



**TESIS DE GRADO  
EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**DESARROLLO DE UNA PLANTA DE ETANOL A  
TRAVÉS DE RESIDUOS FORESTALES.**

**Autor:** Andrés Nicolás Panero

**Legajo:** 45.368

**Director de Tesis:**

Dr. Jorge Tersoglio

**2010**



*A mi familia.*



## **DESCRIPTOR BIBLIOGRÁFICO**

El presente estudio se desarrolla a partir de una alternativa para el desarrollo de combustibles reemplazantes de los fósiles. El etanol combustible y los combustibles renovables, sin afectar el medio ambiente, han cobrado importancia. A continuación se presenta un recorrido a lo largo de los puntos fundamentales a tener en cuenta para el desarrollo de una empresa fabricante de etanol en Argentina o Uruguay. Este trabajo presenta un estudio centrado en las características de las plantas de etanol en desarrollo en el mundo y sus ventajas y desventajas en comparación con tecnologías actuales. A su vez, se desarrolla un estudio de localización y mercado para uno u otro país, así como también un modelo económico - financiero, detectando la criticidad en el poco desarrollo tecnológico y altos costos financieros para la instauración de estas plantas, necesarias para mantener el medio ambiente.

***Palabras Clave:*** *Energías renovables y limpias, uso y modelos, sistema sustentable, crisis energética, diversificación de matriz energética, cambio de paradigma, dependencia de combustibles.*



## **ABSTRACT**

The following study is developed to find an alternative replacement for fossil fuels. The fuel ethanol and renewable fuels, that do not damage the environment, have become important. This study presents an overview of the key points to develop an ethanol manufacturing company in Argentina or Uruguay. This paper shows a study centered in the characteristics of developing ethanol plants around the world and its advantages and disadvantages compared to current technologies. In addition, a location and market study is developed for both countries as well as an economic and financial model, identifying the critically short technological development and the high financial costs for the establishment of these plants, needed to preserve the environment.

**Keywords:** *Renewable and clean energy, utilization and model, sustainable system, energy crisis, energy sources diversification, lack of dependence on fossil fuels.*



## **RESUMEN EJECUTIVO**

La tendencia creciente en el mundo es la utilización de energías “verdes” por los cambios climáticos que presenta nuestro planeta. Es por ello que grupos de investigación están desarrollando reemplazos y análisis de los combustibles actuales.

Los combustibles fósiles son hallados ya en muy pocas zonas y en otras no se justifica su extracción, lo que provoca que ciertos países en el mundo no posean reservas de crudo, el principal combustible del planeta tierra por los últimos 50 años. La Argentina y Uruguay pertenecen al grupo de países con faltantes de reservas o con pequeñas reservas de injustificable extracción.

El etanol combustible es una de las alternativas en estudio para el reemplazo de los combustibles fósiles (naftas únicamente). El mismo había sido desarrollado a la par de las naftas, pero por distintos motivos se dejó de lado. Hoy día cobra importancia por la facilidad de obtenerlo por métodos ya desarrollados hace 40 años y también por la utilización como alcohol en otros rubros. Este combustible presenta la ventaja de ser renovable por provenir de fuentes vegetales comestibles como la caña de azúcar y el maíz, sin embargo, plantear un escenario acerca del volumen necesario para reemplazar a las naftas, hace que sea imposible pensar que estos cultivos en el mundo rendirán como combustible y alimento. He aquí la problemática planteada en este proyecto que es dejar de utilizar alimentos para combustible cuando en diversos países el alimento es escaso. Es por ello que se plantea un método alternativo hoy en estudio.

Este trabajo tiene como objetivo brindar una perspectiva de la problemática recién planteada y brindar una solución a nuestro país y el vecino, para dejar de depender de crudo extranjero cuando tienen amplia posibilidad de producir etanol por su rendimiento agrario. La variedad planteada en este proyecto es utilizar residuos forestales o biomasa para la fabricación de etanol. Esta solución busca brindar, a grandes rasgos, las distintas tecnologías y la más viable en la actualidad y abrir un punto de opinión acerca de la problemática mundial y la forma errónea de cómo se está encarando el futuro.

Además, se realizó una comparativa de mercado entre la Argentina y Uruguay detallando sus escenarios favorables y desfavorables para la instalación de una planta de este tipo y se arribó a la óptima localización para la instalación de la misma.

Se concluyó que ambos países deben desarrollar mejores políticas para la realización de estos proyectos y fomentar su inversión. Además, excluyendo ambos países, las condiciones no están dadas para el nivel de tecnología que se necesita para hacer viables este tipo de proyectos, haciendo que el costo del etanol sea elevado para economizar e ir desplazando las mezclas.



## **EXECUTIVE SUMMARY**

The growing trend in the world is the utilization of “green energy” due to the climate changes in our planet. That is why research groups are developing replacements and analysis for current fuels.

Fossil fuels are founded in a very few areas nowadays and in others, extraction is not justified. This implies that some countries around the world do not have oil reserves, the main fuel of the planet earth for the past 50 years. Argentina and Uruguay belong to this group of countries with small reserves or unjustified extraction.

Ethanol fuel is one of the alternatives under consideration for replacing fossil fuels (gasoline only). It was developed at the same time with gasoline, but for different reasons it was taken apart. This fuel became important because it was easy to obtain with methods that were developed 40 years ago and also used as an alcohol in other areas. This fuel has the advantage of being renewable as it comes from vegetable resources such as sugar cane and maize; however, when analyzing a scenario about the volume that would be needed to replace gasoline, it results impossible to think that these crops will satisfy fuel and food needs in the world continuing with present consumptions. Here are the issues raised in this project to stop the usage of food for fuel when there is a shortage of food in many countries. That is why it is raised as an alternative method under study in this work.

This paper aims to provide an overview of the issues recently presented and provide a solution to our country and neighbor, to stop relying on foreign oil when they have plenty opportunity to produce ethanol from agricultural performance. The variety presented in this project is to use forest waste or biomass to produce ethanol. This solution aims to provide a look into the different technologies and the most viable these days, opening a point of discussion about the world’s problematic and the wrong way we are facing the future.

It is also performed a comparative market between Argentina and Uruguay detailing their positive and negative scenarios for the installation of one of this plants and as a conclusion I reached to the optimum location for installing it.

It was concluded that both countries should develop better policies for the implementation of these projects and encourage the investment on it. In addition, apart from the two mentioned countries, the conditions are not given for the actual technology needed to make such projects viable, making the cost of ethanol higher to economize and start shifting mixtures.



## TABLA DE CONTENIDOS

<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	4
1.3. DESCRIPCIÓN DEL RECURSO .....	5
1.3.1. <i>Ventajas del etanol de celulosa</i> .....	6
1.3.2. <i>Desventajas</i> .....	7
<b>II. COMPARATIVA DEL ETANOL DE CELULOSA VS. EL DE CULTIVOS.....</b>	<b>9</b>
2.1. COMPARATIVA DEL ETANOL DE CULTIVOS CONTRA ETANOL DE CELULOSA.....	11
2.2. MODOS DE PROCESAMIENTO.....	12
2.3. LINEAMIENTOS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES.....	15
2.3.1. <i>Fase de investigación (en los próximos 5 años)</i> .....	15
2.3.2. <i>Optimización y uso de la materia prima</i> .....	16
2.3.3. <i>Estudios en procesos del etanol</i> .....	16
2.3.4. <i>Otros estudios relacionados</i> .....	17
<b>III. ANÁLISIS DE MERCADO .....</b>	<b>19</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	21
3.2. SITUACIÓN ACTUAL .....	21
3.3. BRASIL .....	22
3.4. ESTADOS UNIDOS.....	23
3.5. ARGENTINA .....	25
3.5.1. <i>Competencia</i> .....	27
3.5.2. <i>Marco Legal Argentino</i> .....	28
3.5.3. <i>Sector Forestal Argentino</i> .....	29
3.5.4. <i>Mercado de los biocombustibles argentinos</i> .....	30
3.6. URUGUAY.....	31
3.6.1. <i>Situación actual</i> .....	31
3.6.2. <i>Marco regulatorio Uruguayo</i> .....	32
3.6.3. <i>Mercado energético</i> .....	33
3.6.4. <i>Utilización del Etanol</i> .....	34
3.6.5. <i>Mercado Uruguayo de Biomasa</i> .....	34
<b>IV. COMBUSTIBLES RENOVABLES.....</b>	<b>35</b>
4.1. COMPARATIVA.....	37
4.2. BIOGÁS.....	37
4.3. BIOCARBURANTES .....	38
4.3.1. <i>Biodiesel</i> .....	38
4.3.2. <i>Alcoholes</i> .....	38
4.4. GASES LICUADOS DEL PETRÓLEO (GLP).....	39
4.5. GAS NATURAL.....	39
4.6. HIDRÓGENO.....	40
4.7. COMPARATIVA ENTRE LOS COMBUSTIBLES .....	41
4.7.1. <i>Densidad</i> .....	42
4.7.2. <i>Contenido Energético</i> .....	42
4.7.3. <i>Dosado Estequiométrico</i> .....	44
4.7.4. <i>Producción de CO<sub>2</sub></i> .....	44
4.7.5. <i>Otros tipos de emisiones</i> .....	46
4.7.6. <i>Cuadro de ventajas y desventajas</i> .....	47
4.8. PERSPECTIVA MUNDIAL DE MERCADO .....	48
4.9. RESUMEN DE LA PRIMER PARTE.....	50
<b>V. DESARROLLO DE PROCESO .....</b>	<b>53</b>
5.1. ANÁLISIS DEL PROCESO. DEFINICIONES Y DISEÑO .....	55
5.2. PRETRATAMIENTO DEL SUSTRATO .....	57
5.3. HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA.....	58
5.4. CLOSTRIDIUM THERMOCELLUM .....	60
5.5. GENERALIDADES. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA PROCESO.....	60

5.6. FERMENTACIÓN.....	62
5.5. DESTILACIÓN .....	67
5.6. ALMACENAMIENTO DE MATERIAS PRIMAS Y ADICIONALES.....	68
5.7. GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD – AUTO SUSTENTABILIDAD .....	69
5.8. RESUMEN DEL SEGUNDO CAPÍTULO .....	70
<b>VI. ESTUDIO DE LOCALIZACIÓN .....</b>	<b>73</b>
6.1. LOCALIZACIÓN .....	75
6.2. MICRO-LOCALIZACIÓN.....	78
6.3. FACTORES DE PONDERACIÓN Y MATRIZ DE LOCALIZACIÓN.....	81
6.4. PONDERACIÓN .....	84
6.5. RESULTADOS.....	84
<b>VII. ECONÓMICO - FINANCIERO.....</b>	<b>87</b>
7.1. INTRODUCCIÓN.....	89
7.2. COSTO DE INSTALACIÓN.....	89
7.3. COSTOS OPERATIVOS VARIABLES.....	90
7.3.1. Precio de la madera. Materia Prima.....	90
7.3.2. Costo de las enzimas. Materia Prima.....	91
7.4. COSTOS OPERATIVOS FIJOS.....	91
7.5. IMPUESTOS.....	92
7.6. INVERSIONES.....	95
7.7. ESTRUCTURA DE CAPITAL ÓPTIMA .....	96
7.8. FLUJO DE FONDOS DEL PROYECTO .....	97
7.9. ESCENARIOS .....	98
7.10. RESUMEN DEL TERCER CAPÍTULO .....	100
<b>VIII. CONCLUSIONES .....</b>	<b>103</b>
8.1. CONCLUSIONES.....	105
<b>IX. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>107</b>
9.1. BIBLIOGRAFÍA.....	109
<b>X. ANEXOS .....</b>	<b>111</b>
ANEXO I .....	113
ANEXO II .....	114
A.2.1. <i>Objetivos del etanol</i> .....	114
A.2.2. <i>Funcionamiento de una caldera acuotubular</i> .....	115
ANEXO III.....	116
ANEXO IV .....	117
ANEXO V .....	118
ANEXO VI.....	119
ANEXO VII .....	120

## **I. INTRODUCCIÓN**



## 1.1. INTRODUCCIÓN

La biomasa es una energía alternativa que no está presente en las mentes de las personas, ni es conocida como si lo son la energía Solar, la Eólica y la Hidráulica.

Cabe diferenciar que la biomasa produce combustibles, mientras que estas energías producen electricidad. Por ello es que hay que diferenciarlas a la hora de comparar entre ambas. La biomasa tiene el potencial de producir etanol que es combustible para el mercado automotor y hoy en día se la incinera para generar vapor para generar electricidad mediante una turbina. Las energías mencionadas producen, en la actualidad, electricidad únicamente aunque se sabe que se las puede utilizar como medio para producir hidrógeno, pero aún está en fase de prueba.

Dadas las subas significativas en el barril de petróleo (alcanzando su pico en el año 2008) y las elevadas emisiones de CO<sub>2</sub>, se han tornado miradas a otras formas de producir combustibles. Por lo que debemos empezar a investigar el bioetanol en detalle y a mejorar sus ya conocidos procesos dado que es una forma de energía que se encuentra en grandes cantidades alrededor del planeta. El etanol hoy se obtiene de la caña de azúcar (principalmente Brasil) y del maíz (principalmente EEUU). El etanol de celulosa es otra forma de obtención del biocombustible, aunque aún no ha sido llevada a la práctica debido a problemas en su proceso de transformación, sin embargo, tiene mayores ventajas que la producción a partir de las materias primas actuales.

El etanol es un avanzado y renovable biocombustible que puede ser usado en los automóviles actuales sin modificación alguna. Esto se debe a que en pequeñas proporciones de mezcla se produce la misma combustión reduciendo las emisiones de gases de invernadero. Otra ventaja es la reducción en las importaciones de petróleo, y por ende en la dependencia de sus precios y de su oferta, así como también ayuda a desarrollar las economías rurales.

El etanol de celulosa es producido a través de materias primas no comestibles como lo son las maderas, pero también se realiza de los desechos de los procesos de generación de alimento, es decir, del tallo de la planta. Este producto es una forma eficiente y económica de reemplazar paulatinamente los derivados del petróleo.

Dados los cambios climáticos que sufren los países y los abundantes estudios que se están realizando acerca de este tema, los países están invirtiendo dinero y políticas para incentivar reducciones significativas en las emisiones de gases nocivos a la atmósfera. Es por esto que en la actualidad existen diversas opciones para reducir estos gases y el consumo de naftas y diesel que presenta el transporte. Entre ellas se incluyen la eficiencia a nivel del vehículo (materiales más livianos y autos híbridos), conservación

de energía (se aplican incentivos para utilizar y extender redes de transporte público) y el desarrollo de nuevos combustibles considerados “limpios” (etanol, hidrógeno, celdas eléctricas).

El costo de producir etanol por medio de la celulosa ya es favorablemente comparable al etanol convencional a partir de maíz, soja, sorgo, y caña de azúcar. Sin embargo, los países están estableciendo los lineamientos para reducir los costos de producción y aumentar la eficiencia del proceso de conversión de celulosa a etanol. Hoy en día, los costos son más altos y la eficiencia menor con respecto al petróleo.

Comparando el etanol con respecto a las recientes tecnologías como ser la híbrida, el etanol de celulosa parece ser mucho más viable en cuanto al costo-beneficio que representa tanto para las automotrices como también para el cliente.

Dicho esto, los estudios que se están realizando identifican los puntos importantes que se requieren para superar los desafíos de una producción a gran escala de etanol de celulosa, incluyendo la maximización de la productividad para obtener suficiente cantidad de biomasa (materia prima que puede ser maderas, tallos de diferentes cultivos o la misma celulosa descartada de la fabricación de papel), desarrollar mejores procesos mediante los cuales descomponer estos materiales celulósicos en azúcares, y optimizar los procesos de fermentación para convertir esos azúcares en etanol.

El objetivo de esta parte es realizar una introducción al etanol de celulosa, una comparativa con otras tecnologías desarrolladas y con las naftas, un estudio de mercado de la situación a nivel país Argentina y Uruguay (leyes favorables y desfavorables, competencia, proveedores, etc).

## **1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.**

A pesar de su significativo beneficio en reducir gases de efecto invernadero (según el departamento de Energía de los EEUU el ciclo completo llevaría a una reducción del 90%), el etanol combustible (o bioetanol) a partir de celulosa es visto como una gran solución resolviendo los problemas económicos que tienen las forestales y los sectores rurales en el mundo. Asimismo, elimina el foco de alarma mundial acerca del uso de elementos comestibles para la elaboración de este combustible.

Esta es la visión que tienen las personas inmersas en el tema, al punto de considerar como únicamente válido que es el combustible renovable por excelencia del Siglo XXI. La tecnología adoptada no es reciente. Varias conclusiones indican que el proceso fue ampliamente usado a lo largo de los años. El ejemplo principal es la producción de Cerveza, en el cual se fermenta la materia prima para obtener el producto final.

Entre las materias primas que puede llevar este proyecto, fácilmente recolectables y de grandes volúmenes en el mundo, se encuentran:

- Cortes previos al corte definitivo de la madera (ramas inferiores).
- Restos de ramas y de corte durante el proceso. La parte no utilizable para madera, o también conocido como biomasa.
- Restos de madera y pulpa de celulosa durante el proceso de elaboración de la misma y del papel.
- Árboles infectados.
- Otros: Paja de trigo, rastrojo de maíz, pasto o hierbas, cáscaras de arroz, tallos de otros cultivos y algas.

Cabe resaltar que en el proceso de elaboración de pulpa se están desarrollando estudios para realizar inversiones para producir etanol dentro de la fábrica misma. Esto implicaría una reducción en costos de instalaciones y de estudios de localización.

Estos residuos son procesados en una planta de elaboración de etanol, obteniendo este producto a partir de la fermentación de la celulosa así como también una variedad de co-productos de uso químico (La lignina y el furfural) de amplia salida comercial.

### **1.3. DESCRIPCIÓN DEL RECURSO**

Como ya nombré más arriba los recursos son diversos y fácilmente obtenibles. Los mismos son conocidos por lo que será breve. El proceso necesita de los materiales componentes de la "Biomasa". Este nombre reciben los residuos vegetales principalmente, es decir, puede ser distintos cortes de la planta que no se utiliza, restos de hojas y ramas, algas, etc. Las plantas cuando realizan la fotosíntesis, proceso en el cual capturan CO<sub>2</sub> del aire y rayos solares, forman compuestos complejos de azúcares (sacarosa, compuesto principal de la savia) y luego alimentan las células vegetales logrando su reproducción. Este proceso de conversión almacena energía y a su vez genera O<sub>2</sub> para liberar a la atmósfera a través de la descomposición de la molécula del agua.

La biomasa tiene distintas formas y calidades y es un recurso que se encuentra en grandes cantidades a lo largo del planeta. Esto implica que es un recurso obtenible a un

precio muy económico, por lo que se deberá hacer un análisis exhaustivo de localización para no incurrir en gastos innecesarios de transporte.

Se considera que el etanol producido a partir de biomasa en cuanto a eficiencia y costos de procesamiento es mejor que los ya desarrollados y comercializados.

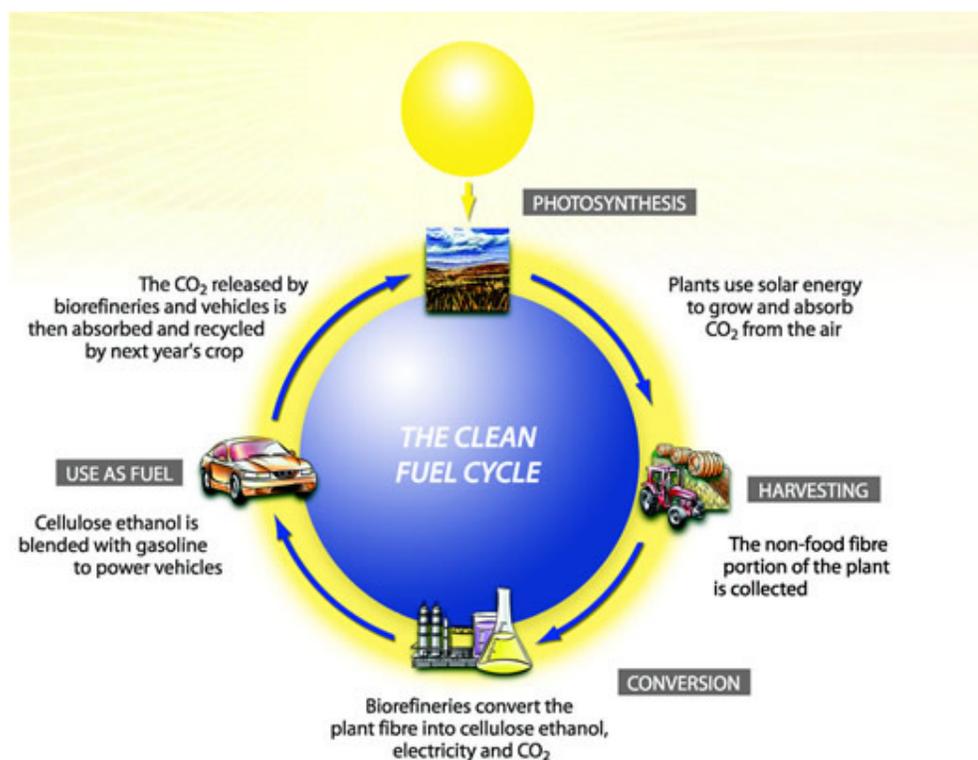


Figura 1.1. Imagen del ciclo del etanol como combustible

### 1.3.1. Ventajas del etanol de celulosa.

Una ventaja de este tipo de combustible con respecto a los del mismo rubro es que los hace muy competitivos en cuanto a costo. Producir el bioetanol junto a los productos químicos derivados, hace que en total el costo sea comparativo.

Otra ventaja es que las materias primas utilizadas (plantas de las cuales se obtiene la celulosa) son abundantes y baratas.

Desde una perspectiva de energía limpia, el departamento de Energía de EEUU (el país es el principal productor de etanol a partir de maíz) determinó que usando el bioetanol a partir de celulosa tanto para transporte como combustible para generar electricidad, reduciría las emisiones de gases de invernadero en un 80 a 90%, mientras que el basado en maíz sólo lo hace en un 20 a 30%. Esto se debe, a que la Lignina (derivado obtenido

del proceso) puede ser quemada para producir vapor y por medio de él electricidad suficiente como para hacer funcionar la planta. Lo cual bajo un correcto diseño es una planta autosustentable.

En cuanto al parque automotor, utilizar etanol no implica modificación alguna en los motores dado que los automóviles ya están preparados para funcionar con una mezcla de 10% etanol. Porcentajes mayores de etanol, necesitarán de modificaciones de motores, sin embargo se sabe que no son costosas las mismas. Actualmente se producen autos en Brasil y EEUU que funcionan con 85% de etanol en mezcla llamados “Flex-fuel” (combustible flexible). En cuanto a funcionamiento, la combustión con estas mezclas trae aparejado ventajas como la remoción de los depósitos que se forman durante la combustión y la limpieza de las líneas de combustible.

La ventaja más importante se establece en países sin reservas o con poca oferta de naftas como lo son EEUU, Uruguay y, en estos últimos tiempos, Argentina, en que estos proyectos favorecen la balanza comercial de los países, cortan con la dependencia de la importación de combustibles y trae innumerables beneficios a nivel país, brindando diversas fuentes de trabajo por el incentivo a los planes forestales y al desarrollo de la forestación, y por la mano de obra necesaria para poner en funcionamiento la obra.

### **1.3.2. Desventajas**

Expertos de la industria y grupos ambientales aseguran que de no contar con ayuda financiera y políticas favorables, la naciente industria fallará de pasar de un exitoso resultado de prueba de laboratorio a escala comercial.

Los procesos y por tanto los equipos necesarios para el tratamiento de la biomasa en celulosa son aún muy caros y tienden a reducir la eficiencia de obtención de azúcares. Es por ello que todavía se los considera en estudio o como procesos en desarrollo y sólo algunos resultan eficientes.

Una desventaja operativa es que los tres subproductos obtenidos del pretratamiento de la biomasa presentan variada composición y reacción a las variables de los procesos (temperatura, presión, químicos y procesos biológicos) según la procedencia (árboles, pasturas, rastrojo de maíz y caña de azúcar, etcétera).



## **II. COMPARATIVA DEL ETANOL DE CELULOSA VS. EL DE CULTIVOS**



## 2.1. COMPARATIVA DEL ETANOL DE CULTIVOS CONTRA ETANOL DE CELULOSA.

El etanol a partir de celulosa está comenzando a ser atractivo porque la materia prima necesaria para la producción (paja de trigo, rastrojo de maíz y los restos de madera, entre otros) es barata y abundante en cualquier país con climas y suelos favorables para el desarrollo de los mismos. Es aún más económica en aquellos países de producción de madera o agropecuarios, dado que este proyecto necesita de los residuos que dejan estas producciones sin limitarla, como no sucede con el etanol obtenido a partir de la caña de azúcar o del maíz.

Como ya dije previamente, la conversión requiere menos consumo de energía externa al proceso por lo que, a diferencia del etanol de maíz, lo hace más efectivo en niveles generales en la reducción de gases de efecto invernadero.

	Rendimiento (litros/ha)	Emisiones de GHG (% menos que la nafta)
Maíz	3700	22%
Caña de azúcar	6750-9000	56%
Celulosa	>11000	91%

Fuente: RFA, EIA, National Geographic, Cornell University

**Figura 2.1.** Comparativa de los tres cultivos energéticos en rendimiento y emisiones de gases invernaderos.

Además hay que tener en cuenta que una hectárea de árboles, hierbas o cultivos particularmente plantados para la obtención de etanol, puede producir más del doble de litros de etanol que una hectárea de maíz, en parte porque se utiliza la planta en su totalidad a diferencia del maíz en que sólo son utilizados los granos.

Esto presenta una gran ventaja dado que en el mundo de los biocombustibles, los entendidos en el tema aseguran que la producción del etanol necesario a partir de maíz no será alcanzado por la baja cantidad de hectáreas cultivables de este insumo, asimismo, porque parte de esos cultivos se destinan para satisfacer las demandas de alimento. Actualmente en EEUU (principal productor de etanol en base al maíz) los cultivos de maíz existentes y planificados tienen el potencial de producir hasta 42 mil millones de litros (en el año 2008 produjo 34 mil millones de litros), considerando que el restante es alimento.

En cambio, considerando los restos de celulosa desperdiciados, los cultivos presentes de los que se puede obtener la misma y los planificados, la producción puede llegar a alcanzar hasta 568 mil millones de litros, lo cual representa hasta dos tercios por encima de lo que actualmente consume este país en derivados de petróleo. Estos datos fueron

tomados del reporte que hizo el Consejo de Defensa de Recursos de EEUU (NRDC, en inglés).

Brasil, principal productor de caña de azúcar, produjo 24 mil millones de litros en el año 2008.

## 2.2. MODOS DE PROCESAMIENTO

En cuanto a la producción del etanol a través de estas materias primas, también existe una marcada diferencia. Como se puede ver en el gráfico de abajo, dependiendo de la materia prima varía el proceso.

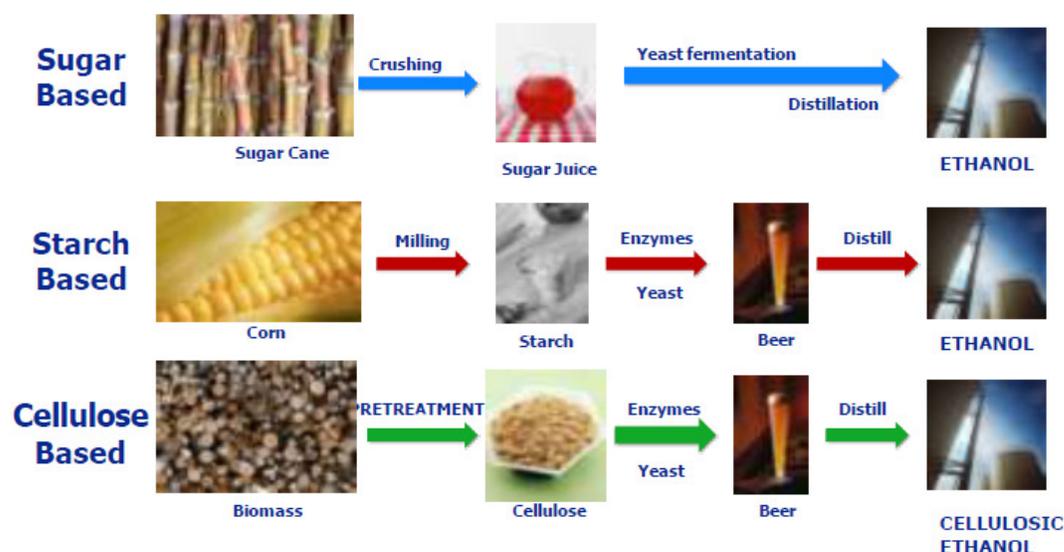
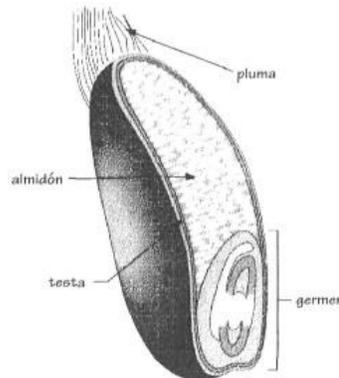


Figura 2.2. Tratamientos aplicados y estudiados para cada materia prima

En el caso de la caña de azúcar, la materia prima se corta y colecta de los campos y se transporta hacia unos molinos en los cuales se tritura antes de ingresarlos. En estos molinos se obtiene el jugo de azúcar (como indica la figura) y, además, se obtiene el bagazo. Se considera que aproximadamente de la caña de azúcar el 30% es este jugo, 35% son residuos de hojas y palo y el restante 35% es el bagazo (material fibroso utilizado como combustible). En el proceso de molienda se busca obtener la mayor cantidad de este jugo y un rendimiento alto de bagazo seco para poder generar electricidad mediante la combustión de éste. La electricidad generada se reinyecta en el circuito de producción permitiendo que la biorefinería se auto-sustente o incluso puede llegar a alimentar la red local de consumo.

El jugo con altos índices de sacarosa es filtrado y tratado con químicos obteniendo, en procesos posteriores, el etanol.

En el caso del maíz, el proceso menos eficiente comparado con otras tecnologías, se colecta el grano y se lo lleva a las biorefinerías de maíz. El primer proceso para obtener etanol puede ser de molienda “seca” o “húmeda” y ambos tienen como objetivo conseguir la mayor cantidad de almidón para ser procesado en etapas posteriores. El molino seco implica moler el grano de maíz en harina que se mezcla con agua y una enzima en ciertas proporciones. Esta enzima se encarga de romper los almidones en complejas cadenas de azúcares que luego son mezcladas con levadura y otra enzima que se encarga de romperlas, formando cadenas simples de azúcar llamada glucosa.



**Figura 2.3.** Composición de Grano de maíz.

La mezcla de glucosa con levadura, y condiciones ambientales adecuadas, hacen que la mezcla fermente obteniéndose alcohol y dióxido de carbono. Esta mezcla es conocida como “cerveza”, que luego se le adiciona calor y por condensación se separa el alcohol. Controlando los niveles de humedad con los que queda la mezcla residual sin alcohol, se puede utilizar para producir electricidad. Sin embargo no es muy útil ni se utiliza. El alcohol condensado se lo comprime y se le elimina el agua, obteniendo etanol de gran pureza.

El proceso de molienda húmeda implica tomar el grano y diluirlo en una mezcla de ácido sulfúrico y agua con el objetivo de separarlo en varios componentes. Estos componentes son enviados a unos molinos donde se separa el germen del maíz. El aceite de maíz es un co-producto de este proceso que se extrae y se vende. La fibra, el gluten y el almidón (componentes del germen de maíz) son separados por máquinas centrífugas.

El gluten y la fibra son secados y filtrados para comidas o para engorde de animales, mientras que la mezcla de almidón acuoso tiene 3 derivados: Puede ser convertido en etanol mediante el mismo proceso de molienda seco (enzimas y levadura), secado y vendido como almidón de maíz o ser convertido en jarabe de maíz.

Finalmente, para el caso de la celulosa existen algunos inconvenientes. Cualquier planta contiene tres componentes principales, celulosa, hemicelulosa y lignina, que van

variando según su especie. A su vez, la celulosa tiene una estructura compleja en la que el azúcar está atrapada por lo que es difícil de obtener. Esto implica recurrir a procesos de alta complejidad para liberar los azúcares en función de la biomasa entrante. Asimismo, este proceso genera derivados que inhiben la fermentación complicando aún más los procesos de fermentación similares al maíz.

Dicho lo anterior, el proceso de obtención de azúcares a partir de celulosa requiere de un pretratamiento y luego sigue los mismos pasos del maíz. Este pre-tratamiento consiste en diluir la biomasa con ácidos a gran temperatura y presión (Hidrolizan) para poder romper las estructuras de la hemicelulosa y la lignina y hacer paso hacia la celulosa que compone en promedio el 45% de la estructura. Conjuntamente, la hidrolización de la hemicelulosa genera una solución de azúcares que también se pueden utilizar para obtener etanol.

Algunos expertos consideran que es óptimo realizar un lavado de vapor luego de este pretratamiento para eliminar el ácido remanente y los agentes presentes que puedan inhibir el efecto de las enzimas.

Al igual que para el maíz, se utilizan enzimas para romper la celulosa y la hemicelulosa a modo de obtener los azúcares necesarios (glucosa) para luego fermentarlos y producir etanol. En la actualidad, es el paso más costoso puesto que requiere del cultivo de microorganismos (proceso difícil de llevar a gran escala) para la producción de las enzimas necesarias.

Esto se verá con mayor detalle en el diseño del proceso pero hay que saber que las plantas llevan miles de años evolucionando, logrando la resistencia a todo tipo de bacterias, hongos, plagas, etc. Con lo cual, no es simple la utilización de enzimas y provoca que el proceso sea muy lento.

La lignina es un material combustible, que en la estructura de la planta es la que le aporta la rigidez a las hebras de celulosa. Es por ello que al separarla en su estado puro, se puede incinerar para producir el vapor necesario para mover una turbina y generar electricidad como cualquier planta eléctrica de proceso Térmico. Esta electricidad puede brindar el auto-sustento de la biorefinería y hasta ser suficiente como para alimentar la red local de electricidad.

Una vez obtenida la glucosa y separada la lignina, se aplica el mismo método de fermentación ya explicado. Se aplica levadura y bajo condiciones ambientales adecuadas y reguladas, la glucosa fermenta liberando dióxido de carbono y etanol.

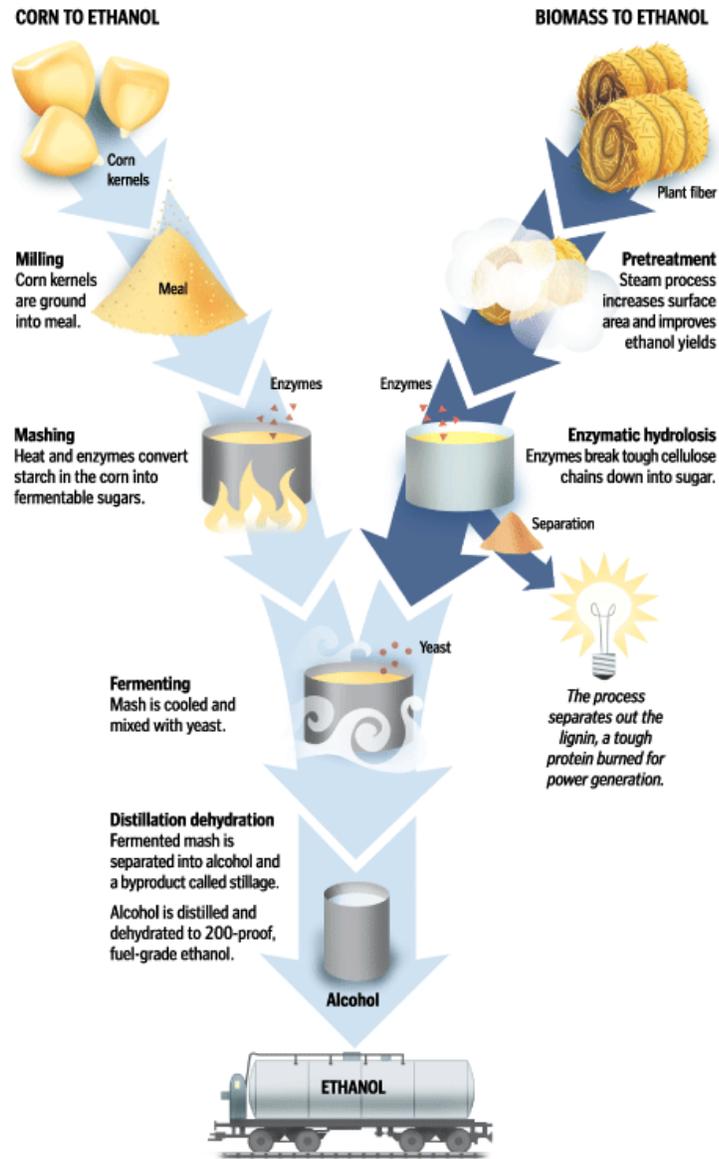


Figura 2.4. Resumen de procesos del etanol de maíz y celulosa

## 2.3. LINEAMIENTOS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

### 2.3.1. Fase de investigación (en los próximos 5 años)

Los próximos focos de atención serán la optimización de los procesos de obtención de celulosa, refinando el pretratamiento de la biomasa necesaria y la conversión de residuos de cultivos. Esto tiene como fin asegurar la reducción de los costos asociados, mejorando la descomposición de la materia prima, la acción de las enzimas y la estabilidad del proceso manteniendo los suelos y la captura del CO<sub>2</sub> de la atmósfera, y desarrollar tecnologías de fermentación para obtener rendimientos mayores de azúcares a partir de la celulosa. El principal objetivo es disminuir el riesgo de la quiebra de

empresas desarrolladas que comercialicen en el rubro por innovar con tecnología pionera que pueda no ser satisfactoria, permitiendo una rápida diversificación de métodos certificados y mejorados, ampliando el área de investigación y conocimiento. Esto permitirá el uso eficiente de los recursos, concepto que desde la aparición del petróleo no se ha tenido en cuenta.

### **2.3.2. Optimización y uso de la materia prima**

Un amplio rango de materiales vegetales (por ejemplo residuos de maíz y maderas) de diversas características físicas y químicas ya están disponibles como materia prima para su conversión a etanol en biorefinerías.

Los EEUU, por ejemplo, espera que sus capacidades de insumos podrán llegar a satisfacer hasta un tercio de las necesidades de su diversificado sistema de transporte. En Argentina, a pesar de la entrada en vigencia de la Ley 26.093 que determina el reemplazo de naftas por hasta un 5% de etanol para el año 2010, no solo tiene la capacidad para satisfacer su mercado sino que puede exportar grandes volúmenes.

Para alcanzar mayores niveles de producción son necesarios nuevos cultivos energéticos con gran rendimiento por hectárea y una mejora en el procesamiento de los mismos. Para ello se deberá hacer hincapié en el tratamiento y manipuleo de la genética para desarrollar cultivos que produzcan los suficientes nutrientes como para mantener un ecosistema sustentable productivo y funcional.

### **2.3.3. Estudios en procesos del etanol**

Diversos laboratorios a lo largo y ancho de la tierra, como lo son el INTA (Argentina), LATU (Uruguay) y el laboratorio de energías renovables de EEUU (NREL), están en permanente investigación, haciendo uso de sus conocimientos y acceso a los recursos necesarios para probar e implementar nuevas metodologías y procesos eficientes para los biocombustibles.

En el caso del etanol de celulosa este laboratorio está probando mejoras en los distintos procesos ya nombrados (Pretratamiento, Hidrólisis, Fermentación y Destilación), así como también evalúa el proceso en general para llevarlo a su máxima eficiencia. Encontramos un ejemplo cercano, una planta piloto de bioetanol a través de biomasa maderera en Paysandú (Uruguay).

Recientemente se demostró que reduciendo los niveles de agua, es decir, trabajando con alto porcentaje de sólidos se obtienen altos índices de conversión a azúcares en el

pretratamiento como así también implica menor equipamiento y energía necesaria para llevar a cabo el proceso. Estas consecuencias se ven reflejadas directamente en el costo del producto, produciendo a un menor costo.

Sin embargo, mantener un alto índice de kg de biomasa por litro de agua tiene sus problemas asociados. En estudios asociados a lo anterior, se demostró que estas altas concentraciones mezcladas con agua reciclada inhiben severamente la fermentación de la glucosa. Esto ha de ser tomado en cuenta dado que se contrapone con la concepción del reciclado de los efluentes impuesto por políticas a favor del medio ambiente.

Dicho esto, las biorefinerías que reciclen el agua de sus efluentes reinsertándola en el proceso deberán realizar mezclas con agua tomada de río.

Otro tema a tener en cuenta es el costo de las enzimas. Estudios recientes han demostrado que se puede reducir drásticamente el costo de las enzimas utilizadas para reducir la celulosa y hemicelulosa a glucosa, mediante la ejecución en simultáneo de la sacarificación y fermentación, por lo cual la hidrólisis y fermentación a glucosa se hace en un solo paso.

#### **2.3.4. Otros estudios relacionados**

Hasta el momento se mencionaron los estudios relacionados con los procesos actuales para la obtención de etanol. Sin embargo, este producto también puede ser producido termoquímicamente utilizando químicos y calor para romper las moléculas de la biomasa en una mezcla de gases ( $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$ ) para luego agregarle un catalizador que modifica la estructura obteniendo productos como el etanol. Este proceso es importante desde el punto de vista que por la composición de la lignina, la misma no puede ser fácilmente convertida mediante los procesos bioquímicos antes descriptos.

La madera es la materia prima que mayor porcentaje de lignina contiene en su estructura, como así también los económicos residuos de la molienda. Lo que conduce a pensar que estas materias primas son poco aptas o deseables para los procesos bioquímicos, aunque al considerarse una biorefinería integrada en la que conste de ambos procesos serían óptimos. En estos casos además podrá tratarse térmicamente la lignina y los residuos de la fermentación para producir energía suficiente para mantener la refinería en funcionamiento.

Otros beneficios que tiene esta conversión termoquímica, es que se puede obtener una mezcla de gases (SynGas en inglés) que mediante diversos procesos pueden ser convertidos en una mezcla rica de etanol. Sin embargo la conversión a syngas produce concentraciones de alquitrán y azufre en la mezcla que interfieren en la conversión de la

biomasa a estos gases. Es por ello que se desarrollaron procesos catalizadores y por ende, un catalizador de alquitrán para removerlo, convirtiendo el 97% de este contaminante en syngas, logrando mayores rendimientos de obtención de esta mezcla, minimizando los costos de proceso y del etanol (aproximadamente en un 33%).

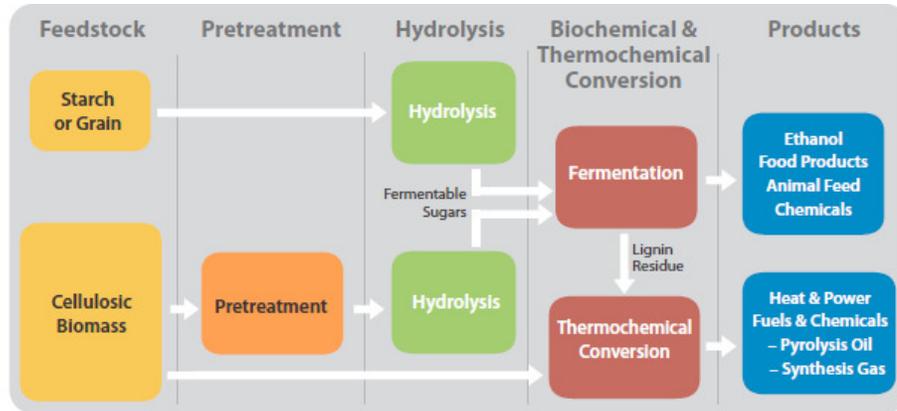


Figura 2.5. Esquema de procesos de una planta de etanol integrada

A continuación muestro un esquema de lo que está siendo desarrollado por el laboratorio de Energías renovables de EEUU para anexar un proceso termoquímico en las biorefinerías.

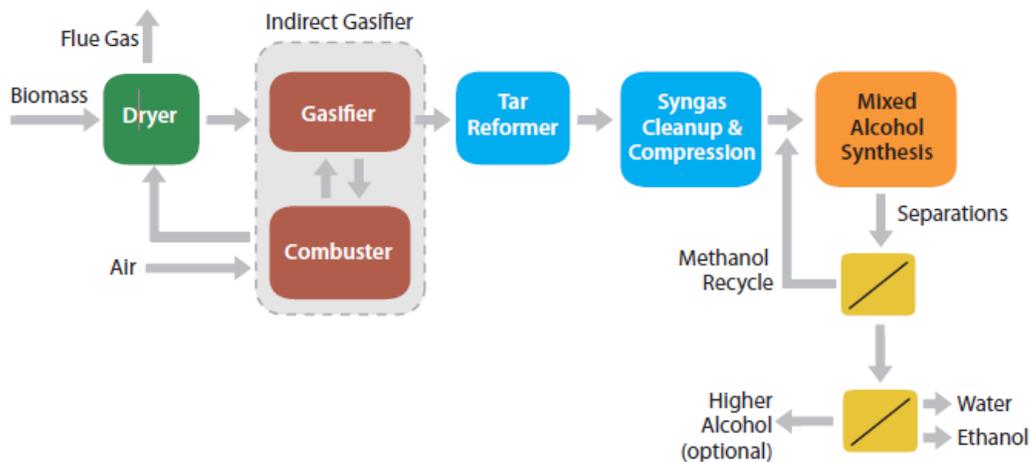


Figura 2.6. Esquema de una planta termoquímica de etanol

### **III. ANÁLISIS DE MERCADO**



### 3.1. INTRODUCCIÓN

Los biocombustibles representan un potencial recurso de energías renovables para el transporte y la creación de grandes mercados para los productores agrícolas. A pesar de que solo algunos son económicamente viables, los mismos tienen grandes implicancias sociales y ambientales: El maíz se utiliza también como alimento. Al utilizarlo como combustible provoca, indefectiblemente, la disminución de tierras disponibles generando una suba en los precios de los alimentos, una fuerte competencia por estas áreas y por el agua, e incentivan a deforestar grandes cantidades de hectáreas. Es por ello que los países deberán organizarse para desarrollar análisis que les permita obtener el mayor provecho de los recursos y generar y asegurar sustentabilidad para las biorefinerías.

En el caso de la caña de azúcar, que también se lo utiliza como alimento, el impacto es menor que el maíz dado que de la parte no utilizada de la producción de azúcar se obtiene el etanol. Es decir, brinda una solución a la utilización de co-productos, revalorizando la materia prima y brindándole al productor un mayor incentivo para la producción de la misma. Este cultivo tiene amplia disponibilidad en gran cantidad de países.

### 3.2. SITUACIÓN ACTUAL

Los recientes estudios de las reservas de petróleo del mundo, la debilidad del dólar y las guerras en los países árabes han llevado los precios del petróleo a niveles elevados alcanzando un máximo histórico a poco más de USD147 en Julio del año 2008.



**Figura 3.1.** Gráfico de la evolución del barril de petróleo en los últimos 7 años

Esto ha incentivado que países a lo largo del mundo desarrollen e incentiven a potenciales combustibles alternativos. Brasil fue el pionero en cuanto al uso del etanol por su situación económica y el fuerte impacto que tuvo la crisis del petróleo en los años '70. Desde esos años tuvo fuertes políticas a favor del desarrollo del etanol a partir de la caña de azúcar, logrando altos rendimientos que en la actualidad el mundo está tratando de copiar para poder sustituir las naftas fósiles.

### **3.3. BRASIL**

La fuerte dependencia y la baja oferta del petróleo en los años '70, provocó que este país adopte una postura rígida para incentivar el bioetanol, producto que se había empezado a utilizar hasta en un 5% de mezcla para el año 1931 con la introducción del automóvil. Este incentivo lo tuvo el mercado de la caña de azúcar y sus destiladores. Durante la segunda guerra mundial y la amenaza de los alemanes de atacar los buques petroleros, el consumo de etanol sufrió un pico alcanzándose niveles de 50% de mezcla en este país. Este programa derivó en que desde la década de los '70 no se pueda comercializar naftas sin mezcla de etanol, fluctuando el porcentaje entre un 10% y un 22% en concordancia a los informes de cosechas y los rendimientos de producción de etanol. A partir del año 1993 se estableció que el mínimo sea 22% y, desde el año 2003, se impuso una variación entre un 20 y un 25%, para luego fijarse hasta la actualidad en 25% mínimo por los elevados precios del petróleo. Esta necesidad e incentivo hizo que las técnicas relacionadas con la producción de caña de azúcar fueran mejoradas al punto de alcanzar las técnicas mundiales más avanzadas.

Las ventajas del uso de la caña de azúcar es que Brasil la produce a un costo muy bajo, y quema el bagazo para generar calor y energía con lo cual se estima que se obtiene un balance energético de 8 a 10 (energía obtenida por energía consumida por el proceso).

En paralelo, desarrolló el mercado de las automotrices que, ante el panorama, tuvieron que adaptar y desarrollar modelos que funcionen a etanol, funcionando algunos completamente a través de éste. El primer auto que se trasladó completamente a etanol fue desarrollado por Fiat y se lanzó al mercado en Julio del año 1979. Hoy se comercializan autos de combustible flexible que funcionan bajo cualquier porcentaje de mezcla regulando el punto de ignición automáticamente.

En el año 2009, Brasil alcanzó el 94% de ventas de este tipo de autos, logrando un porcentaje mayor al 50% en su parque automotor desplazando fuertemente los automóviles tradicionales.

Recientemente el piloto brasilero del Rally Dakar, Klever Kolberg demostró los beneficios y posibilidades que brinda este tipo de combustible. En la prueba del año

2010 corrió con un Mitsubishi de tecnología “Flex fuel”, convirtiéndose en el primer piloto y equipo en competir con Etanol, demostrando que hasta en condiciones adversas se puede utilizar este combustible e interesando al resto de los competidores acerca de esta tecnología por ser líder en la categoría de autos de energía limpia.

Otro aspecto a tener en cuenta es que a Brasil le conviene producir etanol mientras que el precio del petróleo no caiga por debajo de los USD 30 el barril, caso en que los productores obtienen mayores ganancias sólo con la producción de azúcar. De hecho en este país producen uno u otro en función de los precios de mercado.

El ejemplo de Brasil debe ser extrapolado a otros países dependientes de las importaciones del petróleo y en vías de desarrollo, dado que reduce la dependencia de las importaciones y el precio del petróleo, mejora la balanza comercial de los países, permite ajustarse al consentimiento mundial de reducción de CO<sub>2</sub>, mejora el uso de recursos incentivando el mercado de los productores de madera y biomasa y genera grandes cantidades de puestos de trabajo tanto directa como indirectamente. Sin embargo, requiere de un compromiso por décadas por parte de los sucesivos gobiernos hacia políticas favorables de subsidios a la producción y a la investigación y desarrollo.

### **3.4. ESTADOS UNIDOS**

El principal productor de etanol a la fecha es EEUU con el 57% de la producción mundial (34 mil millones de litros por año) que desde el año 2005 desplazó a Brasil del liderazgo a pesar de que éste produce con mayor eficiencia.

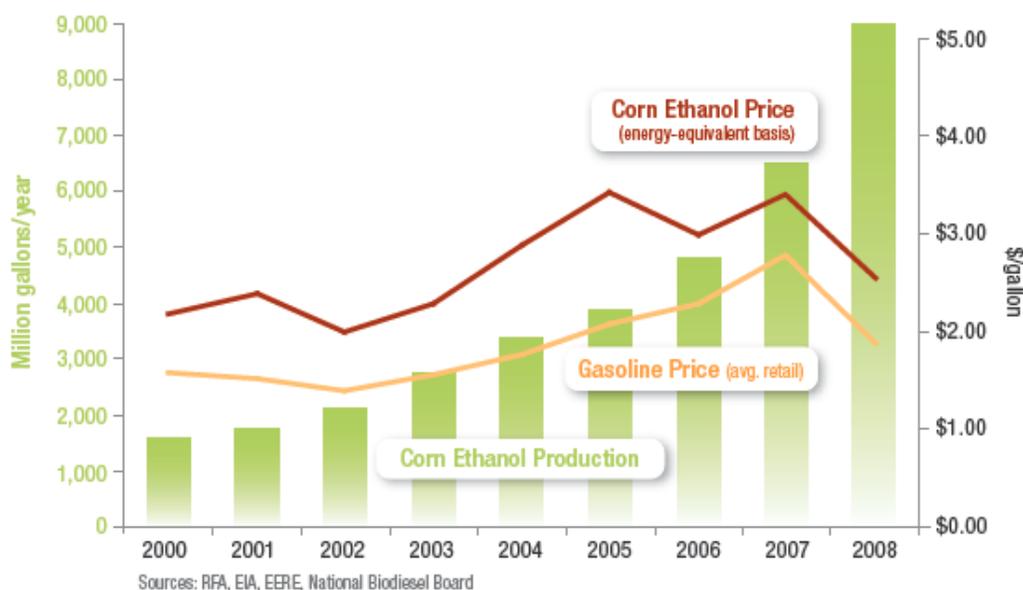
El liderazgo en el ranking mundial se justifica en que la producción de EEUU aumentó 5.5 veces entre los años 2000 y 2008, según el Departamento de Energía de este país (DOE). El etanol producido proviene del maíz dado que cuenta con gran cantidad de área cultivable y su industria está fuertemente desarrollada. El 75% proviene de plantas de molienda seca y el restante de la molienda húmeda, tecnologías ya descritas en la comparación del etanol de celulosa con el de maíz (ver *II. Comparativa Etanol de cultivos contra Etanol de celulosa*).

Sin embargo, la alta dependencia de este país hacia los combustibles fósiles se ve reflejada en su alto consumo de 520 mil millones de litros, haciendo que la actual producción de etanol represente sólo un 6,5% en comparación.

En la actualidad cuenta con 1.877 estaciones de servicio que proveen etanol en un 85% de mezcla, y algunos de sus 50 estados tienen regulaciones que imponen un mínimo de 10% de mezcla. En el caso de Brasil todas las estaciones de servicio ofrecen bioetanol.

Un dato no menor es que las automotrices se están volcando a la producción en masa de automóviles de combustibles flexibles por la creciente demanda y la mayor concientización de la población hacia energías renovables. Además les representa un costo adicional de sólo USD 150 fabricar este tipo de autos. Los datos de mercado indican que ya hay más de 7,5 millones de este tipo de autos circulando.

La existencia de automóviles que circulen puramente a etanol no es reciente. Henry Ford, diseñó el conocido Ford T en 1908 para funcionar con combustibles fósiles, etanol o la mezcla de ambos. Según historiadores, Ford consideraba que el etanol era el combustible del futuro, sustentable y potencialmente superior que los combustibles fósiles, sin embargo, por mejoras notorias en el procesamiento del crudo, el bajo precio que se alcanzó producirlo y la prohibición de la venta de alcohol para frenar las destilerías ilegales en este país, no hubo forma de sostener la industria del bioetanol.



**Figura 3.2.** Gráfico de la evolución del consumo de combustibles y la variación de los precios de las naftas y el etanol de maíz.

A pesar del fuerte incentivo aplicado al etanol que este país está generando, surgen controversias sociales y ambientales de gran índole por el uso de este commodity. Primeramente el maíz se utiliza para alimento por lo que se considera que el vuelco a la producción de etanol es el causante del crecimiento de sus precios. Este tema lo ampliaré más adelante.

Otra controversia es la consideración por el uso eficiente de energía. El etanol a partir de maíz no tiene un buen balance energético. El departamento de energía de EEUU determina que la relación de energía obtenida por energía aplicada es de 1,3, es decir se obtiene sólo un 30% de eficiencia, cuando por la caña de azúcar el mínimo es 8 veces y

con la celulosa se varía entre 2 y 36 veces. Claramente, la eficiencia energética no se logra a través de este cereal, provocando el uso irracional de la energía. De continuar con estos niveles de eficiencia y el continuo crecimiento en la demanda tanto de etanol como de maíz en consecuencia del aumento de la población global, implicará una necesidad mucho mayor de áreas cultivables. Esto trae aparejado acciones como la deforestación de grandes áreas arboladas, las mismas que pueden ser destinadas para las industrias de tratamiento de celulosa y que ayudan con la fijación de CO<sub>2</sub> en mayor medida que los cultivos cerealeros.

Por último, la mayor producción de cultivos de maíz genera mayor demanda hacia el agua, que hoy en día ya se considera que por el derretimiento de los hielos y el descuido global el agua para consumo y para riego está faltando en algunas partes del mundo.

### **3.5. ARGENTINA**

Argentina tiene gran potencial para las energías renovables, especialmente para aquellas provenientes de cultivos. Este país se ha desarrollado a gran escala en el rubro agropecuario debido a los altos precios de la soja y sus suelos aptos para la producción de la misma, sin embargo esto causó que los productores se dediquen a la producción de la misma dejando de lado otros cultivos. Es por esto que se acentuó una marcada diferencia de producción y tecnología aplicada para cada cultivo realizado en Argentina. Actualmente este país produce etanol en el noroeste de su territorio donde se encuentran las plantaciones de caña de azúcar. Hasta el 2006 se producía mediante la melaza o miel de caña, que se produce mediante rodillos o mazas que comprimen fuertemente obteniendo un jugo que se cocina para obtener miel. Se alcanzaron rendimientos de 1000 litros por cada 10 toneladas de azúcar producida (aproximadamente 91 toneladas de caña).

A fines de 2006, el ingenio La Florida (sexto en nivel de producción de azúcar) instaló una planta similar a las de Brasil que convierte el jugo de caña en etanol, con rendimientos de 85 litros por tonelada de caña procesada que comparado con el proceso dicho anteriormente, el rendimiento es mayor al 600%.

La industria azucarera se encuentra concentrada en el noroeste argentino siendo Jujuy, Salta y Tucumán las principales provincias productoras, y, en menor medida las provincias de Santa Fé y Misiones. La zafra del año 2008 arrojó una producción total de 2,4 millones de toneladas, superando en un 11,5% la producción del año anterior; Tucumán, con 15 ingenios representa el 61% de la producción nacional, el norte con 5 ingenios el 37 % y el 2 % restante, el litoral con 3 ingenios que producen azúcar orgánica. El sector azucarero argentino cuenta hoy con 23 ingenios productores en el país, 5.500 cañeros independientes y más de 40 mil trabajadores directos.

Recientemente se ha aprobado la ley de biocombustibles (Ley 26.093: *“Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles.”*), la cual entrará en vigencia en el año 2010 y que impone realizar una mezcla de 5% tanto para el diesel como para las naftas. El primero deberá ser mezclado en su producción con biodiesel, que en nuestro país se produce a través de la soja, y las naftas con etanol.

Según un informe del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), se calcula que para el 2010 el consumo de gasoil y naftas será de 17.723.000 litros y 6.616.000 litros, respectivamente. De cumplirse con los porcentajes fijados en la ley 26.093, se necesitarán 886.152 litros de biodiesel y más de 330 mil litros de bioetanol. De este informe se afirma que en 2010 se deberán destinar casi 52.000 hectáreas de caña de azúcar para cumplir con los requisitos de bioetanol y que en el caso del biodiesel no habrá problemas dado que este se produce a gran escala a partir de la soja. Durante el 2008 se produjeron alrededor de 1,4 millones de toneladas que convirtieron al país en el tercer productor mundial de biodiesel, valor que supera ampliamente lo exigido por ley. Sin embargo, para el caso del bioetanol el sector azucarero estima que la infraestructura es insuficiente para lograr los niveles que se requieren legalmente, por lo que se estima que su aplicación sea gradual.

Lo dicho hasta aquí, es una demostración del amplio y atractivo escenario que presenta la Argentina para la producción de etanol a partir de celulosa. En resumen, los puntos son:

- Amplia cantidad de biomasa apta para la producción.
  - Algas del mar argentino
  - Bosques forestales en Misiones, Corrientes y Entre Ríos
  - Grandes desperdicios de cultivos aprovechables para esta industria. Principalmente caña de azúcar, maíz, sorgo y arroz.
- Creciente demanda de etanol no satisfecha. Leyes que amparan su consumo.
- No se necesita modificación del parque automotor (los automóviles están preparados para funcionar con hasta un 10% de mezcla)
- Posibilidad de exportación a Brasil (cercanía de mercado) y al resto del mundo, mejorando la balanza comercial del país.
- Independencia de Venezuela y de otros países para la importación de crudo y poder eliminar gradualmente los subsidios aplicados a estos combustibles.
- Fomentar áreas no cultivables para forestar, mejorando los suelos y la biodiversidad.

- Reducir la emisión de CO<sub>2</sub> para cumplir con el tratado de Kyoto (Japón) y Copenhague (Dinamarca).
- Ampliar la matriz energética nacional.

### 3.5.1. Competencia

A continuación presento una tabla con las empresas productoras de etanol en la actualidad y las potenciales competidoras. Como se verá, no hay proyectos a base de celulosa.

Empresa	Capacidad (m <sup>3</sup> /año)	Ubicación	Mat. Prima utilizada	Estado de Desarrollo
Los Balcanes SA	126.000	La Florida – Tucumán	Caña de azúcar	Operativo
Soros	200.000	V. Tuerto – Sta. Fé	Maiz	Proyecto
Ledesma SA		Lib. S. Martín – Jujuy	Caña de azúcar	Construcción
Tabacal		Orán – Salta	Caña – Sorgo	Construcción
ARCOR	100.000	San Pedro – Bs. As.	Maiz	Proyecto
Bioetanol Río Cuarto SA	50.000	Río IV – Córdoba	Maiz	Proyecto
San José	100.000	San Luis - SL	Maiz	Proyecto

**Tabla 3.1.** Plantas de Bioetanol en Argentina

Fuente: CEADS-CAI

Para ampliar un poco el panorama argentino, presento un cuadro del IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura) con estimaciones de producción y rendimiento de maíz y sorgo (proyectos competitivos de gran potencial).

MAIZ	2004-05	2005-06	2006-07E
Área (ha.)	3.403.837	3.190.440	3.530.000
Producción (tn)	20.482.572	14.445.538	21.600.000
Rendimiento agrícola (tn/ha)	7,36	5,90	s/d
Rendimiento agrícola potencial	La cosecha actual está generando un rendimiento promedio del orden de las 8,5 tn por hectárea (34% cosechado del área recolectable). Se verifica un salto significativo con respecto a la campaña anterior, a partir de un mayor nivel de aplicación de tecnología. Se espera que este proceso de inversión continúe, especialmente en un escenario de precios altos del maíz, por lo que en el mediano plazo los rendimientos podrían continuar creciendo de modo significativo.		
Rendimiento agroindustrial actual (lts/tn)	360		
Producción por hectárea de etanol de maíz (lts/ha)	2340 lts/ha (considerando rinde promedio de las últimas tres campañas)		

**Tabla 3.2.** Rendimiento del maíz en Argentina

SORGO	2004-05	2005-06	2006-07E
Área (ha.)	617.452	577.010	720.000
Producción (tn)	2.894.250	2.327.865	3.300.000
Rendimiento agrícola (tn/ha)	4,69	4,03	s/d
Rendimiento agrícola potencial	s/d		
Rendimiento agroindustrial (lts/tn)	360		
Producción por hectárea de etanol de Sorgo(lts/ha)	1580 (considerando rinde promedio de las últimas tres campañas)		

**Tabla 3.3.** Rendimiento del sorgo en Argentina

### 3.5.2. Marco Legal Argentino

La ley de los biocombustibles (Ley 26.093) - Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles, establece que todo combustible categorizado como nafta y comercializado en el territorio nacional, deberá ser mezclado con un porcentaje del 5% de bioetanol a partir del primer día del año 2010.

Además del corte obligatorio presenta una serie de ventajas regulatorias para la producción de biodiesel y etanol:

- √ Promoción de la inversión en bienes de capital y obras de infraestructura: a) Devolución anticipada de IVA o; b) Amortización acelerada para Impuesto a las Ganancias.
- √ Los bienes afectados a proyectos aprobados por la Autoridad de Aplicación no integran la base imponible de Impuesto a la Ganancia Mínima Presunta.
- √ Exención impuestos a los combustibles fósiles: a) tasa de Infraestructura Hídrica (nafta y GNC); b) Impuesto sobre Combustibles Líquidos y Gas Natural; c) Impuesto sobre transferencia e importación de Gasoil.
- √ Promoción de cultivos, PyMEs e Investigación y transferencia de tecnología: a) programas específicos a desarrollar por la Secretaría de Agricultura, Ganadería Pesca y Alimentación (SAGPyA) destinados a promover aquellos cultivos destinados a la producción de biocombustibles que favorezcan la diversificación productiva; b) la Subsecretaría de PyMEs y Desarrollo Regional (SSEPyMEyDR) promoverá la adquisición de bienes de capital por parte de las pequeñas y medianas empresas destinados a la producción de biocombustibles, contemplando el equilibrio regional; c) la Secretaría de Ciencia, Tecnología e

Innovación (SECyT) promoverá la investigación, cooperación y transferencia de tecnología, entre las pequeñas y medianas empresas y las instituciones pertinentes del Sistema Público Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, mediante programas específicos.

Para la aplicación de la ley, en el año 2008, la Secretaría de Energía dictó la resolución 1293 en la que se establece el mecanismo de control para la selección, aprobación y orden de prioridad de los proyectos de producción de bioetanol, mediante el cual se aplicarán los beneficios antes mencionados. Esta resolución se destaca por brindar alta prioridad a aquellos proyectos que favorezcan las economías regionales a excepción de la provincia de Buenos Aires, Entre Ríos y Córdoba.

### **3.5.3. Sector Forestal Argentino**

Durante los noventa, Argentina ha sido un importador neto de productos forestales de alto valor agregado (papel, cartón, maderas aserradas de bosques nativos, muebles, maquinaria) y un exportador neto de bienes primarios o semi-elaborados (rollizos, pasta de papel). Esta situación ha comenzado, en parte, a modificarse, en primer lugar como consecuencia de la devaluación en el año 2002 y en segundo lugar debido a las inversiones, tanto extranjeras como de origen nacional realizadas en los noventa (*Fuente: INTI*) dirigidas a la elaboración de productos terminados de mayor valor. Esto favoreció la disminución del saldo comercial negativo.

Sin embargo esto no es suficiente dado que las políticas para exportar son favorables para los productos primarios. Para favorecer la balanza positiva se deberá aplicar fuertes retenciones y menores reintegros a los de poco procesamiento, caso contrario para los de mayor grado.

La comercialización de bosques comenzó en los años '50, contando hoy en día con un millón de hectáreas de bosques cultivados. Sin embargo, los bosques nativos superan ampliamente este número, estimándose que la relación es de 45 a 1 las ha de bosque nativo contra las de cultivado. Sin embargo, los bosques implantados aportan el 85% de la madera necesaria para la industria forestal. En total el volumen comercializado alcanza los 7 millones de m<sup>3</sup>.

Las principales industrias se encuentran en Misiones (por su masa forestal) y Buenos Aires (por su gran densidad de población), pero en los últimos años se han esparcido por otras partes del territorio. Argentina cuenta con 6 plantas celulósicas de envergadura, 6 plantas de tableros de partículas, 3 de tableros de fibra (una cuarta en construcción), plantas de compensado y laminado, 3 procesadoras de resina, cerca de 25

plantas de impregnación y se estima una cantidad de 2000 aserraderos (SAGPYA, 2000).

#### **3.5.4. Mercado de los biocombustibles argentinos**

El mercado argentino presenta un esquema complicado. Actualmente gran parte de los combustibles fósiles consumidos son importados, por lo que presenta grandes oportunidades para desplazarlos por los de gran potencial de reemplazo como lo son el biodiesel y el bioetanol. También presenta oportunidades para el desarrollo de hidrógeno dado que presenta amplia disponibilidad de territorio para la industria Solar y Eólica suficientes como para realizar la electrólisis del agua. De hecho ya existe un proyecto de dimensiones reducidas en el sur de La Pampa que a partir de un molino eólico se genera electricidad para hacer funcionar una máquina de electrólisis de la molécula de agua.

En términos de biocombustibles el más desarrollado en la Argentina es el biodiesel, por su procedencia a partir del cultivo de mayor producción (soja) y por el mayor consumo de diesel con respecto a las naftas.

Por lo pronto, aunque no hay consumo interno apreciable, en nuestro país las plantas de biodiesel de soja tienen una importante capacidad instalada y estiman que en 2008 exportaron cerca de un millón de toneladas. También se están analizando varios proyectos de biorefinerías a partir de maíz, sabiendo que provocan un aumento desmesurado en el costo de estas materias primas y repercute en el mercado alimenticio. Esto se produce en el marco de un continuo aumento de la demanda.

Sin embargo, los especialistas argentinos del INTI y del INTA opinan que no es viable utilizar fuentes de alimento para producir combustibles para transporte. Por ello es que en boletines de estos organismos se están publicando investigaciones de otros cultivos no comestibles. Los dos más factibles para el INTI son: las microalgas y la jatropha. Sin embargo, este último es un cultivo tóxico que cómo fue presentado en Diciembre se necesita producir aceite y debe compartir las líneas de aceite de soja y maíz, contaminando las mismas.

Por lo dicho hasta aquí, en nuestro país se están focalizando fuertemente en la producción de biodiesel. En lo concerniente a este proyecto, la competencia directa de producción de etanol son los ingenios azucareros del NOA con tecnologías aún no óptimas como el mercado brasileiro. Según los ingenios afirman que no poseen estructura suficiente para abastecer de etanol el corte obligatorio del 5% que comenzó en el 2010.

He aquí el nicho y las ventajas que posee este proyecto para la implementación en Argentina.

### **3.6. URUGUAY**

La situación de Uruguay es muy distinta a la Argentina. Actualmente produce pequeñas cantidades de etanol en Paysandú y algo más de biodiesel.

La Ley 18.195 que promueve la producción de agro-combustibles establece que a partir del año 2009 se debe incorporar un corte mínimo de 2% de biodiesel al gasoil y a partir del 2012 ese mínimo será de 5%. A su vez, establece que para el caso del etanol y naftas se debe incorporar hasta un 5% para fines del año 2014 y que a partir de esa fecha el 5% de etanol constituirá el “mínimo” obligatorio.

Esto representa un problema y una ventaja para este proyecto. En primer lugar, los esfuerzos uruguayos se concentran en realizar modificaciones en las plantas mezcladoras de gasoil e incentivar desde todos los ámbitos (políticos, económicos y sociales) la producción de biodiesel dado que el etanol a nivel legal recién establece obligaciones para un lapso de 5 años. La ventaja radica en que pocos invertirán en proyectos de etanol, liberando la oferta en el mercado para nuevos proyectos de producción. Sin embargo, el presidente de la petrolera estatal ANCAP afirmó recientemente que Uruguay ya empezó a mezclar etanol en las naftas con lo cual están incentivando la demanda del mismo.

Estas mezclas regidas por la ley no necesitan de modificaciones en los motores de combustión, con lo cual no es necesario una inversión en nuevos motores. Otro pilar para incentivar la demanda y la inserción de un mercado fuerte de alcohol.

Actualmente existe una empresa proveedora de etanol en el mercado uruguayo de nombre “ALUR”. Esta empresa es competidora a nivel de mercado, pero se maneja bajo otra tecnología y materia prima. Este año comenzará a producir con la melaza, luego con sorgo dulce y sus perspectivas a futuro es producir a través de caña de azúcar.

#### **3.6.1. Situación actual**

Uruguay, al igual que la Argentina tiene un desarrollado sistema agropecuario y variados tipos de cultivos y suelos. El desarrollo de un mercado de biocombustibles puede ayudar a ambos a revalorizar sus cultivos y por ende a desarrollar su población rural.

Cabe resaltar que Uruguay no presenta producción de combustibles fósiles con lo cual debe importar crudo y depende fuertemente del precio mundial del barril de petróleo, como así también del petróleo de Venezuela. Los altos precios alcanzados en el año 2008 han hecho que los uruguayos apuren los reglamentos que promueve la ley de los biocombustibles y empiecen la mezcla para abaratar los costos, sin embargo, es necesaria una fuerte inversión. Asimismo, mejora la balanza comercial del país, permitiendo el ahorro de divisas que gasta el país en la compra de petróleo a Venezuela.

Actualmente la ley establece que debe mezclarse 2% de biodiesel hasta el 2011 y luego el mínimo pasará a ser de 5%. Para el caso de las naftas y en lo que concierne a este proyecto es obligatoria la mezcla de 5% de etanol a partir del 2015, mientras que hasta alcanzar esa fecha será voluntario. Lo cual no incentiva el mercado de biocombustibles a corto y mediano plazo. Cabe recordar que el Uruguay cuenta con 3.5 millones de habitantes y 1.1 millones vehículos de transporte (78% naftero y en su mayoría motos). Esto implica determinar que el mercado de naftas es muy reducido en Uruguay. Sin embargo, para proyectos de magnitud el país presenta grandes oportunidades y ventajas en cuanto a la exportación.

### **3.6.2. Marco regulatorio Uruguayo**

En Julio del 2006 se presentó una propuesta de Ley para el incentivo de biocombustibles que fue aprobada en 2007. Entre los puntos principales de esta ley se destaca:

- Regula la producción, comercialización y el uso de los biocombustibles.
- ANCAP, la petrolera estatal, no tendrá el monopolio de producción y exportación de biocombustibles. Aunque las importaciones y la comercialización seguirá perteneciendo a la estatal.
- Establece el período y el porcentaje a ser mezclado para el diesel y las naftas. Para el etanol se establece un mínimo de 5% a partir del 2015, mientras que para la fecha es voluntario. Para el biodiesel, se debe mezclar hasta un 2% en el período de 2008 a 2011 y, a partir del 2012 el mínimo se establece en un 5%.
- Permite la producción en pequeña escala para autoconsumo (Hasta 4000 litros/día).
- Las exportaciones deberán contar con una autorización previa.

- El Gobierno de Uruguay puede permitir excepciones de impuesto a los productos. Ya se está analizando un desfasaje de 5 a 10 años para el pago de los impuestos.
- Establece los mínimos estándares de calidad y del producto que debe tener para ser comercializado.

### 3.6.3. Mercado energético

Uruguay hasta el 2007 contaba con una oferta energética compuesta en un 55% por petróleo y 2% de gas, por el lado de las fuentes no renovables. En cuanto a las renovables, la hidro-energía aportaba un 28%, la leña y el carbón vegetal un 12% y los residuos de biomasa un 3%. Uruguay importa por completo su demanda de petróleo, lo que genera un gasto anual para el país estimado en 800 millones de dólares. El consumo de Diesel ronda los 800 millones de litros por año y los de naftas en 300 millones de litros. Estos valores llevados al marco legal vigente nos ofrece la perspectiva de necesidad de biocombustibles que necesita el país. A partir del 2015, cuando las mezclas lleguen al 5% mandatorio, el Uruguay necesitará 15 millones de litros de etanol y 40 millones de biodiesel.

De datos estadísticos se sabe que el sector de mayor demanda de energía es el de transporte (aproximadamente un 33%), mientras que lo siguen de cerca el uso residencial (28%) e industrial (22%). Es por ello que la producción de biocombustibles tiene su foco en reducir por completo la dependencia de combustibles fósiles del sector transportista. De continuar la diferencia de precios del petróleo y el biodiesel, Uruguay tomará la decisión de hacer funcionar sus plantas térmicas con este último.

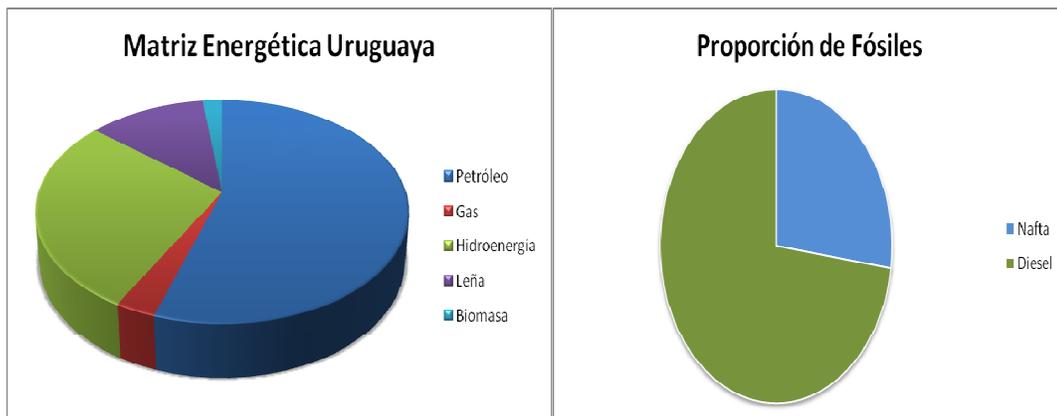


Figura 3.3. Matriz energética uruguaya

### **3.6.4. Utilización del Etanol**

ANCAP es proveedora de etanol pero no lo tiene para destinarlo para combustible, es por ello que ya comenzó con el programa de biocombustibles. El programa consiste en adquirir el molino azucarero de Bella Unión, construir una destilería para la producción de etanol e incrementar el área sembrada a 10 mil hectáreas. Se estima que este complejo podrá producir 18 millones de litros, valor que supera el 5% impuesto para el 2015, por lo que se destinará primeramente a la exportación.

La planta actualmente operativa de etanol de la petrolera estatal se ubica en Paysandú produciendo 1,5 millones de litros por año, producción que será duplicada en los próximos años. El principal insumo es sorgo y en menor medida la melaza de la caña de azúcar. Actualmente el consumo de etanol se aproxima a los 5 millones de litros que es utilizado para bebidas alcohólicas y por las industrias.

El etanol producido será destinado para Venezuela para poder pagar el préstamo que realizó PDVSA para la construcción de la destilería. En cuanto se optimice la producción, Uruguay podrá mirar el atractivo mercado brasilero por su cercan localización. La producción de Brasil se encuentra en el norte del territorio, por lo que el sur de ese país puede ser abastecido por el norte de Uruguay (Bella Unión) por cercanía y menores costos de transporte.

### **3.6.5. Mercado Uruguayo de Biomasa**

Existen en la actualidad tres grandes emprendimientos que utilizan materia prima proveniente de biomasa para la generación de energía eléctrica como sub-producto, ya sea en base a residuos de cáscara de arroz o desechos forestales. Estos emprendimientos generan competencia en la demanda de biomasa que necesitará este proyecto.

El primer emprendimiento es Botnia, la cual se estableció en el país para producir pasta de celulosa, que con los residuos de dicha producción (el llamado licor negro) producirá energía eléctrica. Tiene una capacidad variable de 5 a 30 MW y un contrato de 2 años.

Otro emprendimiento es la empresa Weyerhaeuser, que también generará energía eléctrica con biomasa, se encuentra estableciendo contratos con empresas extranjeras que invertirían en el país en aserraderos y biomasa para producción de electricidad. La misma apunta a desarrollar tecnologías de segunda generación, que utilizan materia celulósica para producir etanol u otros productos energéticos de una manera más eficiente y a mayor escala.

## **IV. COMBUSTIBLES RENOVABLES**



#### **4.1. COMPARATIVA**

Durante las últimas décadas, los países se han estado enfocando hacia un avance tecnológico y mejoras en el ahorro de combustible permitiendo disponer de vehículos más eficientes. Pero estos no han sido suficientes para resolver los problemas de disponibilidad, dependencia del petróleo y contaminación asociada al transporte. Las previsiones futuras sobre el aumento de vehículos, el incremento de los problemas de contaminación y la congestión en las ciudades hace necesario definir una estrategia para reducir los impactos medioambientales, económicos y sociales del sector.

Entre las energías renovables disponibles se encuentran:

#### **4.2. BIOGÁS**

El biogás, como bien indica su nombre, es un combustible gaseoso que se obtiene por degradación de la materia orgánica. La digestión anaeróbica por parte de las bacterias de residuos urbanos o animales provoca un desprendimiento de gases y lodos residuales (principalmente metano y dióxido de carbono). Otra forma de obtención es mediante la gasificación de madera o biomasa.

El metano es un compuesto del gas natural que actualmente se utiliza en motores nafteros en algunos países como la Argentina. Es por ello, que el tratamiento del biogás implica eliminar aquellos gases que afectan la mezcla, entre ellos el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O presentes en la mezcla.

Las principales fuentes de generación del biogás son:

- Vertederos de residuos sólidos orgánicos.
- Plantas de obtención de metano de residuos orgánicos.
- Estaciones depuradoras de aguas residuales con tratamiento biológico.
- Plantas de digestión anaeróbica con residuos de animales (ampliamente estudiado en estos períodos).

El biogás es una opción viable y económica de combustible considerando que las fuentes de obtención son varias y económicas (se necesita poca infraestructura y se estima en pequeñas producciones que puede costar alrededor de 500USD), es una combustión limpia y necesaria (produce CO<sub>2</sub> en vez de emanar metano a la atmósfera que es 20 veces más poderoso que el dióxido de carbono como gas de invernadero).

### **4.3. BIOCARBURANTES**

Los biocarburos, también denominados biocombustibles líquidos, son productos obtenidos a partir de materias primas de origen agrícola.

Se dividen en Biodiesel y Alcoholes.

#### **4.3.1. Biodiesel**

El biodiesel es un combustible producido a partir de aceites vegetales que se puede utilizar en cualquier motor diesel. Argentina es el tercer país productor de este combustible por sus extensos cultivos de soja.

El proceso consiste en obtener aceite a partir de las semillas oleaginosas y luego por procesos químicos se obtiene el biodiesel junto con la glicerina.

Las ventajas de este combustible líquido es que no contiene azufre y aromatizantes, a diferencia del diesel obtenido del crudo de petróleo, que en el proceso de combustión se liberan al aire, provocando la contaminación de aire. Es necesario recordar que el azufre en presencia de vapor de agua se convierte en un compuesto tóxico para los humanos y animales.

Otra ventaja que presenta es que fomenta cultivos que abundan en diferentes países, promoviendo el desarrollo de tecnología de cultivos, transporte y variables directas e indirectas relacionadas (balanza comercial del país, situación económica de los productores, desarrollo de economías rurales, etcétera).

El biodiesel se puede almacenar en tanques similares al gasoil y posee una lubricidad 6 mil veces mayor que este, por lo que aumenta notoriamente la vida útil de los motores y no se encuentran diferencias en relación al consumo, encendido y rendimiento.

#### **4.3.2. Alcoholes**

El metanol y el etanol son los principales alcoholes reemplazantes de las naftas fósiles en motores de combustión interna.

El etanol se puede obtener por síntesis o fermentación, aunque éste último proceso es más económico y últimamente es el mayormente estudiado.

Ya se ha hablado de los métodos de obtención y de los principales países que lo fabrican.

El metanol se obtiene generalmente a partir de madera, paja de cereales u oleaginosas, y se realiza desde el año 1925 mediante una reacción catalítica del gas de síntesis, es decir una mezcla de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>.

La principal ventaja medioambiental de estos combustibles radica en su origen. Los biocombustibles, tal y como se ha detallado anteriormente, provienen mayoritariamente de la biomasa, la cual es el principal foco de reducción del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que se podría liberar en la atmósfera.

#### **4.4. GASES LICUADOS DEL PETRÓLEO (GLP)**

El GLP es la sigla utilizada para denominar a la mezcla de gases que se obtienen de la destilación del petróleo. Los gases licuados de petróleo son subproductos o derivados del petróleo que se almacenan y transportan en forma líquida.

Está compuesto de hidrocarburos como el butano y el propano, pero también contiene impurezas como el propileno o el butileno.

Los GLP son combustibles que pueden ser utilizados en motores de Ciclo Otto, pero éstos tienen que someterse a una serie de adaptaciones en el sistema de inyección. También se puede usar en motores diesel transformados con catalizadores de tres vías, logrando conseguir una reducción importante en las emisiones de CO, NO<sub>x</sub> e hidrocarburos no quemados.

La utilización del GLP no genera emisiones de SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre) culpable junto a los NO<sub>x</sub> de la lluvia ácida. También se eliminan los olores y se reduce a niveles mínimos las vibraciones del motor.

#### **4.5. GAS NATURAL**

El gas natural es la fuente de energía fósil que más ha evolucionado desde los años 70, representando la quinta parte del consumo energético mundial actual. El gas natural es la mezcla de hidrocarburos gaseosos, compuesto principalmente por el metano (en proporción es superior al 80%), y se encuentra en la naturaleza en yacimientos subterráneos confinados junto al petróleo o sólo.

El gas extraído se trata en las cercanías y se transporta por gasoductos o buques hasta la planta de depurado y transformación para luego ser conducido hacia la red de gas o a las zonas de almacenamiento.

Actualmente existen en el mercado varias marcas que ofrecen Kits de conversión para motores de ciclo Otto de inyección electrónica, logrando que este tipo de vehículos puedan circular tanto con gas natural como con naftas. También existen fabricantes que producen directamente los vehículos con motores de gas natural.

Estos sistemas son ampliamente utilizados en Argentina debido a que, a pesar de que pueden resultar un poco caros los equipos, el GNC (Gas Natural Comprimido) está subsidiado y representa una variable muy económica en comparación con las naftas y el diesel.

En términos de contaminación es considerado el combustible natural más limpio de los combustibles fósiles, porque realiza una combustión limpia sin emitir agregados como sí lo hacen las naftas.

#### **4.6. HIDRÓGENO**

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica y uno de los componentes principales del agua y de toda la materia orgánica. Es el elemento químico más abundante de la tierra, lo que le confiere la propiedad de ser inagotable.

También se caracteriza por ser un elemento de difícil obtención por no existir en la naturaleza en estado puro dada su alta capacidad de reacción. Es por esto que el principal inconveniente del uso de hidrógeno como combustible alternativo es su obtención. Al no ser un recurso, sino un portador de energía, el hidrógeno se produce a partir de materia prima como el agua o los recursos fósiles, y por lo tanto se recurre al consumo de energía para obtenerlo. Así, la generación de este elemento supone una inversión económica y técnica de gran envergadura.

Puede obtenerse a partir de diversas fuentes, ya sea nuclear, fósil o bien de tipo renovable, mediante los siguientes procesos:

- **Electrólisis a partir del agua:** es un proceso que disocia la molécula del agua en sus componentes primarios y de esa manera permite obtener hidrógeno y oxígeno. Es un proceso que requiere gran cantidad de energía.

- Gasificación de la biomasa: Proceso térmico que permite la conversión de la biomasa o la madera en un combustible gaseoso de rendimiento pobre, mediante un proceso de oxidación parcial con Vapor, Oxígeno o Aire.
- A partir de hidrocarburos (gas natural, naftas) y alcoholes (metanol, etanol): Mediante procesos químicos se disocian las moléculas obteniendo H<sub>2</sub> en estado puro.

Las características más destacables del hidrógeno son su elevado poder calorífico y que no produce emisiones en su combustión salvo vapor de agua.

Entre otras características tiene una alta velocidad de llama con temperaturas de 2.050°C, inflamabilidad en amplios rangos y una alta temperatura de auto-ignición, evitando el pistoneo y permitiendo una mayor compresión. Aunque todo apunta a que es un gran carburante para el transporte, el problema fundamental reside en generar un sistema de almacenaje que satisfaga todos los requisitos de seguridad. Esto se debe a que el H<sub>2</sub> en estado gaseoso es la molécula más pequeña, escapándose por los intersticios del mejor material de almacenaje. Es por ello que se analiza en transportarlo líquido, lo que provoca un aumento de la peligrosidad por su alta reactividad y explosiva transformación en la molécula de agua en presencia de Oxígeno.

El uso del hidrógeno como combustible se traduce desde el punto de vista medioambiental en la reducción a cero de las emisiones de HC, CO<sub>2</sub>, óxidos de nitrógeno y azufre.

#### **4.7. COMPARATIVA ENTRE LOS COMBUSTIBLES**

Se obtuvieron tablas con las propiedades de todos los combustibles en estudio realizado y aprobado en la universidad de Catalunya. Favor de referirse al Anexo 1 para más detalle.

La comparación se hará en función de las naftas y el diesel que se intentan reemplazar. Para ello se intentará determinar:

- Almacenaje
- Calidad de la mezcla
- Contenido energético
- Características de combustión

### 4.7.1. Densidad

La densidad determina la cantidad de materia contenida en un volumen determinado y permite determinar en parte el contenido de energía que posee el combustible. Mayores densidades indican mayor energía almacenada por unidad de volumen, factor que junto con el consumo específico, afecta directamente a la autonomía del vehículo.

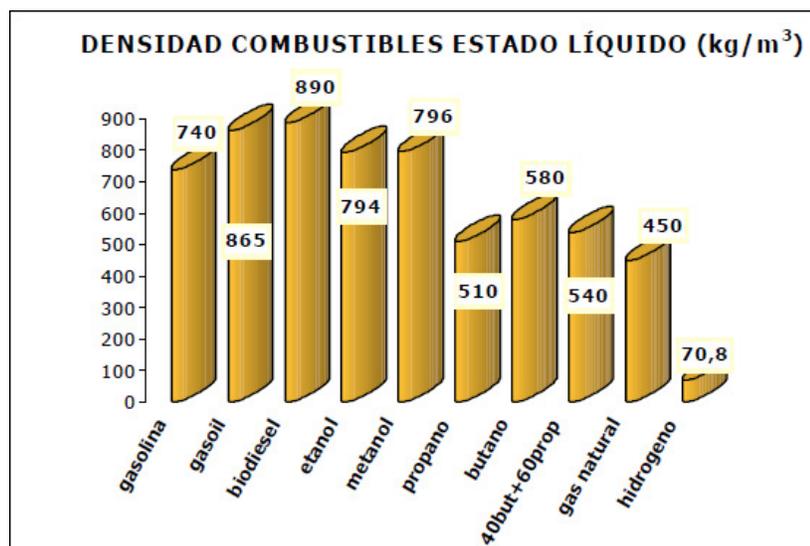


Figura 4.1. Densidad de combustibles para determinar almacenamiento

El biodiesel es el combustible que mayor capacidad de almacenamiento permite por su alta densidad.

El biogás, al igual que el gas natural, se debería tratar en estado comprimido o licuado para elevar el contenido energético por unidad de volumen. El gas natural en estado comprimido eleva su densidad, aunque es inferior a las naftas, por lo que implica un aumento del peso del tanque y por lo tanto es más apropiado para grandes flotas de vehículos.

El hidrógeno se comporta de una manera similar al gas natural pero con una densidad muy inferior. Este hecho repercute en la necesidad de aumento del volumen de almacenamiento y con ello un aumento del peso del vehículo. La complejidad técnica que implica el almacenamiento del hidrógeno en forma licuada es uno de los factores desacelerantes en el avance de su consolidación como combustible alternativo. Para almacenarlo en este estado se necesitan depósitos criogénicos de elevado desarrollo tecnológico y costo.

### 4.7.2. Contenido Energético

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de calor desprendido en su combustión teórica y completa, en condiciones normales.

El combustible que contiene menor PCI másico es el biogás con 15,33 MJ/kg, siendo 3 veces menor que el contenido energético de la nafta, mientras que el hidrógeno es el combustible con mayor PCI másico, el cual supera en 2,75 veces el contenido energético de la nafta fósil. El metanol, el etanol y el biodiesel, relevantes para este proyecto de análisis, presentan un bajo poder calorífico en relación a los hidrocarburos que forman la nafta y el gasoil, y se debe a la presencia de oxígeno en sus formulas.

En conclusión el combustible más adecuado energéticamente para reemplazar las naftas sería el hidrógeno.

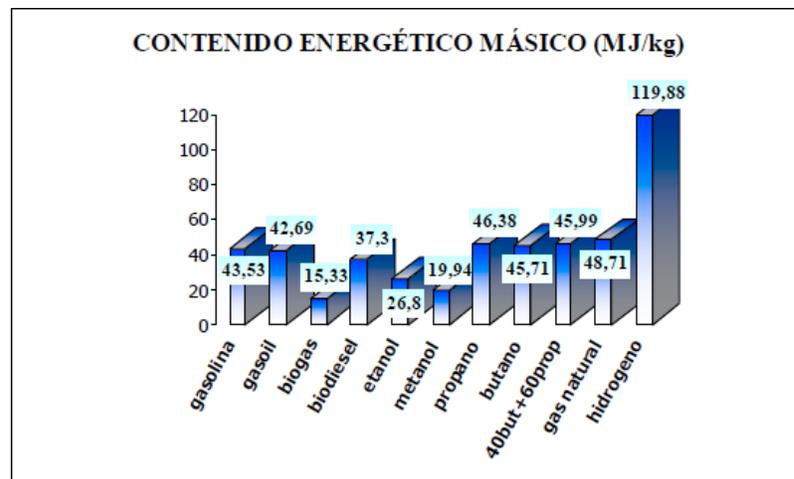


Figura 4.2. Contenido energético por combustible

Sin embargo, la combustión se realiza en presencia de oxígeno dentro de los compartimientos del motor. Es por ello que al realizar la mezcla teórica para obtener la misma combustión, el contenido energético de todos los combustibles de la comparativa cambia, presentando diferencias poco significativas con respecto a la nafta y el gasoil, oscilando valores entre 2,34 y 3,37 MJ/kg. Ningún combustible resulta ser superior, salvo el hidrógeno, reforzando sus ventajas frente al resto. El etanol presenta una diferencia mínima y se lo ubica como un adecuado reemplazante.

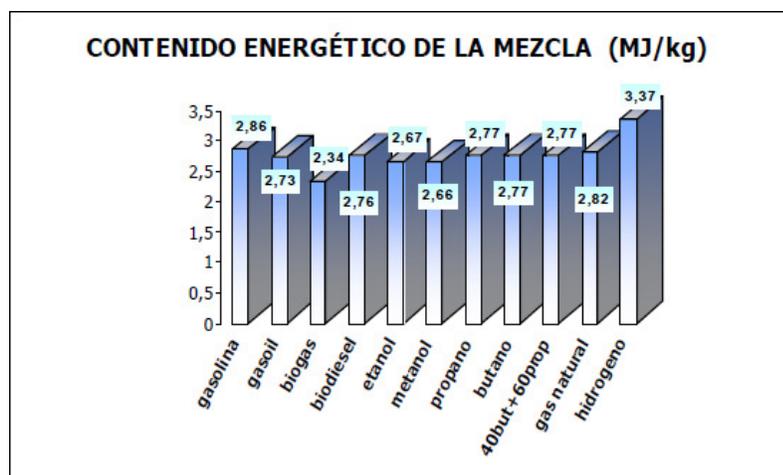


Figura 4.3. Contenido energético por combustible

#### 4.7.3. Dosado Estequiométrico

El dosado estequiométrico es la relación entre la cantidad de aire y la de combustible necesario para que se produzca una combustión completa, sin que falte ni sobre comburente.

Ciclo	Comburente	Dosado	Relación Caudal
Otto	Nafta	14,19	1
	Biogás	5,56	2,55
	Etanol	9,02	1,57
	Metanol	6,48	2,19
	GNC	16,23	0,87
	Hidrógeno	34,58	0,41
Diesel	Gasoil	14,62	1
	Biodiesel	12,53	1,17

Tabla 4.1. Relación de dosado con respecto a combustibles fósiles

A partir de estas relaciones se obtiene como conclusión que para el caso de estudio, el ciclo Otto, se necesita mayor caudal de etanol para obtener la misma calidad de combustión que utilizando Nafta, aproximadamente un 50% más.

#### 4.7.4. Producción de CO<sub>2</sub>

En todo proceso de combustión en presencia de carbono se produce CO<sub>2</sub>. Al ser un gas no combustible posee un poder antidetonante muy elevado. No es un gas tóxico, pero al reducir la proporción de oxígeno en el aire se convierte en un elemento perjudicial para la salud y es el principal responsable del efecto invernadero por el gran incremento de emisiones que se viene generando.

En la Figura 4.4 se puede destacar el hidrógeno con una emisión nula, ya que no contiene carbono en su composición y sus medidas se representan en gramos de CO<sub>2</sub>/KWh. que genera.

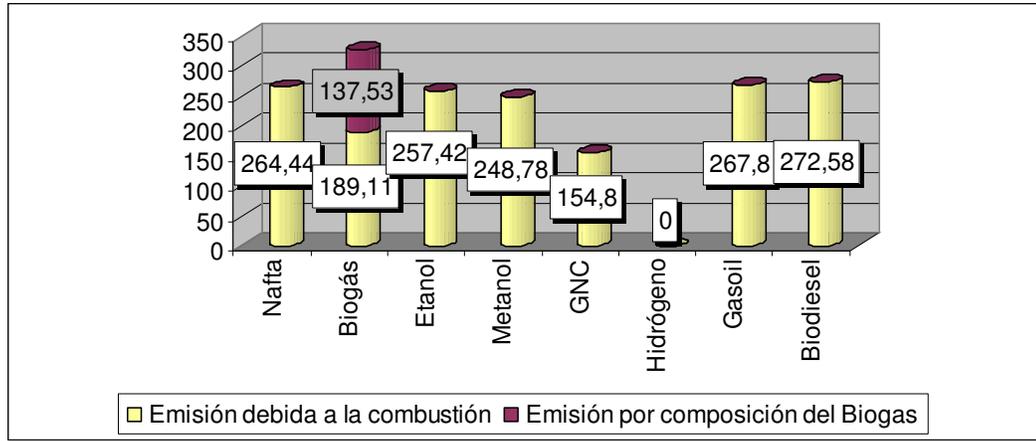


Figura 4.4. Cuadro de emisiones (CO<sub>2</sub>/KWh)

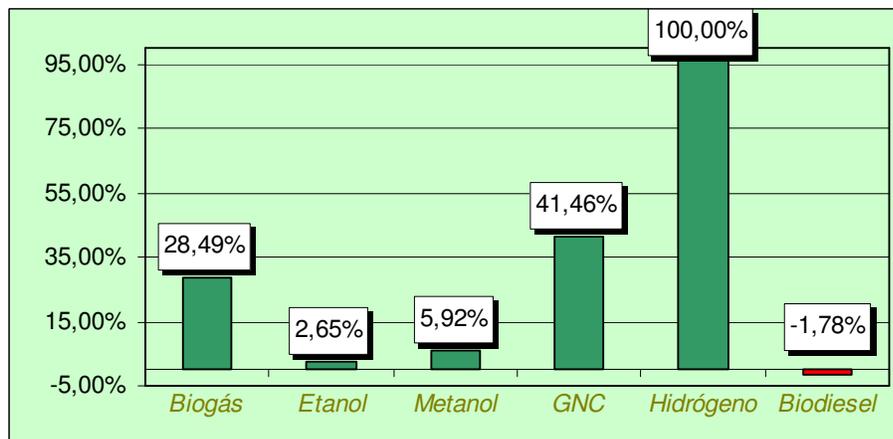


Figura 4.5. Cuadro de reducción de emisiones

A excepción del Hidrógeno, que no produce CO<sub>2</sub> por no contener carbono en su combustión, las emisiones teóricas más bajas de esta fuente de contaminación las produce el Gas Natural, que con respecto a la nafta, se reducen un 41,46 %.

El biogás tiene dos componentes de emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera: Una componente es la combustión propia del combustible, pero también la composición del gas presenta este gas contaminante. De estudiar solamente la combustión arribaríamos a la conclusión que es una fuente reductora de emisiones, sin embargo, la propia composición del gas hace que los niveles de contaminantes sean mayores a los obtenidos por combustión de naftas. La realidad es que este porcentaje adicional se obtiene de su procedencia, la fermentación o degradación de materia orgánica, el cual

está presente aún cuando no se utiliza para fabricar este gas. Es por ello que es difícil determinar si es una fuente reductora o contaminante.

El biodiesel, combustible que hoy se considera del futuro muestra una reducción negativa, es decir, emite mayor cantidad de CO<sub>2</sub> que el diesel, aunque es mínimo. No obstante este aumento se ve compensado por el origen del biocombustible. La vegetación de la que procede el biodiesel necesita CO<sub>2</sub> para realizar la fotosíntesis. Por lo tanto, la emisión que se obtiene al quemar este combustible en un motor alternativo de combustión interna cerraría el ciclo que utilizaría este CO<sub>2</sub> emitido para alimentar el cultivo que produciría de nuevo el biodiesel.

Por último, y el más relevante para este proyecto, el etanol produce en su combustión con O<sub>2</sub> una leve reducción de CO<sub>2</sub> (2,65%) con respecto a las naftas, hecho que no se piensa al hablar favorablemente del etanol. Sin embargo, y al igual que el biodiesel, el principal sustento de reducción radica en los cultivos necesarios para fijar el dióxido de carbono. La madera de la cual puede provenir este combustible puede fijar en promedio 2.2 toneladas de CO<sub>2</sub>, logrando una reducción importante considerando que el etanol de madera puede producirse hasta 300 litros por tonelada de materia prima y 200kg de lignina.

#### **4.7.5. Otros tipos de emisiones**

**CO:** es un gas tóxico, incoloro, inodoro e insípido que se produce por la falta del O<sub>2</sub> necesario que permita completar la reacción de combustión. La generación de CO se produce en un paso previo a la creación de CO<sub>2</sub>, por lo tanto primero se genera todo el CO y a continuación el dióxido de Carbono que sea posible según la cantidad de O<sub>2</sub> disponible. Por un lado provoca la destrucción del ozono estratosférico, pero contribuye a la formación de ozono troposférico, lo que contribuye al efecto invernadero alterando la calidad de la atmósfera y de los ecosistemas.

**HC:** son una mezcla de compuestos que se producen por falta de oxígeno o exceso de combustible para realizar la combustión completa de todo el hidrocarburo suministrado. Provocan la llamada niebla fotoquímica que contamina la atmósfera y provoca riesgos para la salud.

**NOx:** la emisión de este contaminante es independiente al proceso de combustión. Debido a las altas presiones y temperaturas que se generan en la cámara de combustión el nitrógeno y el oxígeno presentes en el aire reaccionan dando lugar a los óxidos de nitrógeno. Produce los mismos efectos que el CO.

**Partículas:** pueden ser sustancias sólidas y/o líquidas y su emisión está provocada por problemas en la formación de la mezcla de aire y combustible.

En resumen, para todos los combustibles clasifico los niveles de estas emisiones:  
Siendo 0 la emisión prácticamente nula y 5 una emisión elevada

	Otto						Diesel	
	Naftas	Biogas	Etanol	Metanol	GNC	Hidrógeno	Gasoil	Biodiesel
<b>CO</b>	3 a 5	2	2	2	3 a 5	0	3	2
<b>HC</b>	3 a 5	2	2	2	3 a 5	0	3	2
<b>NOx</b>	3 a 5	3	4	4	3 a 5	3	4	4
<b>Partículas</b>	0	4	0	0	0	0	4	3

**Tabla 4.2.** Valoración de los distintos combustibles

#### 4.7.6. Cuadro de ventajas y desventajas

Comburente	Ventajas	Desventajas
Biogás	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducción importante de CO<sub>2</sub> durante la combustión</li> <li>Emisiones de CO y HC se reducen ligeramente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Necesidad de comprimirlo o licuarlo por su baja densidad</li> <li>Bajo poder calorífico</li> <li>Menor autonomía en comparación con las naftas</li> </ul>
Etanol	<ul style="list-style-type: none"> <li>Combustible renovable</li> <li>Se produce a partir de materias primas económicas y abundantes</li> <li>A partir de la celulosa se generan residuos que se pueden utilizar para generar electricidad</li> <li>Posee gran capacidad de almacenamiento</li> <li>Alto octanaje mejorando la eficiencia a la combustión</li> <li>Disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>, CO y HC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se debe utilizar como aditivo a las naftas dado que una mezcla 100% requiere grandes modificaciones del motor</li> <li>Mayor consumo por menor contenido energético. Reduce la autonomía.</li> <li>Altamente volátil. Dificulta el arranque en frío (otra modificación al motor)</li> </ul>
Metanol	<ul style="list-style-type: none"> <li>Combustible parcialmente renovable (sólo si proviene de biomasa)</li> <li>Igual al etanol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>El rango de inflamabilidad es elevado por lo que es fácilmente combustible</li> <li>Igual al etanol</li> </ul>
GLP	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fácilmente licuables</li> <li>No se necesitan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Derivados del petróleo</li> <li>Menor autonomía</li> </ul>

	modificaciones <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Buen poder antidetonante</li> <li>▪ 10% de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y algo menos de CO y de HC</li> </ul>	
GNC	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abundante disponibilidad</li> <li>▪ Elevado poder antidetonante</li> <li>▪ Reducción importante en CO<sub>2</sub></li> <li>▪ Equipos relativamente económicos</li> <li>▪ Producción ya implementada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Densidad menor que implica un tanque mayor y menor autonomía</li> <li>▪ Altos costos para licuarlo y mantenerlo en ese estado</li> </ul>
Hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Menor consumo</li> <li>▪ Rendimiento alto por excelente PCI</li> <li>▪ Emisiones nulas de CO<sub>2</sub>, CO, HC y partículas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Complejidad de obtención. Su producción requiere energía externa</li> <li>▪ Complejidad de almacenamiento.</li> <li>▪ Altamente inflamable</li> <li>▪ Bajo octanaje</li> </ul>
Biodiesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Combustible renovable</li> <li>▪ Gran capacidad de almacenamiento</li> <li>▪ Autonomía similar al gasoil</li> <li>▪ Reduce CO<sub>2</sub> por la materia prima utilizada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ PCI menor al gasoil</li> <li>▪ Implica modificaciones en los conductos de admisión</li> <li>▪ No se reducen las emisiones de Nitrógeno</li> </ul>

**Tabla 4.3.** Cuadro comparativo de ventajas y desventajas

#### 4.8. PERSPECTIVA MUNDIAL DE MERCADO

Según un estudio de la Conferencia Internacional de Biocombustibles en San Pablo, la producción mundial de etanol crecerá 191%, de 55.700 millones de litros fabricados en 2007 a 162.000 millones en 2015; mientras que la demanda de etanol en 2010 será de 101.000 millones de litros, ante una oferta de 88.000 millones de litros.

Se estima que ese escenario tiende al equilibrio en 2015, cuando la oferta deberá situarse cercana a 162.000 millones de litros, frente a una demanda que rondará 150.000 millones de litros.

En justificación a esto, varios países en el mundo por tratar de aproximarse al compromiso realizado en el tratado de Kyoto y Copenhague, están imponiendo leyes y haciendo acuerdos con las automotrices para que modifiquen sus motores.

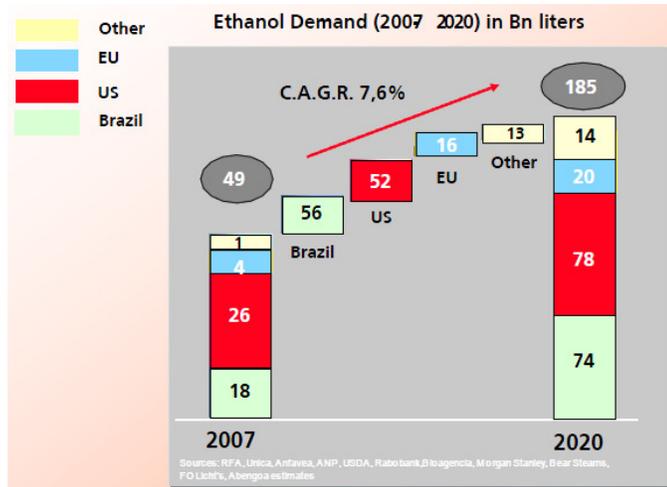


Figura 4.6. Demanda de etanol para los próximos años

A continuación expongo un gráfico que en cierta medida concientiza a la población que las tecnologías que hoy se consideran revolucionarias y óptimas en cuanto a reducción de emisiones, no resultan adecuadas y se vuelve a contraponer con el uso eficiente de la energía.

### Cellulose ethanol could have a profound impact on CO<sub>2</sub> emissions

Meeting emissions reduction goals with technology

#### Hybrid Technology



Toyota Prius Hybrid  
Running Gasoline 70 HP  
**115 g CO<sub>2</sub>/km**

#### Cellulose E85 in a Flexible Fuel Vehicle



Ford Focus FFV  
Running cellulose E-85  
130 HP  
**40 g CO<sub>2</sub>/km**



GM Yukon Denali  
Running cellulose E-85  
320 HP  
**119 g CO<sub>2</sub>/km**

Figura 4.7. Comparativa entre autos “flex-fuel” e híbridos

A partir de este gráfico vemos como los autos híbridos no están de acuerdo con el uso eficiente de la energía, mientras que leves modificaciones en automóviles corrientes (haciendo que funcionen prácticamente a 85% de etanol) hacen reducir las emisiones y se tienen potencias similares a los autos actuales con un leve aumento de precio. No así con los autos híbridos que son caros.

Este punto remarca la importancia de focalizar los esfuerzos en la producción de etanol.

Además el abastecimiento de celulosa (producción y logística) y las biorefinerías serán grandes fuentes de trabajo y mejorarán los pequeños productores rurales, mejorarán la matriz energética local e incentivarán el desarrollo e innovación para optimizar los procesos tal y como sucedió con el petróleo.

#### **4.9. RESUMEN DE LA PRIMER PARTE**

El uso de la biomasa para producir biocombustibles genera mucha expectativa por el hecho de tener a disposición grandes cantidades de combustible renovable de producción local para desplazar a los derivados del petróleo. Esto conlleva a mejorar la situación económica de las plantaciones forestales (principal receptor del CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera) y del país, a reducir las fuentes de emisiones del país y a la independencia de tener reservas petroleras.

Sin embargo, dados los recientes cambios climáticos que sufre el mundo en general creo que lo conveniente es analizar los proyectos en función de las implicancias sociales y ambientales en vez de estar continuamente pendientes de la alta rentabilidad. Con esto me refiero a encontrar un equilibrio en el cual los grandes inversores apuesten por tecnologías prometedoras de gran revés de impacto ambiental como lo es el etanol de celulosa, las celdas de hidrógeno, la electricidad a partir del sol y el viento, en lugar de continuar apostando a la alta rentabilidad de producción de petróleo, hecho que se reduce gradualmente por la disminución de reservas mundiales.

En el mercado de los combustibles el etanol de celulosa es el más rentable, ecológico y alcanzable en el mediano plazo, hecho que se fomentará aún más a partir de la investigación y mejoramiento de los pretratamientos que se necesiten en el proceso, abaratando la obtención del mismo.

En cuanto al maíz, se cree fuertemente en la implicancia negativa que tiene en términos de eficiencia de utilización de la energía. Es contradictoria y poco favorable la posición que adopta el país más poderoso económicamente (EEUU) hacia combustibles renovables y el uso eficiente de energía mientras siga apostando al etanol de maíz. Este país que tiene los recursos necesarios (económicos, jurídicos y tecnológicos) para plantear los nuevos lineamientos a seguir para un uso eficiente de la energía y reducción de impacto ambiental, continúa apostando a tecnologías poco eficientes cuando debería implementar sus recursos a proyectos más eficientes como el que realizo, proyectos de energía solar, proyectos de energía eólica, etc.

La Argentina presenta un mercado poco competitivo a pesar del hecho de estar desarrollando los ingenios azucareros a niveles de producción de los de Brasil, aunque falta tiempo para lograrlo. A su vez, presenta amplias posibilidades internas y de

exportación por el abastecimiento a un mercado desarrollado como es el de Brasil y Europa. Tiene la contra de no tener seguridad jurídica y permanentes cambios de rumbo económico y político, sin mencionar los pocos incentivos al desarrollo industrial o de elaboración de productos elaborados y las fuertes retenciones a la exportación de productos.

En lo que se refiere a producción, el norte del país parece ser un lugar aprovechable para la instalación de este proyecto, principalmente las provincias de Corrientes y Misiones quienes presentan amplia oferta forestal y subsidios a estos proyectos. Asimismo, este proyecto favorecerá la producción interna y el corte de dependencia de combustibles importados como actualmente este país realiza a Venezuela (país que hoy en día tiene fuerte inestabilidad política).

El Uruguay, sin embargo, presenta una serie de dificultades por el hecho de que la petrolera estatal domina la producción y el control de los proyectos de generación de combustibles. En otro aspecto, es un mercado chico y expandible en un futuro lejano (año 2015). Pero al igual que la Argentina presenta dos mercados cercanos y en expansión (Argentina y Brasil). La ventaja que tiene es que se encuentra posicionado como un amplio y respetado productor, que ha sido merecedor de respeto frente a otros países importadores de sus materias primas, a diferencia de Argentina que pierde continuamente mercados.

Como mencioné se están desarrollando proyectos de gran alcance y a lo largo del territorio para satisfacer por encima las demandas de etanol, y a pesar de tener un fuerte incentivo hacia la producción de madera la radicación de este proyecto no es atractivo de no surgir un incentivo fuerte por parte del gobierno de Uruguay para este tipo de proyectos.

El mundo se está volcando a la producción de etanol y Brasil apuesta fuerte a la expansión de su desarrollo tecnológico de producción del mismo a partir de caña de azúcar en los países del Mercosur. Esto es un problema, dado que esta tecnología de celulosa está en estudio y se encontrará con una fuerte barrera y competencia en cuanto a costos de producción. Sin embargo, tanto Argentina como Uruguay deberían expandir al máximo sus posibilidades de diversificación energética para desarrollar la competencia y producir en grandes volúmenes y desarrollar al máximo sus tecnologías y por ende favorecer la economía y desarrollo del país. Remarco nuevamente que ambos dependen del petróleo de Venezuela y su matriz energética depende fuertemente del petróleo y sus derivados.



## **V. DESARROLLO DE PROCESO**



## 5.1. ANÁLISIS DEL PROCESO. DEFINICIONES Y DISEÑO

La investigación de la producción del etanol a partir de energías renovables como lo son los compuestos celulosos ha sido continua a través de los años, dado el bajo costo y disponibilidad de la materia prima. Casi todo el trabajo de investigación se concentró en la bioquímica, genética y el desarrollo del proceso del fungi (bacteria para convertir a etanol, especialmente *Trichoderma reesei*) en conjunción con la posterior conversión mediante levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) de los azúcares producidos a etanol. Luego de varios años de estudio se ha arribado a la conclusión de que no es la única solución potencial. Esto será presentado a lo largo de esta segunda parte.

Como ya mencioné, las plantas presentan tres componentes principales: Celulosa, lignina y la hemicelulosa. La celulosa está compuesta de moléculas de glucosa unidas entre sí formando largas cadenas constituyendo una estructura cristalina. Además tiene la característica de ser fibrosa, resistente e insoluble en agua. La Hemicelulosa también es insoluble en agua, pero es una mezcla de polímeros compuestos de xilosa, manosa, galactosa o arabinosa. Por último, la lignina es un complejo polímero aromático compuesto por fenil-propano, el cual es resistente a la degradación biológica.

Dicha esta presentación, la celulosa puede ser reducida a glucosa por medio de procesos químicos o enzimáticos que rompan esa estructura cristalina. El proceso más prometedor a la actualidad es el uso de enzimas celulasas, las cuales como se sabe, son biodegradables y no provocan daño al medio ambiente (la misma naturaleza las aporta). Este proceso, no obstante, requiere de un pretratamiento para poder aumentar la eficiencia y rendimiento del proceso, obteniendo productos competitivos.

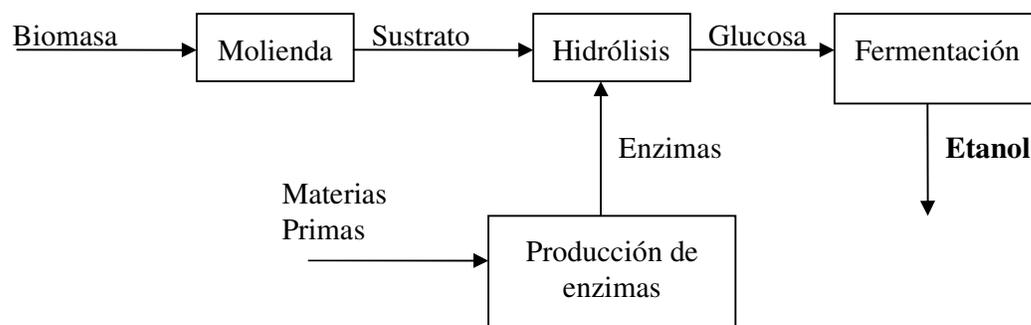
Uno de los factores limitantes de la efectividad y bioconversión de los residuos celulosos de la madera es la resistencia del subproducto o sustrato (a partir de ahora me dirigiré con este nombre) para ser convertido a etanol luego del pretratamiento. Esta resistencia se traduce en mayores procesos y costos para su conversión, lo cual provoca que sea poco factible el proceso en general. En términos específicos y ya adentrándonos en términos técnicos, la lignina y la hemicelulosa le brindan rigidez a las células de la planta y en conjunto trabajan para resistir naturalmente procesos químicos, físicos y hasta la hidrólisis enzimática. Este proceso se lo llama recalcitración lignocelulósica.

En la madera, por la presencia de hemicelulosa y lignina, se hace difícil la aplicación de estas enzimas. Para permitir la acción enzimática es que se usa un pretratamiento, los cuales pueden ser biológicos, mecánicos, Físico-químicos. Estos procesos intentan aumentar el área de contacto con la celulosa removiendo la lignina, solubilizando la hemicelulosa, rompiendo la cristalinidad de las moléculas formantes e incrementando el volumen de los poros. El problema de estos pretratamientos radica en el alto consumo

de energía térmica o eléctrica, que, traducido en números, significa consumir del 30 al 65% del etanol producido.

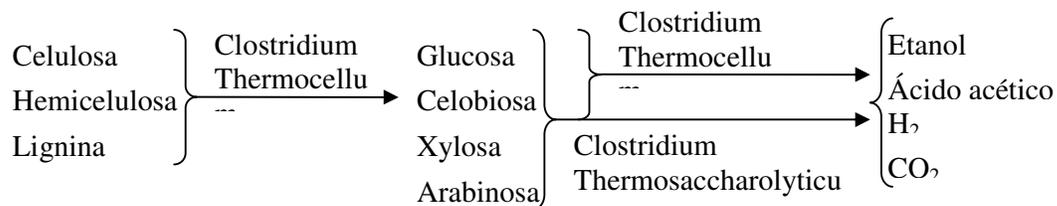
Recordemos sintéticamente la fuerte ventaja del etanol como combustible frente a las naftas. El etanol se quema más limpiamente, tiene un octanaje mayor, puede ser quemado con mayor eficiencia y tiene una baja emisión de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. El balance energético es favorable, es una fuente de energía presente y fácilmente obtenible, mejora las economías rurales y es menos tóxico que sus pares, el metano y las naftas. Las fuentes celulósicas se pueden conseguir a USD 42 por tonelada seca, lo que equivale a un precio del petróleo en 6 a 7 dólares por barril sobre la base de su equivalente en masa o de 12 a 13 dólares por barril en base al contenido energético equivalente (*Bioenergy: background, potential, and policy. Center for Strategic and International Studies, Washington, D.C. 2003*). Hoy sabemos que el precio del barril de petróleo está muy por encima de estos valores.

A continuación presento un esquema del proceso básico del hidrolizado de la biomasa, introduciendo al sistema sustrato obtenido del pretratamiento.



**Figura 5.1.** Proceso básico de hidrolizado

Este proceso, en términos básicos, consiste en hidrolizar continuamente la celulosa a azúcares de baja complejidad molecular y luego fermentar los mismos en alcoholes, más precisamente en etanol (producto que nos interesa para este estudio). Este flujo-grama presenta la ventaja de no contar con otro reactor para la producción de enzimas, dado que la enzima es producida y usada en el reactor.



**Figura 5.2.** Proceso básico de conversión bajo dos tipos de enzimas

Este proceso es digno de estudio dado que una sola bacteria puede tratar la celulosa para conversión directa a etanol. Esta bacteria, *Clostridium Thermocellum*, rompe las moléculas de celulosa convirtiéndola en glucosa y celobiosa. Ambos primeros son utilizados por el mismo organismo convirtiéndolo en Etanol y Ácido acético, hidrógeno y CO<sub>2</sub>. Los cuatro subproductos pueden ser transformados por otra bacteria (*Clostridium Thermosaccharolyticum*), pero la misma se encuentra bajo investigación dado que es muy inestable y en un ambiente ácido se inhibe la conversión.

## 5.2. PRETRATAMIENTO DEL SUSTRATO

A continuación presento los pretratamientos más usados para la biomasa y poder obtener el etanol. El rendimiento de los procesos aplicados se mide como un porcentaje entre el peso inicial y el peso luego del pretratamiento:

- Termoquímico a fibras
- Acido diluido
- Hidróxido de sodio
- Peróxidos de hidrógeno
- Acido acético

Uno de los pretratamientos consiste en reducir los chips de madera en fibras mediante un proceso termoquímico. Este proceso se realiza mediante la inyección de vapor calentando los chips durante 3 min a 145°C y alcanza un rendimiento del 95%. Es decir, por cada kg de chips que se agregan al sistema, el 95% se convierte en fibra por el desgaste sufrido.

En el pretratamiento de ácido diluido, los chips son mezclados con ácido sulfúrico de concentración 0,05M y llevados a una temperatura de 120°C durante una hora, logrando un rendimiento del 91%.

El pretratamiento de hidróxido de sodio arrojó resultados de 83% de eficiencia mezclando la biomasa entrante con una concentración de 0,38M y llevando el sistema a temperaturas de 55°C.

Otros procesos probados fueron los que se usaron peróxidos, en los que se utilizó peróxido de hidrógeno mezclado en distintas proporciones con ácido sulfúrico de similares concentraciones a los anteriores, obteniendo 77% para un agregado del 5% y 49% para una mezcla similar en agua.

Por último, el tratamiento de ácido acético, se realiza con una concentración de éste de 17,4M y 30% de peróxido de hidrógeno, obteniendo como resultado la más baja eficiencia de conversión del 40%.

En resumen, a partir de estos procesos actualmente conocidos y de fácil aplicación, vemos que el que mantiene el mayor rendimiento es el pretratamiento de ácido diluido (ácido sulfúrico), mientras que los más ineficientes son el de ácido acético y peróxido de hidrógeno con agua. Los informes obtenidos indican que se pierde más del 50% del peso insertado al proceso. Esto encuentra su fundamento en que estos pretratamientos liberan a la mezcla radicales hidroxilo ( $\text{HO}^*$ ) y radicales acetato ( $\text{CH}_3\text{COO}^*$ ) respectivamente, los cuales son agentes extremadamente oxidantes tanto para la lignina como para los polisacáridos (celulosa y hemicelulosa).

Sin embargo, al analizar la remoción de lignina dentro de los compuestos se concluye que los más ineficientes son los que han logrado una mayor remoción de la misma. De los estudios realizados, las muestras con los tres primeros pretratamientos (ácido sulfúrico, hidróxido de sodio y el peróxido alcalino) han removido menos del 10% de lignina original presente en el compuesto, mientras que el del ácido acético ha removido prácticamente cerca del 80%.

Este factor de remoción de lignina es importante dado que una alta recuperación del sustrato y remoción de la lignina, implican un proceso eficiente con una baja pérdida de material. En el caso de estos tres pretratamientos de índices altos y bajos respectivamente indican que este proceso ha removido otros componentes de la madera en lugar de la lignina.

### **5.3. HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA**

Como paso posterior al pretratamiento es que se realiza la hidrólisis enzimática. Una enzima es una molécula que tiene como función acelerar el proceso químico de otra molécula, es decir, catalizan las reacciones siempre que sea termodinámicamente posible. Las enzimas no alteran el balance energético de las reacciones donde intervienen, ni modifican el equilibrio de la reacción, pero consiguen acelerar el proceso incluso millones de veces. Esto implica que una reacción que se produce bajo el control de una enzima, o de un catalizador en general, alcanza el equilibrio mucho más rápido que la correspondiente reacción no catalizada.

En el caso de la obtención de etanol a partir de madera, se aplica este proceso para degradar las complejas moléculas de la celulosa en simples cadenas de glucosa.

Este proceso se realiza en un reactor de temperatura controlada y se utiliza el producto pretratado por los procesos anteriores y enzimas como la Celulasa y Beta-glucosidasa en un ambiente de pH ácido. Este proceso se realiza durante dos horas, sin embargo, puede variar su duración por la composición que tenga la biomasa pretratada entrante.

Una vez finalizado el proceso se centrifuga la mezcla y se filtra para eliminar los líquidos participantes del proceso. En estos pasos se debe medir las concentraciones de glucosa y xilosa mediante equipos especiales de monitoreo.

Los resultados vuelven a sorprender como en el pretratamiento. Las muestras pretratadas con ácido acético y peróxido de hidrógeno (ambas de bajo rendimiento en la conversión en peso) fueron aquellas que presentaron mayores concentraciones de glucosa. Esto se debe a la menor presencia de lignina por lo que permitió obtener mayor cantidad de material hidrolizable del reactor de pretratado.

Asimismo, la utilización de enzimas para el caso del ácido acético fue menor a 10 FPU/g de glucosa. La conclusión que se obtuvo con estos pretratamientos, es que los resultados de diversos estudios demuestran que aproximadamente el 95% del contenido de glucosa de las muestras con radicales fue hidrolizado, mientras que aquellos en donde la remoción de hemicelulosa ha sido baja, han provocado una baja conversión a glucosa.

El estudio indica que el análisis con respecto a la concentración de glucosa obtenida al final del proceso es erróneo. Es por ello que se deben comparar las concentraciones de glucosa con respecto al peso con que salieron del pretratamiento. Esto demuestra que la alta concentración obtenida con el pretratado de ácido acético, es muy similar a la obtenida con el peróxido en ambiente ácido por peso del sustrato original. Esto favorece al pretratamiento de peróxido de hidrogeno, el cual tiene también la ventaja de realizarse a una menor temperatura, pero tiene un tiempo de conversión mucho mayor.

Otro resultado de importancia a tener en cuenta para el diseño de estas plantas de tratamiento es que los pretratamientos no mejoran en el tiempo, es decir, obtienen su pico de conversión dentro de las primeras 24hs de dilución, y luego de estas horas los resultados son casi despreciables.

Al ver los resultados de los primeros tres pretratamientos surge la hipótesis de que las altas concentraciones de glucosa en el reactor inhiben las enzimas celulasas aplicadas. Sin embargo, al ver los altos resultados obtenidos por el peróxido en ambiente ácido (últimos dos) se rechaza esta hipótesis.

Sin embargo, el punto fuerte para asumir que la conversión es favorable es la asociación con la fuerte remoción de la lignina dentro de la mezcla aportada. Esto se justifica en

que al remover la capa de lignina aumenta la superficie de contacto con la celulosa para un ataque mayor por parte de las enzimas, favoreciendo el rendimiento del pretratamiento por la mayor obtención de glucosa.

A partir de este proceso resta por explicar la mezcla con levaduras para fermentar los azúcares a etanol y obtener el producto deseado en este proyecto.

#### **5.4. CLOSTRIDIUM THERMOCELLUM**

Luego de haber presentado todos los pretratamientos más conocidos y estudiados, la dificultad que presentan todos estos procesos presentados anteriormente en este trabajo, es que pueden producir la inhibición de algún tipo de reacción, haciendo que sea ineficaz la conversión de azúcares a etanol en algún punto del proceso. Es por ello, que científicos a lo largo del mundo han y están evaluando distintas alternativas para mejorar y eficientizar los procesos de conversión.

Como presenté en la introducción, un avance fue encontrar una única bacteria que realice todo el trabajo de conversión. Esta bacteria tiene el nombre de Clostridium Thermocellum y posee diversas ventajas, entre ellas:

- Puede colaborar con la hidrólisis tanto de materiales con alto contenido de lignina (como lo son las maderas duras pretratadas con ácido diluido) como con los que les ha sido removido.
- En gran escala, la descomposición anaeróbica es una ventaja, dado que proveer el oxígeno necesario para la producción de celulasa en un ambiente de fermentación es uno de los procesos más caros.
- La temperatura de cultivo del organismo es de 60°C, lo que provoca que los problemas de contaminación y uso de energía son disminuidos y el enfriamiento de los fermentadores es mucho más simple.
- Esta temperatura baja con respecto a los otros procedimientos facilita la recuperación del etanol.
- En quinto lugar, estos microorganismos se caracterizan por ser robustos en el sentido microbiológico y contienen enzimas estables.
- Y por último, los anaerobios tienen un rendimiento bajo en células, lo que provoca que un porcentaje mayor del sustrato es convertido a etanol.

#### **5.5. GENERALIDADES. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CADA PROCESO**

Como ya mencioné en la primer entrega de este trabajo, la biomasa celulósica en la década de 1980 costaba \$20 a \$ 30 por tonelada seca, la cual era mucho más barata que

el maíz, que tenía un costo de \$ 110 tonelada seca, sin embargo, el proceso de hidrólisis de la celulosa no era competitivo con el del almidón. El problema es que requieren de un tratamiento previo muy caro. Además, el uso de maíz proporcionaba aceite y proteínas como productos adicionales, que eran de un valor mucho mayor que la lignina para la venta. En 1990, el costo de producción de etanol de celulosa (por *Trichoderma* con levadura) se pensó que era próximo al de la producción de maíz por hongos sin subsidios mediante. Sin embargo, tanto el etanol producido de maíz como el etanol producido a partir de la celulosa se comparaban con los costos de los combustibles líquidos convencionales (naftas). En EEUU el etanol de celulosa tenía un precio de venta de USD 0,36 por litro en 1988, USD 0,31 por litro en 1996, y USD 0,32 en 2003; mientras que para el maíz fue de 0,32 dólares por litro en el 1994, y en el 2001 fue de USD 0,44. No obstante, era necesario un subsidio de 0,13 dólares por litro para competir con las naftas en la década de 1990, USD 0,18 por litro en el 1994, y USD 0,19 por litro se hubieran requerido en el 2000.

De diversos estudios a futuro, con la mejor tecnología aplicada a la biomasa, se prevé que el precio de venta de etanol puro puede llegar a ser de USD 0,13 por litro y en el mejor de los casos podría ser tan bajo como USD 0,09 por litro. Este es un escenario de máxima, pero remarca la posibilidad de que son posibles importantes reducciones de costos y que se podría lograr hacer que el etanol dé competencia en el uso de combustibles para el transporte, reduciendo sus costos por debajo del precio actual de las naftas.

El costo del proceso de *Trichoderma*-levadura es todavía prohibitivo para empezar a desplazar a las petroleras, mientras que para este proceso directo de co-cultivo de clostridios, estas enzimas son de muy bajo costo porque son producidas por los organismos de fermentación durante la producción de etanol. Dicho esto, la fermentación directa de la celulosa en etanol que plantea este proceso podría ahorrar USD 0,13 por litro en comparación con la técnica simultánea de *Trichoderma* y levadura, ya que en este proceso se combina la producción de celulasas, hidrólisis y fermentación en un biorreactor único.

La conversión de aserrín de maderas mezcladas a etanol fue de 2,5 veces mayor en un fermentador continuo con *C. Thermocellum* que con la sacarificación y fermentación simultáneas utilizando celulasa de *Trichoderma*,  $\beta$ -glucosidasa, y *S. cerevisiae*. Además, la tasa de conversión resultó ser cuatro veces mayor. Los cultivos mixtos de bacterias anaeróbicas termófilas ofrecen amplia posibilidad de reducción de costos de producción en la conversión de la ligno-celulosa a etanol. Con recursos dedicados a la investigación y producción en escala de estas bacterias, a la transformación de la agricultura, a bosques, y a los recursos urbanos, el etanol podría convertirse en un sustituto económico de los combustibles obtenidos del petróleo mientras éstos mantengan un precio mayor a USD 30 por barril (hoy está en 80 USD promedio el barril).

Esta nueva tecnología podría proporcionar una salida rentable para esta energía renovable antes de esperar que el otro proceso (Trichoderma-levadura) pueda resultar económico.

La reducción de costos de la nueva bacteria se refleja en el hecho de realizar una conversión directa de clostridios, lo que se traduce en la eliminación de capital o gastos de funcionamiento para la producción de enzimas, amplia reducción de sustrato para la producción de las mismas y, por último, enzimas y sistemas de fermentación compatibles. Todo esto refleja la amplia posibilidad que tiene el etanol frente a los actuales combustibles en conjunción con el balance positivo de reducción de CO<sub>2</sub>.

## 5.6. FERMENTACIÓN

Una vez alcanzadas las mayores concentraciones de azúcares del pretratamiento y la hidrólisis es que pasamos a la transformación a etanol propiamente dicha. Este proceso se llama de fermentación y consiste en realizar un proceso biológico de los azúcares mediante levaduras o bacterias y obtener como producto el etanol. Este proceso es ampliamente utilizado y bien conocido, siendo un ejemplo de fermentación: la producción de la cerveza. La fórmula química que presento a continuación simplifica este proceso:



Figura 5.3. Esquema de conversión de glucosa a etanol

Como se puede ver, por cada molécula de glucosa se obtienen 2 de etanol y 2 de CO<sub>2</sub>. En función de la fórmula química teóricamente, cada 100 gramos de glucosa se generarían 51,4 gramos de etanol y 48,8 gramos de CO<sub>2</sub>. Esto se debe a que la glucosa tiene mayor peso molar que el etanol y el dióxido de carbono. Sin embargo, dado que las bacterias utilizan parte de la glucosa para crecer, esta relación química no produce el 100% de los resultados anteriores.

El proceso de conversión bacteriológico es el cual se está incidiendo mayormente, dada su ventaja de rápida conversión con respecto a las levaduras (método tradicionalmente usado por la cerveza). Una bacteria puede transformar en minutos materia celulósica con alta eficiencia, mientras que las levaduras lo hacen en horas y con menor eficiencia. Estas bacterias son la ya mencionada como *Clostridium Thermocellum* y también *Z. Mobilis*. De la primera ya hablamos, y la segunda, es una bacteria de amplia difusión en el rubro y crece en un proceso de varios pasos germinada a través de la fermentación de semillas en un reactor.



**Figura 5.4.** Fermentadores

Los estudios científicos se están volcando a la primer bacteria y a otras de obtención más económica para poder llevar a cabo el proceso.

Con la primer bacteria, ya expliqué que el proceso no tiene equipos adicionales con lo cual el proceso se completa en el mismo reactor que la bacteria crece, rompe la estructura de la biomasa y fermenta los azúcares. En cambio, la segunda bacteria, del reactor donde crece se debe incorporar en la línea de reactores fermentadores para poder producir el etanol en varios pasos. Este proceso es considerado el proceso de hidrolización y fermentación, dado que a pesar de las bajas temperaturas que deben tener los fermentadores por la T° de evaporación del etanol, las enzimas que aún permanecen en la mezcla pueden seguir hidrolizándola para incrementar la eficiencia del proceso. El etanol obtenido es bombeado a la torre de destilación.

La levadura más conocida para fermentar el proceso es “*Saccharomyces cerevisiae*”, también conocida como “levadura panificadora” dada su utilización en panificadoras.

A continuación presento los rendimientos para la glucosa (C6) y la xilosa (C5) obtenidos de un estudio.

Ethanol yield from glucose.	
Dry stover	1 tonne (1000 kg)
Cellulose content	× 0.45
Cellulose conversion and recovery efficiency	× 0.76
Ethanol stoichiometric yield	× 0.51
Glucose fermentation efficiency	× 0.75
Yield from glucose	131 kg ethanol = 151 L (40 gallons)

Ethanol yield from xylose.	
Dry stover	1 tonne (1000 kg)
Hemicellulose content	× 0.29
Hemicellulose conversion and recovery efficiency	× 0.90
Ethanol stoichiometric yield	× 0.51
Xylose fermentation efficiency	× 0.50
Yield from xylose	66 kg ethanol = 76 L (20 gallons)

**Tabla 5.1.** Rendimiento de la glucosa y la xilosa.

Fuente: NREL

En conclusión, con los métodos actuales y descritos en este trabajo, por cada 1000kg de biomasa obtendríamos 227 litros de etanol, es decir, tendríamos 22,7% de eficiencia. Existen algunos lineamientos para utilizar el dióxido de carbono obtenido en un fermentador, que junto al hidrógeno se puede generar etanol.

Dado el valor representativo de etanol que se obtiene a partir de la hemicelulosa (compuesto de carbono 5), se tiende a procesar también la hemicelulosa para poder hacer el proyecto económicamente viable.

Esta necesidad plantea el desarrollo de bacterias que puedan procesar cadenas de carbono 6 y 5, es decir, los derivados de la celulosa (glucosa) y la hemicelulosa (xilosa). Actualmente, la bacteria más prometedora es la que se llevó la patente de US número 5.000.000, y es un organismo desarrollado que combina dos bacterias conocidas *Escherichia Coli* y *Zymomonas PDC*. La primera reside en la mayoría de los organismos digestivos animales y se encarga de romper los azúcares de las paredes celulares y convertirlos en ácido pirúvico. Aquí es cuando entran en acción las características de la segunda bacteria, la cual puede convertir este ácido en etanol, dejando en total un residuo del 20% en peso del volumen tratado. Este residuo, al igual que los otros procesos, puede ser quemado para producir vapor. Según los investigadores, este organismo bacteriológico puede tratar cualquier tipo de biomasa y promete ser un proceso económico.

Las condiciones de operación hoy logradas para el proceso de fermentación son las siguientes:

Temperature	65°C
Initial Saccharification Solids Level	20% total solids
Residence Time	1.5 days
Size of Vessels	3,596 m <sup>3</sup> (950,000 gal) each
Number of Vessels	5
Number of Continuous Trains	1
Cellulase Loading	12 FPU/g cellulose

**Tabla 5.2.** Condiciones actuales de fermentación

La cantidad de enzima agregada se determina en función de la presencia de celulosa en el reactor de hidrolizado, y el rendimiento de la conversión está dado por el tiempo de residencia (permite una mejor acción por parte de las enzimas) en los reactores de hidrolizado y en los fermentadores en conjunto.

La tabla 5.3 brinda las reacciones que se llevan a cabo en el reactor para el hidrolizado:

Reaction	Reactant	Fraction Converted to Product
$(\text{Glucan})_n \rightarrow n \text{ Glucose Oligomer}$	Glucan	0.04
$(\text{Glucan})_n + \frac{1}{2}n \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}n \text{ Cellobiose}$	Glucan	0.012
$(\text{Glucan})_n + n \text{ H}_2\text{O} \rightarrow n \text{ Glucose}$	Glucan	0.90
$\text{Cellobiose} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ Glucose}$	Cellobiose	1.0

**Tabla 5.3.** Reacciones en el reactor. Descomposición

Fuente: NREL

Mientras que la próxima tabla señala las reacciones llevadas a cabo en los fermentadores. Esta tabla muestra el crecimiento de los microorganismos y el cambio de los azúcares.

Reaction		Reactant	Fraction Converted to Product <sup>38</sup>
Glucose	→ 2 Ethanol + 2 CO <sub>2</sub>	Glucose	0.90
Glucose + CSL + 0.018 DAP	→ 6 <i>Z. mobilis</i> + 2.4 H <sub>2</sub> O + 0.3 O <sub>2</sub>	Glucose	0.04
Glucose + 2 H <sub>2</sub> O	→ 2 Glycerol + O <sub>2</sub>	Glucose	0.004
Glucose + 2 CO <sub>2</sub>	→ 2 Succinic Acid + O <sub>2</sub>	Glucose	0.006
Glucose	→ 3 Acetic Acid	Glucose	0.015
Glucose	→ 2 Lactic Acid	Glucose	0.002
3 Xylose	→ 5 Ethanol + 5 CO <sub>2</sub>	Xylose	0.80
Xylose + 0.835 CSL + 0.015 DAP	→ 5 <i>Z. mobilis</i> + 2 H <sub>2</sub> O + 0.25 O <sub>2</sub>	Xylose	0.04
3 Xylose + 5 H <sub>2</sub> O	→ 5 Glycerol + 2.5 O <sub>2</sub>	Xylose	0.003
Xylose + H <sub>2</sub> O	→ Xylitol + 9.5 O <sub>2</sub>	Xylose	0.046
3 Xylose + 5 CO <sub>2</sub>	→ 5 Succinic Acid + 2.5 O <sub>2</sub>	Xylose	0.009
2 Xylose	→ 5 Acetic Acid	Xylose	0.014
3 Xylose	→ 5 Lactic Acid	Xylose	0.002

**Tabla 5.4.** Reacciones en los fermentadores. Descomposición

Fuente: NREL

Ambos procesos son difíciles de determinar su tiempo por el simple motivo de que las enzimas se desarrollan durante el hidrolizado y fermentado. Cabe recordar que la conversión no es 100% estequiométrica dado que las bacterias consumen azúcar para su reproducción. Esto significa que mientras las enzimas rompen la estructura molecular de la celulosa, las levaduras comienzan con el proceso de fermentación de los azúcares para obtener el etanol. Es por ello, que en el instante que las enzimas lograron el hidrolizado completo y que se debería pensar en el comienzo de la fermentación, las levaduras ya han estado trabajando y el etanol ya está presente en la mezcla.

El valor de 12 FPU/g (filter paper units o unidades de papel de filtro) por gramo de celulosa está asumido por el proyecto bajo la adición de enzimas con concentración de 50 FPU/ml.

La segunda tabla explica claramente el consumo de glucosa u otros azúcares para otros co-productos que no son el etanol. Además debemos considerar que los procesos no son ideales y que tanto los materiales como los equipos pueden estar contaminados de otros componentes que afecten el proceso. Se considera que para efectos del diseño del presente proyecto y obtenido de experiencia, el 3% de los azúcares ingresados y obtenidos en el sistema son perdidos por esta contaminación.

En cuanto a diseño, los fermentadores no necesitan estar a altas temperaturas como sí lo necesita el hidrolizado. Al final de la línea de hidrolizado y de los fermentadores se encuentra un tanque de recepción de la mezcla para permanecer estática y terminar el proceso de fermentado. Al fondo del tanque se deben colocar depuradores para cualquier partícula que pueda sedimentarse. En este tanque la mezcla debe permanecer

un tiempo no menor a 4 horas, y su utilidad adicional es que se utiliza como “buffer” entre la fermentación y la destilación.

## 5.5. DESTILACIÓN

La destilación es uno de los últimos procesos y, al igual que la fermentación, ya es conocido en el proceso de la cerveza. Este proceso se utiliza para recuperar el etanol de la mezcla obtenida, separándolo de los materiales presentes en la misma logrando una concentración de 99,5% de etanol para su posterior envasado y venta.

Para el caso de una planta de etanol de celulosa, la destilación se produce en dos pasos, en la cual se remueve el CO<sub>2</sub> y un alto porcentaje de agua como primer paso, mediante evaporación. El agua se elimina por el fondo del evaporador en un 90% y el flujo de vapor se ventea por encima del depurador con porcentajes aproximados de 83% de CO<sub>2</sub>, 13% de etanol y 4% de agua. En este depurador el CO<sub>2</sub> en su totalidad y un pequeño porcentaje de etanol son separados mientras que gran parte de éste es recuperado en este depurador. En segunda instancia se le aplica un evaporador que lleve al etanol a un estado azotrópico en el cual sea imposible de separarlo de otros líquidos y no pueda ser separado por destilación. A partir de este proceso se aplica vapor para absorber la fase no deseada y separar el etanol. Para ello, se calienta nuevamente la fase y se bombea a una columna de absorción, donde se remueve el 95% del agua remanente y un pequeño porcentaje de etanol. El 99,5% de éste en estado ya puro es enfriado y bombeado para almacenaje. El agua absorbida es devuelta al proceso.

De la primer fase se obtienen productos sólidos disueltos en la mezcla del tanque buffer. Estos son secados por filtros a presión y pueden ser combustionados. El líquido separado en el filtro (aproximadamente 25% de lo ingresado al sistema) se hace pasar por intercambiadores de calor con el calor no usado en la destilación, formando un jarabe de alta concentración. . De estos sólidos obtenidos mezclados con el jarabe podemos obtener la energía necesaria mediante combustión para generar vapor y mover una turbina, generando electricidad y auto-sustentando la planta.

El material recomendado para todos los reactores, cañerías, válvulas, intercambiadores es acero 304L. En caso de aplicar mayores concentraciones de ácido sulfúrico en el pretratamiento, en conjunción con el calor, se deberá considerar aceros menos susceptibles como el 316L, o ya empezar a considerar algún tipo de aislación interna del caño mediante algún material no reactivo.

El vapor considerado en este proceso se debe realizar mediante una caldera. Las mismas pueden fabricar vapor a través de distintos combustibles y con distintas eficiencias. Las calderas pueden ser acuotubulares o piro-tubulares, en que reciben su nombre de acuerdo

al material que transportan por caños. Las primeras transportan agua para convertir a vapor y las segundas circulan gases a altas temperaturas. Básicamente su funcionamiento es a través de intercambio de calor entre los caños y el área por la que circulan. En las acuotubulares (las más utilizadas), el calor puede venir de la incineración de material combustible sólido o inyectando líquido o gas y combustionándolo. Éstas son las recomendadas en este proyecto por inyectarle al proceso biomasa, que (como vimos en el proceso) tenemos material de desperdicio que puede ser usado mediante su incineración para el funcionamiento de la misma. No es tema de importancia en este proyecto, por lo que no será contemplada una explicación más exhaustiva de la misma. Adjunto en el anexo un flujograma de una caldera acuotubular y una breve explicación para mayor detalle.

## **5.6. ALMACENAMIENTO DE MATERIAS PRIMAS Y ADICIONALES**

Debe considerarse en todo proyecto la necesidad de almacenamiento de materias primas y producto terminado contemplando en su totalidad el sistema necesario para el funcionamiento de la planta. Con esto quiero decir que a modo de simplificar hasta aquí he explicado el funcionamiento de la planta de etanol de celulosa considerando los procesos y equipos fundamentales. Sin embargo, se necesita especificar y remarcar durante el diseño la importancia que tiene disponer de Tanques de almacenamiento de materias primas y producto terminado, bombas, cañerías, válvulas, CCM (centro de control de motores), conexión eléctrica y de señales, etcétera. Es necesario contemplar todo esto en el diseño ya que los mismo brindarán dificultades en las interconexiones, en su disposición física, en la seguridad de la planta y en el correcto funcionamiento de la misma.

No hay una forma o formula para determinar estos equipos o la disposición de los mismo para este proyecto ya que los equipos, la tecnología y los costos varían de país en país y el espacio físico depende del terreno y del equipo de construcción y diseño, con lo cual al momento del diseño y construcción se debe contemplar esta maquinaria y su tipo contemplando todas las características hasta aquí dichas a lo largo del proyecto.

En resumen, los materiales a almacenar son Etanol, Ácido sulfúrico, enzimas de celulosa, agua para proceso y protección de incendios.

La planta ejemplo considerada hasta aquí puede brindar con este proceso un rendimiento de 650m<sup>3</sup> de etanol diarios. Para ello, asumimos que debemos disponer de tanques para poder almacenar mínimamente 7 días de producción o 4540m<sup>3</sup> de etanol. Esto es para poder cumplir con la demanda y prevenir posibles complicaciones en el día a día de la operación. Los tanques disponibles para esta cantidad son de acero al carbono y mínimamente deben ser 3.

El ácido sulfúrico se almacena con 5 días de operación lo que corresponde al almacenamiento de  $72\text{m}^3$  del mismo. En el mercado existen tanques de  $100\text{m}^3$  de acero inoxidable 316L de dimensiones aproximadas en 4m de base por 8m de altura. El tanque debe ser de acero 316L debido a que el material almacenado es altamente corrosivo, al igual que la cañería, válvulas, reactor, fermentadores, bomba, etc.

Las enzimas de celulosa se almacenan con 4 días de stock en estado líquido o el equivalente a  $100\text{m}^3$ . Cabe recordar que las mismas son producidas mismo en la planta o en un fabricante próximo a la planta, lo cual será un factor limitante al momento de considerar la localización de la planta. Los tanques pueden ser de acero inoxidable 304L y de volumen  $500\text{m}^3$ .

El agua contra incendio es almacenada en tanques de grandes dimensiones. Dado esto, el material que asumimos para la construcción posible es de acero al carbono dado que debe ser construido in situ. El flujo que debe considerarse por la dimensión es de  $568\text{m}^3$ .

Nuevamente recalco que no hay un estándar definido y todos los metros de cañería, tanques disponibles, bombas, actuadores y demás será reevaluado en la etapa de diseño y construcción del proyecto, pero cumpliendo con las características de los materiales dichos hasta aquí.

## **5.7. GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD – AUTO SUSTENTABILIDAD**

La hemicelulosa y la lignina separada en el proceso de hidrolizado es material combustible. Estas plantas generan la idea y posibilidad de poseer un proceso sustentable en el cual los propios residuos generen la electricidad necesaria para fabricar el etanol. Para ello se necesita de equipos en los cuales se puedan quemar estos residuos para calentar agua y generar electricidad mediante el vapor obtenido del proceso anterior.

Estos equipos son ya utilizados por las industrias o por las empresas termoeléctricas para generar vapor o mismo para generar electricidad. Estos equipos son conocidos como calderas y turbinas. Las calderas pueden ser acuotubulares o piro-tubulares, según el fluido que circule por las cañerías. Las más seguras son las acuotubulares, dado que las segundas por problemas de diseño han estallado por la presión de los gases calientes.

Básicamente, el funcionamiento de una caldera acuotubular consiste en triturar el combustible sólido para aumentar la superficie de contacto con el oxígeno y por el diseño del ingreso al sistema. Para visualizar una caldera referirse al anexo I. En este

proyecto tenemos la lignina y la hemicelulosa separadas en el proceso de hidrolizado. La concentración en sólidos sacados del proceso es de 52% aproximadamente. Este sistema inyecta los residuos triturados a un combustor en el cual por temperatura del medio incinera estos residuos. Los vapores generados calientes circulan a modo de chocar con un intercambiador en el cual circula agua. En esta transferencia de calor es que se genera el vapor y se obtiene por una boquilla especialmente diseñada para atrapar las gotas líquidas no convertidas a gas. A los gases de la combustión se los hace pasar por este intercambiador de manera que cedan la mayor parte del calor hacia el agua para mejorar la eficiencia del equipo, continuando su camino hacia la chimenea de escape, en la cual se capturan partículas contaminantes del medio ambiente.

El vapor generado ya completamente en su fase gaseosa se lo envía a una turbina de multietapas. Esta turbina tiene distintos tamaños paletas que reciben el vapor a alta presión a través de toberas especialmente dispuestas para aprovechar al máximo el flujo. Esta turbina transforma esta presión y movimiento tangencial en un rotor. Este rotor se conecta a un generador que mediante inducción en un campo magnético genera electricidad.

La turbina se la considera multietapa, dado que el vapor al chocar con las paletas pierde presión, por lo que al querer inyectarlo nuevamente se requiere de una superficie más grande para el mismo efecto. En el diseño de la planta se debe contemplar que el vapor se extrae en 3 condiciones y se reinyecta al proceso de pretratamiento y para intercambiar calor en la destilación y evaporación. El vapor condensado es enviado de vuelta al intercambiador para volver al ciclo mencionado.

Los valores que se pueden obtener de este proceso para justificar el mencionado de “planta auto-sustentable” es generar 30MW a través de estos residuos. El consumo de la planta puede variar, como dijimos en función de los equipos y modelos que se usan, pero en total y de manera aproximada con lo dicho hasta aquí, debe rondar los 12MW, dejando 18MW para la red eléctrica. Estos valores no sólo abren una perspectiva de planta auto-sustentable, sino que también genera un escenario favorable de generación de energía en dos ámbitos a través de una materia prima abundante: combustible para transporte y electricidad para consumo.

## **5.8. RESUMEN DEL SEGUNDO CAPÍTULO**

Variando los procesos y distintas alternativas aún en investigación es que encuentro como común denominador los siguientes procesos:

Hidrólisis Enzimática: Ruptura de las moléculas mediante enzimas y simultánea sacarificación y posterior fermentación: Los pasos en la conversión de materiales

celulosos a etanol en este proceso incluye el pretratamiento, la conversión biológica, la recuperación de producto y el tratamiento de los co-productos y residuos. Este proceso combina, como expliqué a lo largo de esta segunda parte, la hidrólisis y la fermentación en un solo reactor, haciendo que los azúcares generados se fermenten directamente a etanol, eliminando los problemas de acumulación de azúcares e inhibición de enzimas.

Hidrólisis mediante ácido diluido: Este proceso, como se dijo, utiliza bajas concentraciones de ácido y altas temperaturas en el proceso de la biomasa celulósica. La materia prima es tratada con 0,5% de ácido diluido y calentado a 200°C para hidrolizar la hemicelulosa y permitir una mejor área de exposición de celulosa para hidrolizar. Brevemente, la hemicelulosa se convierte a pentosa (azúcares de cadenas de carbono cinco como la arabinosa y la xilosa) que son fermentadas a etanol y destiladas. Los sólidos remanentes como la celulosa y la lignina, entran en una segunda fase de hidrolización, donde la celulosa es convertida a glucosa con 2% de ácido diluido y a 240°C. Los azúcares resultantes del proceso son fermentados y luego destilados.

Hidrólisis de altas concentraciones de ácido: El proceso utiliza altas concentraciones de ácidos halogenados y a temperatura ambiente para convertir la celulosa en azúcares. La alta eficiencia de la hidrólisis de la celulosa se logra en una mezcla con 40% en peso de ácido clorhídrico, 60% de ácido sulfúrico o 90% en peso de ácido fluorhídrico. El primero es el único en fase comercial.

La materia de proceso (madera) es pretratada con 10% en peso de ácido reciclado de la hidrólisis de celulosa. Este pretratamiento convierte la hemicelulosa en azúcares C5 y C6 (cadenas de carbono cinco y seis), y posteriormente el ambiente ácido resultante y el azúcar presente es separado, neutralizado fermentado y destilado. Estos sólidos al igual que el anterior proceso, entran en una segunda fase de hidrolización y son mezclados con ácido en concentraciones entre 40 y 90% en peso dependiendo cuál de los tres mencionados anteriormente es utilizado. La celulosa es convertida en azúcares C6 (glucosa) y en otro paso de conversión, se recicla el líquido con concentraciones de 10% de ácido y 10% de glucosa para el pretratamiento. El resto de los sólidos (desechos) se lavan, se secan y pueden ser utilizados como combustibles para generación de electricidad.

Podemos afirmar que la celulosa se encuentra ya en una posición favorable para la entrada en la fase comercial. Para esto, se debe continuar con investigaciones más arduas para efficientizar el proceso y hacerlo rentable en comparación con los existentes (naftas y etanol a partir de fuentes de comida). En relación a esto, también se deberían aplicar políticas que impacten en el desarrollo de estas fuentes y favorezcan el ingreso de estas tecnologías renovables y de poca incidencia a futuro en los alimentos. Con esto quiero decir, que se debería concientizar que el combustible es necesario pero no se debe obtener de comida o cultivos que afecten el cambio climático. El maíz y la caña de

azúcar amplían sus horizontes de cultivo en contra de las delimitadas zonas arboladas de nuestro planeta, afectando principalmente a la captura de CO<sub>2</sub> y, por ende, al calentamiento global.

Este problema planteado, también se justifica simplemente con el uso racional de energía que aplican los países. Generar etanol a través de maíz, demanda grandes cantidades de energía eléctrica, que se traduce en que gran parte del combustible generado tiene como destino final su misma generación, en vez de ser usado en medios de transporte, desperdiciando grandes áreas de cultivo y alimento en su propia generación.

Demostre que esta planta puede ser auto-sustentable y además abastecer de electricidad a la red eléctrica en grandes cantidades. Además es importante realizar un proceso en el cual se incluya la hemicelulosa para obtener mayor etanol y poder hacer frente a los costos de operación. El proceso más eficiente a la actualidad es el de ácido diluido y el análisis de localización y económico-financiero se basará en este tipo de planta.

## **VI. ESTUDIO DE LOCALIZACIÓN**

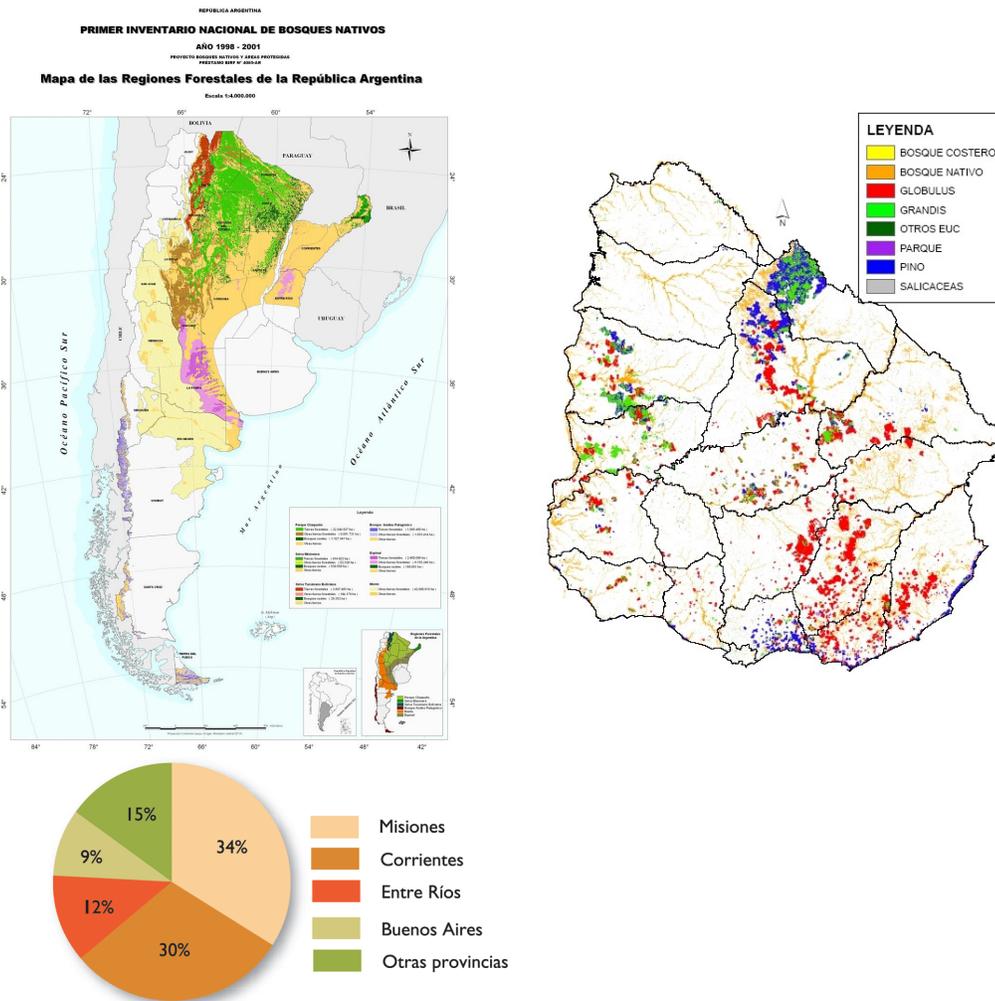


## 6.1. LOCALIZACIÓN

Es fundamental para la localización de una planta de celulosa contar con grandes volúmenes de materia prima a un costo bajo, para poder hacer frente al precio competitivo de las naftas. Para ello un punto fundamental es la instalación en zona de empresas de celulosa y pasteras. Dado que se cuenta con infraestructura y amplia disponibilidad de residuos de celulosa, así como también de zonas forestales en la proximidad.

Otro factor a tener en cuenta es la disponibilidad de agua, ampliamente utilizada en la caldera y los procesos de pretratamiento, hidrolizado y destilación.

El mercado demandante también es un punto crítico para saber qué mercado se va a abastecer y por ende pensar en exportaciones, regulaciones, permisos, etc.



**Figura 6.1.** Carta forestal para Argentina y Uruguay

En la comparativa de dos países, nos encontramos que ambos tienen posibilidades para la construcción de la planta en cuestión. En cuanto a zonas forestales, la Argentina cuenta con una amplia producción e incentivo subsidiario en las provincias de Misiones y Corrientes, mientras que Uruguay cuenta con la zona de Paysandú que es conocida como el epicentro de la actividad forestal, mientras que en el norte se incentiva la caña de azúcar en conjunción con forestación.

El vecino país, además, posee un fuerte incentivo al sector forestal dado que al no poseer red de distribución de gas, el principal medio es la leña.

Además, como ya dije anteriormente, Uruguay no posee hidrocarburos de ningún tipo, por lo que en reemplazo del gas utiliza la leña y necesita dejar de depender de Argentina y Brasil para importar naftas. La red energética de Uruguay se encuentra en problemas dado que no poseen gas o gasoil para generar electricidad a partir de centrales termoeléctricas y como por Ley está prohibida la instalación de centrales nucleares, la única forma de tener electricidad es mediante la importación o carbón vegetal o leña. Se sabe de experiencias pasadas que este pequeño país no puede depender de Argentina o Brasil para satisfacer su creciente demanda energética a un ritmo de 50MW/año.

En Uruguay, históricamente la demanda de leña ha sido el principal factor que determinó los niveles de extracción de madera en este país. La leña llegó a representar alrededor del 90% del volumen anual de producción de madera, fundamentalmente como consecuencia de la crisis petrolera mundial de los '70. Es por esto, que Uruguay tiene la postura de instalar zonas forestales e incentivar la instalación de plantas industriales de celulosa que generen electricidad a la red y, de ser posible, plantas industriales de etanol como se plantea en este proyecto.

En Argentina, especialmente en la zona del norte de Corrientes se generan residuos forestales por más de 5 millones de toneladas anuales. El procedimiento actual de eliminación de estos residuos es el de apilarlos y quemarlos cerca de las plantaciones o aserraderos. Esto tiene tres desventajas. La primera es que los suelos quemados tienen un tiempo prolongado (mínimo 3 años) para recuperar sus características productivas. La segunda y relacionada con el proyecto es que se la materia prima con la cual se podría generar etanol se está quemando sin propósito alguno: generación de etanol o electricidad a través de una caldera. La tercera desventaja es que emite a la atmósfera aproximadamente 2,5 millones de toneladas de carbono favoreciendo el cambio climático y contradiciendo lo propuesto en el Tratado de Kyoto y Copenhague.

Para brindar un aspecto económico, el país derrocha 150 millones de dólares por año, valor que al Estado le representa 10 veces el costo de promoción de las plantaciones forestales a través de lo impuesto en la Ley 25.080. Esto se debe a que el país no considera esta actividad por considerarla poco representativa frente a la estructura del

país (la soja es la principal actividad en la actualidad), y, en consecuencia, se identifica la ausencia de un plan forestal nacional y un plan de reemplazo de hidrocarburos.

Dicho todo esto, el análisis macro para uno u otro país se centrará en dos localizaciones:

- En Argentina, Corrientes o Misiones
- En Uruguay, Paysandú

Para empezar a brindar aspectos técnicos que fácilmente determinen la macro-localización es que adjunto la siguiente tabla.

País	Superficie terrestre (miles de ha)	Superficie bosques naturales (miles de ha)	Porcentaje bosques naturales de la superficie terrestre (%)	Plantaciones (miles de ha)	Porcentaje bosques plantados de la superficie terrestre (%)
Argentina	278,040	31,792	11.4	1,229	0.4
Brasil	851,488	475,314	55.5	5,384	0.6
Chile	75,663	13,460	17.8	2,661	3.5
Paraguay	40,675	18,432	45.3	43	0.1
Uruguay	17,622	740	4.2	766	4.3

La Argentina proporciona una gran ventaja con respecto a Uruguay analizando en términos de recursos forestales. Agregando el volumen de cultivos agrícolas, Argentina posee un volumen global de 84,5 millones de toneladas, mientras que Uruguay sólo produce 4,2 millones de toneladas. Esto implica que los cultivos lignocelulosos son mayores en Argentina y además presenta grandes cantidades de territorio para fomentar estos cultivos, como vimos en el cuadro anterior.

La necesidad de modificar la estructura energética es un poco mayor en Uruguay, pero no debemos descartar que nuestro país importe gas ya sea por Bolivia o mediante un buque conectado en el gasoducto marítimo de Bahía Blanca, pagando excesivos precios. Las naftas han estado aumentando de precios, lo que provocó la preocupación y el fomento de toma de acciones para evitar la dependencia en los hidrocarburos. Es por ello que ya hoy, Argentina produce biodiesel a través de oleaginosas.

En relación con el mercado, además de lo dicho anteriormente, tanto las dos provincias argentinas como el departamento de Uruguay presentan cercanía logística al mercado sur de Brasil, en el cual se necesita de etanol para satisfacer el corte obligatorio impuesto por ley como vimos en el primer capítulo.

En cuanto a infraestructura, tanto Paysandú como Misiones presentan un panorama desarrollado. Corrientes queda un poco por detrás, aunque es una provincia argentina que ha crecido mucho en los últimos tiempos por los cultivos agrícolas. Ambos países tienen deficiencia en su sistema ferroviario con lo cual el transporte es terrestre, no presentando diferencias significativas entre uno y otro.

Es por todo lo dicho hasta aquí que voy a seleccionar Argentina y más específicamente Misiones por el hecho de poseer mayor disponibilidad de recursos, fácil accesibilidad del resto de las provincias y cercanía al mercado de Brasil.

## **6.2. MICRO-LOCALIZACIÓN**

En la sección anterior quedó definida la macro-localización de la planta en la provincia de Misiones. En la presente, se realizará un análisis más detallado sobre las distintas posibilidades que pueden surgir dentro del territorio misionero.

La provincia de Misiones tiene un amplio potencial forestal y, así como el país, exporta celulosa y papel. La ventaja de esta provincia es la cercanía del mercado brasilero fundamentalmente y su capacidad forestal por tierras favorables.

Además, la provincia tiene como principal actividad la agroindustria en la cual se procesa la Yerba Mate y el Té, Arroz, Mandioca y Maíz. Todos estos procesos generan residuos celulósicos aprovechables para este proyecto. Vale la pena recalcar que también existe un ingenio azucarero en San Javier, lo que adiciona el bagazo al proceso, que es el residuo de esta industria.

La provincia se encuentra rodeada de cinco ríos, de los cuales son conocidos el Paraná, el Uruguay y el Iguazú. Además al presentar gran cantidad de hectáreas de Selva Misionera (aproximadamente el 35% del territorio), la provincia presenta un clima húmedo (humedad del 75 al 90%) y con altas precipitaciones favoreciendo la actividad forestal y agrícola. Este clima evita la inserción de la Soja en la provincia dado que el cultivo principal del país requiere de climas más secos.

En cuanto a transporte la provincia posee transporte terrestre como principal, siendo las rutas 12 y 14 las más conocidas por su trayectoria hasta la Capital Federal de nuestro país. La ruta 14 es la denominada “Ruta del Mercosur” por su densidad de tránsito hacia Brasil, Paraguay y Uruguay. La ruta 12 es la ruta que une los pueblos del Norte de la provincia con la capital provincial (Posadas) y continúa hacia Brasil y Paraguay arribando a la triple frontera.

Las empresas ferroviarias son privadas y se encuentran en deterioro. El tren que arriba a Buenos Aires parte desde Posadas y es meramente de pasajeros.

El río Paraná constituye una ruta acuática importante que permite el transporte de productos desde Misiones. Por la situación geográfica los pueblos del Norte tienen

puertos sobre este río. Se estima que en un plazo futuro el costo del flete desde Misiones hasta Buenos Aires será de aproximadamente US\$ 7 por tonelada.

La red eléctrica se distribuye por la ruta 12, siendo punto de conexión para empresas generadoras algún pueblo ubicado sobre esta ruta. La ruta 14 tiene recorrido por reservas naturales de la selva misionera con lo cual, instalar una fábrica como la planteada en este proyecto traería sobrecostos por el transporte y problemas con los equipos medioambientales por falta de información y por llegar a considerarla una rama favorable para el incentivo a la deforestación.

Además de la información recabada, se afirma que las industrias se instalan a la vera de la ruta provincial N°12 por estos motivos mencionados, siendo el principal polo industrial de la provincia la ciudad capital de Posadas.

Analizando la información dicha hasta aquí y ubicando ciudades a lo largo de la ruta 12 y próxima al Río Paraná encontré varias alternativas que iré analizando individualmente. Las mismas son: Posadas, Jardín América, Eldorado, Puerto Iguazú.

### **Ciudades de Misiones:**

- **Ciudad de Posadas (capital):** Geográficamente se la considera la puerta de entrada a la provincia. Cuenta con el 29% de la población provincial (252.981 habitantes). La principal actividad industrial de esta ciudad son los aserraderos, mientras que las restantes y no menos importantes para este proyecto, son fábricas de terciados, láminas, muebles y aberturas, tabacaleras, y molinos de yerba mate y arroz, y una bio-fábrica, que clonará plantines de algunos árboles y cultivos. Es la única ciudad de la provincia que cuenta con un parque industrial. Todo este polo industrial favorece la instalación de esta fábrica de etanol.

La ciudad posee cuatro medios de transporte, siendo la ruta terrestre ya mencionada uno de ellos. Otro medio es el tren que arriba sólo a esta ciudad en la provincia y es conocido por ser únicamente de pasajeros. Posee un aeropuerto que es el que presenta mayor movimiento luego del de Iguazú. Además se encuentra a la vera del río Paraná el cual brinda una ruta marítima disponible hoy no aprovechada. En la actualidad, Misiones está creando planes para crear puertos y volver a utilizar esta ruta marítima principalmente utilizada por buques paraguayos. Uno de estos planes es crear un puerto localizado 50km al norte de la ciudad capital.

- **Ciudad Eldorado:** La industria maderera es la principal actividad económica en esta ciudad de 47.556 habitantes, por el hecho de contar con la instalación de 70 aserraderos. La industria yerbatera está poco desarrollada en esta ciudad, pero

sin embargo existen establecimientos de este producto contando con secaderos y molinos yerbateros.

La instalación de los aserraderos en la ciudad ha fomentado la forestación de pino y eucalipto en la zona próxima al conurbano para abastecer a la demanda local de esa ciudad.

La ciudad exporta dentro de la misma provincia o a Brasil y Paraguay varios productos derivados de la industria maderera o hasta mismo la madera en sí para producir papel.

Esta ciudad es atractiva por su gran oferta de madera zonal y grandes volúmenes de residuos por parte de los aserraderos (materia prima por excelencia de este proyecto). Además, su ubicación sobre la ruta 12 y cercanías de industrias arroceras, ingenios azucareros y mercado de exportación de etanol como el brasilero, hacen de la ciudad una atractiva oportunidad para inversión de este proyecto.

- **Ciudad Puerto Piray:** Esta ciudad es conocida por la instalación de una planta de celulosa a orillas del Río Paraná. A pesar de que la empresa asegura tener los certificados internacionales de disposición e impacto ambiental, medioambientalistas y vecinos aseguran que ocasiona una gran contaminación al ecosistema lindante.

A su vez, en esta ciudad también se encuentra el aserradero más grande y moderno de Argentina de la empresa Alto Paraná SA. Estas dos empresas justifican el asentamiento de tan sólo 8.557 habitantes que se censó en la localidad.

Esta urbe es atractiva por la infraestructura ya presente para el tratamiento de madera, sin embargo, la baja densidad de población y los problemas medioambientales pueden generar problemas para la instalación de este proyecto. No se va a favorecer negocios que no tengan certificados medioambientales o de proceso, ya que puede impactar negativamente en esta nueva industria.

- **Ciudad de Montecarlo:** Con una población de 16.300 habitantes, esta ciudad del centro de Misiones y a orillas del río Paraná tiene como principales actividades económicas la industria maderera, frutícola, tabacalera y yerbatera. El atractivo radica en la infraestructura presente para la instalación de un proyecto de este tipo, cuenta con residuos celulósicos económicos y se encuentra localizada próxima a la capital de la provincia y al mercado brasilero. No tiene puerto construido sobre el río.

- **Ciudad de Puerto Rico:** La población de Puerto Rico se encuentra a mitad de camino entre Iguazú y Posadas. Esta ciudad de 14.520 habitantes es conocida como la capital de la Industria y de los lapachos, por el hecho de contar con la

infraestructura y fomento de las industrias madereras por la cercanía a las plantaciones y los accesos terrestres y marítimos a mercados nacionales e internacionales. En esta ciudad está instalada la pastera “*Papel Misionero*”, que al igual que la pastera de Puerto Piray es cuestionada por la falta de certificación de sus procesos y por la contaminación del agua y del aire.

### **6.3. FACTORES DE PONDERACIÓN Y MATRIZ DE LOCALIZACIÓN**

Para realizar la matriz de localización debemos tomar estos datos recabados de las ciudades disponibles para la localización y determinar factores que las diferenciarán del resto. Estos factores son:

- **Disponibilidad de Mano de Obra o Densidad de Población:**
  - La disponibilidad de obreros calificados o personal disponible para capacitación, será un factor importante para determinar la localización dado que se necesitan para la operación diaria. Las distancias que se debe recorrer entre pueblos es grande y la baja densidad que tiene la provincia hacen que sea un factor no menor. La mayor densidad de población se encuentra en Posadas seguida de Eldorado.
  
- **Cercanía a la oferta:**
  - La disponibilidad y bajo costo de los residuos celulósicos es un factor fundamental a tener en cuenta para abaratar los costos del proceso. Dado que la madera se transporta por camiones, será valorada una ubicación cercana a las plantaciones. Asimismo, la disponibilidad de aserraderos en la ciudad, brinda la posibilidad de contar con grandes cantidades de residuos económicos para la elaboración del etanol. La mayor cantidad de aserraderos se encuentran en Eldorado, seguido de Posadas. La primera ciudad, además, es próxima a las plantaciones en la provincia.
  
- **Cercanía a la demanda**
  - El mercado del etanol, aún poco desarrollado, dificulta la libre distribución, siendo reducidas las bocas de expendio y lugares de mezcla con hidrocarburos. Es por ello que toma importancia este factor por el hecho de, al igual que para las materias primas, tener que reducir los costos de distribución del producto terminado. Eldorado parece ser la ciudad más cercana al mercado brasilero, sin embargo la diferencia con Posadas es de 200km, lo cual beneficia a ambas para determinar cercanía del mercado brasilero y del argentino.

- **Medios de transporte**

- Relacionados con los puntos anteriores, los medios de transporte cobran importancia al momento de reducir los costos de la larga cadena logística. Tanto para el transporte de la mano de obra hacia y desde la fábrica, la logística de abastecimiento a la misma, como la cadena de distribución del producto final impactan en los costos del producto final y, por ser un proceso aún poco competitivo en costos, se debe valorar la reducción en la cadena logística. De los estudios realizados para la Argentina, el principal medio de transporte pero poco económico, es el transporte terrestre por medio de camiones. En el mundo, el medio más económico es el marítimo, el cual en esta provincia (por anegamientos) ha perdido las instalaciones portuarias de Eldorado, Puerto Rico y Santa Ana. En segundo lugar mundial, lo sigue de cerca el ferroviario, en el cual es notoria la falta de inversión en este sector no sólo en la provincia analizada, sino que en el país en general. El que tiene mayores posibilidades de ser utilizado es Eldorado por fácil acceso y cercanía a las fábricas de celulosa y madera y por la poca inversión necesaria para refaccionarlo.
- Otro medio es el tren, pero lamentablemente nuestro país sufre de poca y hasta ninguna inversión en este sector de la economía. Esto deriva en la existencia de tendidos ferroviarios no utilizados o deteriorados y para el caso de Misiones, sólo arriba a Posadas, siendo la única ciudad de la provincia con la ventaja de poder llegar a disponer de este medio de transporte (obvio con inversión en el mismo).

- **Recursos Hídricos**

- Dado el volumen de agua que, como explique en el proceso del etanol, es necesario para la producción y limpieza, es fundamental contar con grandes volúmenes de agua a costos reducidos. Es por ello que la instalación sobre el Río Paraná ha sido un factor en la macro-localización.
- Contar con un puerto para la distribución del combustible y posible arribo de materias primas abarataría en gran medida la cadena logística. Como aclaré en el punto anterior las ciudades con capacidad portuaria son Posadas y con pequeñas obras de refaccionamiento, la ciudad de Eldorado.

- **Servicios a la industria**

- Para el funcionamiento de este tipo fábrica es necesario el terreno y cuanto más amplio para futuras expansiones es más valorado. Otros puntos de suma para la

matriz de localización son los servicios y la infraestructura ya presente en cercanías al terreno. Con esto me refiero a que cuente con electricidad, gas, agua, impuestos bajos, etc. En el caso de este proyecto es fundamental poseer conexión a la red eléctrica de distribución, dado que se generará un excedente eléctrico para alimentar la ciudad. No obstante, en caso faltante, deberá comprar electricidad al mercado para continuar con el proceso.

- El gas no es fundamental para la fábrica pero es necesario para las instalaciones administrativas. El agua necesaria debe ser abundante y barata como fue justificada en el punto anterior y los impuestos bajos permitirán a la empresa justificar sus estados financieros para la financiación de la misma.
- En cuanto al terreno, vemos que la provincia de Misiones tiene poca densidad de población, con lo cual facilita la disponibilidad de terrenos. Sin embargo, la infraestructura no es igual para todas las ciudades. Posadas es la única ciudad que cuenta con un parque industrial en desarrollo, mientras que Eldorado ya cuenta con la instalación de 70 aserraderos los cuales necesitan de los mismos servicios. El resto de las ciudades más pequeñas se encuentran faltas de inversión para abastecer estos servicios, por lo que será necesaria una mayor inversión para extender las redes de servicio actuales hasta el terreno seleccionado.

- **Impacto medioambiental:**

- El proceso de la generación de etanol no causa daño al medioambiente como sí lo hacen los hidrocarburos, dado que los residuos del proceso de este proyecto se reutilizan para generar electricidad propia para la planta. Las materias primas utilizadas son naturales con lo cual no existe impacto ambiental alguno que pueda perjudicar el ecosistema y el agua utilizada en el proceso se reprocesa. En teoría y en la práctica experimental no existe riesgo alguno de impacto ambiental. El diseño ya contempla todas las medidas posibles para evitar la contaminación de algún tipo y se contemplará realizar la certificación de huella ambiental generada para evitar problemas con la población, grupos ecologistas y nuestro país.
- Para este punto se valorará la localización lejana a las pasteras que están contaminando, evitando la posible compra de sus residuos o dicho de otro modo, evitar favorecer su negocio hasta tanto no estén certificadas.

## 6.4. PONDERACIÓN

Para cada factor se dará un puntaje del 1 al 10 a cada ciudad, de acuerdo a qué tan bien cumple con las condiciones deseadas explicadas en el punto anterior. En este sistema de puntuación, 10 es el máximo y 1 es el mínimo.

A su vez, cada factor tendrá una ponderación sobre el total determinado a partir de la relevancia que tiene para este proyecto y la posible disponibilidad en la provincia de Misiones.

Estos valores numéricos del 1 al 10 para cada ciudad se ponderarán por el factor y se sumará la ponderación para poder determinar cuál es la ciudad que cobra más relevancia por cumplir mayoritariamente con la mayoría de los factores.

## 6.5. RESULTADOS

A partir de lo expuesto anteriormente, se asigna la ponderación correspondiente a cada factor y ciudad a modo de confeccionar la siguiente matriz de localización:

Factores / Ponderación	Ciudades				
	Eldorado	Montecarlo	Posadas	Puerto Piray	Puerto Rico
Población	8	6	10	6	4
14%	1,12	0,84	1,4	0,84	0,56
Accesos Hídricos	10	7	10	7	7
12%	1,2	0,84	1,2	0,84	0,84
Medios de transporte	10	5	10	7	8
14%	1,4	0,7	1,4	0,98	1,12
Cercanía a la demanda	10	8	7	9	7
16%	1,6	1,28	1,12	1,44	1,12
Cercanía de la oferta	10	10	7	10	8
18%	1,8	1,8	1,26	1,8	1,44
Servicios	9	7	10	6	6
14%	1,26	0,98	1,4	0,84	0,84
Impacto Medioambiental	10	10	10	2	2
12%	1,2	1,2	1,2	0,24	0,24
<b>Total</b>	<b>9,58</b>	<b>7,64</b>	<b>8,98</b>	<b>6,98</b>	<b>6,16</b>

**Figura 6.1.** Matriz de localización

De los resultados de la matriz vemos que la opción más viable para la instalación de la planta de etanol es la ciudad de Eldorado. La misma tiene mejores puntajes en factores clave para el desarrollo de este proyecto, con lo cual la instalación en el municipio haría más factible y económico cumplir con los requisitos del proyecto.



## **VII. ECONÓMICO - FINANCIERO**



## 7.1. INTRODUCCIÓN

En esta sección se procederá a brindar una idea de los indicadores financieros que afectan al proyecto. Para ello armaré un flujo de fondos, un estado de resultados y estimaré los costos e ingresos para poder estimar el capital de inversión necesario para la instalación de la planta en la ciudad de Eldorado, Misiones. Con ello obtendré la tasa de retorno del proyecto sobre capital invertido (TIR) y el periodo de repago para el proyecto. A su vez, se determinará el costo del etanol para un flujo de fondos cero.

## 7.2. COSTO DE INSTALACIÓN

En la sección de desarrollo de proceso he mencionado las distintas áreas que necesita el proyecto y sus equipos para poder fabricar el etanol. Resumidamente las áreas son Manejo de Materiales (donde se almacenan las materias primas y se descargan los camiones), Pretratamiento, Proceso de enzima, Fermentación, Destilación, Almacenamiento de producto terminado, Caldera, Terreno y, Naves industriales y administrativas.

El costo de instalación de estas áreas se puede determinar bajo un estudio a detalle que consiste en la investigación exhaustiva de todos los equipos necesarios y su instalación, junto al diseño de un layout tentativo para determinar la localización de los mismos y extensión de cañerías de proceso y sistemas de protección para incendios. Esto no está en el alcance de esta tesis, por lo que se tomará como referencia los costos asociados con la instalación de una planta de etanol a partir de maíz debido a que es un proceso similar, con exclusión del cambio en los pretratamientos. Por ello es que se considerará un valor mayor sobre esta área.

La puesta en marcha de la planta se estima en 2 años y el costo de instalación asciende a 800 millones de pesos argentinos. Este valor contempla: la compra del terreno y su preparación (chequeado por departamento de ingeniería), construcción de naves industriales y edificios administrativos (también fue chequeado el estimado y se considera la instalación de los edificios administrativos in situ por la cercanía al pueblo de Eldorado). También se incluye en el estimado la compra e instalación de equipos, cañerías, sistemas de instrumentación y control, áreas de buffer, etc. por área mencionada. A la vez, fue adicionado el valor de la contratación de una empresa de ingeniería para el desarrollo de la ingeniería básica y de detalle de la misma, tomando como referencia lo cobrado en proyectos de ingeniería por una empresa. Esta empresa brindó el dato de cobrar un 10% del total de la instalación en promedio, basado en su experiencia en proyectos de construcción desde cero.

A su vez, he contemplado el riesgo y la contingencia de este proyecto dado que me encuentro en la etapa de factibilidad del mismo, contemplando las variables macro del proyecto. Por esto es que al tener varios grados de libertad que se ajustarán a lo largo de la iniciación del proyecto y en la ingeniería a detalle del mismo, es que estimé un alto riesgo de error en mi estimado tomando un 20% del costo de la instalación más el de Ingeniería (7% es lo que considera la empresa de Ingeniería para una etapa conceptual en la cual se tienen determinados los requerimientos a detalle y se tiene un estimado próximo al proyecto).

Todos estos valores conforman el estimado de 800 millones de pesos o 205 millones de dólares para la puesta en marcha de una planta productora de etanol a partir de biomasa desde esta etapa de factibilidad.

### **7.3. COSTOS OPERATIVOS VARIABLES**

Estos costos son los determinados por ser de corta duración y actualizables año a año por una variación en el consumo o producción, en su costo día a día o en la oferta y la disponibilidad de los mismos.

Para el caso de este proyecto tenemos varias fuentes variables de materia prima:

#### **7.3.1. Precio de la madera. Materia Prima**

El valor de las extracciones de madera es alto pero fluctúa. Sin embargo, recordando lo planteado en este proyecto, los residuos de la madera u otro producto celulósico es el principal insumo atractivo para este proyecto. Estos productos pueden ser leña, arbustos, residuos forestales (aserrín), restos de poda, residuos agrícolas (caña de azúcar, caña de maíz, cáscaras de arroz, etc), que se puedan conseguir a centavos la tonelada.

Esto se justifica en que una buena gestión de compras podrá conseguir la materia prima a un precio bajo, reduciendo el costo de producir el etanol y mejorando los indicadores financieros de la empresa. Estos indicadores se traducen en mejorar el flujo de fondos de la misma y por ende el de resultados, incrementando el valor de la empresa, lo que beneficiará a los accionistas. Este beneficio atraerá más recursos a la empresa, lo que puede permitir futuras expansiones y mejoras en el proceso, debido a que un incremento del capital y la baja de los costos operativos permitirá tener la inversión necesaria en investigación y desarrollo. Este trabajo luego volverá a serle retribuido a los accionistas, brindándole un retorno a su inversión y el ciclo vuelve a comenzar. Se estima que por tonelada de biomasa se pueden obtener 227 litros (como estimé en la parte de ingeniería de proceso) y estos residuos se pueden conseguir por USD 10 la tonelada.

### **7.3.2. Costo de las enzimas. Materia Prima**

He mencionado a lo largo del proyecto que para la conversión de la biomasa a etanol es necesaria la producción de enzimas que rompan las complejas cadenas de la celulosa para simplificarla en cadenas simples de glucosa. A su vez, para el desarrollo de las enzimas y la fermentación se deberán comprar levaduras y ácido acético para la hidrolización.

Juntando los costos de todos los insumos necesarios para el tratamiento de la biomasa, el costo completo de los que componen el costo variable se estima en USD 35 por tonelada de madera, que junto a la biomasa hacen un total de USD 45 por cada 227 litros de etanol producido (20 centavos de dólar por litro).

### **7.4. COSTOS OPERATIVOS FIJOS**

Los costos aquí estimados son los que se incurren a pesar del nivel de producción que tenga la fábrica, pero son los necesarios para la producción. Estos costos son por ejemplo los gastos en mano de obra, en mantenimiento y los seguros del capital.

Para el caso de mano de obra consideré un organigrama de fábrica estándar. Al ver las áreas a instalar, los turnos (3 turnos de 8 horas) es que determiné un total de 50 operarios, 5 supervisores de planta. Para realizar el mantenimiento consideré 8 técnicos de mantenimiento los cuales irán rotando en los 3 turnos, dejando la máxima cantidad para la noche cuando se realizarán las tareas de mantenimiento. Los operarios de mantenimiento responderán a un supervisor que organizará el esquema planteado recientemente y será el encargado de llevar a cabo el plan de mantenimiento preventivo y las tareas de mantenimiento correctivo.

Dado que el producto final es uno solo, es que considere un controller de producción, el cual se encargará del planning de producción y los stocks de seguridad de las materias primas y el producto terminado.

Para llevar a cabo las distintas tareas de mejoras a las máquinas o trabajos puntuales es que se contratará un ingeniero de planta. Este cumplirá el rol de ingeniero de proceso y de la planta en su totalidad, llevando a cabo proyectos de distinta índole que mejorarán el día a día de la planta.

La fábrica necesita de una persona capacitada que tome las decisiones en la planta en función de los roles aquí planteados. Es por ello que se contratará a un gerente de planta en función de su experiencia, para responder a las necesidades del mercado y tomar las decisiones claves que mejoren el valor de la empresa.

Para llevar a cabo los estados de resultados y el balance mes a mes junto al cierre contable es que se contratará un equipo de asesores especializados en el tema para no incurrir en gastos grandes por contratar a un gran equipo de finanzas. Sin embargo, dada la delicadeza del tema es que se contratará a un contador y un ayudante para chequear que la información sea correcta.

A su vez para mantener la seguridad de la operación y del predio es que se contratará un técnico de seguridad encargado de los asuntos de seguridad, higiene y medio ambiente conforme lo regulan las leyes argentinas. Se encargará de implementar políticas de estos tres rubros y tomará decisiones para ejecutar trabajos y análisis de riesgos.

Por último, para la seguridad del predio se contratarán 6 empleados privados que irán rotando en los 3 turnos a modo de evitar posibles robos o hurtos en el predio.

## **7.5. IMPUESTOS**

Procederé a detallar los impuestos que por el rubro (Biocombustibles) se gravaran a este tipo de empresa.

La ley que aplica es la ley 26.093: “Régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentable de biocombustibles”.

En Argentina, los impuestos que pagan las empresas son Impuestos a las Ganancias, Mínima presunta, Impuesto al Valor Agregado, Impuesto al crédito y al debito, Ingresos Brutos, Impuestos sobre Bienes Personales, Aranceles de importación, impuesto a los sellos, impuesto inmobiliario municipal y provincial, aportes sobre remuneraciones. Estos impuestos se le aplican a todas las industrias. Sin embargo, para este proyecto la ley mencionada arriba es la que establece los lineamientos de promoción para la instalación de este tipo de industrias en nuestro país.

Voy a hacer un breve resumen de los principales impuestos que afectan a esta industria y luego brindaré la promoción de la industria establecida en la ley 26.093, para poder plasmar los gastos que se van a incurrir en el estado de resultados.

- El impuesto a las ganancias es un impuesto que se calcula sobre la utilidad antes de impuestos. Este término en contabilidad, se obtiene de restar al ingreso, todos los gastos referidos a la operatividad para obtener el producto final (costos directos del producto o variables y gastos administrativos), las amortizaciones y los intereses bancarios de deuda.

En el caso de pérdidas de utilidades el Estado Nacional no nos devuelve o paga el impuesto, sino que establece lo que se llama “quebranto” o el pago de la mínima presunta:

- El quebranto, conceptualmente, es un crédito acumulado de máxima duración 5 años, que al no pagar I.G. queda como un saldo a favor para la empresa.
- El pago de mínima presunta. Este impuesto establece que en caso de que la empresa no pague impuestos a la ganancia, se paga el 1% sobre el Activo productivo en adelanto y queda fijado como crédito para los años venideros, cancelando los posibles pagos futuros.

La utilización de uno u otro crédito de impuesto se determina a través de un acuerdo o una auditoria por parte del gobierno, en la cual se establece, en función de su categoría, los impuestos a pagar al fisco.

- Las amortizaciones en Argentina son propias de cada empresa y también se determinan mediante consultoría con el gobierno.

Por lo general, en términos contables, los valores que se utilizan son:

- **Terrenos:** 50 años
- **Máquinas:** 10 años
- **Insumos Varios:** 5 años

- Los intereses se calculan devengados de los pasivos de la empresa en su totalidad para los meses o el año en curso.

- Impuesto al Valor Agregado (I.V.A.): la empresa se comporta como una administradora de este impuesto, aplicando 21% en cualquier caso de intercambio sobre el valor del activo, insumo a comprar o vender. La diferencia entre el IVA que debe pagar y el que absorbe, es el monto final a pagar al Estado.

Surge el mismo efecto con el impuesto a las ganancias al tratarse de una devolución del IVA: El Estado nos brinda un crédito para los años venideros, cancelando débitos futuros.

- Al requerir créditos para financiar las obras o establecer créditos de venta (Bienes de Cambio a crédito) se paga un impuesto cercano al 1,2% sobre el valor de la deuda.

- Por ley, se debe pagar un impuesto por bienes personales. Este impuesto se aplica de dos maneras sobre el patrimonio de la empresa total. Es decir, el impuesto aplica dos tasas dependiendo del valor del patrimonio que se posea. Este monto de quiebre está establecido en 5.000.000 de pesos, aplicando para montos menores al mismo un 0,75%; y, en contraposición, se imputa un impuesto del 1,25%.
- Al tratarse de la compra de un terreno y la instalación de una planta sobre el mismo, encontramos que debemos pagar impuestos relacionados con este procedimiento. Por la compra del terreno debemos pagar por escritura un gravamen del 5% sobre el valor establecido, y por inmobiliaria se paga un 3% de comisión para la misma.
- Al momento de realizar los planos y comenzar con la construcción, debemos pagar dos impuestos más establecidos por ley. Uno es el de Gestoría y Derechos que aplica un 10% del valor de la construcción y al arquitecto firmante de los planos se le abona una comisión del 10%.
- Existen otros impuestos varios como el Impuesto a los Sellos, inmobiliario municipal (0,9%) y provincial, aranceles de importación (en el caso de importar maquinarias o insumos) que estos dependen del material que se trate, así como también del país de origen de la transferencia) que no son relevantes comparados con los que detallamos más arriba.
- Mano de obra, existen por ley el pago de ciertos montos y aportes sobre sueldo bruto. A modo de simplificación, un empleador debe pagar un 28% más sobre sueldo bruto de cada empleado, mientras que el empleado recibe un 17% menos del sueldo bruto. Entre ellos, podemos nombrar los aportes jubilatorios que rondan el 16%, el servicio social para jubilados y pensionados (PAMI) que por la ley 19.032 se abona un 2%, obra social un 4,8%, subsidios familiares 3,5% y de Aseguradora de Riesgos del Trabajo un 2%.

La ley de los biocombustibles establece promociones para fomentar la instalación de este tipo de empresas en el país:

- Establece el corte obligatorio de las naftas para el año 2010 por un mínimo de 5% de etanol. Este punto en la ley incentiva este tipo de proyectos, dado que como comenté en la primer parte de este proyecto, los ingenios azucareros (hoy proveedores del etanol combustible en nuestro país) no tienen la capacidad suficiente para abastecer la totalidad del mercado establecido por ley. Es una demanda no satisfecha.

- **Impuesto al Valor Agregado y al Impuesto a las Ganancias:** Se aplicará el beneficio promocional establecido en la Ley N° 25.924 a la adquisición de bienes de capital o la realización de obras de infraestructura correspondientes al proyecto respectivo. El problema de esta ley es que establece beneficios para 3 años luego de promulgada y su año fue el 2004. Con lo cual, por Ley no contamos con ningún beneficio salvo que se actualice la norma.
- También establece la devolución anticipada del IVA para la compra de bienes de capital a partir del tercer año fiscal. El problema es que se devuelve únicamente si el crédito no ha sido absorbido por los débitos fiscales que tenga el proyecto. En este proyecto este es el caso, dado el IVA invertido año a año en la compra de materias primas.
- No estará alcanzado por la tasa de Infraestructura Hídrica establecida por el Decreto N° 1381/01, por el Impuesto sobre los Combustibles Líquidos y el Gas Natural establecido en la Ley N° 23.966, por el impuesto denominado "Sobre la transferencia a título oneroso o gratuito, o sobre la importación de gasoil", establecido en la Ley N° 26.028, así como tampoco por los tributos que en el futuro puedan sustituir o complementar a los mismos.

## 7.6. INVERSIONES

La puesta en marcha de la Planta de Etanol a base de Biomasa o residuos forestales tiene una duración de 2 años aproximadamente. Dado que los primeros meses la inversión a realizar es sustancialmente mayor a la de los últimos 12 meses, justificado por la compra de los equipos. Para poder tener una mejor comprensión y visión de lo explicado:



**Figura 7.1.** Total de capital invertido mes a mes del cronograma de inversión

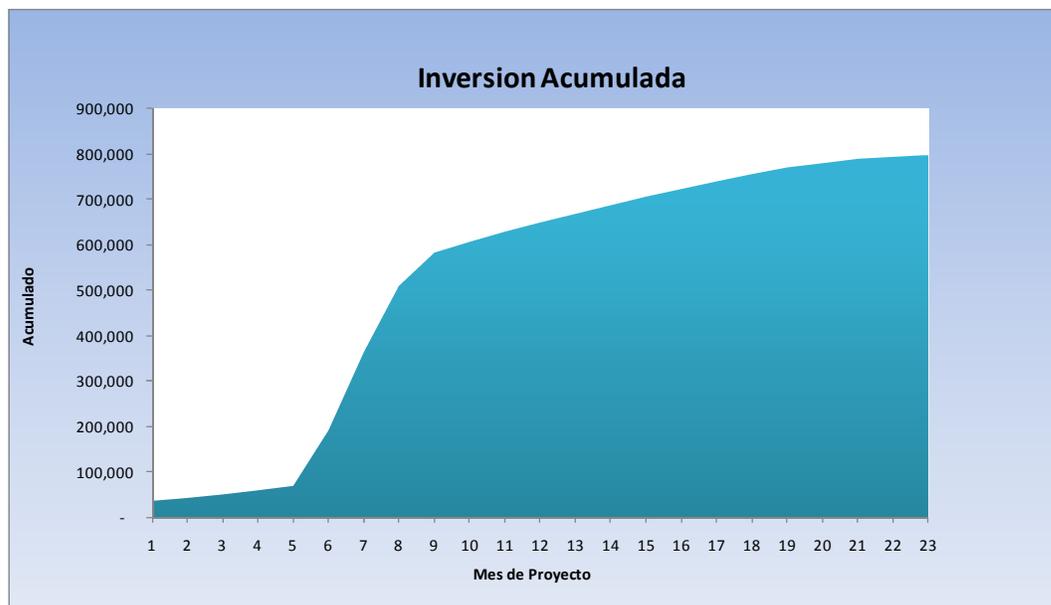


Figura 7.2. Total de capital invertido acumulado

## 7.7. ESTRUCTURA DE CAPITAL ÓPTIMA

Las formas de financiación para comenzar con un proyecto son dos: Capital de inversores o Deuda Bancaria a largo plazo. Esto se traduce en Patrimonio Neto o Pasivo en el cuadro de balance con el Activo operativo y no operativo.

El cálculo de la estructura de capital brinda una idea de la mejor forma de financiarse en cada país, dado que ambas formas tienen una tasa de interés asociada. Este cálculo brinda la opción de asumir cuál será la mejor opción para financiarse en un proyecto de esta magnitud para reducir intereses y retornos de capital tomando una u otra estructura. Esto es importante dado que estos pagos o devoluciones se realizan año a año afectando el resultado del año fiscal del cuadro de resultados. Por lo que la estructura que represente un menor costo a la organización será la adoptada para incrementar resultados netos. Este rendimiento óptimo es el conocido como WACC (*Weighted Average Cost of Capital*) y determina una ponderación entre ambas formas de capitalización para pagar menos rendimiento.

Para el Cálculo de Costo de Capital se toma el modelo CAPM, en el cual el costo del capital está asociado con la tasa libre de riesgo (surge de la relación entre un bono del tesoro de los Estados Unidos a 10 años y uno a 30 años, considerados libres de riesgos), una ponderación ( $\beta$ ) con respecto al rendimiento del mercado y, por último, la suma de la tasa de riesgo-país del país emisor de bonos (en este caso Argentina). Este último valor se traduce en el rendimiento que deben tener los bonos de ese país considerado de

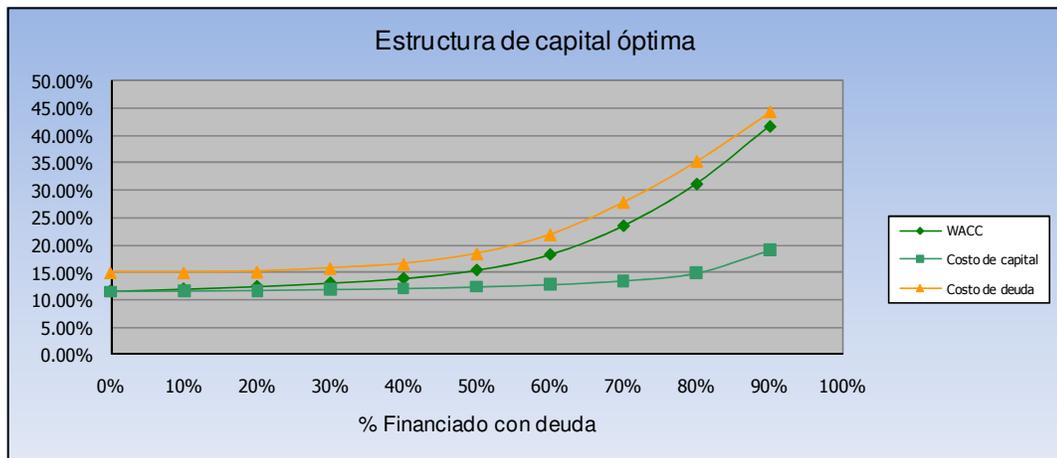
riesgo, para rendir más atractivamente que los bonos libres de riesgo del tesoro de EEUU.

El rendimiento del mercado se obtiene de la diferencia entre el índice S&P 500 (en el cual se contempla el rendimiento de 500 empresas de referencia del mercado) y la tasa libre de riesgo (rendimiento de los bonos del tesoro de EEUU).

El riesgo país se encuentra en 636 puntos básicos y representa el porcentaje adicional que Argentina debe pagar por un bono emitido en este país.

Con estos valores se obtuvo que la tasa de rendimiento del capital es de 11,5%, mientras que una tasa favorable de un banco de desarrollo mundial, como lo es el BID (*Banco Interamericano de Desarrollo*), es del 15% para proyectos de desarrollo de economías regionales de América.

Es por ello que el WACC se determinó en 11,5% como tasa de descuento para los flujos futuros y la estructura de capital óptima en 100% de Patrimonio Neto.



**Figura 7.3.** Costo del capital y deuda.

## 7.8. FLUJO DE FONDOS DEL PROYECTO

Una vez establecidos los principales costos y los impuestos que se gravaran en nuestro estado de resultados, y la tasa de descuento de los flujos futuros es que realicé el flujo de fondos del proyecto.

Este flujo de fondos está establecido en la planilla EXCEL adjunta bajo el nombre *Proyecto Etanol.xls*. A su vez, para facilitar la lectura de este proyecto final es que copio la tabla en el Anexo.

En la planilla se encuentran varias hojas de trabajo: el flujo de fondos del proyecto, flujo de fondos del inversor, estado de resultados, cuadro de fuentes y usos, activo de trabajo, balance, financiación, cálculo del IVA, Plan de Inversiones y Amortizaciones, Inversión Total, Cronograma de inversiones, Precios, Cálculos de mano de obra, inversiones y costos fijos y variables, y cálculo de estructura de capital.

Asumiendo el actual escenario para la Argentina y dicho todo esto, las variables que se consideraron para el cálculo son:

- Dólar: 3,88 ARS/USD
- Inflación anual: 20%
- Precio del etanol: 2,19 ARS

Estos índices puestos en el cálculo y junto a lo ya mencionado es que obtengo un valor neto actual para el flujo de fondos del proyecto de:

VAN	779,546 M\$
TIR	0.00%



Figura 7.4. Flujo de Fondos del Proyecto y cuadro resumen de VAN y TIR

## 7.9. ESCENARIOS

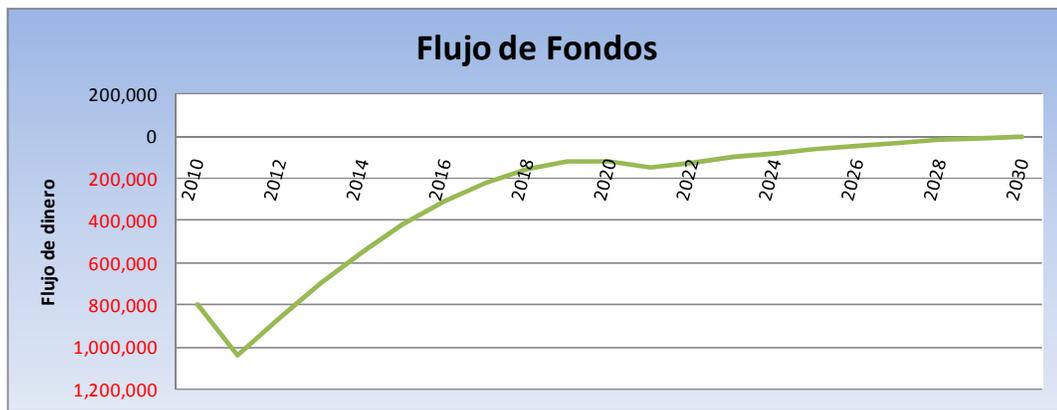
Ahora bien, las estimaciones tienen error y proponer un flujo de fondos en una etapa de factibilidad tiene su error asociado como puede ser que se tenga un error en el precio de venta del etanol actual y a futuro, o los supuestos de cómo se comportaría el estado de resultados con los valores en dólares a futuro y la inflación de la Argentina.

Es por ello que para este modelo construido es que planteo un análisis de las variables de juego, y a mi parecer podría establecer el mínimo precio de venta a partir del cual el flujo de fondos del proyecto es cero, es decir, encontrar el punto de equilibrio.

Por supuesto que se pueden plantear varias opciones para hacer variar los números, pero no es el objetivo de la tesis, con lo cual trataré de realizar brevemente un análisis de riesgos del proyecto.

Bajo la función “*Goal Seek*” o “*Buscar Objetivo*” buscaré el valor mínimo de venta del etanol que haría un punto de equilibrio del proyecto, es decir, que invierta y obtenga el mismo dinero y la tasa de rendimiento TIR sea igual al WACC.

Este valor no es muy lejano al planteado en el modelo y es de **2.52 ARS**.



**Figura 7.5.** Flujo de Fondos del Proyecto con cambio de precio de venta

Lamentablemente, el período de repago simple es de 7 años y el real es de 20 años, siendo para el inversor un VAN negativo de 1,17 MM ARS, por lo que no invertiría en el proyecto, dado que el valor actual es más negativo que la inversión misma.

El precio de venta que permite un VAN de equilibrio para el inversor es de **3,87 ARS**, el cual es casi el precio actual de venta de la nafta en Argentina. Este valor brinda un flujo de fondos del proyecto de 2,6 MM ARS, una TIR de 36.99% y bajando el período de repago a 5 años únicamente.

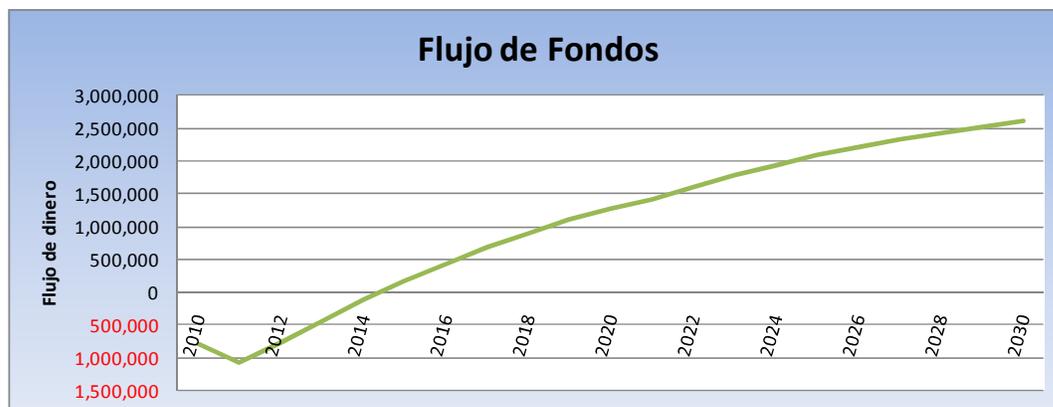


Figura 7.6. Flujo de Fondos del Proyecto a partir del punto de equilibrio del inversor

## 7.10. RESUMEN DEL TERCER CAPÍTULO

La estructura de capital inicial se considero de 100% de Patrimonio Neto. No hay relación mejor dada la particular situación de tener un WACC similar al costo de capital. Por lo que hay que mejorar los costos para poder bajar el costo de activo de trabajo al inversor y obtener utilidades mayores.

No se cuenta con subsidios que pudieran fomentar estos resultados. Se necesita de una política a favor de los distintos pasos del estado de resultados para mejorar los resultados no asignados y brindarle mayores ganancias a los accionistas para que puedan invertir en este proyecto y hacerlo factible.

En otros países se han dado cuenta de esto y tienen políticas fuertes de incentivo a la industria, para fomentar esta tecnología y su desarrollo para convertirse en la tecnología del futuro. En mi punto de vista, creo que la Argentina se encuentra en una situación en la que si quiere continuar con el desplazamiento de los hidrocarburos deberá aplicar subsidios que se pueden obtener de impuestos a las naftas, con lo cual se castiga a los combustibles fósiles para desarrollar la oferta del etanol. El impuesto este no se vería traducido en un aumento del precio al consumidor final por el simple hecho de que la mezcla con etanol lo abarataría.

Dadas las condiciones planteadas el proyecto no es rentable:

**VAN (M\$)** 779.546

**TIR** 0%

**Periodo de Repago Simple (años):** no tiene

**Periodo de Repago Real (años):** no tiene

Estos valores a la vista de un inversor no son atractivos porque:

- Por las altas inversiones se pierde dinero y el valor actual del proyecto es más bajo que no hacerlo.
- Además, se debe tener en cuenta que la situación del país y de los mercados financieros “sin riesgo” (Mercado de Estados Unidos) afectan el costo de capital de un inversor y su aversión al riesgo en invertir en este tipo de proyecto. Otro punto para los accionistas que la situación creciente de inestabilidad que está presentando la Argentina fomenta que el costo del capital sea aún mayor, o peor aún, es que está perdiendo el interés de los inversores en nuestro país.



## **VIII. CONCLUSIONES**



## 8.1. CONCLUSIONES

El proyecto aún se encuentra en la etapa de factibilidad a pesar de considerársele uno de los cambios de tecnología más importante del mundo. La importancia de este proyecto radica en la necesidad de generar recursos renovables (madera o cultivos de distinta índole) y/o utilizar los residuos de otros procesos favoreciendo el medio ambiente por la captura de gases nocivos. Cabe recordar que las tasas de deforestación del planeta han disminuido con respecto a años anteriores, sin embargo la tendencia sigue siendo negativa y por ende, sufrimos sus efectos. A su vez, al fomentar este tipo de industria básica indirectamente se está fomentando pequeñas economías a lo largo del planeta dado que estos cultivos se pueden realizar en los lugares poco favorecidos para otra actividad.

El punto importante de este tipo de iniciativa es que permite la reducción en la dependencia de los combustibles fósiles, extraídos en sólo algunas partes del mundo, principalmente Arabia Saudita, evitando conflictos por políticas de poder u otros motivos relacionados con la logística y el transporte. Es decir, permitiría que cada país dependa internamente de su propio combustible para su red de transporte.

Para el caso particular de esta tesis, tanto la Argentina como Uruguay, ambos países con reservas casi nulas, necesitan fuertemente de este tipo de proyectos por el simple hecho de dejar de depender de las importaciones de los combustibles fósiles y su alto costos incurridos para realizarlo. Siendo ambos países con gran desarrollo agropecuario, encontré que es una pérdida de oportunidad de no aprovechar este potencial para satisfacer sus crecientes demandas no satisfechas de etanol, ya sea por la legislación vigente o por la tendencia global de desarrollo sustentable cada vez más instaurado en las personas.

En cuanto a la localización de este tipo de industrias vimos que se valora y justifica mayormente su instalación en zonas de pequeña población en cercanía de productos forestales o celulosos y en lo posible con diversidad de transporte por el simple hecho de abaratar costos que impactan en el costo final del producto.

Al analizar las distintas etapas arribo a la conclusión que los países emergentes (aquellos que tienen mayor cantidad de recursos naturales) se encuentran faltos de políticas favorables hacia proyectos de grandes cambios que puedan posicionarlos como pioneros de distintas tecnologías, como lo son los biocombustibles. El único que aprovechó esta situación fue Brasil y es claro ejemplo para la comunidad latinoamericana. En el caso puntual de la Argentina, se presenta el corte obligatorio de las naftas para “acoplarse” a la tendencia en políticas mundiales a favor del medio ambiente y cambiar la tendencia de generación de CO<sub>2</sub>, pero no presenta la oferta

necesaria para realizarlo, encontrando esta propuesta de proyecto un nicho importante a cubrir. Sin embargo, teniendo la oferta asegurada, sus altos costos de inversión, de materias primas y de costos operacionales generan que el proyecto no sea rentable para la inversión por parte de capitales accionarios.

La peculiaridad de tener retorno a la inversión en el proyecto pero un alto costo para los accionistas y un profundo análisis en los estados contables, hace pensar que los gobiernos deben implementar (primeramente) subvenciones para asegurar la factibilidad de estos proyectos y fomentar su investigación y desarrollo. Una vez obtenida la experiencia y la reducción de costos es que se encontrarán en etapa competitiva para desplazar a los combustibles fósiles y ser una rama principal de la economía de un país.

## **IX. BIBLIOGRAFÍA**



## 9.1. BIBLIOGRAFÍA

Hierro, 2006. *Guía para la construcción de una industria eficiente y sustentable de bioetanol carburante en Argentina*. Instituto Tecnológico de Buenos Aires.

*Análisis del balance de energía derivada de biomasa en Argentina*. FAO Departamento Forestal. 2009

*Energy grows on trees*. Reporte de la conferencia internacional de bioenergía a base de madera. 2008

Aden *et. al.*, 2002. *Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis for Corn Stover*. Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL).

Reunión de expertos, 2009. *Cultivos Lignocelulósicos para la producción de energía en el Uruguay*. Facultad de Agronomía y Universidad de la República.

Oyhantçabal, 2005. *Biomasa forestal para producción de energía en Uruguay: una visión desde la oferta*. Unidad de proyectos agropecuarios de cambio climático-MGAP. Uruguay.

Stanmeyer, 2010. *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010*. FAO.

Tomaselli, 2006. *Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación.

*Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020*. FAO.

Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE). <http://www.enre.gov.ar>.

RFA, Ethanol Industry Statistics. <http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/#E>

Ley 26.093 - *Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles*.  
<http://infoleg.mecon.gov.ar/infolegInternet/anexos/115000-119999/116299/norma.htm>

Beaudry-Losique *et al.* 2008. *National Biofuels Action Plan*. Biomass Research and Development Board.

Brinkman *et al.* 2005. *Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicles Systems-A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions*.

Rynd *et al.* 2006. *Fuel Ethanol from Cellulosic Biomass*. American Association for the Advancement of Science.

Pimentel & Patzek. 2005. *Ethanol production using corn, switchgrass and Wood*. Natural Resources Research.

Henrique Pinto & Kamdem. 1995. *Comparison of pretreatment methods on the enzymatic saccharification of Aspen Wood*. Department of Forestry, Michigan State University.

Ballesteros *et al.* 2002. *Ethanol production using simultaneous saccharification and fermentation system in a fed-batch basis*. World Journal of Microbiology & Biotechnology

White & Kulcinski. 1998. *Net Energy payback and CO<sub>2</sub> emissions from wind-generated electricity in the Midwest*. University of Wisconsin

## **X. ANEXOS**



## ANEXO I

Provincia / Región	Especies				Totales
	Coníferas	Eucalipto	Salicáceas	Otras	
Misiones	313,721	24,911	-	46,316	384,948
Corrientes	232,461	95,773	-	810	329,044
Entre Ríos	11,712	90,048	15,919	13,386	131,065
Buenos Aires	6,905	36,920	47,826	8,118	99,769
Patagonia	48,320	-	19,595	695	68,610
NOA	6,898	16,054	204	756	23,912
Córdoba, Sta Fé y La Pampa	34,221	12,095	2,483	-	48,799
Resto	1,749	3,031	23,377	1,351	29,508
<b>Totales</b>	<b>655,987</b>	<b>278,832</b>	<b>109,404</b>	<b>71,432</b>	<b>1,115,655</b>

**Figura 10.1.** Tabla de superficie de montes implantados (ha).

Fuente: SAGPyA

Producto	Producción				Valoración MM U\$S
	Valor	Unidad	Precio unit.	Unidad	
Papel	1.2	MM tn	700	U\$S / tn	840
Pulpa	0.2	MM tn	550	U\$S / tn	110
Recortes	0.7	MM tn	200	U\$S / tn	140
Tableros	1.2	MM m3	180	U\$S / m3	216
Madera aserrada	1.6	MM m3	180	U\$S / m3	288
Residuos	5.0	MM tn	30	U\$S / tn	150
<b>Totales</b>					<b>1,744</b>

**Figura 10.2.** Tabla de valoración de un bosque implantado

Fuente: Elaboración sobre AFCP, SAGPyA, SAyDS

## ANEXO II

### A.2.1. Objetivos del etanol.

Objetivos del etanol y sus impactos			
Ítems	Actual	A Medio Plazo	A Largo Plazo
Billón de galones	4	20	30 a 200
Porcentaje de reemplazo de naftas	2%	10%	15 a 100%
Reducción de CO <sub>2</sub>	1.8%	9%	14 a 90%
Materia prima	Almidón (14% rendimiento energético)	Desechos de celulosa	Cultivos de energía de celulosa (>37% rendimiento energético)
Proceso	Fermentación de almidón  Poco procesos de celulosa	De-cristalización ácida: Transición a enzimas  Celulasas  Metabolismos de azúcares simples  Múltiples microbios Algunos cultivos energéticos	De-cristalización y despolimerización enzimática  Celulasas y otras Hidrolasas glycosyl  Transportadores de azúcar  Procesos de alta temperatura  Metabolismos capaces de procesar varios azúcares  Procesos integrados  Diseños de cultivos energéticos de celulosa  Captura de carbón a través de fragmentación de la planta
Desarrollo de proceso	Proceso centralizado	Proceso centralizado	Proceso centralizado o expandido. Alta eficiencia de proceso.

### A.2.2. Funcionamiento de una caldera acuotubular

Aquí se presentará un simple esquema de funcionamiento de una caldera posible para implementar en el proyecto.

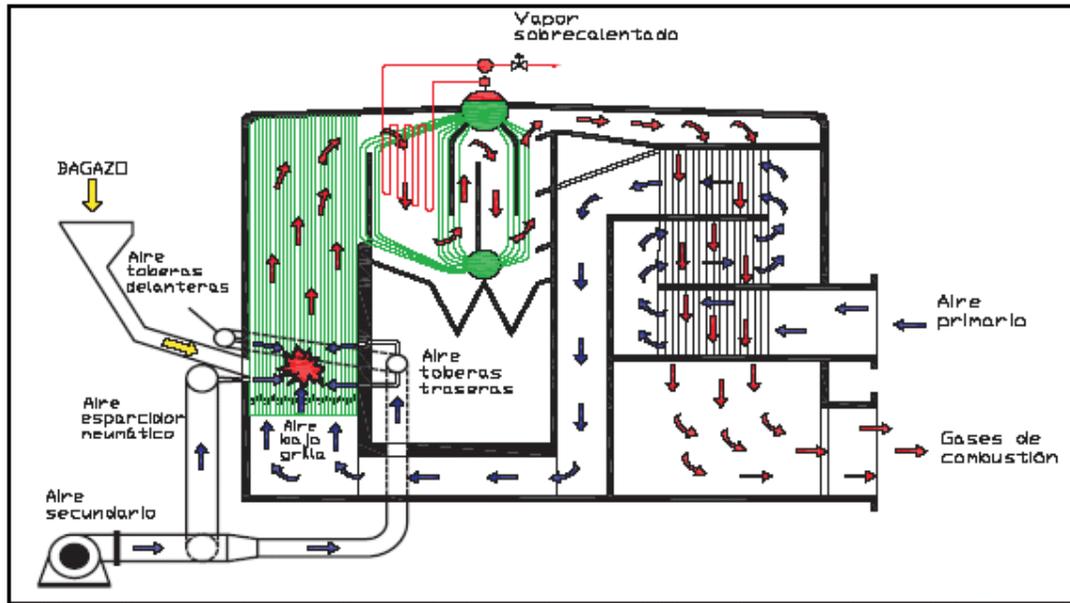


Figura 10.3. Esquema de una caldera acuotubular

ANEXO III



Figura 10.4. Mapa de Misiones en función de sus principales actividades  
Fuente: Municipalidad de Misiones

ANEXO IV

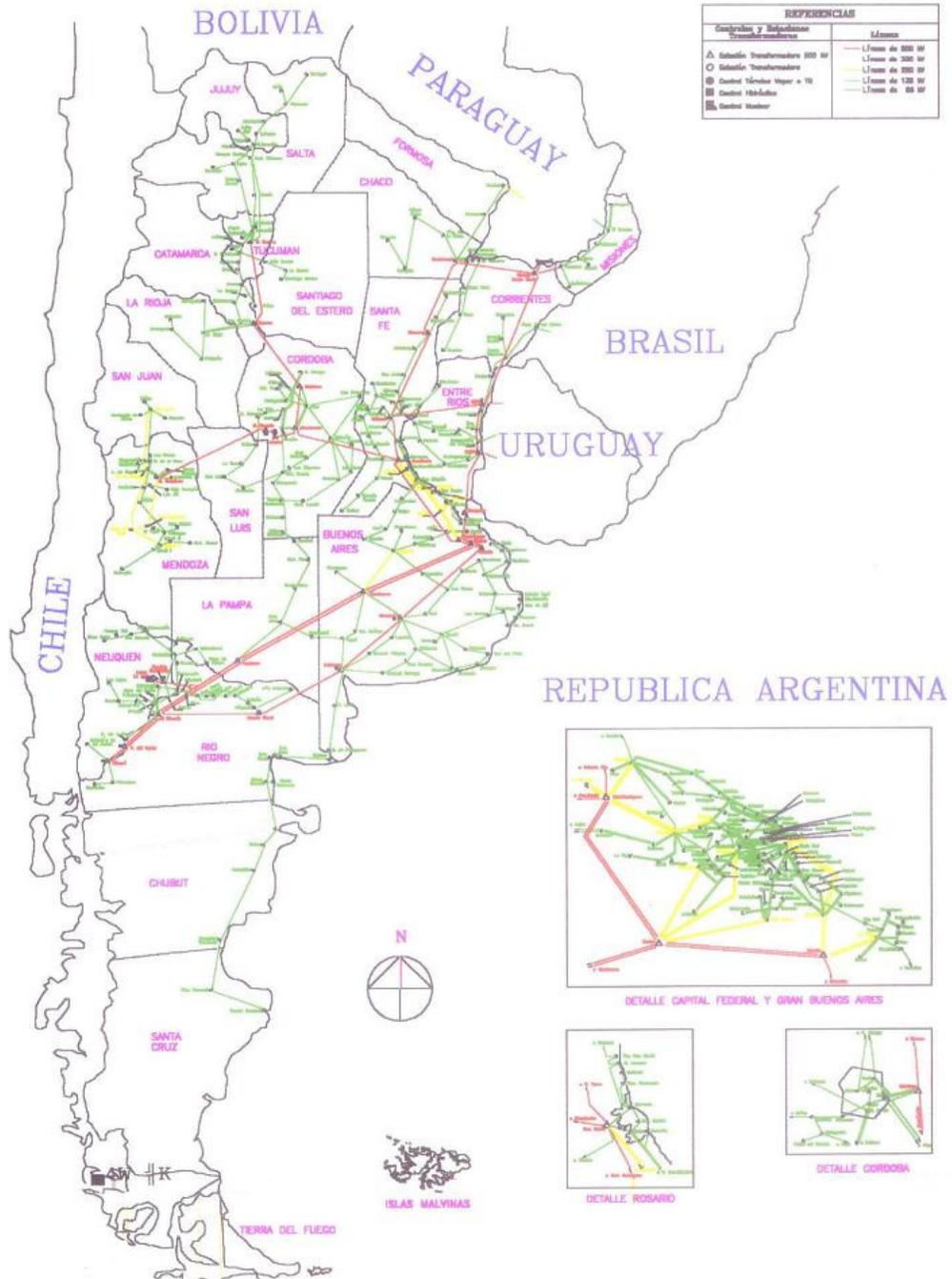


Figura 10.5. Red de sistema de transporte de energía eléctrica para la conexión a red de este proyecto.

Fuente: CAMMESA

ANEXO V

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>TOTAL EGRESOS</b>	<b>799,123</b>	<b>613,940</b>	<b>159,038</b>	<b>100,045</b>	<b>103,542</b>	<b>105,612</b>	<b>110,132</b>
Inversiones Activo Fijo (sin IVA)	660,432						
Inversiones Activo de Trabajo	555,646	106,527	75,217	84,601	95,292	107,495	
Impuesto a las Ganancias	58,294	52,511	24,828	18,941	10,319	2,636	
IVA Inversion	138,691						
Egresos Cierre							
<b>TOTAL INGRESOS</b>	<b>348,361</b>	<b>342,741</b>	<b>275,642</b>	<b>272,019</b>	<b>261,906</b>	<b>243,435</b>	
UAIG	166,555	150,033	70,937	54,117	29,484	7,532	
Intereses Pagados							
Amortizaciones	72,196	72,196	72,196	72,196	72,196	72,196	59,704
Recupero del Credito Fiscal	109,609	120,512	132,509	145,706	160,226	176,198	
Ingresos Cierre							
<b>WACC</b>	<b>11.50%</b>						
Flujo de Fondos	799,123	265,580	183,703	175,597	168,477	156,294	133,303
Flujo de Fondos acumulado	799,123	1,064,703	881,000	705,402	536,926	380,632	247,329
Periodo de Repago Simple (años)							
Flujo de Fondos al año 0	799,123	238,187	147,762	126,674	109,002	90,690	69,372
Flujo de Fondos acumulado	799,123	1,037,310	889,548	762,874	653,872	563,182	493,810
Periodo de Repago Real (años)							
<b>FLUJO DE FONDOS</b>	<b>799,123</b>	<b>265,580</b>	<b>183,703</b>	<b>175,597</b>	<b>168,477</b>	<b>156,294</b>	<b>133,303</b>

**VAN** 779,546  
**TIR**

Figura 10.6. Flujo de fondos del proyecto bajo las condiciones dadas en el capítulo 7.8.

ANEXO VI

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>Activos</b>	<b>799,123</b>	<b>1,463,030</b>	<b>1,667,078</b>	<b>1,788,404</b>	<b>1,908,181</b>	<b>2,022,638</b>	<b>2,135,029</b>
<b>Activos Corrientes</b>	<b>0</b>	<b>736,103</b>	<b>1,012,347</b>	<b>1,205,869</b>	<b>1,397,842</b>	<b>1,584,495</b>	<b>1,756,591</b>
Disponibilidades	0	257,649	442,805	579,636	709,239	827,278	923,891
Créditos ventas	0	478,454	569,542	626,233	688,603	757,218	832,700
<b>Activos No Corrientes</b>	<b>799,123</b>	<b>726,927</b>	<b>654,731</b>	<b>582,535</b>	<b>510,339</b>	<b>438,143</b>	<b>378,439</b>
Manejo de Materiales	40,877	36,380	31,884	27,387	22,891	18,995	14,716
Pretratamiento	103,554	92,163	80,772	69,381	57,990	46,599	37,280
Proceso de enzima	42,512	37,835	33,159	28,483	23,807	19,130	15,304
Fermentación	51,232	45,597	39,961	34,326	28,690	23,054	18,444
Destilación	118,815	105,745	92,676	79,606	66,536	53,467	42,773
Tratamiento de aguas	17,986	16,007	14,029	12,050	10,072	8,094	6,475
Almacenamiento	10,900	9,701	8,502	7,303	6,104	4,905	3,924
Caldera	208,744	185,782	162,820	139,858	116,896	93,935	75,148
Varios	29,976	26,679	23,381	20,084	16,787	13,489	10,791
Terreno	58,364	58,177	56,989	55,802	54,615	53,428	52,240
Edificios	115,163	112,860	110,557	108,253	105,950	103,647	101,944
<b>Pasivo + Patrimonio Neto</b>	<b>799,123</b>	<b>1,463,030</b>	<b>1,667,078</b>	<b>1,788,404</b>	<b>1,908,181</b>	<b>2,022,638</b>	<b>2,135,029</b>
<b>Pasivos</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Deudas Bancarias LP	0	0	0	0	0	0	0
Deudas Bancarias CP	0	0	0	0	0	0	0
Deudas Comerciales	0	0	0	0	0	0	0
<b>Patrimonio Neto</b>	<b>799,123</b>	<b>1,463,030</b>	<b>1,667,078</b>	<b>1,788,404</b>	<b>1,908,181</b>	<b>2,022,638</b>	<b>2,135,029</b>
Acciones Comunes	799,123	1,354,769	1,461,296	1,536,513	1,621,114	1,716,406	1,823,902
Resultados No Asignados	0	108,261	205,782	251,891	287,067	306,232	311,128

Figura 10.7. Balance año a año del proyecto.

ANEXO VII

(M\$)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Precio Etanol Promedio (\$/lt)	2.2	2.4	2.6	2.9	3.2	3.5	3.9
Producción (MM lt)	237.3	237.3	237.3	237.3	237.3	237.3	237.3
Precio Electricidad Promedio (\$/MWh)	131.8	129.6	128.0	126.8	125.9	125.2	124.7
Producción (MWh)	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
<b>Ventas Totales</b>	<b>521,949.8</b>	<b>573,868.8</b>	<b>630,993.1</b>	<b>693,840.1</b>	<b>762,979.3</b>	<b>839,038.2</b>	<b>922,707.4</b>
MO	52,303	62,764	75,317	90,380	108,456	130,147	156,177
Compra de insumos	182,484	218,981	262,777	315,332	378,399	454,078	544,894
Mantenimiento	22,519	27,023	32,428	38,914	46,696	56,036	67,243
Costos de Operación	257,307	308,768	370,522	444,626	533,551	640,261	768,314
Utilidad antes del impuesto a las ganancias, amorti	264,643	265,101	260,471	249,214	229,428	198,777	154,394
Amortizaciones	72,196	72,196	72,196	72,196	72,196	72,196	72,196
Utilidad antes del impuesto a las ganancias e interes	192,447	192,905	188,275	177,018	157,232	139,073	94,689
Intereses							
Ingresos Brutos (3%)	15,658	17,216	18,930	20,815	22,889	25,171	27,681
Impuesto sobre bienes personales (1,25%)	9,989	18,288	20,838	22,355	23,852	25,283	26,688
Impuesto inmobiliario (0,9%)	244	244	244	244	244	244	244
Pago IVA		7,124	77,325	79,487	80,762	80,842	79,341
Utilidad antes del impuesto a las ganancias (UAIG)	166,555	150,033	70,937	54,117	29,484	7,532	-39,265
Impuestos	58,294	52,511	24,828	18,941	10,319	2,636	
Utilidad Neta	108,261	97,521	46,109	35,176	19,165	4,896	-39,265
Pago de dividendos							
Resultados Acumulados	108,261	97,521	46,109	35,176	19,165	4,896	

Figura 10.8. Cuadro de resultados estimado para el proyecto.