deshidratación de etanol	DH1, DH2	2	Stainless Steel, 304	33.800	72.739	94.561
Reactor	R5	4		160.000	688.654	895.250
Columna de destilación de furfural	D3	1	Stainless Steel, 304	229.333	246.768	320.798
Columnas de deshidratación de furfural	DH3, DH4	2	Stainless Steel, 304	48.800	105.020	136.526
Mezclador	M3	2	Stainless Steel, 304	445.500	958.735	1.246.355
TOTAL					34.736.469	45.157.410

Fuente: Elaboración propia en base a Matche.

En la Tabla 34, se muestra los valores CIF⁸² de los equipos por etapa de producción, con el respectivo porcentaje considerado en la inversión. Se observa como la fermentación corresponde a casi el 60% de la inversión en equipos.

Tabla 34: Costo equipos

Proceso	Precio 2009 M US\$ CIF (aproximado)	%
Lavado	170	0,4
Reducción de tamaño	215	0,5
Impregnar con ácido	2.500	5,5
Pretratamiento	4.700	10,4
Separación sólido/líquido	215	0,5
Separación triple de componentes	700	1,5
Neutralización y detoxificación	6.400	14,2
Fermentación	27.000	59,7
Destilación de etanol	1.500	3,3
Producción de furfural	1.400	3,1
Producción de lignina glioxalada	1.250	2,8
TOTAL	45.200	100

Fuente: Elaboración propia en base a Matche [76].

Los precios que se obtuvieron desde la página web eran precios FOB. Para calcular el precio CIF de los equipos se recurrió a la ayuda experta de Rodrigo Torres jefe de importaciones de Ecu Line. Según lo comentado por él, para pasar de precio FOB⁸³ a precio CIF se debe agregar un 30% aproximado del valor total del equipo. Esta tarifa está dividida en una parte fija que corresponde al traslado y una parte variable que corresponde al seguro. El seguro a pagar depende del tipo de importación.

Los costos de los estanques de almacenamiento tanto para insumos químicos como para productos finales se encuentran en el Anexo 13.

En la Tabla 35 se encuentran los costos totales de equipos y estanques de almacenamiento. Se observa que el costo de los equipos es casi un 85% de la inversión en compra de equipos y estanques almacenamiento.

⁸² CIF.: Costo más seguro, más flete.

⁸³ FOB: Free On Board.

Tabla 35: Costos total de equipos y almacenamiento.

Ítem	Precio total 2009 MM US\$ CIF	%
Equipos de proceso	45,2	84,5
Estanques de almacenamiento	8,35	15,5
TOTAL	53,5	100

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1. Comparación de costos de equipos con plantas similares.

El costo total en equipos y estanques para el diseño de esta biorefinería es de 53,5 MM US\$, para una producción anual de 78.000 m³ de bioetanol. Si comparamos estas cifras con valores similares de plantas que producen este biocombustible, se puede apreciar que existen economías de escalas asociadas y que los valores obtenidos de los costos de los equipos es este estudio son análogos a las otras plantas (ver Tabla 36).

Tabla 36: Comparación en costos de equipos con plantas similares.

Planta	Costo Equipos MM US\$	Producción de bioetanol M m ³ /anuales
Biorefinería de este estudio.	53,5	78
Planta de Copec S.A. diseñada por TOMSA ⁸⁴	85	80
Planta DOE de U.S.A.	121,1	220

Fuente: Elaboración propia en base a García 2008 y estudio NREL.

Se observa que la planta DOE de Estados Unidos, casi triplica la producción a la que se diseña en este estudio, pero sus costos en equipos no triplican a los obtenidos. Esto muestra la existencia de economías de escalas en el proceso.

⁸⁴ TOMSA: empresa española dedicada al diseño de plantas productoras de alcohol.

5.3. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN.

5.3.1. Costos fijos

Para conocer el costo total de la inversión hay que calcular otros ítems, como lo son la preparación del sitio, costos de construcción, bodegas, entre otros. Como se mencionó en el comienzo del capítulo, se ocupará una metodología de la NREL, que calcula estos costos. Es importante señalar que este método no es usual que se ocupe en Chile, pero se cree que puede dar una muy buena aproximación real de los costos involucrados [15].

El total de costos de equipos instalados (TCE) corresponde a la suma del total de equipos, más los costos de los tanques de almacenamiento (TET), multiplicado por un factor de instalación de 1,43 [15] como lo muestra la Tabla 37.

Tabla 37: Costos de equipos instalados.

Ítem		MM US \$
Costo total equipos y almacenamiento		53,5
Factor de instalación	43% (TET)	22,5
TCE		76

Fuente: Elaboración propia en base a Correa 2008.

El factor de instalación de equipos y tanques de almacenamiento genera un costo de 22,5 MM US\$ (Tabla 37).

Los costos directos e indirectos de construir la planta se muestran en la Tabla 38.

Tabla 38: Costo de inversión.

			MM US \$
TOTAL COSTOS DE EQUIPOS INSTALADOS (TCE)			76
Bodega	1,5 %	TCE	1,2
Preparación del sitio	9%	TCE	6,8
TOTAL DE COSTOS DE INSTALACIÓN (TCI)			84
Costos indirectos			
Costos prorrateables	10%	TCI	8,4
Gastos del campo	10%	TCI	8,4
Construcción	25%	TCI	20,1

Proyecto de contingencia	3%	TIC	2,5
TOTAL DE INVERSIÓN DE CAPITAL (TIC)			123,4
Otros costos (incluido terreno y traslado de equipos)	10%	TIC	12,4
TOTAL DE INVERSIÓN DEL PROYECTO			136,6

Fuente: Elaboración propia basado en estudio NREL.

Se estima los TCE (total de costos de equipos instalados) en 76 millones de dólares. Es decir, éste es el monto que se requiere para que los equipos queden instalados en el terreno. A esto hay que agregarle la preparación del terreno y la construcción de bodegas extras. Así, los costos de instalación (TIC) llegan a 84 MM US\$.

Los costos indirectos corresponden al 48% del TIC. Estos costos corresponden a construcción, proyectos de contingencia, toma de agua, entre otros y tienen un valor de 39,4 MM US\$. En total se tienen que los costos totales de inversión de capital (TIC) son de 123, 4 MM US\$.

Sumando a lo anterior los costos directos, como el terreno, traslado de equipos desde el puerto hacia la ubicación de la planta, que es un 10% de TIC, se llega a una inversión total cercana a los 140 MM US\$.

5.4. COSTOS OPERACIONALES.

Los costos operacionales están estrechamente ligados con los costos que tiene la planta para fabricar sus productos finales. Abarcan desde los costos de insumos químicos, hasta planillas de sueldos y costos de mantención de planta.

5.4.1. Costos variables de operación.

Estos costos son los que se deben pagar sólo cuando la planta está en operación. Éstos dependen del nivel de producción y corresponden principalmente a insumos químicos, materias primas, e incluyen los costos por uso de electricidad y energía ocupada en la producción.

Como se ha mencionado anteriormente la planta trabajará 24 hrs diarias por 335 días al año, dejando 1 mes libre para la mantención.

Los costos por insumo y materia prima se presentan en la Tabla 39.

Tabla 39: Costos de insumos.

Insumos	Precio [US \$]	Kilos usado por tonelada	Toneladas usadas por año	Costo total anual MM US\$
H ₂ SO ₄ [Kg]	0,19	2	890	0,16
Nutrientes [KG]	0,36	15	6.500	2,3
Ca(OH) ₂ [Kg]	0,118	9	3.600	0,5
Glioxal [Kg]	2,4	105	44.371	106,5
Levadura Red Star [kg]	7,5	0,08	35	0,25
Celulasas industrial [Kg]	1,6	94	39.500	62
NaOH [Kg]	0,8	33	13.700	8,9
Diesel [kg]	1,18		2.000	2,3
Agua [kg]	0,00006	3.721	1.570.000	0,09
Electricidad [M watt]	90		49	4,5
Biomasa [m³]	7,2		420	3,1
Costos por traslado de materia prima				0,025
Tratamiento RILes y RISEs [kg]	0,048		592.200.000	28,2
TOTAL				218,8

Fuente: Elaboración propia.

Las cantidades requeridas de insumos están en base a 1 tonelada. Estos cálculos fueron desarrollados en el balance de masa correspondiente al capítulo de Estudio Técnico. El costo total anual de procesar 420.000 toneladas de residuo de eucalipto es cercano a los 220 MM US\$.

Los precios de los insumos fueron cotizados e investigados tanto en sitios de internet que ofrecían sus productos, como en mercado extranjeros de estos (glioxal). EL precio del hidróxido de sodio (NaOH) se obtuvo de Oxiquim, empresa chilena que vende este producto a 800 US\$/ton. La profesora María Elena Lienqueo colaboró con la información sobre precio relativo a las enzimas.

Se puede apreciar con claridad que los principales costos de insumos están asociados al uso de enzimas (celulasas), al glioxal y al tratamiento de las aguas y sólidos.

El precio de las enzimas (celulasas) bordea actualmente entre los 2,7 - 8 US\$/galón de etanol producido. Se estableció un precio de 3 US\$/galón de etanol producido. Con este cálculo se

llega a un costo final anual de 62 MM US\$. Cabe señalar que este precio es para celulosas industriales, que tienen un rendimiento menor a las celulasas que son utilizadas por lo general en laboratorios y que por ende tiene un menor precio (ver Gráfico 18).

El precio del glioxal se consultó en sitios de internet [77] llegando a tener un precio referencial de 2,4 US\$/kg. Se cree que este valor puede disminuir considerablemente, si se ocupan las economías de escala y/o se hacen contratos importantes con los distribuidores. El costo anual corresponde a casi 110 MM US\$.

El gasto en electricidad y en diesel se calculó en base a consumos de otras plantas similares. Se calculó proporcionalmente el gasto energético en función de la producción anual de bioetanol [15] (ver Anexo 14).

El análisis de costo de tratamiento de RILes y RISes, se estimó con los valores que la empresa Bravo Energy otorgó, que constan de una parte fija (según cantidad de material a tratar) y una parte variable, que depende de la distancia de traslado.

5.4.2. Costos fijos de operación.

Estos costos se deben pagar independiente de que la planta produzca o no produzca. A estos costos pertenecen los sueldos de la plana completa de la empresa y los costos de mantención de ésta.

5.4.2.1. Planilla de sueldos.

En el Anexo 15 se presenta en detalle los recursos humanos involucrados en la empresa con sus respectivos sueldos.

En la Tabla 40 se presenta un resumen de los costos relacionados a cada área de la empresa. Se observa que anualmente el costo fijo de plana de sueldo es de casi 1 MM US\$.

Tabla 40: Resumen plana de sueldo anual por área.

	Costo anual US \$
Gerencia General	81.500
Gerencia Administración, Finanzas, Ventas y RRHH	288.000
Gerencia de Operaciones	640.500
TOTAL	1.010.000

Fuente: Elaboración propia en base a Claret, 2009.

Para la determinación del recurso humano se contó con la ayuda del experto Johnny Claret⁸⁵, ex subgerente de producción de una compañía chilena.

Es importante señalar que la planta funciona a plena capacidad por 24 horas; por ende es vital poseer la cantidad de personal suficiente para cubrir toda esta demanda de horas. Es por esto que se tienen 20 operarios de turno y 4 jefes de turno, más 4 personas de mantenimiento. El resto de los trabajadores realizará sus funciones en turno de 8 hrs diarias, 5 días a la semana.

5.4.2.2. Costos de mantención de equipos y suministros de oficina.

Al igual que en la sección en donde se evaluó los costos totales de la planta, en esta sección para evaluar los costos de mantención y de suministros se ocupó el método de la NREL.

La Tabla 41 muestra los costos relacionados a la mantención de los equipos (2% de TCE⁸⁶) que corresponde a 1,5 MM US\$ anuales.

Los gastos generales están relacionados con la cantidad de empleados y con las oficinas, en donde los beneficios a los empleados y los suministros que necesitan tienen un costo de 0,5 MM US\$ anuales.

En total los costos fijos operacionales llegan a la suma de 3,2 MM US \$ anuales.

⁸⁵ El experto pidió confidencialidad con respecto a su ex empleador.

⁸⁶ TCE: Total costos equipos.

Tabla 41: Costos de mantención y suministros.

			M US\$
Total sueldos			1.010
Mantención de equipos	2%	TCE	1.500
Gastos generales			
Beneficios a empleados	30%	Sueldos	303
Mantención de edificios	5%	Sueldos	50,5
Suministros de oficinas	5%	Sueldos	50,5
Energía	10%	Sueldos	101
TOTAL GASTOS GENERALES			505
Seguros	0,3%	TCI	252
TOTAL COSTOS FIJOS			3.270

Fuente: Elaboración propia en base a NREL.

5.5. CAPITAL DE TRABAJO.

El capital de trabajo⁸⁷ se calculó pensando que el primer mes de operación de la planta no se tendría ninguna ganancia. Además se consideró medio mes de insumos químicos a costear. Por último se estimó 15 días de cuentas por cobrar [15].

En la Tabla 42 se muestra que el capital de trabajo corresponde a 16 MM US\$.

Tabla 42: Capital de trabajo.

	M US\$
Sueldos del primer mes	84
Stock insumos y materia prima para 15 días	9.600
Ventas por cobrar de 15 días	7.085
TOTAL	16.769

Fuente: Elaboración propia en base a Correa, 2008.

Los insumos para los primeros 15 días pueden tener un valor elevado, debido a que los precios como el del glioxal son altos, a su vez las ventas por cobrar son altas debido a que este proyecto contempla no solo producir bioetanol, sino que además lignina glioxalada y furfural.

⁸⁷ La definición más básica de capital de trabajo lo considera como aquellos recursos que requiere la empresa para poder operar.

5.6. FLUJO DE CAJA.

Antes de comenzar la operación de la planta y se empiecen a recibir flujos de dinero, es necesario la construcción de ésta. La construcción se estimó en 3 años⁸⁸, con una inversión cercana a los 140 MM US\$. Esta planta tendrá una capacidad de procesamiento de 52 ton/hr, procesando al año 420.000 ton de residuos de eucalipto.

La capacidad de producción de la planta en un comienzo va a ser de un 50%, para ir aumentando hasta el 100% en el tercer año de producción.

Cabe señalar que estas ganancias están calculadas con un precio del bioetanol que hace que el VAN sea cercano a cero⁸⁹. Para lograr esto, se iteró en el precio del bioetanol, para llegar a la situación antes comentada.

5.6.1. Flujo de caja con inversión externa sin financiamiento.

Para dar a conocer mejor la situación económica del proyecto, se presenta un flujo de caja que no tiene soporte financiero externo como bancos o préstamos internacionales para poder cubrir el total de la inversión. Este tipo de flujo de caja se puede denominar, flujo de caja puro, ya que una entidad privada puede colocar el total de la inversión que se necesita para el proyecto.

Este tipo de evaluaciones ayudan a conocer las fortalezas del proyecto, como si rentable en el largo plazo, que TIR⁹⁰ es la que tiene el proyecto y si finalmente ayuda a dilucidar si es conveniente o no, hacer una planta con inversión pura.

Con la capacidad antes mencionada, se espera producir bioetanol, furfural, lignina glioxalada, CO₂ y DDGS (levadura para cosmetología). Los beneficios esperados por concepto de ventas se muestran en la Tabla 43.

El flujo de caja realizado arroja que con un precio de bioetanol de 1.255 US\$/m³, se obtiene un VAN igual a cero. La TIR calculada para esta situación fue de un 15% y el periodo de recuperación de capitales se produce en el año 7. El flujo de caja correspondiente se muestra en la Tabla 44.

⁸⁸ Patricio Rojas: consultor financiero y crediticios de bancos nacionales.

⁸⁹ VAN cercano a cero significa que lo que se invirtió se recupera sin ganancias.

⁹⁰ TIR: Tasa Interna de Retorno.

Tabla 43: Producción y ganancia anuales.

Productos	Producción anual en m ³	Producción anual en ton	Precio Venta US \$ m ³	Precio Venta US \$ ton	Valor de venta MM US \$	%
Bioetanol	78.000	61.700	1.020		79,7	32
Furfural	24.200	28.200		880	24,7	10
Lignina Glioxilada	60.000	73.100		1.900	133	53,4
CO2	41.300	81.800		20	1,6	0,6
Levadura	8.900	6.700		1.500	10	4
TOTAL					249	100

Fuente: Elaboración propia en base a flujo de caja realizado.

Este precio de bioetanol obtenido es más caro que los precios actuales de mercado. Por ejemplo en Estados Unidos el precio del bioetanol es de 650 US\$/m³ [78], es decir, es precio de bioetanol obtenido con inversión pura duplica al precio antes señalado.

El precio al cual el bioetanol se vendería en Chile es de 1.150 US\$/m³ [15], precio que es menor al que se obtuvo en este análisis (1.255 US\$/m³).

En ambas situaciones antes señala el precio del bioetanol es mayor. Este precio es para hacer que el VAN sea igual a cero, por ende para obtener mayores ganancias el VAN debería ser superior a cero, con lo cual el precio del bioetanol debería ser aún mayor. Es claro ver que el análisis de este flujo muestra un panorama negativo para la producción de bioetanol y coproductos derivados de biorefinería, es por esto que se realizará un nuevo análisis de flujo de caja, pero esta vez con financiamiento externo, como lo es un préstamo bancario.

Las condiciones bajo las cuales se realizó el flujo de caja se exponen en la Tabla 45. Estas condiciones serán detalladas en las siguientes secciones.

Tabla 44: Flujo caja con financiamiento y un VAN=0. Valores en millones de US\$.

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Ingresos																						
Venta bioetanol		49,1	68,7	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	
Venta co-productos		84,5	118,3	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	
Ingresos totales		133,6	187,0	267,2																		
<i>Costos Variables</i>		115,3	161,4	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	
<i>Costos Fijos</i>		4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	
Total Costos Fijos		119,6	165,7	234,9																		
Gastos financieros																						
Depreciación legal		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8	0,8											
Pérdidas ejercicio anterior																						
Utilidad antes de impuesto		5,8	13,1	24,1	24,1	24,1	24,1	31,5	31,5	31,5	31,5	32,3										
Impuesto primera categoría		1,0	2,2	4,1	4,1	4,1	4,1	5,4	5,4	5,4	5,4	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	
Utilidad después de impuestos		4,8	10,9	20,0	20,0	20,0	20,0	26,2	26,2	26,2	26,2	26,8										
Gastos financieros																						
Depreciación																						
Legales		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8	0,8											
Pérdidas ejercicio anterior																						
Flujo caja operacional																						
MM US \$		13,0	19,1	28,2	28,2	28,2	28,2	26,9	26,9	26,9	26,9	26,8										
Inversión fija	136,7																					
IVA de la inversión																						
Recuperación IVA de la inversión																					0	
Valor residual de los activos																					0	
Capital de trabajo	16,8																					
Recuperación capital de trabajo																					16,8	
Préstamo	0																					
Amortizaciones		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Flujo de capitales MM US \$	-153,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,8	
Flujo de caja MM US \$	-153,4	13,0	19,1	28,2	28,2	28,2	28,2	26,9	26,9	26,9	26,9	26,8	43,6									
VAN MM US \$	-153,4	-140,4	-121,4	-93,3	-65,3	-37,2	-9,3	17,4	44,0	70,6	97,1	123,5	149,9	176,2	202,4	228,6	254,8	281,0	307,1	333,1	375,4	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 45: Condiciones del flujo de caja.

Horizonte de tiempo	20 años
Tasa descuento	15%
Impuesto primera categoría	17%
Depreciación acelerada de equipos	6 años
Depreciación acelerada tanques	10 años
Inversión inicial	140 MM US\$
Capital de trabajo	16,8 MM US\$

Fuente: Elaboración propia en base a Correa 2008, Rojas 2009, Caro, 2009 y SII⁹¹.

5.6.1.1. Horizonte de tiempo.

El horizonte de tiempo para la evaluación del proyecto corresponde a 20 años. La definición del plazo se basó en proyectos similares en los cuales el periodo de evaluación corresponde al mencionado anteriormente. Ejemplo de esto son los estudios realizados por la NREL en los años 1999 y 2002[69]. Otro ejemplo lo constituye la planta de Noruega de la NTNU⁹² que considera un horizonte de 25 años [15].

Cabe señalar que por ser un proyecto de una línea de investigación de innovación, y dado que los equipos son nuevos, se puede hacer una evaluación a largo plazo.

Otras empresas del área de biocombustibles, como Copec S.A., no evalúan los proyectos en menos de 15 años. Esto es una clara evidencia de lo relevante que es poseer un amplio periodo de evaluación [15].

5.6.1.2. Tasa de descuento e impuesto de primera categoría.

La tasa de descuento corresponde a la tasa que los inversionistas exigen que tenga el proyecto para que éste tenga alicientes para ser llevado a cabo, ante otros proyectos. La tasa seleccionada corresponde a un 15%. Esta tasa se seleccionó en base a información recopilada de otros proyectos.

⁹¹ SII: Servicio de Impuestos Internos.

⁹² NTNU: Norges Teknisk Naturvitenskapelige Universitet. Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología.

Por ejemplo, la empresa Copec S.A. descuenta sus proyectos al 13% [15]; sin embargo, debido a que este proyecto no tiene ningún similar en Chile para poder comparar su tasa de descuento, y dado que es un proyecto que requiere de una mayor investigación, se decidió descontar este diseño de biorefinería a un 15%.

Otro aspecto a mostrar de estos proyectos, es que al no tener un retorno de inversión en forma segura, sufren un riesgo de incertidumbre que hace que la tasa de descuento sea mayor que en otras plantas.

El impuesto de primera categoría⁹³ en Chile corresponde a un 17% [79].

5.6.1.3. Depreciación de equipos y tanques de almacenamiento.

La depreciación fue hecha para equipos y estanques de almacenamiento. La ley permite realizar una depreciación acelerada en caso que corresponda. En nuestro caso se hace una depreciación acelerada de equipos de 6 años y de estanques de almacenamiento de 10 años [79]. Estos valores se obtuvieron del Servicio de Impuestos Internos de Chile. Cabe destacar que estos años de depreciación están dentro del periodo de evaluación de la planta, por ende el valor libro de equipos y estanques al final del periodo de evaluación es de cero.

5.6.2. Flujo de caja con inversión financiada externamente.

Dado que el análisis del flujo de caja sin financiamiento arrojó un panorama negativo, en esta sección se dará a conocer qué pasará si el flujo de caja se hace con financiamiento.

Con este nuevo escenario el precio del bioetanol es de 1.055 US\$/m³, para obtener un VAN igual a cero. La TIR calculada para esta situación fue de un 15% y el periodo de recuperación de capitales se produce en el año 7. El flujo de caja correspondiente se muestra en la Tabla 46.

Se observa como el precio obtenido del bioetanol, bajo una inversión financiada, tiene un valor menor al precio de éste en el análisis del proyecto sin financiamiento. Si bien la TIR y el periodo de recuperación son los mismos, el precio es 100 US\$/m³ menor.

⁹³ El Impuesto de Primera Categoría grava las utilidades tributarias de los negocios, dejando afectas las rentas provenientes del capital y de las empresas comerciales, industriales, mineras y otras. Artículo 20 Ley de Impuesto a la Renta.

Tabla 46: Flujo caja con financiamiento y un VAN=0. Valores en millones de US\$.

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos																					
Venta bioetanol		41,2	57,7	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5	82,5
Venta co-productos		84,5	118,3	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1
Ingresos totales		125,8	176,1	251,6																	
<i>Costos Variables</i>		110,5	154,7	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221
<i>Costos Fijos</i>		4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Total Costos Fijos		114,8	159,0	225,3																	
Gastos financieros		5,6	5,3	4,9	4,4	3,9	3,4	2,8	2,2	1,5	0,8										
Depreciación legal		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8	0,8										
Pérdidas ejercicio anterior			2,9																		
Utilidad antes de impuesto		-2,9	0,6	13,1	13,6	14,1	14,6	22,6	23,3	23,9	24,7	26,2									
Impuesto primera categoría			0,1	2,2	2,3	2,4	2,5	3,8	4,0	4,1	4,2	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Utilidad después de impuestos		-2,9	0,5	10,9	11,3	11,7	12,1	18,8	19,3	19,9	20,5	21,8									
Gastos financieros		5,6	5,3	4,9	4,4	3,9	3,4	2,8	2,2	1,5	0,8										
Depreciación Legales		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8	0,8										
Pérdidas ejercicio anterior			2,9																		
Flujo caja operacional MM US \$		11,0	17,0	24,0	23,9	23,8	23,7	22,4	22,3	22,1	22,0	21,8									
Inversión fija	136,7																				
IVA de la inversión																					
Recuperación IVA de la inversión																					0
Valor residual de los activos																					0
Capital de trabajo	29,4																				
Recuperación capital de trabajo																					29,4
Préstamo	66,4																				
Amortizaciones		4,5	4,9	5,3	5,7	6,2	6,7	7,3	7,9	8,6	9,3										
Flujo de capitales MM US \$	-99,6	-4,5	-4,9	-5,3	-5,7	-6,2	-6,7	-7,3	-7,9	-8,6	-9,3	0	29,4								
Flujo de caja MM US \$	-99,6	6,5	12,1	18,7	18,2	17,6	17,0	15,1	14,3	13,5	12,7	21,8	51,2								
VAN MM US \$	-99,6	-93,2	-81,1	-62,5	-44,4	-26,9	-10,1	4,9	19,0	32,4	44,9	66,3	87,7	109,0	130,3	151,6	172,8	194,1	215,2	236,4	286,0

Fuente: Elaboración propia.

Este nuevo precio del bioetanol genera un mejor panorama en cuanto a la evaluación económica, debido que este precio es más cercano a lo que se vendería el bioetanol en Chile (1.150 US\$/m³).

Las condiciones del financiamiento se presentan a continuación.

5.6.2.1. *Financiamiento.*

Se proyecta que el financiamiento se hará con un 40% de préstamo bancario y 60% de inversión por parte independiente. Las condiciones del préstamo se plantean en la Tabla 47.

Tabla 47: Condiciones de préstamos.

Monto Pedido [MM\$]	66,3
Periodo de Pago [años]	10
Cuota Anual [MM\$]	10,1
Tasa de Interés [%]	8,5

Fuente: Elaboración propia en base a Caro 2009 y Rojas 2009.

El periodo de pago se fijó en base a conversaciones con expertos en el tema. Patricio Rojas, consultor financiero de bancos nacionales, expresó que por menos de 10 años ningún banco se haría cargo del préstamo, debido al riesgo crediticio del proyecto y por ser un proyecto nuevo en su rubro.

La tasa de descuento se obtuvo de conversaciones con Rodrigo Caro, ingeniero del área de finanza de CMPC, quién comentó que el proyecto tiene un riesgo similar a una emisión hecha en Singapur, en donde la tasa de interés resultó ser de un 8% más el Libor⁹⁴. Esta tasa fue para un proyecto que obtuvo una clasificación Moody B2.

La tasa Libor calculada en lo que va del año 2009, según el Banco Central, es de un 0,5% [80].

La clasificación Moddy es una clasificación de riesgo de inversión, en que se le asigna una nomenclatura en función de que si los pagos de interés están cubiertos, cuan buenos son los retornos de capitales, etc. En la Tabla 48 se muestra el orden de la clasificación desde la mayor a menor solvencia.

⁹⁴ Libor: London Inter-Bank Offered Rate.

Tabla 48: Clasificación Moody.

Escala de inversión	Escala de especulación
Aaa	Ba1
Aa1	Ba2
Aa2	Ba3
Aa3	B1
A1	B2
A2	Caa1
A3	Caa1
Baa1	Caa3
Baa2	CC
Baa3	C

Fuente: Abanfin. Asesores bancarios y financieros.

Otro ejemplo de que este tipo de proyecto tiene una clasificación B1 o B2, es la planta de Abengoa Bioenergy Nebraska, del año 2005 [81].

5.7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

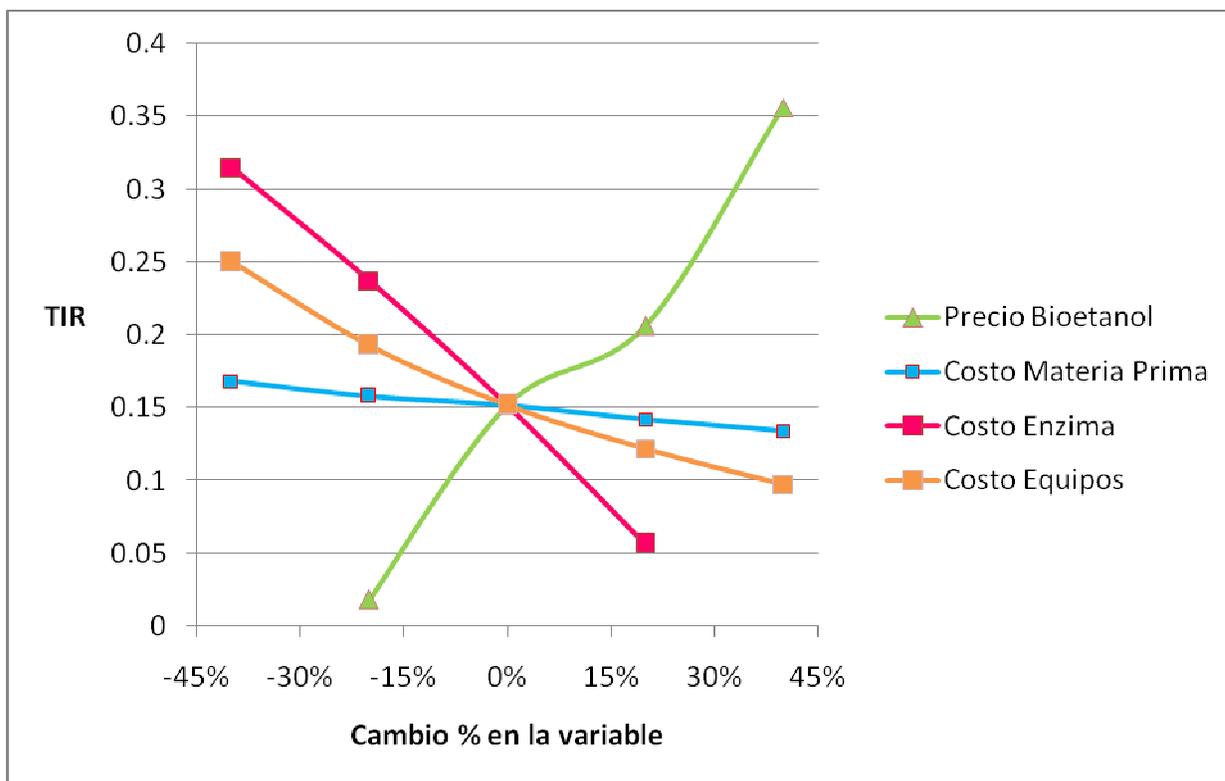
Se realizó un análisis de sensibilidad para 5 componentes centrales de este flujo de caja. Estos son: el precio de bioetanol, el costo de la materia prima, el costo de la enzima y a la inversión (Gráfico 17). Además se evaluó en proyecto sin la venta de CO₂, es decir, liberando el dióxido de carbono al medio ambiente.

El caso base corresponde a un precio de venta de etanol de 1.055 US\$/m³, un costo de 7,6 US\$/m³ de biomasa (residuo forestal), un costo de enzima de 3 US\$/galón de etanol producido y una inversión en equipos igual a 54 MM US\$.

Se ocupará este caso base, ya que el precio del bioetanol obtenido bajo un flujo de caja con financiamiento, es menor que el precio obtenido en el proyecto sin financiamiento.

El Gráfico 17 muestra la TIR, al ir variando porcentualmente las variables a analizar. Las variables se hicieron variar incrementándolas y disminuyéndolas en un 20 y 40% respectivamente.

Gráfico 17: Análisis de sensibilidad



Fuente: Elaboración propia en base a flujo de caja realizado. Ver Anexo 16.

Se nota claramente que el proyecto es sensible al costo de la enzima y al costo de los equipos. Es decir, una pequeña variación porcentual en la variable hace que se generen grandes cambios en la TIR. No ocurre lo mismo con la sensibilidad de la materia prima, ya que no se observa una variación marcada en la TIR.

Además se aprecia que al ir aumentando el precio de venta del bioetanol, la TIR lo hace de la misma manera, haciendo que el proyecto dependa considerablemente de este valor.

5.7.1. Análisis de sensibilidad del precio de venta del bioetanol.

El escenario que plantea un VAN =0, corresponde a un precio de etanol de 1.055US\$/m³. Si este precio de venta aumenta (dejando las otras variables fijas) se obtendrían contextos más favorables. Por ejemplo si el precio de venta fuera el que se estima en Chile, que corresponde a 1.150 US \$/m³[15], se obtendría un VAN de casi de 36 MM US \$, con una TIR del 20% y un periodo de recuperación de capitales de 6 años (ver Anexo 17). Este VAN no genera incentivos para invertir, dado que las ganancias son exiguas.

Si el panorama fuese el precio al cual se vende en Estados Unidos, en donde el m³ de bioetanol se vende a 650 US\$[78], el resultado se convierte automáticamente en una mala inversión. El VAN sería de -159 MM US\$ (ver Anexo 18) en el cual la inversión no se recuperaría. Claramente esta situación es un escenario pesimista ya que este precio no correspondería al caso de Chile.

En un escenario optimista se pueden obtener buenos beneficios si 8520/el precio del crudo sube considerablemente, hasta el punto que alcance valores cercanos a los 150 US\$/barril, como ocurrió a mediados del año 2008, Reportes de empresas del rubro informan que en 10 años más el precio del barril de crudo puede llegar a los 250 US\$[82]. Cuando el precio del crudo era cercano a los 150 US\$/barril, el precio del bioetanol era de 1.300US/m³[83]. Con este precio se obtendrían ganancias de 90 MM US/\$ con una TIR de 27,6% y un periodo de recuperación de 4 años (ver Anexo 19). En este caso la TIR que se obtiene es mayor a la tasa que se descontó el proyecto, por lo que bajo este panorama el proyecto es rentable.

5.7.2. Análisis de sensibilidad del precio de la materia prima.

El precio de la materia prima puede llegar a ser una variable muy relevante a ser considerada. En conversaciones con José Valdés, ingeniero de planta de CMPC, se discutió que el panorama de los precios de los residuos de eucalipto puede tornarse complejo. El precio podría subir drásticamente debido a un aumento de la demanda de éste. A su vez existiría un costo de oportunidad alto, en vender este residuo, que podría ser potencialmente ocupado por la misma empresa para la producción de energía, como lo hace hoy en día la empresa forestal Arauco en su sede de Nueva Aldea. Como se mencionó, el precio del residuo de eucalipto puede llegar a triplicarse, si ocurren los hechos antes señalados.

Bajo estas suposiciones se ha hecho un nuevo flujo de caja (ver Anexo 20), en el cual el precio de la materia prima se triplicó. Con esto se itera el nuevo precio del bioetanol para que el VAN sea cero.

Triplicar el precio de la biomasa se traduce en aumentar el precio del bioetanol en 130 US\$/m³. Con este aumento, el precio del bioetanol debería de ser 1.180 US\$/m³; este precio resulta ser mayor al estimado al que se vendería en Chile (1.150 US\$/m³), por lo que el proyecto no sería viable económicamente.

5.7.3. Análisis de sensibilidad a la venta de lignina pura, no como lignina glioxalada.

Este análisis se ha hecho debido que los costos de producir lignina glioxalada son altos (ver Tabla 39) y los retornos no son los mejores (ver Tabla 43).

La idea es vender lignina pura a productores secundarios que la usen como insumo. La lignina está tasada entre 0,09 a 4,4 US\$/kg según el grado de pureza[84]. En este caso, se fijó el precio de 1 US\$/kg, situándose en un panorama pesimista.

Para obtener un VAN igual a cero, el precio del bioetanol debería ser de 430 US\$/m³ (ver Anexo 21). Este precio es 625 US\$ más barato por m³ y se obtiene principalmente por la reducción de los costos de producción (glioxal e hidróxido de sodio ya no se ocupan como insumo). Se observa que a primera vista, la venta de lignina pura convendría más que venderla como lignina glioxalada, debido a que el precio de éste último no es el suficiente para que se obtengan rentabilidades altas.

5.7.4. Análisis de sensibilidad del precio de la enzima.

En el futuro se estima que el precio de la enzima puede llegar a reducirse hasta 10 veces[85], con esto el costo de usar celulasas podría ser de 0,27 US\$/galón de etanol. Con esta condición se iteró hasta encontrar el precio del bioetanol que haga cero el VAN, manteniendo como co-producto la lignina glioxalada y el furfural. Se encontró un precio de 445 US\$/m³ y una TIR del 15% (ver Anexo 22). Este precio claramente es 610 US\$/m³ más barato. Esto exclusivamente por la disminución del precio de las enzimas involucradas en el proceso. Esto muestra que el proceso es rentable teniendo una disminución drástica de los costos.

5.7.5. Análisis de sensibilidad a la inversión.

La capacidad de la planta actual es de 421 mil toneladas anuales produciendo cerca de 70 mil m³ de bioetanol. Se va a escalar la planta para que pueda abastecer la demanda total del bioetanol al año 2010, es decir, se va a escalar la planta para que produzca 162 mil m³ de bioetanol y procese 880 mil toneladas de residuo de eucalipto al año.

Para los cálculos de los costos de la nueva inversión se recurrirá al método de Chilton [15], que relaciona precios de distintos equipos en función de sus capacidades. El método de Chilton es el siguiente:

$$\left(\frac{C_a}{C_b}\right) = \left(\frac{X_a}{X_b}\right)^\eta$$

Donde C_a : Costo del equipo a

C_b : Costo del equipo b

X_a : Capacidad del equipo a

X_b : Capacidad del equipo b

η : exponente.

Este método se aplicó a cada uno de los equipos involucrados en el proceso, pero como ya se calcularon las dimensiones de los equipos, en esta parte solo se va a extrapolar la planta completa dada su capacidad, modificando el método de Chilton para obtener una aproximación de lo que puede ser el escalamiento. El método modificado queda de la siguiente manera:

$$\left(\frac{C_{pa}}{C_{pb}}\right) = \left(\frac{X_{pa}}{X_{pb}}\right)^\eta$$

Donde C_a : Costo de la planta a

C_b : Costo de la planta b

X_a : Capacidad de la planta a

X_b : Capacidad de la planta b

η : exponente. En Chile se usa un exponente de 0,6[15, 86].

Además de modificar los costos de inversión, se deben modificar los costos de insumos y las ganancias.

Con las condiciones antes señaladas, se obtiene un VAN igual a cero con un precio de venta de bioetanol de 915 US\$/m³ con una TIR del 15% y un periodo de recuperación de 7 años (ver Anexo 23).

Si se compara la situación actual de producción de 78 mil m³ de bioetanol y la de producción de 162 mil m³ (para satisfacer en totalidad la demanda), se observa que el precio del bioetanol se reduce de 1.055 US\$/m³ a 915 US\$/m³, lo que significa que existen economías de escalas asociadas.

Una de las alternativas que se planteó en el taller de biocombustibles organizados por BioTop, fue la de cambiar esta perspectiva de una planta gigante a varias plantas pequeñas que cubran la misma demanda, pero que estén ubicadas en distintas zonas del país. Esto permitiría disminuir los costos relativos al transporte de materia prima y a los costos de distribución de los

productos procesados, teniendo la desventaja de no poseer las economías de escala de plantas de mayor tamaño. Este es un tema que no se trata en esta memoria.

5.7.6. Análisis de sensibilidad sin la venta de CO₂.

Para ésta nueva condición, el precio del bioetanol que hace cero el VAN es de 1.200 US\$/m³.

En la Tabla 43 se aprecia como la venta de CO₂ aporta con solo un 0,6 % del total de las ganancias. Por lo que se espera que el flujo de caja no sufra un gran impacto. Para poder calcular el precio del bioetanol al cual el VAN se hace cero, se descontó de la inversión el costo de los tanques de almacenamiento del dióxido de carbono. Con este nuevo panorama el precio del bioetanol sube de 1.055 US\$/m³ a 1.200 US\$/m³. La TIR obtenida y el periodo de recuperación de capitales son los mismos comparados con el caso base, es decir, un 15% y 7 años respectivamente (ver Anexo 24).

Se observa como la liberación del CO₂ al ambiente no causa un gran impacto en términos de resultados económicos, pero si para el precio final de venta del bioetanol, que sube un 13%.

6. ESCENARIO FUTURO

Es importante mencionar nuevamente que el hecho de ser un país dependiente de la energía puede llevar a la economía del país a una situación crítica, sobre todo si el precio de los combustibles llegara a subir como ocurrió a mediados del año 2008. Es por esto que el bioetanol puede dar una respuesta positiva ante esta situación.

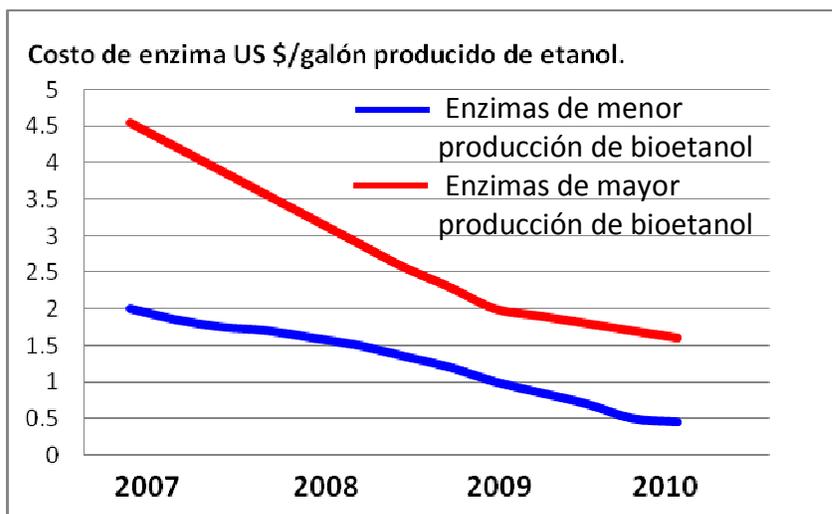
6.1. PROYECCIONES EN EL MUNDO

El mundo ya ha desarrollado el proceso para la obtención de bioetanol de primera generación, lo que se está desarrollando ahora es el bioetanol de segunda y tercera generación.

En el taller de biocombustibles BioTop, realizado en Valparaíso, se señaló que las tecnologías para hacer bioetanol a partir de madera podrán estar en funcionamiento para el año 2015.

Los costos relacionados a la producción, como de las enzimas, podrían llegar a bajar hasta 10 veces su precio actual (considerando el máximo precio de las enzimas de mayor producción de bioetanol, con las enzimas de menor producción de bioetanol), debido al desarrollo masivo de la producción de enzimas como lo muestra el Gráfico 18.

Gráfico 18: Evolución del precio de las celulasas.



Fuente Elaboración propia en base a Novozymes 2009.

Se piensa que otros costos pueden disminuir, como los costos de materia prima si las plantas productoras de bioetanol se tornen versátiles, es decir, que sean capaces de procesar una variada gama de materias primas, como cartón, papelería, residuos agrícolas y residuos de

madera. Todo lo anterior añadido a que los procesos sean más integrados, como es el caso de un Bioproceso consolidado (BPC) (ver capítulo sobre Descripción del proceso) [87].

Estudios revelan que tarde o temprano el petróleo se va agotar [3], por lo que hay que buscar nuevos procesos que sean capaces de satisfacer la demanda de plástico, de productos químicos o de productos derivados de petróleo, que existirá en un futuro cercano. La biorefinería puede ofrecer una posible solución a este problema, en particular si los costos asociados a la producción se tornan más económicos. En un futuro, el precio del petróleo inevitablemente va a subir, dado por la alta demanda y la poca oferta de éste, con este alto precio de petróleo, y las bajas en los costos de producción de una biorefinería, se pueden obtener retornos positivos para este tipo de proyectos.

Cabe señalar además que la versatilidad de la biorefinería, permite que se puedan producir variados tipos de productos como lo muestra la Figura 11, con esto se podría satisfacer la demanda de plásticos biodegradables y la demanda de ciertos productos químicos como adhesivos, por ejemplo.

A su vez el desarrollo de nuevas tecnología, generaría la creación de nuevos productos que reemplacen a lo ya existentes, creando un nuevo mercado y una nueva oportunidad para desarrollar proyectos como el que se estudió en esta investigación.

6.2. PROYECCIONES EN CHILE

En nuestro país se espera que para el año 2010 se inviertan más de 27 mil millones de pesos entre inmobiliarias, obras públicas, puertos, minería, energía, entre otros. El 40% corresponderá a energía [88]. De este 40%, nada se invertirá en biocombustibles, lo que nos dice no hay planes de entrar a este mercado.

Si bien existen consorcios desarrollando tecnologías para la fabricación de bioetanol, no se ve en un futuro cercano el desarrollo de una planta de biocombustible. Añadiendo a lo anterior las palabras de José Antonio Ruiz de la CNE⁹⁵ [89], que dice que el Estado no va a subvencionar ningún proyecto de este tipo, Es posible pensar que el desarrollo de plantas de biorefinería o plantas de producción de bioetanol será una realidad en un futuro lejano.

Pareciese que Chile aún no ve a los biocombustibles, como una posible solución a la situación crítica de dependencia energética. En cambio si ve una posible solución en el uso de la energía

⁹⁵ CNE: Comisión Nacional de Energía.

nuclear [90]. Estudios señalan que la energía nuclear puede llegar a usarse en el corto tiempo, en el 2020 [91], si los estudios mandados hacer por la Comisión Nacional de Energía establecen el uso seguro de éste tipo de energía, pero se cree que recién en 50 años más el uso de la energía nuclear puede ayudar a la diversificación de matriz energética.

Los biocombustibles tal vez sean el paso intermedio entre el petróleo y el desarrollo de la energía a base de Hidrógeno, pero mientras no existan muestras concretas de proyectos para generar biocombustible de segunda generación, en Chile no se tendría bioetanol de producción nacional.

7. CONCLUSIONES

Poder diversificar la matriz energética en Chile es fundamental. El bioetanol puede resolver en parte este problema al ser una energía renovable no convencional que no genera un impacto ambiental considerable, como sí lo hacen fuentes energéticas como petróleo y carbón.

En Chile se permitirá una mezcla E5 (5% etanol y 95% de gasolina normal) con excepción tributaria. Lo que da como resultado que en Chile la demanda de bioetanol sería de 162.000 m³ para el 2010.

A través de esta investigación se logró identificar una región favorable para la instalación de una biorefinería que procese residuos de eucalipto. La ubicación corresponde a la IX región en la comuna de Angol. La particularidad de esta zona es que está cercana a las principales fuentes de residuos de eucalipto y además posee un mapa vial rico en carreteras y caminos para camiones recolectores, dada la explotación forestal que existe en la región.

Se proyecta que la capacidad de planta es de 420.000 toneladas de biomasa anualmente, la que producirá cerca de 80.000 m³ de bioetanol con lo que se alcanzará a cubrir el 48% de la demanda de bioetanol que Chile requeriría satisfacer en el 2010. Además, se producirán cerca de 30.000 toneladas de furfural y 70.000 toneladas de lignina glioxalada por año. De las corrientes no utilizadas en el proceso se obtendrán 6.500 toneladas de DDGS y 80.000 toneladas de CO₂ anualmente.

Esta co-generación de productos se enmarca dentro del concepto de biorefinería, es decir, que además de producir bioetanol se producen subproductos que pueden llegar hacer una alternativa positiva para que la producción de etanol sea sustentable económicamente. El diseño de esta biorefinería es a nivel exploratorio, es decir, los resultados de este estudio son una primera impresión, sobre qué es lo que pasaría si se decide implementar una planta con estas características.

La línea de producción consta en ir tratando la materia prima (residuos de eucalipto), desde tratamientos generales a procesos específicos que originarán los productos antes señalados. Cabe mencionar que dentro de estas etapas se escogió a la explosión a vapor como el proceso encargado del pretratamiento de la madera debido a que industrialmente posee buenos rendimientos. Para la neutralización y detoxificación se escogió al hidróxido de calcio como el reactivo encargado de precipitar inhibidores. Para la fermentación se seleccionó el proceso SFS, encargado de la producción del bioetanol. El resto de las etapas son procesos de refinamiento de corrientes, como por ejemplo destiladores y deshidratadores encargados de concentrar los productos.

La evaluación económica se realizó de dos formas, la primera con una inversión pura sin financiamiento y la segunda con una parte financiada por una entidad bancaria. La primera forma se realizó con una tasa de descuento del 15%, a un periodo de evaluación de 20 años. La inversión inicial es de cerca de 140 MM US\$. El precio de venta del bioetanol para obtener un VAN igual a cero es de 1.255US\$/m³, con una TIR del 15% y un periodo de recuperación de capital de 7 años. Este precio de venta del bioetanol es superior al que se vendería el bioetanol en Chile, por ende este proyecto no generaría ganancias, de hecho tendría una evaluación negativa se vende al 1150 US\$/m³ (precio estimado de venta en Chile), por lo que no sería viable de implementar.

La segunda forma plantea la misma condiciones anteriores, pero con un financiamiento del 40% de la inversión. El precio obtenido, para tener un VAN igual a cero es de 1.055 US\$/m³, este precio de bioetanol es cercano a lo que se podría llegar a vender el producto en Chile, por lo no existen grandes alicientes a entrar a esta industria mediante el modelo aquí presentado, ya que se obtendría un VAN ligeramente superior a cero. Lo mismo indica la TIR que es similar a la que se descontó el proyecto.

Se observa como ambas situaciones no aseguran la rentabilidad del proyecto, en la primera claramente la situación es negativa, pero la segunda tampoco causa que un inversor quiera entrar a este negocio, por lo que el proyecto según como se modelo, no tiene alicientes positivos para su desarrollo.

Además, el análisis de sensibilidad arroja que el estudio es vulnerable a los cambios en los precios de las enzimas usadas para la hidrólisis de celulosa. En el futuro se estima que éstas pueden llegar a tener un precio diez veces menor; y dada esta condición sí se obtendrían resultados positivos que generen incentivos a invertir en esta industria. Otro punto importante es que el precio de la materia prima se puede ver fuertemente afectado, llegando a precios del triple de lo que se conoce actualmente. Esto, porque en un futuro los residuos que no son ocupados, podrían adquirir una importancia tal (usos alternativos), que haga que los precios suban, lo que transforma inmediatamente estos proyectos en no rentables en el largo plazo.

Sería interesante continuar el estudio de la biorefinería, tal vez con la idea de fabricar otros productos o con la idea de investigar nuevas tecnologías que permitan obtener mejores retornos monetarios.

Sin duda alguna los retornos monetarios son los impulsos que necesitan los inversionistas para realizar proyectos de esta envergadura. Proyectos que ayuden a Chile a ser menos dependiente de fuentes de energía externas y a diversificar la matriz energética.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Ragauskas AJ, Williams CK, Davison BH, Britovsek G, Cairney J, Eckert CA et al. The path forward for biofuels and biomaterials. *Science* 2006; 311(5760): 484-489.
2. Chaize T. www.dani2898.com. [en línea], [consulta: 22 agosto 2009]
3. Hamelinck C, VHG, PC Faaij A. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle-and long-term. *Biomass & Bioenergy* 2005; 28: 384-410.
4. Food and Agriculture Organization. *Panorama Internacional y vision del Estado.*; 2008.
5. Galbe M, Zacchi G. A review of the production of ethanol from softwood. *Appl Microbiol Biotechnol* 2002; 59(6): 618-628.
6. ANFAVEA. www.anfavea.com.br. [en línea], [consulta: 27 septiembre 2009]
7. Traub A. Políticas sobre biocombustibles en Chile. *Producción de semillas en especies destinadas a la producción de biocombustibles*; Santiago, Chile. 2008.
8. ESAB. www.esab.es. [en línea], [consulta: 22 septiembre 2009]
9. Weiland P. Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. *Appl Biochem Biotechnol* 2003; 109(1-3): 263-274.
10. Drunk07. <http://drunk07-quimica.blogspot.com/>. [en línea], [consulta: 18 noviembre 2009]
11. CIEMAT. www.energiasrenovables.ciemat.es. [en línea], [consulta: 3 octubre 2009]
12. Universidad de Concepción. *Bioetanol: Una alternativa Energética Concepción: Universidad de Concepción.*; 2005.
13. Cavieres P. *Marco global de biocombustibles*. 2008.
14. Kamm B, Kamm M. Principles of biorefineries. *Appl Microbiol Biotechnol* 2004; 64(2): 137-145.
15. Correa T. Estudio exploratorio de la producción de etanol en Chile a partir de residuos forestales. *Ingeniería Civil Industrial thesis, Universidad de Chile, Santiago*, 2008.
16. BioTop. www.top-biofuel.org. [en línea], [consulta: 11 septiembre 2009]
17. Steve Sorrell JS, Roger Bentley, Adam Brandt and Richard Miller. *Global Oil Depletion*. In: Centre UER, 2009.
18. Sánchez F. *Mercado internacional de las energías renovables. IV Encuentro internacional de inversiones en energías renovables y MDL*; Santiago, Chile. 2009.
19. U.S.A.Government. www.eia.doe.gov. [en línea], [consulta: 10 enero 2010]
20. 7 días. www.7dias.com.do. [en línea], [consulta: 10 enero 2010]
21. Spatuzza A. www.bnamericas.com/news. [en línea], [consulta: 10 enero 2010]
22. Patrouilleau R., Yapura P., Casanovas M. *Perspectiva de los Biocombustibles en Argentina, con énfasis en el etanol de base celulósica*. In: *Agropecuaria*, ed. Buenos Aires; 2006.
23. Tokman M. *Matriz energética & proyecciones futuras*. In: *Energía CNd*, ed.; 2008.
24. Astudillo A. www.latercera.com [en línea], [consulta: 15 noviembre 2009]
25. Muñoz R., Acosta L., González R. *Potencial de producción de biocombustibles en base a cultivos agrícolas en Chile. Parte II: Evaluación económica de elaboración de biocombustibles*. In: *María. UTFS*, ed.; 2006.
26. Almada M. *Análisis de la producción de materias primas para la elaboración de bioetanol y biodiésel, y de estos biocombustibles, presente y esperada hasta 2020, en países potencialmente proveedores de Chile*. In: *ODEPA*, ed. Santiago; 2006.

27. ENAP. www.enap.cl. [en línea], [consulta: 28 septiembre 2009]
28. Iglesias R. Política energética y oportunidades para los biocombustibles en Chile. Bioenergy for a sustainable development. Biofuels: Challenges in technologies and markets; Valparaíso, Chile. 2009.
29. BCN. www.leychile.cl. [en línea], [consulta: 12 diciembre 2009]
30. Díaz P., Peña Y., Ulloa M.. Evaluación técnica-tconómica del negocio de la producción de etanol a partir de remolacha para su uso como combustible.; 2006.
31. Bailey B. Performance of ethanol as a transportation fuel. Applied Energy Technology Series 1996; 168: 37-58.
32. Pereira L. The chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials. Quim Nova 2003; 26(6): 863-871.
33. Pereira Jr N., Melo L.M. Biomass of Lignocellulosic Composition for Fuel Ethanol Production and the Context of Biorefinery. Río de Janeiro, Brasil, 2008.
34. CMPC. www.papelnet.cl. [en línea], [consulta: 5 septiembre 2009]
35. CONAF. Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile. 1999.
36. Instituto Forestal. Superficies de plantaciones forestales IV-XI regiones actualización a diciembre 2005. Santiago, Chile: INFOR; 2006.
37. Sánchez JM. www.arbolesornamentales.com. [en línea], [consulta: 18 agosto 2009]
38. Santibáñez JP. Caracterización Química de residuos Forestales y Agrícolas, pre-tratados con Hongos de Pudrición Blanca. 2009.
39. Bertran J. Potencial de Biomasa Forestal. 2008.
40. Cortínez V. Procesamiento de desechos eucalipto y lenga con ácido diluido y enzimas celulolíticas comerciales para la producción de bioetanol. 2008.
41. Taylor G. Biofuels and biorefinery cocept. Energy Policy 2008; 36: 4406-4409.
42. ZHU J.Y., PAN X.J., GLEISNER R. The status of and key barriers in lignocellulosic ethanol production: a technological perspective. International Conference on Biomass Energy Technologies.; Guangzhou, China. 2008.
43. Lee J.M., Hwang I.T., Park N.J., Hwang Y.K., Chang J.S., Hwang J.S. Furfural: Hemicellulose/xylose-derived biochemical. Biofpr 2008; 2: 438-454.
44. Pizzi A. Lignin-based wood panle adhesives without formaldehyde. Holz Roh Werkst 2007; 65: 65-70.
45. Jofré J., Niklitschek T. Lignina: Sus usos en la industria.; 2008.
46. Masisa. www.masisa.com. [en línea], [consulta: 2 diciembre 2009]
47. Lowe. www.lowes.com. [en línea], [consulta: 20 octubre 2009]
48. PlasticsTechnology. www.ptonline.com. 2007. [en línea], [consulta: 18 diciembre 2009]
49. Muñoz P. Producción de Amilasas, Xilanasas y Celulasas para Elaboración de biocombustibles en Chile y el Mercosur. Santiago, Chile.; 2009.
50. Cortínez V. Montecinos C., Pezoa R. Plan de negocios para la instalación de una planta de biobutanol en Chile. Santiago, Chile.; 2008.
51. Cibermodo.com. www.cometologas.com. [en línea], [consulta: 20 noviembre 2009]
52. Sánchez C. Distintos usos del dióxido de carbono en síntesis electroquímica. Doctorado thesis, Universidad de Alicante, Alicante, 2004.
53. Vega L. El dióxido de carbono como recurso. VIII Seminario internacional sobre el cambio climático: Nuevas tecnologías contra el cambio climático; Madrid. 2008.

54. AmericaEconomica. www.americaeconomica.com. [en línea], [consulta: 22 agosto 2009]
55. Coomercenet. www.co2-solutions.com. [en línea], [consulta: 28 octubre 2009]
56. Cantarella M., Cantarella L., Gallifuco A., Spera, Alfani F. Comparison of different detoxification methods for steam-exploded poplar wood as a substrate for the bioproduction of ethanol in SHF and SSF. *Process Biochemistry* 2004; 39 1533-1542.
57. Ramos L., Carpes S., Silva F., Ganter J. Comparison of the Susceptibility of two hardwood species, *Mimosa scabrella* benth and *Eucaliptus viminalis* labill, to steam explosion and enzymatic hydrolysis. Brasil; 1999.
58. Mabee W., Gregg D., Arato C., Berlin A., Bura R., Gilkes N. et al. Updates on softwood-to-ethanol process development. *Appl Biochem Biotechnol* 2006; 129-132: 55-70.
59. Ballesteros I, Negro M., Oliva J., Manzanares P., Ballesteros M. Ethanol production from steam-explosion pretreated wheat straw. *Appl Biochem Biotechnol* 2006; 129-132: 496-508.
60. Oliva J.M. Efecto de los productos de degradación originados en la explosión a vapor de biomasa de Chopo sobre *Kluyveromyces marxianus*. Doctor thesis, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2003.
61. Luo C., Brink D., Blanch H.,. Identification of potential fermentation inhibitors in conversion of hybrid poplar hydrolyzate to ethanol. *Biomass & Bioenergy* 2002; 22: 125-138.
62. Olofsson K, Bertilsson M, Liden G. A short review on SSF - an interesting process option for ethanol production from lignocellulosic feedstocks. *Biotechnol Biofuels* 2008; 1(1): 7.
63. Lienqueo ME. Separación y Procesos Biotecnológicos. 2007.
64. Technology P. www.purevisiontechnology.com. [en línea], [consulta: 23 noviembre 2009]
65. Sun Y, Cheng J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresour Technol* 2002; 83(1): 1-11.
66. Sánchez O., Cardonas C. Producción biotecnológica de alcohol carburante I: obtención a partir de diferentes materias primas. *INCI* 2005; 30: 671-678.
67. Tomás-Pejó E., Oliva J., Ballesteros M. Realistic approach for full-scale bioethanol production from lignocellulose: a review. *Journal of Scientific & Industrial Research* 2008; 67: 874-884.
68. Tomas-Pejo E., Oliva J., Ballesteros M, Olsson L. Comparison of SHF and SSF processes from steam-exploded wheat straw for ethanol production by xylose-fermenting and robust glucose-fermenting *Saccharomyces cerevisiae* strains. *Biotechnol Bioeng* 2008; 100(6): 1122-1131.
69. Aden A. Ruth M., Ibsen K., Jechura J, Neeves K., Sheehan J., Wallace B. Lignocellulosic biomass to ethanol process desing and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover. In: Laboratory NRE, ed. Colorado; 2002.
70. Al-Asheh S., Banat F., Lagth A. Separation of ethanol - water mixtures using molecular sieves and biobased adsorbent. *Chemical Engineering Research and Design* 2004; 82: 855-864.
71. Ananias R. Física de la madera., Universidad del Bio Bío., Concepción.
72. Ballesteros M., Oliva J.M., Negro M, Manzanares P., Ballesteros I. Ethanol from lignocellulosic materials by a simultaneous saccharification and fermentation process

- (SFS) with *Kluyveromyces marxianus* CECT 10875. *Process Biochemistry* 2004; 39: 1843-1848.
73. Perry R., Green D. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 1999.
 74. Améstica L. *Reactores químicos y bioquímicos*. 2007.
 75. Treybal R. *Operaciones de transferencia de masa*, Segunda edn., 1980.
 76. Matches. www.matche.com. [en línea], [consulta: 10 diciembre 2009]
 77. Alibaba. www.alibaba.com. 2009. [en línea], [consulta: 3 diciembre 2009]
 78. DTN. www.dtnethanolcenter.com. [en línea], [consulta: 13 agosto 2009]
 79. Servicio Impuestos Internos. ww.sii.cl. [en línea], [consulta: 23 diciembre 2009]
 80. Banco Central de Chile. www.bcentral.cl. [en línea], [consulta: 23 diciembre 2009]
 81. Abengoa. www.abengoa.com. [en línea], [consulta: 15 octubre 2009]
 82. Macalister T. www.guardian.co.uk. 2009. [en línea], [consulta: 5 diciembre 2009]
 83. Charts T. <https://futures.tradingcharts.com>. 2009. [en línea], [consulta: 28 agosto 2009]
 84. Latvian State Institute of Wood Chemistry. www.ist-world.org. [en línea], [consulta: 24 octubre 2009]
 85. Lynd L. Overview and evaluation of fuel ethanol from cellulosic biomass: Technology, economics, the environment, and policy. *Journal Name: Annual Review of Energy and the Environment; Journal Volume: 21; Other Information: PBD: 1996 1996: Medium: X; Size: pp. 403-465.*
 86. Zomosa A. *Manual de proyectos de ingeniería química* 1984.
 87. Wyman C. Biomass ethanol: Technical progres, opportunities, and commercail challenges. *Energy Environ* 1999; 24: 189-226.
 88. Díaz J. Proyecciones 2010: Pronósticos y escenarios pra anticiparse a lo que ocurrirá el proximo año. *Economía y negocios. El mercurio*. 2009.
 89. Ruíz J. Políticas and incentives for biofuels in Chile. IV Encuentro internacional de inversiones en energías renovables y MDL; Santiago, Chile. 2009.
 90. Iturriaga RM. www.bcn.cl/carpeta_temas_profundidad/energia-nuclear. [en línea], [consulta: 10 enero 2010]
 91. Saez AM. Energía Nuclear. ¿Un futuro en Chile? *Revista de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile*. Vol 46. Santiago, Chile.; 2009:12-17.
 92. García T. Evaluación técnico-económica de una planta de bioetanol a partir de maíz., Universidad de Chile, Santiago, 2008.
 93. Escull. www.escull.net. [en línea], [consulta: 7 diciembre 2009]
 94. Hála E., Wichterle I., Polak J., Boublik T. Vapor liquid equilibrium data at normal pressures. 1968.
 95. Lamoureux J. Diseño conceptual de una planta biodiesel. Universidad de Chile, Santiago, 2007.

9. SIGLAS, CONVERSIONES Y PROPIEDADES DE COMPUESTOS.

CENER: Centro Nacional de Energía Renovable.

CIEMAT: Centro de Investigación energética, Medioambientales y Tecnológicas.

CIF: Cost Insure Freight.

CNE: Comisión Nacional de Energía.

CONAMA: Corporación Nacional de Medio Ambiente.

CORFO: Corporación de Fomento de la Producción

DDGS: Destiller's Dried Grain with Solubles.

DOE: Departamento de Energía de Estados Unidos.

EMTB: éter metil tert-butílico.

FFV: Vehículos Flex-Fuel.

FIEM: Federación Española de la Industria Maderera.

FOB: precio Free On Board.

IEA: Agencia Internacional de la energía.

INFOR: Instituto Forestal.

NREL: Laboratorio Nacional de Energías Renovables.

NTNU: Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología.

OECD: Organización para la cooperación y el desarrollo económico.

RAE: Residuos Aprovechables Energéticamente.

SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

SII: Servicio de Impuestos Internos.

TIR: Tasa Interna de Retorno.

Tabla 49: Conversiones usadas

1 lb.	0,4536 kg.
1 ton.	1.000 kg.
1 m ³ .	1.000 lt.
1 galón.	3,8 lt.
1 barril.	52 galones.
1 BTU.	252,2 calorías.
1 m ³ .	2,5 mst ⁹⁶ .
1 mst.	Madera apilada en 1x1x1 metros.
Densidad del eucalipto.	0,59 ton/m ³ .

Fuente: Elaboración propia.

⁹⁶ mst: metro estérico.

Tabla 50: Propiedades de compuestos químicos importantes.

Compuesto químico	Apariencia	Propiedades				Solubilidad
		Densidad [kg/m ³]	Peso molecular [gr/mol]	Temperatura de ebullición [°C]	Presión de vapor [mm Hg]	
Bioetanol	Líquido incoloro volátil de olor característico y agradable.	0,789	46	78-79	67,5 / 20°C	En agua, éter, acetona y benceno
Furfural	Líquido amarillento descolorido.	1,16	96	162	760 / 18,5°C	8 gr / 100 gr agua
Glioxal	Líquido amarillento descolorido.	1,27	58	51	18 / 18°C	Buena en agua
Hidróxido de sodio	Sólido, gránulos blancos sin olor	2,13	40	1388	1 / 739°C	7 gr / 100 gr agua
Ácido sulfúrico	Líquido aceitoso incoloro	1,8	98,1	327	0,3 / 20°C	Buena
Dióxido de Carbono	Gas incoloro que no tiene olor	1,833	44,01	-78,5	43.300 / 21°C	N.A.
Agua	Líquido incoloro e inodoro	1	18	100	17,5 / 20°C	Completa
Hidróxido de calcio	Polvo blanco inodoro	2,211	74,1	580	N.A.	0,185 g/ 100 gr agua

Fuente: Elaboración propia en base a MSDS⁹⁷ de cada compuesto.

⁹⁷ MSDS: Material Safety Data Sheet

10. ANEXOS

Anexo 1: Especificación de calidad para bioetanol

Propiedad	Unidad de medida	Valor
Contenido de etanol	% volumen	mín. 92,1
Contenido de metanol	% volumen	máx. 0,5
Goma lavada	mg/100 ml	máx. 5,0
Contenido de agua	% volumen	máx. 1,0
Contenido de desnaturalizador	% volumen	mín. 1,96 - máx. 5,0
Cloro inorgánico	mg/l	máx. 32
Cobre	mg/kg	máx. 0,1
Acidez (como ácido acético)	mg/l	máx. 56
pH	pH	mín. 6,5 – máx. 9,0
Azufre	% masa	máx. 0,003
Sulfatos	ppm	máx. 4
Apariencia		Visualmente libre de sedimentos y material suspendido. Brillante y claro a temperatura ambiente o 21°C (la mayor de ambas)

Fuente: Elaboración propia en base a decreto nº 11 del 9 de mayo del 2008.

Anexo 2: Puntos del D.S.N °95 de 2001 a la cual está sometido este estudio.

k. Instalaciones fabriles, tales como metalúrgicas, químicas, textiles, productoras de materiales para la construcción, de equipos y productos metálicos y curtiembres, de dimensiones industriales. Se entenderá que estos proyectos o actividades son de dimensiones industriales cuando se trate de:

k.1. Instalaciones fabriles cuya potencia instalada sea igual o superior a dos mil kilovoltios-ampere (2.000 KVA), determinada por la suma de las capacidades de los transformadores de un establecimiento industrial.

Tratándose de instalaciones fabriles en que se utilice más de un tipo de energía y/o combustibles, el límite de dos mil kilovoltios-ampere (2.000 KVA) considerará la suma equivalente de los distintos tipos de energía y/o combustibles utilizados.

l) Agroindustrias, mataderos, planteles y establos de crianza, lechería y engorda de animales, de dimensiones industriales. Se entenderá que estos proyectos o actividades son de dimensiones industriales cuando se trate de:

l.1. Agroindustrias, donde se realicen labores u operaciones de limpieza, clasificación de productos según tamaño y calidad, tratamiento de deshidratación, congelamiento, empacamiento, transformación biológica, física o química de productos agrícolas, y que tengan capacidad para generar una cantidad total de residuos sólidos igual o superior a ocho toneladas por día (8 t/d), en algún día de la fase de operación del proyecto; o agroindustrias que reúnan los requisitos señalados en los literales h.2. o k.1., según corresponda, ambos del presente artículo.

ñ) Producción, almacenamiento, transporte, disposición o reutilización habituales de sustancias tóxicas, explosivas, radioactivas, inflamables, corrosivas o reactivas.

ñ.4. Producción, almacenamiento, disposición, reutilización o transporte por medios terrestres, de sustancias inflamables que se realice durante un semestre o más, y con una periodicidad mensual o mayor, en una cantidad igual o superior a ochenta mil kilogramos diarios (80.000 kg/día), entendiéndose por tales a las sustancias señaladas en las Clases 3 y 4 de la NCh 2120/Of89.

Anexo 3: Composición del bosque nativo por regiones.

ESPECIES	REGIONES [Há]												%	
	I	II	III	IV	V	RM	VI	VII	VIII	IX	X	XI		XII
Alerce											263.191,8			2
Ciprés de las Guaitecas											37.909,1	514.105,1	418.311,8	7,2
Araucaria									43.600,2	207.885,2	9.587,7			1,9
Ciprés de la Cordillera						56,3	2.440,3	7.890	18.852,4	5.264,5	10.492,8			0,3
Lenga								13.564	143.642,4	102.199,5	566.880,1	1.440.702,2	1.124.563,7	25,3
Coihue de Magallanes											182.194,6	578.942,9	1.031.960	13,4
Roble-Hualo					632,7	6.540,1	18.301,8	148.182	14.666,1					1,4
Roble - Raulí – Coihue								158.916	488.667,3	432.488	380.459,6			10,9
Coihue - Raulí-Tepa									52.449	104.638,8	406.431,3			4,2
Esclerófilo	7.299,8			1.373,5	93.692,1	86.857,7	97.271,1	41.195	15.268,6	354,9	1.776,2			2,6
Siempre verde				236,6	988,1			583	9.061,7	55.670,2	1.749.949,9	2.281.782,1	50.633,2	30,9

Fuente: Elaboración propia en base a INFOR 2006.

Anexo 4: Composición de plantaciones por regiones.

	Regiones plantadas [Há]								%	
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI		
Atriplex	54.272,3									2,8
Acacia Saligna	6.213,8									0,3
Eucaliptus	2.736,1	36.027	25.603,8	30.671,9	211.150,3	138.440,7	95.103,4			27,8
Pino Radiata		10.581,2	64.842,3	363.409,5	608.990,4	120.993,2	116.181,4			66,2
Pino ponderosa								13.756,5		0,7
Pino contorta								6.021,7		0,3
Otras	3.618,6	401	1.856,7	3.629,4	2.145,4	7.533,1	6.143,2	11.844		1,9

Fuente: Elaboración propia en base a INFOR 2006.

Anexo 5: Residuos de eucalipto de la VIII región y distancia relativa a Laja y Angol.

VIII Región						
Provincia	Capital	Comuna	Eucalipto [Há]	Total Residuos [m ³]	Distancia a Laja [23]	Distancia a Angol [23]
Arauco	Lebu	Arauco	15.408,60	79,62	160,9	167,13
		Cañete	10.440,50	53,95	182,25	107,55
		Contulmo	10.586,10	54,70	148,63	73,92
		Curanilahue	10.560,90	54,57	184,26	154,14
		Lebu	6.441,10	33,28	235,8	161,12
		Los Álamos	4.911,20	25,38	208,77	134,06
		Tirúa	9.370,20	48,42	213,84	139,13
Bío Bío	Los Ángeles	Alto Biobío	18,5	0,10		
		Antuco	24,8	0,13	112,03	125,01
		Cabrero	521,6	2,70	53,8	110,81
		Laja	2.488,40	12,86		80,17
		Los Ángeles	1.889,30	9,76	47,74	60,72
		Mulchén	27.365,50	141,40	75,72	69,78
		Nacimiento	6.853,40	35,41	36,55	43,62
		Negrete	807,7	4,17	54,14	42,26
		Quilaco	2.727,00	14,09	90,45	92,22
		Quilleco	2.948,90	15,24	87,85	100,83
		San Rosendo	278,9	1,44	2,36	82,53
		Santa Bárbara	5.759,40	29,76	87,04	100,02
		Tucapel	7.110,10	36,74		113,82
Yumbel	1.186,20	6,13	36,64			
Concepción	Concepción	Chiguayante	396,5	2,05		156,43
		Concepción	3.243,10	16,76	141,02	147,19
		Coronel	4.704,20	24,31	127,76	133,94
		Florida	5.350,00	27,64	124,24	182,5
		Hualpén	0,00		156,89	163,07
		Hualqui	4.112,60	21,25	102,53	169,77
		Lota	4.696,60	24,27	132,36	138,53
		Penco	1.187,70	6,14	166,77	159,54
		San Pedro de la Paz	1.556,20	8,04	140,06	146,23
		Santa Juana	6.736,30	34,81	92,17	98,35
		Talcahuano	331,1	1,71	155,15	161,33
		Tomé	6.505,10	33,61	163,13	175,63

VIII Región						
Provincia	Capital	Comuna	Eucalipto [Há]	Total Residuos [m³]	Distancia a Laja [23]	Distancia a Angol [23]
Ñuble	Chillán	Bulnes	2.256,80	11,66	91,04	148,06
		Chillán	2.275,10	11,76	109,88	166,89
		Chillán Viejo	2.919,00	15,08	108,21	165,21
		Cobquecura	3.324,90	17,18	210,53	267,55
		Coelemu	1.727,40	8,93	160,37	217,39
		Coihueco	1.428,00	7,38	136,69	193,69
		El Carmen	716,6	3,70	118,87	175,87
		Ninhue	2.944,00	15,21	153,97	210,99
		Ñiquén	1.268,50	6,55		
		Pemuco	2.861,50	14,79	110,21	152,1
		Pinto	730,7	3,78	134,45	191,46
		Portezuelo	1.792,00	9,26	135,21	192,22
		Quillón	1.813,10	9,37	100,76	157,78
		Quirihue	4.731,20	24,45	177,16	243,17
		Ránquil	1.076,40	5,56		
		San Carlos	1.768,80	9,14	134,57	191,58
		San Fabián	1.685,30	8,71	176,02	233,03
		San Ignacio	783,8	4,05	114,77	171,78
		San Nicolás	5.627,80	29,08	132,25	189,26
		Treguaco	1.248,80	6,45	169,76	226,77
54 Yungay	1.653,10	8,54	89,49	131,7		
TOTAL			211.150,50	1.091,00	5.909,04	7.417,85

Fuente: Elaboración propia en base a Bertran, 2008.

Anexo 6: Residuos de eucalipto de la IX región y distancia relativa a Laja y Angol.

IX Región						
Provincia	Capital	Comuna	Eucalipto [Há]	Total Residuos [m³]	Distancia a Laja [23]	Distancia a Angol [23]
Malleco	Angol	Angol	17.496,60	85,71	80,17	0
		Purén	4.305,70	21,09	131,31	56,61
		Los Sauces	15.596,60	76,40	106,43	31,73
		Renaico	3.004,30	14,72	59,66	20,51
		Collipulli	20.110,00	98,51	109,5	30,61
		Ercilla	7.453,50	36,51	122,04	44,33
		Traiguén	8.104,30	39,70	142,84	68,13
		Lumaco	7.198,30	35,26	129,52	54,81
		Victoria	10.299,60	50,45	144,44	66,74
		Curacautín	2.175,20	10,66	200,78	123,07
TOTAL			95.744,10	469,00	1.226,69	496,54

Fuente: Elaboración propia en base a Bertran, 2008.

Anexo 7: Memoria de cálculo del balance de masa para SFS.

Nomenclatura:	Acido Acético: Ac.A	Arabinosa: A
	Celulosa: C	Dióxido de carbono: DC
	Etanol: E	Enzimas: EN
	Furfural: F	Levadura: L
	Hidroxi-metil furfural: HMF	Manosa: M
	Xilosa: X	
	Actividad enzimática mediada : FPU _m	Actividad enzimática comprada: FPU _c

En donde A_b significa especie A en la corriente b del diagrama de flujos.

- Levadura: ecuación que modela el crecimiento de la levadura, L_{15.5} representa la cantidad de levadura que hay una vez terminada la fermentación.

$$L_{15.5} = L_{15.3} * \exp(t * \mu_{m\acute{a}x})$$

Datos: tiempo: 20 horas y $\mu_{m\acute{a}x}=0,2625 \text{ hr}^{-1}$ [56].

- Furfural: ecuación representa las corrientes de donde se genera furfural.

$$0,5 * (A_{15.1} + G_{15.1} + M_{15.1}) = F_{15.5}$$

- Acido Acético: esta ecuación muestra que la cantidad de ácido acético se mantiene antes y después de la fermentación.

$$Ac.A_{15.1} = Ac.A_{15.5}$$

- Arabinosa, galactosa y manosa: ecuaciones para el cálculo de los otros azúcares que no participan en la generación de bioetanol.

$$A_{15.5} = 0,5 * A_{15.1}; \quad G_{15.5} = 0,5 * G_{15.1}; \quad M_{15.5} = 0,5 * M_{15.1}$$

- Etanol: cálculo de la producción de bioetanol a través del uso del rendimiento de la levadura.

$$E_{15.5} = Yield * C_{15.1}$$

Dato: yield =0,43 gr/gr[68]. Además se hace el supuesto que la levadura consume toda la celulosa.

- CO₂: cálculo de la producción de CO₂ a través del uso del rendimiento de la levadura.

$$DC_{15.5} = Yield * DC_{15.1}$$

Dato: yield =0,57 gr/gr[68].

- HMF: un 2% de xilosa se transforma en Hidroxi-metil furfural [60].

$$HMF_{15.5} = 2\% * X_{15.1}$$

- Xilosa: un 98% de la xilosa que entra a la fermentación es recuperada a la salida[60], el otro 2% restante es transformado en Hidroxi-metil furfural.

$$X_{15.5} = 98\% * X_{15.1}$$

- Enzimas: la primera ecuación muestra la cantidad de enzima que se necesita en la fermentación, y la segunda muestra que un 70% de la enzima se recupera al terminar esta etapa, es resto se degrada.

$$EN_{15.2} = \left(\frac{FPU_m}{FPU_c} \right) * C_{15.1}$$

$$EN_{15.5} = 70\% * EN_{15.2}$$

Anexo 8: Resumen balance de masa.

Composición	Corrientes											
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F11.1
Xilosa	229			229	224			224		224	22	22
Arabinosa	20			20	19			19		19		
Galactosa	32			32	31			31		31		
Manosa	36			36	35			35		35	6	6
Celulosa	436			436	427			427		427	353	353
Lignina	193			193	189,1			189		189	208,4	
Cenizas	2			2	2			2		2	6	6
Extraíble	53			53	52			52		52		
Agua		1.000	900	100	98	2.775	543	2.233		2.233	1.362	1.362
Vapor de Agua									997	997		
Levadura												
Enzima												
Ca(OH) ₂												
H ₂ SO ₄						22	5	17		17	10	10
Glyoxilato												
Lodo + Piedras	149,4		149,4									
Ácido Acético												
Ácido fórmico												
Furfural												
HMF												
Ácido 4 hidrobenzoico												
Etanol												
Nutrientes												
CO ₂												
NaOH												
Lignina Glioxalada												
TOTAL	1.149	1.000	1.049	1.100	1.078	2.796	547	3.229	996	4.225	1.967	1.759
Temperatura [°C]	25	25	25	25	25	25	25	25	190	190	50	25
Presión [atm]	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1

Corrientes												
Composición	F12.1	F12.2	F12.3	F13	F14	F15.1	F15.2	F15.3	F15.4	F15.5	F16	F17
Xilosa	91		91		91	113				111		111
Arabinosa	6		6		6	6				3		3
Galactosa	10		10		10	10				5		5
Manosa	16		16		16	22				11		11
Celulosa	5,3		5,3		5,3	359						
Lignina												
Cenizas	6		6		6	11,5						
Extraíble												
Agua	2.358		2.358	236	2.123	3.484	200	4.000		7.734	50	7.684
Vapor de Agua												
Levadura								0,3		66,3	66	
Enzima							94			94		85
Ca(OH) ₂		2	2	32								
H ₂ SO ₄	2					10						
Glyoxilato												
Lodo + Piedras												
Ácido Acético	68		68		68	68				68		68
Ácido fórmico	45		45									
Furfural	67		67							20		20
HMF	13,5		13,5							11,5		11,5
Ácido 4 hidrobenzoico	35		35									
Etanol										154		154
Nutrientes									140			28
CO ₂										204,5		204,5
NaOH												
Lignina Glioxalada												
TOTAL	2.723	2	2.723	268	2.325	4.084	294	4.000	139	8.482	116	8.384
Temperatura [°C]	50	25	25	25	25	25	25	37	25	37	37	37
Presión [atm]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Corrientes												
Composición	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27	F28	F29
Xilosa	110				110					44		44
Arabinosa	3				3					3		3
Galactosa	5				5							
Manosa	11				11							
Celulosa												
Lignina												
Cenizas												
Extraíble												
Agua	7.300		2.190	155	4.955	6	150	33		4.988	3.990	998
Vapor de Agua		384,2										
Levadura												
Enzima	84				84					84		84
Ca(OH) ₂												
H ₂ SO ₄									0,3			
Glyoxicilato												
Lodo + Piedras												
Ácido Acético	69				69					69		69
Ácido fórmico										9		9
Furfural	19				19					85		85
HMF	12				12					12		12
Ácido 4 hidrobenczoico												
Etanol	154				7	147						
Nutrientes	28			145	28					28		28
CO ₂	10	194										
NaOH												
Lignina Glioxalada												
TOTAL	7.805	578	2.190	301	5.304	152	150	33	0,3	5.322	3.990	1.331
Temperatura [°C]	70	70	65	65	65	25	25	25	25	150	25	25
Presión [atm]	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Corrientes								
Composición	F30	F31	F32	F33	F35	F36	F37	F38
Xilosa			7					7
Arabinosa			3					3
Galactosa								
Manosa								
Celulosa								
Lignina				173				
Cenizas								
Extraíble								
Agua	229				229			7.107
Vapor de Agua		100	898					898
Levadura								
Enzima			84					84
Ca(OH) ₂								32
H ₂ SO ₄								5
Glyoxicilato						105,4		
Lodo + Piedras								
Ácido Acético			68					68
Ácido fórmico			9					9
Furfural		122,5						
HMF			12					12
Ácido 4 hidrobenczoico								
Etanol								
Nutrientes			28					28
CO ₂								
NaOH					108,5			
Lignina Glioxalada							173,6	
TOTAL	230	222	1.109	174	339	105	173	8.254
Temperatura [°C]	25	60	60	25	25	25	25	25
Presión [atm]	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia en base al balance de masa realizado.

Anexo 9: Ecuaciones de diseño de equipos.

Nombre del equipo	Ecuación de diseño	Nomenclatura	
Filtro rotatorio con lavado	$t_f = \frac{\mu * \alpha * C}{2 * \Delta P^{(1-s)}} \left(\frac{V_f}{A} \right)^2$	$\frac{t_w}{t_f} = 2 * \frac{V_w}{V_f}$	<p>μ: viscosidad lecho α:resistencia especifica torta C: masa de torta por unidad de medida filtrada. A: área de filtrado P: presión t: tiempo V: volumen w: wash f: filtrado</p>
Molino de bolas vibratoria	$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}}$		<p>V_c: velocidad critica de rotación del molino D: diámetro del molino</p>
Centrifuga tubular de tazón sólido	$\left\{ \frac{2\pi LR^2 \Omega^2}{g} \right\} = \Sigma_{\text{tubular}}$	$\left(\frac{Q}{\eta \Sigma} \right)_{\text{tipo 1}} = \left(\frac{Q}{\eta \Sigma} \right)_{\text{tipo 2}}$	<p>L: largo de la centrifuga R: radio interno de la centrifuga Ω: velocidad angular de rotación G: constante gravitacional Q: flujo volumétrico H: eficiencia por tipo Σ: tipo de centrifuga</p>
Filtro prensa	$v = \frac{Q}{A}$		<p>v: velocidad fluido Q: flujo volumétrico A: Área de filtrado</p>
Columnas de deshidratación	$H = 3 * D$	$M = \rho * V$	<p>F: flujo volumétrico T: tiempo residencia P: densidad tamiz 0,66 kg/cc M: masa</p>

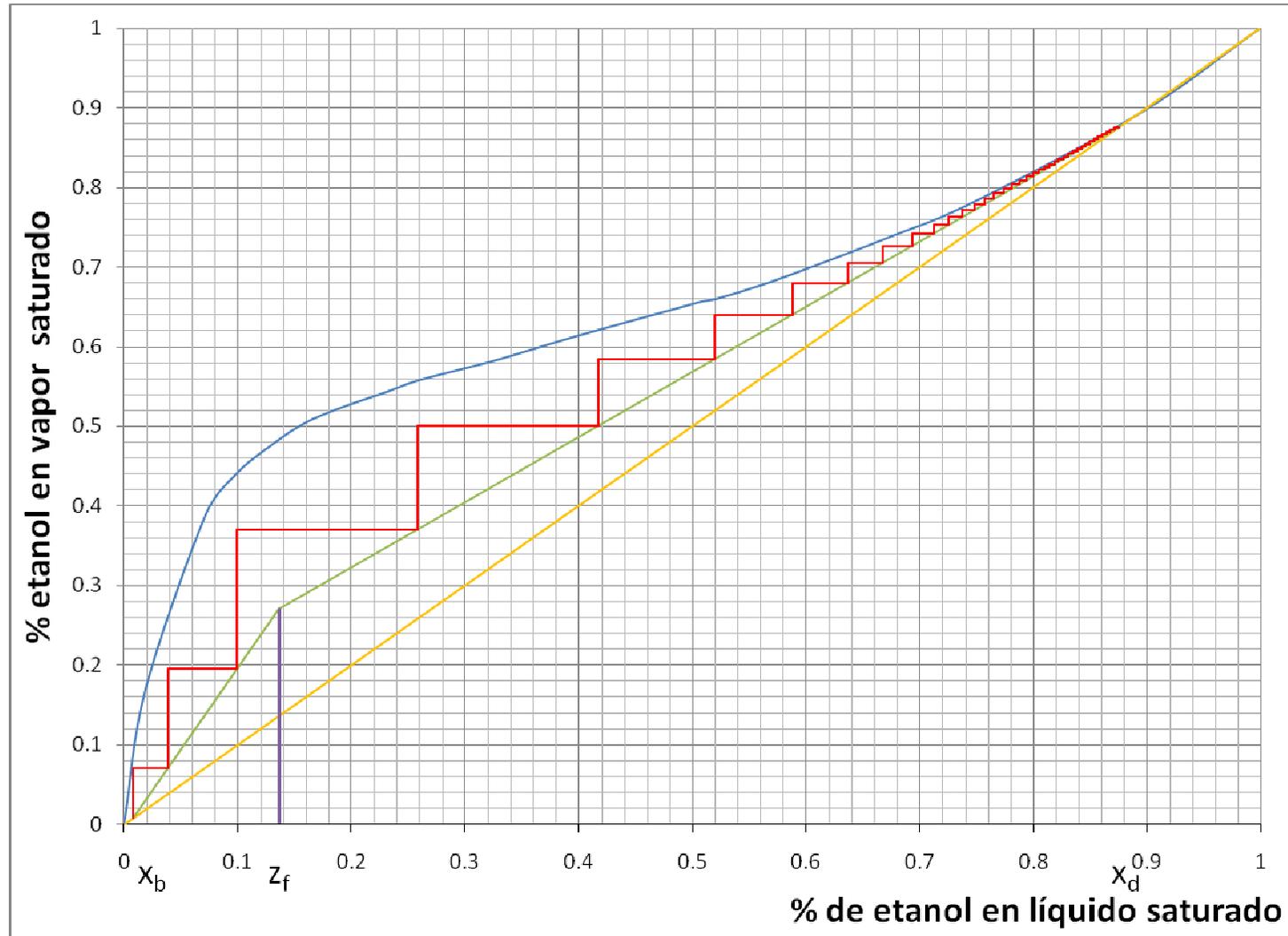
Fuente: Elaboración propia en base a García 2008[92], Lienqueo 2007[63], página web 2006 [93] y Améstica 2007[74].

Anexo 10: Curva equilibrio etanol-agua.

Fración molar en fase líquida	Fración molar en fase gaseosa
0	0
0,019	0,17
0,072	0,389
0,097	0,438
0,124	0,47
0,166	0,509
0,234	0,545
0,261	0,558
0,327	0,583
0,397	0,612
0,508	0,656
0,52	0,66
0,573	0,684
0,676	0,739
0,747	0,782
0,894	0,894
1	1

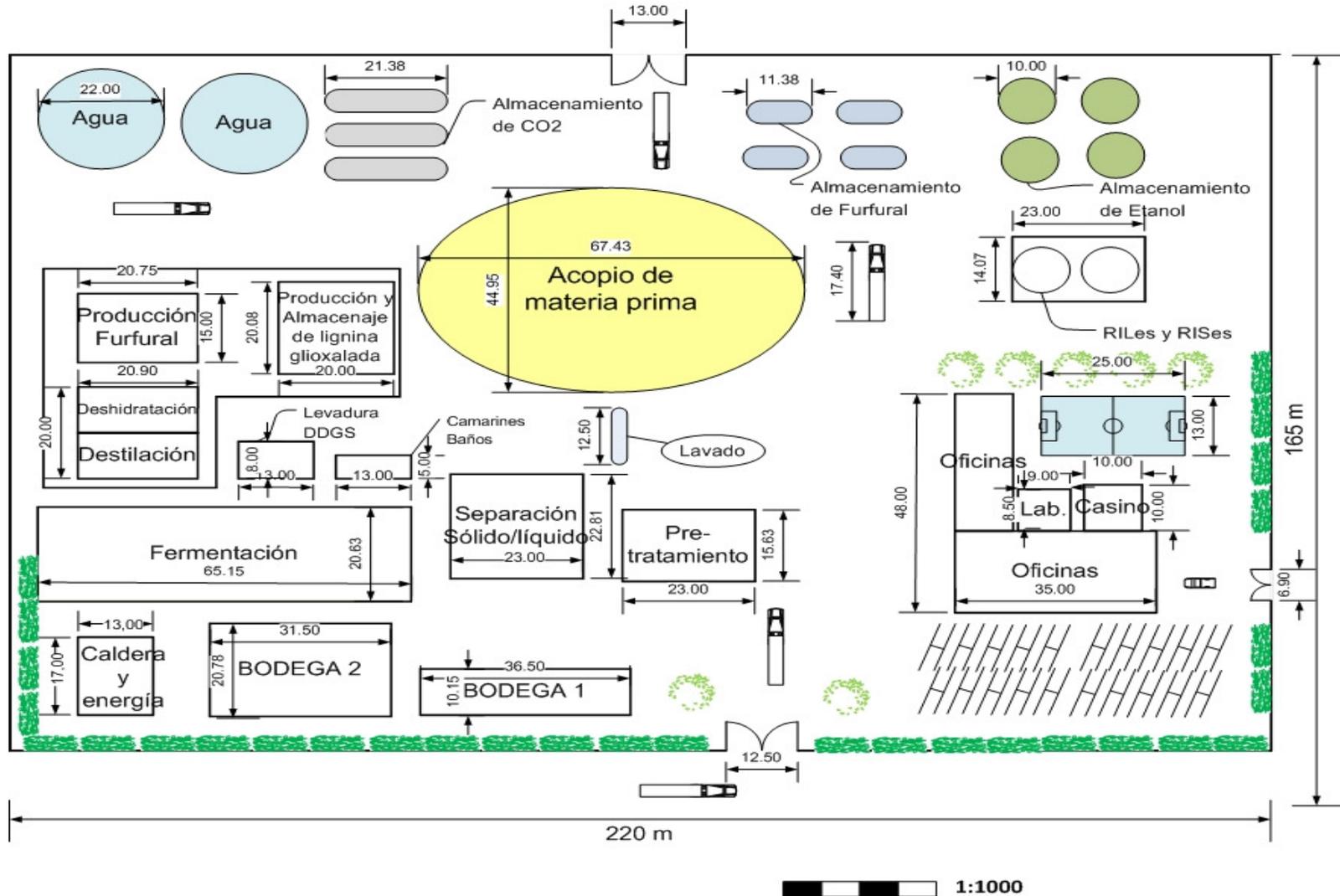
Fuente: Hala, 1968[94].

Anexo 11: Diagrama McCabe-Thiele.



Fuente: Elaboración propia en base a la curva equilibrio etanol-agua[94].

Anexo 12: Layout de la planta.



Fuente: Elaboración propia en base a layout de otras plantas vistas[92, 95].

Anexo 13: Costos tanques de almacenamiento.

Tanques	Nº	Tipo	Material	Precio unitario 2007 US\$ FOB	Precio unitario 2009 US\$ FOB	Precio total 2009 US\$ CIF
Ácido sulfúrico	3	H. Round ends	Stainless Steel, 316	84.900	274.063	356.281
Levaduras	2	V. Cone top&bottom	Stainless Steel	2.000	4.304	5.595
Nutrientes	2	V. Cone top&bottom	Stainless Steel	37.700	42.600	55.380
CO2	4	H. Round ends	Stainless Steel	123.700	532.415	692.140
Bioetanol deshidratado	4	API Floating roof	Stainless Steel	80.200	389.500	506.350
Lignina glioxilada	16	V. Cone roof flat bot	Stainless Steel	147.800	2.544.575	3.307.948
Furfural	3	H. Round ends	Stainless Steel, 316	255.500	824.770	1.072.201
Levadura producto	3	V. Cone top&bottom	Stainless Steel	11.500	37.123	48.260
Agua	2	Cone roof fiel fab	Carbon Steel	325.300	700.059	910.077
Hidróxido de Calcio	2	V. Cone top&bottom	Stainless Steel 304	61.200	131.705	171.217
RILEs y RISEs	10	Cone roof fiel fab	Carbon Steel	52.400	563.835	732.986
TOTAL					6.417.253	8.342.429

Fuente: Elaboración propia en base a Matche[76].

Anexo 14: Memoria de cálculo de electricidad consumida.

Para estimar el consumo eléctrico de la planta se utilizó como referencia datos de otras plantas similares[15].

Datos: para producir 100.000 m³ de bioetanol se ocuparon 48.426 M Wh.

Con este dato se puede calcular cuánta electricidad consumirá una planta que produce 78.000 m³ de bioetanol, además se agrega un 30% por consumo en producción de otros coproductos como furfural.

$$x = \left(\frac{48.426 * 78.000}{100.000} \right) * 1,3 = 49.104 \text{ MWh}$$

Anexo 15: Plana de sueldos.

		Cantidad	Sueldo mensual \$	Costo anual US \$
Gerencia General	Gerente	1	3.000.000	67.925
	Secretaria	1	600.000	13.585
Gerencia administración, finanzas, ventas y R.R.H.H.	Gerente	1	2.300.000	52.075
	Secretaria	2	550.000	24.906
	Subgerente de RRHH	1	1.200.000	27.170
	Seleccionador	1	800.000	18.113
	Subgerente de Ventas	1	130.000	2.943
	Atención a clientes	1	600.000	13.585
	Jefe de adquisiciones y cotizaciones	1	800.000	18.113
	Ventas	2	900.000	40.755
	Administrativos	4	800.000	72.453
	Logística y planeación	1	800.000	18.113
Gerencia de operaciones	Gerente	1	2.300.000	52.075
	Secretaria	1	550.000	12.453
	Jefe de Planta	1	1.500.000	33.962
	Ingeniero de planta	1	1.900.000	43.019
	Ingeniero de mantenimiento	1	1.300.000	29.434
	Jefe de personal	1	1.200.000	27.170
	Jefe de laboratorio	1	900.000	20.377
	Jefe de turno	4	800.000	72.453
	Técnico de laboratorio	2	600.000	27.170
	Técnico de mantenimiento	4	600.000	54.340
	Operadores de turno	20	500.000	226.415
	Operadores de patio	4	450.000	40.755
TOTAL		58	25.080.000	1.009.358

Fuente: Elaboración propia en base a ayuda de experto, Claret.

Anexo 16: TIR del análisis de sensibilidad.

Variación porcentual en la variable	TIR			
	Bioetanol (\$ precio venta)	Materia prima (costo \$)	Enzimas (costo \$)	Costos equipos (\$ inversión)
-40%		17%	32%	25%
-20%	2%	16%	24%	19%
0%	15%	15%	15%	15%
20%	21%	14%	6%	12%
40%	36%	13%		10%

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 17: Flujo caja. Precio venta bioetanol =1.150 US\$/m³. Valores en millones de US\$.

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos																					
Venta bioetanol		45,0	62,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9	89,9
Venta co-productos		84,5	118,3	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1
Ingresos totales		129,5	181,3	259																	
<i>Costos Variables</i>		110,4	154,5	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7
<i>Costos Fijos</i>		4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Total Costos Fijos		114,7	158,8	225,0																	
Gastos financieros		5,7	5,3	4,9	4,4	3,9	3,4	2,8	2,2	1,5	0,8										
Depreciación legal		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8	0,8										
Pérdidas ejercicio anterior																					
Utilidad antes de impuesto		0,9	9,0	20,9	21,3	21,8	22,3	30,4	31,0	31,7	32,4	34									
Impuesto primera categoría		0,2	1,5	3,5	3,6	3,7	3,8	5,2	5,3	5,4	5,5	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8
Utilidad después de impuestos		0,8	7,4	17,3	17,7	18,1	18,5	25,2	25,7	26,3	26,9	28,2									
Gastos financieros		5,7	5,3	4,9	4,4	3,9	3,4	2,8	2,2	1,5	0,8										
Depreciación Legales		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8	0,8										
Pérdidas ejercicio anterior																					
Flujo caja operacional																					
MM US \$		14,7	21,0	30,4	30,3	30,3	30,2	28,8	28,7	28,6	28,5	28,2									
Inversión fija	136,7																				
IVA de la inversión																					
Recuperación IVA de la inversión																					0
Valor residual de los activos																					0
Capital de trabajo	29,7																				
Recuperación capital de trabajo																					29,7
Préstamo	66,5																				
Amortizaciones		4,5	4,9	5,3	5,7	6,2	6,7	7,3	7,9	8,6	9,3										
Flujo de capitales MM US \$	-99,8	-4,5	-4,9	-5,3	-5,7	-6,2	-6,7	-7,3	-7,9	-8,6	-9,3	0	29,7								
Flujo de caja MM US \$	-99,8	10,2	16,1	25,1	24,6	24,0	23,4	21,5	20,8	20,0	19,1	28,2	57,9								
VAN MM US \$	-99,8	-89,6	-73,6	-48,6	-24,1	-0,2	23,0	44,2	64,8	84,5	103,3	131,0	158,7	186,3	214,0	241,5	269,0	296,5	324,0	351,4	407,5

Fuente: Elaboración propia

Anexo 18: Flujo caja. Precio venta bioetanol = 650 US\$/m³. Valores en millones de US\$.

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Ingresos																						
Venta bioetanol		25,4	35,6	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8	
Venta co-productos		84,5	118,3	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	
Ingresos totales		109,9	153,9	219,9																		
Costos Variables																						
Costos Variables		110,4	154,5	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	
Costos Fijos																						
Costos Fijos		4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	
Total Costos Fijos		114,7	158,8	225																		
Gastos financieros		5,6	5,2	4,8	4,4	3,9	3,4	2,8	2,2	1,5	0,8											
Depreciación legal		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8	0,8											
Pérdidas ejercicio anterior		0,0	18,6	36,9	55,1	72,8	90,1	106,8	115,5	123,5	130,9	137,6	142,7	147,9	153,0	158,1	163,2	168,4	173,5	178,6	183,8	
Utilidad antes de impuesto		-18,6	-36,9	-55,1	-72,8	-90,1	-106,8	-115,5	-123,5	-130,9	-137,6	-142,7	-147,9	-153,0	-158,1	-163,2	-168,4	-173,5	-178,6	-183,8	-188,9	
Impuesto primera categoría																						
Utilidad después de impuestos		-18,6	-36,9	-55,1	-72,8	-90,1	-106,8	-115,5	-123,5	-130,9	-137,6	-142,7	-147,9	-153,0	-158,1	-163,2	-168,4	-173,5	-178,6	-183,8	-188,9	
Gastos financieros		5,6	5,2	4,8	4,4	3,9	3,4	2,8	2,2	1,5	0,8											
Depreciación Legales		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8	0,8											
Pérdidas ejercicio anterior			18,6	36,9	55,1	72,8	90,1	106,8	115,5	123,5	130,9	137,6	142,7	147,9	153,0	158,1	163,2	168,4	173,5	178,6	183,8	
Flujo caja operacional																						
MM US \$		-4,7	-4,9	-5,1																		
Inversión fija	136,7																					
IVA de la inversión																						
Recuperación IVA de la inversión																					0	
Valor residual de los activos																						0
Capital de trabajo	28,1																					
Recuperación capital de trabajo																						28,1
Préstamo	65,9																					
Amortizaciones		4,4	4,8	5,2	5,7	6,2	6,7	7,2	7,9	8,5	9,3											
Flujo de capitales MM US \$	-98,8	-4,4	-4,8	-5,2	-5,7	-6,2	-6,7	-7,2	-7,9	-8,5	-9,3	0	28,1									
Flujo de caja MM US \$	-98,8	-9,2	-9,7	-10,4	-10,8	-11,3	-11,8	-12,4	-13,0	-13,7	-14,4	-5,1	22,9									
VAN MM US \$	-98,8	-108,0	-117,6	-127,9	-138,7	-149,9	-161,6	-173,8	-186,7	-200,1	-214,3	-219,3	-224,4	-229,4	-234,4	-239,4	-244,4	-249,4	-254,4	-259,4	-237,2	

Fuente:

Elaboración

propia

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos																					
Venta bioetanol		50,8	71,1	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6	101,6
Venta co-productos		84,5	118,3	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1
Ingresos totales		135,4	189,5	270,7																	
Costos Variables		110,4	154,5	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7	220,7
Costos Fijos		4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Total Costos Fijos		114,7	158,8	225,0																	
Gastos financieros		5,7	5,3	4,9	4,4	3,9	3,4	2,8	2,2	1,5	0,8										
Depreciación legal		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8	0,8										
Pérdidas ejercicio anterior																					
Utilidad antes de impuesto		6,8	17,2	32,6	33,0	33,5	34,0	42,1	42,7	43,4	44,1	45,7									
Impuesto primera categoría		1,2	2,9	5,5	5,6	5,7	5,8	7,2	7,3	7,4	7,5	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
Utilidad después de impuestos		5,6	14,2	27,0	27,4	27,8	28,3	34,9	35,5	36,0	36,6	37,9									
Gastos financieros		5,7	5,3	4,9	4,4	3,9	3,4	2,8	2,2	1,5	0,8										
Depreciación																					
Legales		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8	0,8										
Pérdidas ejercicio anterior																					
Flujo caja operacional																					
MM US \$		19,5	27,8	40,2	40,1	40,0	39,9	38,5	38,4	38,3	38,2	37,9									
Inversión fija	136,7																				
IVA de la inversión																					
Recuperación IVA de la inversión																					0
Valor residual de los activos																					0
Capital de trabajo	30,2																				
Recuperación capital de trabajo																					30,2
Préstamo	66,7																				
Amortizaciones		4,5	4,9	5,3	5,7	6,2	6,8	7,3	8,0	8,6	9,4										
Flujo de capitales MM US \$	-100,1	-4,5	-4,9	-5,3	-5,7	-6,2	-6,8	-7,3	-8,0	-8,6	-9,4	0	30,2								
Flujo de caja MM US \$	-100,1	15,0	22,9	34,9	34,3	33,8	33,1	31,2	30,5	29,7	28,8	37,9	68,1								
VAN MM US \$	-100,1	-85,1	-62,3	-27,5	6,6	40,1	72,9	103,8	133,9	163,2	191,6	228,9	266,1	303,3	340,5	377,6	414,6	451,6	488,5	525,3	591,4

Anexo 19: Flujo caja. Precio venta bioetanol =1.300US\$/m³. Valores en millones de US\$.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 20: Flujo caja. Precio biomasa triplicado y VAN = 0. Valores en millones de US\$.

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos																					
Venta bioetanol		46,1	64,6	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3	92,3
Venta co-productos		84,5	118,3	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1
Ingresos totales		130,7	182,9	261,3																	
<i>Costos Variables</i>		115,3	161,4	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6
<i>Costos Fijos</i>		4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Total Costos Fijos		119,6	165,7	234,9																	
Gastos financieros		5,7	5,3	4,9	4,4	3,9	3,4	2,8	2,2	1,5	0,8										
Depreciación legal		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8	0,8										
Pérdidas ejercicio anterior		0	2,9																		
Utilidad antes de impuesto		-2,9	0,8	13,3	13,8	14,3	14,8	22,8	23,5	24,1	24,9	26,4									
Impuesto primera categoría		0,0	0,1	2,3	2,3	2,4	2,5	3,9	4,0	4,1	4,2	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Utilidad después de impuestos		-2,9	0,7	11,1	11,4	11,8	12,3	19,0	19,5	20,0	20,7	21,9									
Gastos financieros		5,7	5,3	4,9	4,4	3,9	3,4	2,8	2,2	1,5	0,8										
Depreciación																					
Legales		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8	0,8										
Pérdidas ejercicio anterior			2,9																		
Flujo caja operacional																					
MM US \$		11,1	17,1	24,2	24,1	24,0	23,9	22,6	22,5	22,3	22,2	21,9									
Inversión fija	136,7																				
IVA de la inversión																					
Recuperación IVA de la inversión																					0
Valor residual de los activos																					0
Capital de trabajo	30,6																				
Recuperación capital de trabajo																					30,6
Préstamo	66,9																				
Amortizaciones		4,5	4,9	5,3	5,8	6,3	6,8	7,4	8,0	8,7	9,4										
Flujo de capitales MM US \$	-100,4	-4,5	-4,9	-5,3	-5,8	-6,3	-6,8	-7,4	-8,0	-8,7	-9,4	0	30,6								
Flujo de caja MM US \$	-100,4	6,6	12,2	18,9	18,3	17,8	17,1	15,2	14,5	13,7	12,8	21,9	52,6								
VAN MM US \$	-100,4	-93,8	-81,7	-62,9	-44,6	-27,0	-10,0	5,0	19,3	32,8	45,5	67,0	88,6	110,1	131,6	153,1	174,5	195,9	217,3	238,6	289,6

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 21: Flujo caja. Precio lignina 1US\$/kg y VAN=0. Valores en millones de US\$.

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos																					
Venta bioetanol		16,8	23,5	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6	33,6
Venta co-productos		54,7	76,6	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4
Ingresos totales		71,5	100,1	143,1																	
<i>Costos Variables</i>		57,6	80,6	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2
<i>Costos Fijos</i>		4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Total Costos Fijos		61,8	84,9	119,4																	
Gastos financieros		5,1	4,7	4,4	4	3,5	3,1	2,5	2	1,4	0,7										
Depreciación legal		8	8	8	8	8	8	0,8	0,8	0,8	0,8										
Pérdidas ejercicio anterior			3,4	1																	
Utilidad antes de impuesto		-3,4	-1,0	10,2	11,6	12,0	12,5	20,3	20,9	21,5	22,1	23,6									
Impuesto primera categoría				1,7	2	2	2,1	3,5	3,5	3,7	3,8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Utilidad después de impuestos		-3,4	-1,0	8,5	9,6	10	10,4	16,9	17,3	17,8	18,4	19,6									
Gastos financieros		5,1	4,7	4,4	4	3,5	3,1	2,5	2	1,4	0,7										
Depreciación																					
Legales		8	8	8	8	8	8	0,8	0,8	0,8	0,8										
Pérdidas ejercicio anterior			3,4	1																	
Flujo caja operacional																					
MM US \$		9,7	15,2	21,9	21,6	21,6	21,5	20,2	20,1	20,0	19,8	19,6									
Inversión fija	133,5																				
IVA de la inversión																					
Recuperación IVA de la inversión																					0
Valor residual de los activos																					0
Capital de trabajo	16,1																				
Recuperación capital de trabajo																					16,1
Préstamo	59,8																				
Amortizaciones		4	4,4	4,7	5,2	5,6	6,1	6,6	7,1	7,7	8,4										
Flujo de capitales MM US \$	-89,7	-4,0	-4,4	-4,7	-5,2	-5,6	-6,1	-6,6	-7,1	-7,7	-8,4	0	16,1								
Flujo de caja MM US \$	-89,7	5,6	10,9	17,1	16,5	16,0	15,4	13,6	12,9	12,2	11,4	19,6	35,7								
VAN MM US \$	-89,7	-84,1	-73,2	-56,2	-39,8	-24,0	-8,7	4,7	17,5	29,6	40,8	60,1	79,4	98,6	117,8	136,9	156,1	175,2	194,2	213,3	247,9

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 22: Flujo de caja. Precio enzima un décimo del valor actual y VAN =0. Valores en millones de US\$.

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos																					
Venta bioetanol		17,4	24,4	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8
Venta co-productos		84,5	118,3	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1	169,1
Ingresos totales		101,9	142,7	203,9																	
Costos Variables		87,1	121,9	174,2																	
Costos Fijos		4,3																			
Total Costos Fijos		91,4	126,2	178,5																	
Gastos financieros		5,4	5,1	4,7	4,2	3,8	3,3	2,7	2,1	1,5	0,8										
Depreciación legal		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8	0,8										
Pérdidas ejercicio anterior			3,1																		
Utilidad antes de impuesto		-3,1		12,5	12,9	13,4	13,9	21,9	22,5	23,1	23,8	25,4									
Impuesto primera categoría				2,1	2,2	2,3	2,4	3,7	3,8	3,9	4,1	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Utilidad después de impuestos		-3,1		10,3	10,7	11,1	11,5	18,2	18,7	19,2	19,8	21,1									
Gastos financieros		5,4	5,1	4,7	4,2	3,8	3,3	2,7	2,1	1,5	0,8										
Depreciación																					
Legales		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,8	0,8	0,8	0,8										
Pérdidas ejercicio anterior			3,1																		
Flujo caja operacional																					
MM US \$		10,5	16,5	23,3	23,2	23,1	23,0	21,6	21,5	21,4	21,3	21,1									
Inversión fija	136,7																				
IVA de la inversión																					
Recuperación IVA de la inversión																					
Valor residual de los activos																					
Capital de trabajo	23,5																				
Recuperación capital de trabajo																					
Préstamo	64,1																				23,5
Amortizaciones		4,3	4,7	5,1	5,5	6,0	6,5	7,0	7,6	8,3	9,0										
Flujo de capitales MM US \$	-96,1	-4,3	-4,7	-5,1	-5,5	-6,0	-6,5	-7,0	-7,6	-8,3	-9,0	0	23,5								
Flujo de caja MM US \$	-96,1	6,2	11,8	18,2	17,7	17,1	16,5	14,6	13,9	13,1	12,3	21,1	44,6								
VAN MM US \$	-96,1	-89,9	-78,1	-60,1	-42,5	-25,5	-9,1	5,3	19,0	32,0	44,1	64,9	85,5	106,2	126,8	147,4	168,0	188,5	209,0	229,5	272,7

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 23: Flujo caja. Capacidad de producción de planta de 162 mil m³ y VAN =0. Valores en millones de US\$.

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos																					
Venta bioetanol		74,2	103,9	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4	148,4
Venta co-productos		175,3	245,5	350,6	350,6	350,6	350,6	350,6	350,6	350,6	350,6	350,6	350,6	350,6	350,6	350,6	350,6	350,6	350,6	350,6	350,6
Ingresos totales		249,5	349,3	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499	499
<i>Costos Variables</i>		225,6	315,8	451,2	451,2	451,2	451,2	451,2	451,2	451,2	451,2	451,2	451,2	451,2	451,2	451,2	451,2	451,2	451,2	451,2	451,2
<i>Costos Fijos</i>		5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
Total Costos Fijos		230,9	321,1	456,5	456,5	456,5	456,5	456,5	456,5	456,5	456,5	456,5	456,5	456,5	456,5	456,5	456,5	456,5	456,5	456,5	456,5
Gastos financieros		9,2	8,6	7,9	7,2	6,4	5,5	4,6	3,6	2,5	1,3										
Depreciación legal		12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	1,2	1,2	1,2	1,2										
Pérdidas ejercicio anterior			3,4																		
Utilidad antes de impuesto		-3,4	3,5	21,9	22,6	23,4	24,2	36,8	37,8	38,9	40,1	42,5									
Impuesto primera categoría			0,6	3,7	3,8	4,0	4,1	6,2	6,4	6,6	6,8	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2
Utilidad después de impuestos		-3,4	2,9	18,1	18,8	19,4	20,1	30,5	31,4	32,3	33,3	35,3									
Gastos financieros		9,2	8,6	7,9	7,2	6,4	5,5	4,6	3,6	2,5	1,3										
Depreciación																					
Legales		12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	1,2	1,2	1,2	1,2										
Pérdidas ejercicio anterior			3,4																		
Flujo caja operacional																					
MM US \$		18,6	27,6	38,8	38,7	38,6	38,4	36,3	36,1	35,9	35,7	35,3									
Inversión fija	211,7																				
IVA de la inversión																					
Recuperación IVA de la inversión																					0
Valor residual de los activos																					0
Capital de trabajo	58,9																				
Recuperación capital de trabajo																					58,9
Préstamo	108,2																				
Amortizaciones		7,3	7,9	8,6	9,3	10,1	11,0	11,9	12,9	14,0	15,2										
Flujo de capitales MM US \$	-162,4	-7,3	-7,9	-8,6	-9,3	-10,1	-11,0	-11,9	-12,9	-14,0	-15,2	0	58,9								
Flujo de caja MM US \$	-162,4	11,3	19,7	30,2	29,4	28,4	27,4	24,4	23,2	21,9	20,5	35,3	94,2								
VAN MM US \$	-162,4	-151,1	-131,4	-101,4	-72,2	-43,9	-16,7	7,4	30,3	51,9	72,2	106,9	141,6	176,2	210,8	245,3	279,7	314,2	348,5	382,8	474,3

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 24: Flujo caja sin venta de CO₂. Valores en millones de US\$.

AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ingresos																					
Venta bioetanol		46,9	65,7	93,8	93,8	93,8	93,8	93,8	93,8	93,8	93,8	93,8	93,8	93,8	93,8	93,8	93,8	93,8	93,8	93,8	93,8
Venta co-productos		83,7	117,2	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4
Ingresos totales		130,6	182,9	261,3																	
<i>Costos Variables</i>		115,3	161,4	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6	230,6
<i>Costos Fijos</i>		4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
Total Costos Fijos		119,6	165,7	234,9																	
Gastos financieros		5,6	5,2	4,8	4,4	3,9	3,4	2,8	2,2	1,5	0,8										
Depreciación legal		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,7	0,7	0,7	0,7										
Pérdidas ejercicio anterior			2,7																		
Utilidad antes de impuesto		-2,7	1,0	13,4	13,8	14,3	14,8	22,9	23,5	24,2	24,9	26,4									
Impuesto primera categoría			0,2	2,3	2,4	2,4	2,5	3,9	4,0	4,1	4,2	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Utilidad después de impuestos		-2,7	0,9	11,1	11,5	11,9	12,3	19,0	19,5	20,1	20,7	21,9									
Gastos financieros		5,6	5,2	4,8	4,4	3,9	3,4	2,8	2,2	1,5	0,8										
Depreciación Legales		8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	0,7	0,7	0,7	0,7										
Pérdidas ejercicio anterior			2,7																		
Flujo caja operacional MM US \$		11,1	17,0	24,1	24,0	24,0	23,9	22,5	22,4	22,3	22,2	21,9									
Inversión fija	134,9																				
IVA de la inversión																					
Recuperación IVA de la inversión																					0
Valor residual de los activos																					0
Capital de trabajo	30,6																				
Recuperación capital de trabajo																					30,6
Préstamo	66,2																				
Amortizaciones		4,5	4,8	5,3	5,7	6,2	6,7	7,3	7,9	8,6	9,3										
Flujo de capitales MM US \$	-99,3	-4,5	-4,8	-5,3	-5,7	-6,2	-6,7	-7,3	-7,9	-8,6	-9,3	0	30,6								
Flujo de caja MM US \$	-99,3	6,6	12,2	18,9	18,3	17,8	17,2	15,2	14,5	13,7	12,9	21,9	52,5								
VAN MM US \$	-99,3	-92,7	-80,6	-61,8	-43,6	-25,9	-8,9	6,2	20,5	34,0	46,7	68,2	89,8	111,2	132,7	154,1	175,5	196,9	218,2	239,5	290,4

Fuente: Elaboración propia.