



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



FACULTAD DE
INGENIERÍA
UDELAR

OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DE LA INDUSTRIALIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS : RSU-EtOH

Andrade, Noelia
Bon, Marcelo
Costa, Francis
Ferreira, Mauricio
Pérez, María José

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

Tutores

Prof. Ing. Quím. Mónica Loustaunau
Prof. Ing. Quím. Raúl Prando

Montevideo, Uruguay
Abril de 2011

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a nuestras familias y amigos que nos han apoyado durante el transcurso del proyecto.

También a todas aquellas personas, instituciones y empresas que han colaborado y en especial, a los tutores que han contribuido con su experiencia en la elaboración del proyecto.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Estudio de Mercado y Comercialización	10
Capítulo 3. Localización y Tamaño	37
Capítulo 4. Evaluación Tecnológica	66
Capítulo 5. Ingeniería.....	122
Capítulo 6. Evaluación de Impacto Ambiental	316
Capítulo 7. Organización.....	339
Capítulo 8. Evaluación Económico - Financiera	346
Capítulo 9. Evaluación del Proyecto de Inversión	374

ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y GLOSARIO

Aditivo antidetonante: Producto que se mezcla con la gasolina para disminuir su poder detonante en los motores de explosión: uno de los antidetonantes más característico es el tetraetilplomo.

Almidón: Polisacárido de fórmula $(C_6H_{10}O_5)_n$ contenido en los órganos verdes de las plantas.

ALUR: Alcoholes del Uruguay.

AMM: Área Metropolitana de Montevideo.

ANCAP: Administración Nacional de Combustibles Alcohol y Portland.

Biodiesel: Combustible diesel producido a partir de biomasa. Es un combustible sintético líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, nuevos o usados, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación, y que se aplica en la preparación de sustitutos totales o parciales del diesel obtenido del petróleo.

Bioetanol: Etanol obtenido a partir de la actividad de microorganismos.

Biogás: Gas metano que se origina por la acción de bacterias sobre sustancias orgánicas, aparece principalmente donde hay desechos.

Biomasa: Masa total de los componentes biológicos de un ecosistema.

CALNU: Cooperativa Agropecuaria Limitada Norte Uruguayo.

CARU: Comisión Administradora del río Uruguay.

Celulosa: Polímero formado por unidades de glucosa de forma lineal que es el componente básico de la membrana de las células vegetales.

CEPIS/OPS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Organización Panamericana de la Salud.

CO₂: Dióxido de carbono.

Contaminación: Presencia de cualquier sustancia o energía o cualquier alteración física o química de un vector ambiental (agua, aire o suelo) o combinación de éstas que pueda generar efectos adversos a la salud y el bienestar humano así como a la utilización de los recursos naturales.

Contenido de humedad: Se determina mediante los siguientes métodos: En el método de medición peso-húmedo, la humedad de la muestra se expresa como un porcentaje del peso del material húmedo; en el método peso-seco se expresa como un porcentaje del peso seco del material. El método peso-húmedo se usa más frecuentemente en el campo de la gestión de los residuos.

COV: Compuestos orgánicos volátiles.

DBEDT: Department of Business, Economic Development and Tourism.

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno.

Destilación: Proceso de separación de mezclas que utiliza fases de vapor y líquido, esencialmente a la misma temperatura y presión.

DIEA: Dirección de Estadísticas Agropecuarias.

DINAMA: Dirección Nacional de Medio Ambiente.

DNA: Dirección Nacional de Aduanas.

DNETN: Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear.

DNH: Dirección Nacional de Hidrografía.

DNM: Dirección Nacional de Meteorología.

DQO: Demanda Química de Oxígeno.

Dureza: En química, se denomina dureza del agua a la concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio. Son éstas las causantes de la dureza del agua, y el grado de dureza es directamente proporcional a la concentración de sales metálicas.

E–DIESEL: Mezcla de bioetanol con gasoil utilizando un aditivo solvente y produciendo un biocombustible diesel. Posee muy buenas características en cuanto a combustión y reducción de contaminación.

E5: Mezcla del 5% de bioetanol y el 95% de gasolina normal.

E10: Mezcla del 10% de bioetanol y el 90% de gasolina normal. Hasta esta proporción de mezcla los motores de los vehículos no requieren ninguna modificación y produce la elevación del un octano en la gasolina mejorando su resultado y obteniendo una notable reducción en la emisión de gases contaminantes.

E85: Mezcla del 85% de bioetanol y 15% de gasolina, utilizada en vehículos con motores especiales.

E95 y E100: Mezclas hasta el 95% y 100% de bioetanol, son utilizados con motores especiales.

ETBE: Etil-ter butil éter. Se obtiene por síntesis del bioetanol con el isobutileno, subproducto de la destilación del petróleo. Se utiliza como aditivo de la gasolina. Posee las ventajas de ser menos volátil y más miscible con la gasolina que el propio etanol y, como el etanol, se aditiva a la gasolina en proporciones del 10–15%. La adición de ETBE o etanol sirve para aumentar el índice de octano de la gasolina, evitando la adición de sales de plomo.

Fermentación: Degradación anaeróbica de compuestos orgánicos realizada por las enzimas de ciertos microorganismos.

FOB: Free On Board (franco a bordo) de uso universal y que significa que la mercancía es puesta a bordo por el expedidor, libre de todo gasto, siendo de cuenta del destinatario los fletes, aduanas, etc.

Furfural: Es un aldehído derivado de varios subproductos de la agricultura, maíz, avena, trigo, aserrín, etc.

Gas natural: El que procede de formaciones geológicas o aceites naturales.

Gestión de residuos sólidos: Modalidad que se da una institución o un conjunto de instituciones con el objetivo de ejecutar o hacer que se ejecuten un conjunto de actividades necesarias para el manejo integral de los residuos sólidos. Se incluyen en

estas las políticas de gestión, recolección y tratamiento y el establecimiento de objetivos y metas, las actividades de planificación, ejecución, regulación y control.

Hemicelulosa: Polímero no celulósico que incluye: glucanos, mananos, galactanos y xilanos.

Hidratos de carbono: Glúcido. Nombre genérico de las sustancias orgánicas de reacción neutra, formadas por carbono, hidrógeno y oxígeno.

Hidrólisis: Descomposición de un compuesto químico por la acción del agua.

IICA: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

IMM: Intendencia Municipal de Montevideo.

IMP: Intendencia Municipal de Paysandú.

Índice CONEAT: También llamado índice de productividad final, se refiere a áreas de suelo homogéneas en cuanto a su productividad en términos de los rubros definidos.

INE: Instituto Nacional de Estadística.

KJ: Kilo Joule. Unidad de trabajo y energía.

Ktep: Kilo tonelada equivalente de petróleo.

Lignina: Polifenol complejo. Sustancia que aparece en los tejidos leñosos de los vegetales y que mantiene unidas las fibras de celulosa que los componen.

Lignocelulosa: La mezcla de polímeros más abundante en la biomasa, se compone de tres tipos de polímeros: la celulosa, la hemicelulosa y la lignina.

Lixiviado: Líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción, arrastre o percolación de agua pluvial y que contiene, disueltos o en suspensión, componentes que se encuentra en los mismos residuos.

Microrregión: comprende a la Ciudad de Paysandú, algunas áreas urbanas adyacentes como San Félix al Sur y Nuevo Paysandú al norte, su extensa área suburbana (ejidos de Paysandú), importantes áreas rurales y las localidades de Casa Blanca, Porvenir, Estación Esperanza y Constancia. Los límites del espacio microrregional se encuentran al sur en el Arroyo Negro y al norte en el Río Queguay, siendo difusos hacia el este, no más allá de la localidad de Piedras Coloradas. La microrregión es parte de un territorio binacional transfronterizo y centro de servicios de una zona de producción agropecuaria en transformación.

MIC/STI: Ministério da Indústria e do Comércio/Secretaria de Tecnologia Industrial.

MTOP: Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

NEB: Nebraska Ethanol Board.

NO_x: Óxidos de nitrógeno.

NREL: National Renewable Energy Laboratory.

NTK: Nitrógeno Total Kjeldhal.

Octanaje: El octanaje o índice de octano es una escala que mide la resistencia que presenta un combustible (como la gasolina) a detonar prematuramente cuando es comprimido dentro del cilindro de un motor.

OPYPA: Oficina de Política y Programación Agropecuaria.

OSE: Obras Sanitarias del Estado.

Paridad de exportación: Es el precio en el mercado internacional del bien menos los costos de transporte, almacenamiento, despacho, inspección, aranceles, etc.

PCI: Poder Calorífico Inferior.

PDRS: Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana

PDVSA: Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima.

Pentosa: Monosacárido (glúcidos simples) formados por una cadena de cinco átomos de carbono. Como en los demás monosacáridos aparecen en su estructura los grupos alcohólicos (OH). Además, también pueden llevar grupos cetónicos o aldehídicos. La fórmula general de las pentosas es $C_5H_{10}O_5$.

Peso específico: Se define como el peso de un material por unidad de volumen (por ejemplo, Kg. /m³) y depende de la localización geográfica, la estación del año y el tiempo de almacenamiento.

Plan de Gestión Ambiental: Documento donde se establecen las políticas y formas de gestión durante las distintas etapas del emprendimiento.

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

Reciclaje: Es la operación de utilizar un residuo, previa transformación para su fin inicial o para otros fines, entre los que se incluye el uso de compost, pero no la recuperación energética.

Relleño sanitario: Sitio de disposición final para residuos sólidos urbanos o asimilables que cuenta con una infraestructura determinada, y se realizan una serie de operaciones que permiten minimizar los riesgos a la salud y los impactos ambientales negativos.

Residuos sólido asimilable a urbano: Residuo que no pudiendo clasificarse por su origen como RSU, puede ser recolectado, transportado o eliminado conjuntamente con éstos.

RSD: Residuo Sólido Domiciliario, residuo sólido generado por actividades propias realizadas en las viviendas o en cualquier establecimiento semejante a aquellas.

RSDPG: Residuos Sólidos de Pequeños Generadores.

RSI: Residuos Sólidos Industriales.

RSU: Residuo Sólido Urbano, es cualquiera de lo clasificado como residuo sólido domiciliario, comercial o público o todo otro tales como: Residuo procedente de limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas; animales domésticos muertos, así como muebles, enseres; residuo o escombros procedente de obras menores de construcción y reparación domiciliaria.

Sacarífico: Sustancia que contiene azúcar.

Silvicultura: Técnica botánica que se ocupa del aprovechamiento integral de las especies de los bosques.

SDF: Sitio de Disposición Final, emplazamiento formal, normalmente bajo operación municipal, donde se realiza la disposición final de un residuo.

ST: Sólidos Totales

STV: Sólidos Totales Volátiles

Tratamiento: Cualquier proceso físico, térmico, químico o biológico, o conjunto de éstos, que cambian las características de los residuos, para reducir su volumen, su peligrosidad o para facilitar su manipulación o incrementar su valorización.

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket. Tipo de biorreactor tubular que operan en régimen continuo y en flujo ascendente, es decir, el influente entra por la parte inferior del reactor, atraviesa todo el perfil longitudinal, y sale por la parte superior. Son reactores anaerobios en los que los microorganismos se agrupan formando biogránulos.

UNIT: Instituto de Normas Técnicas del Uruguay.

VAL: Viabilidad Ambiental de Localización.

Valorización: Cualquier operación que permita la utilización de material o energía contenida en los residuos sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar impactos ambientales nocivos. Se incluyen todas las operaciones de reciclaje y de valoración energética.

Valorización Energética: Es la valorización de residuos con fines de recuperación de energía.

Vertedero: Sitio de disposición final donde los residuos se disponen a cielo abierto, sin impermeabilización, sin planificación ni control y sin tratamiento de emisiones.

Viñaza: Residuo del primer paso de destilación, denominada despojamiento, donde se separa el etanol de los sólidos remanentes de la fermentación (orgánicos e inorgánicos, solubles e insolubles) generando una solución de etanol en agua al 50% v/v y la viñaza que sale por el fondo de la columna de destilación.

Resumen ejecutivo

RESUMEN EJECUTIVO

El presente informe es un anteproyecto de factibilidad técnica y económica de una planta de obtención de etanol, que utiliza como materia prima los residuos sólidos urbanos (RSU) que ingresan al sitio de disposición final (SDF) de la ciudad de Paysandú.

La producción anual considerada en este proyecto es de 1.200 m³ de etanol hidratado, utilizando las 23.700 toneladas de RSU generadas en Paysandú.

Los destinos posibles para el etanol son el consumo industrial que, de acuerdo al estudio de mercado realizado, asciende a 7.100 m³/año y el alcohol carburante, con una demanda proyectada de 23.000 m³/año, en cumplimiento de la Ley N° 18.195.

El precio del alcohol considerado en este anteproyecto es de 0,8 U\$S/litro.

Se estudió la posibilidad de usar los RSU de varios departamentos, llegando a la conclusión que Paysandú es la mejor opción dado que concentra las características deseadas como ser: tener disponibles los RSU y contar con el apoyo de las autoridades del municipio. Si bien desde el punto de vista de la cantidad de RSU no era la mejor opción, las otras alternativas no estaban disponibles, por ejemplo Montevideo en el cual se proyecta llevar a cabo el Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana.

Este emprendimiento se ubicará en el predio donde está el SDF de los RSU de Paysandú. Esta ubicación es un punto estratégico debido a que se encuentra en el lugar donde se deposita la materia prima utilizada, facilitando en gran medida el acceso a la misma. Además, se destaca la existencia de un plan urbanístico donde se prevé instalaciones industriales y disponibilidad de agua entre otras. El emprendimiento ocupará un área de 0,2 hectáreas, que se arrendará a un costo de 100 U\$S por hectárea y por mes.

La Intendencia Municipal de Paysandú (IMP) proyecta la clasificación en origen de los residuos generados en la ciudad de Paysandú y alrededores, por lo que los mismos serán de dos tipos: RSU clasificados en origen (RSU húmedos y RSU secos) y RSU sin clasificar. Los residuos que ingresan a la planta son los sin clasificar y los húmedos.

Luego de una extensa búsqueda bibliográfica y un análisis exhaustivo de las tecnologías aplicables a nivel mundial, se definieron las más adecuadas para llevar a cabo el proceso productivo.

La producción de bioetanol se divide en 5 etapas fundamentales: Acondicionamiento, Pretratamiento, Hidrólisis, Fermentación y Destilación.

En primer lugar, los RSU que ingresan a la planta son acondicionados, lo que consiste en la separación de los RSU secos (vidrio, plástico, metales y otros no orgánicos), obteniéndose los "RSU acondicionados". Los RSU secos no serán valorizados en este proyecto, debido a que a medida que avance la clasificación en origen, el volumen de estos irá mermando por lo que no aporta ingresos significativos.

Esta etapa se diseñó de acuerdo a la logística utilizada para la recolección de residuos de la IMP. Además se modeló el ingreso de los RSU tomando en cuenta la clasificación en origen, la que será progresiva y alcanzará el 100% en el año 9 de la vida del proyecto.

En la etapa de pretratamiento, los RSU acondicionados son descompuestos a alta presión y temperatura de forma que queden preparados para la hidrólisis. A continuación se realiza una hidrólisis enzimática y luego una fermentación con levaduras obteniéndose etanol. Por último, el etanol se concentra mediante una destilación simple.

El emprendimiento empleará al comienzo 64 personas, de los cuales 28 serán clasificadores. Debido a la clasificación en origen proyectada, el número de clasificadores empleados irá disminuyendo hasta alcanzar 8, totalizando entonces 44 personas.

El proceso se diseñó de forma de aprovechar al máximo las fuentes de energía y los recursos naturales, minimizando el impacto ambiental inherente a la instalación del emprendimiento. Para lo cual:

- Como fuente de energía se utiliza la biomasa recuperada en el proceso (9 toneladas por día) que debe ser complementada con leña (19 toneladas por día).
- Se reutilizan 113 m³/día de aguas residuales, recirculándola en un ciclo cerrado de 1200 m³/día, siendo necesarios 94 m³/día de agua de reposición tomados del Río Uruguay. El vertido a curso de agua se realizará una única vez al año cuando se realice el paro para mantenimiento.
- Se previó el aprovechamiento del vapor generado en el proceso (67.500 Kg/día).
- Se generará energía eléctrica (0,2 MW) a partir del metano generado en el tratamiento de efluentes, la que será vendida a UTE.

En función de la evaluación del impacto ambiental realizada se entiende que el proyecto trae para Paysandú un conjunto importante de impactos positivos; genera una importante dinámica en la economía local, y a su vez, contiene un conjunto de medidas de mitigación que hacen posible su ejecución en forma admisible para el medio ambiente. Como es el caso de la selección de la tecnología para el enfriamiento de la viñaza, donde se priorizó minimizar los olores molestos a pesar del aumento de costos y el de la reutilización del efluente a través de un circuito cerrado.

La inversión total necesaria para la instalación de este emprendimiento es de 5,5 millones de U\$S, esta cifra se discrimina en un 98,7% de inversiones amortizables y un 1,3% de no amortizables. Los costos totales anuales en promedio son 1,5 millones de U\$S, que se compone de costos fijos y costos variables, los que representan 62 y 38% respectivamente. El principal aporte al costo fijo es la mano de obra que representa un 52%. En el caso de los costos variables, el mayor componente es la leña que representa un 59%.

Del estudio económico-financiero del emprendimiento se determinó que no es rentable desde el punto de vista financiero. Sin embargo, este proyecto puede ser viable si el nivel de producción supera los 1.400 m³ por año de etanol (punto de equilibrio), lo que puede conseguirse complementando con alguna otra materia prima como puede ser el aserrín generado en el aserradero contiguo. Para una producción de 1.500 m³/año de etanol, se requiere procesar unos 21 m³/día de aserrín. La utilidad del proyecto en ese caso, se estima en 200.000 U\$S por año.

Por último, este proyecto tiene un gran interés debido a los siguientes puntos: El etanol se avizora como una alternativa energética al petróleo en el futuro, además de ser producido a partir de un residuo que actualmente no se valoriza económicamente, cuya acumulación por otra parte es un serio problema medioambiental.