

BIOETANOL A PARTIR DE UN RESIDUO AGRÍCOLA EN MÉXICO: SIMULACIÓN DEL PROCESO Y ESCENARIOS DE CONSUMO.

Elizabeth Mar Juárez*, Florentino Murrieta, Jorge Aburto Anell

Instituto Mexicano del Petróleo. Eje Central Lázaro Cárdenas 152, Col. San Bartolo
Atepehuacan, CP 07730, México, DF.

* Tel: (55) 91757492; Fax (55) 91757561; emar@imp.mx

RESUMEN

(Presentación Oral) En este trabajo se simula el proceso para producir bioetanol a partir de bagazo de caña con el software SuperPro Designer. A partir de ello, se proyectan dos escenarios de consumo de bioetanol en México: primero, como sustituto del oxigenante de las gasolinas; y segundo, como una alternativa energética para evitar emisiones de gases de efecto de invernadero.

El proceso propuesto consiste en un pretratamiento, seguido de una sacarificación y termina con la fermentación de hexosas y pentosas. El pretratamiento consiste en una ozonólisis para hidrolizar la lignina y liberar la celulosa y hemicelulosa de su conformación cristalina. El resultado óptimo propone que la severidad del pretratamiento puede ser moderada, con una conversión sólo del 5% de la biomasa. Así, el rendimiento óptimo es de 0.2382 kilogramo (kg) de etanol por kg de bagazo, el costo es de 0.3228 dólares por litro de etanol y se requiere una inversión de alrededor de 48 millones de dólares por planta.

Los escenarios de consumo muestran que la producción nacional de bioetanol de manera tradicional es insuficiente para cualquier objetivo de introducción del mismo en la matriz energética. Entonces, la alternativa de producción de bioetanol vía residuos lignocelulósicos es la única manera de abastecer con materia prima nacional cualquier escenario de consumo. Así, el uso del bagazo de caña representa una producción potencial de 5,377 millones de kg de etanol, es decir siete veces la cantidad requerida para la oxigenación de gasolinas en México.

1.- Introducción

Las razones para promover un cambio hacia el uso extendido de biocombustibles complementando el uso de combustibles fósiles se deben a dos preocupaciones: primero, la disminución de la seguridad energética-capacidad de acción dada la actual dependencia de importaciones en adición a la incertidumbre sempiterna del mercado petrolero y, segundo, la relevancia de los efectos ambientales que genera el uso de las energías tradicionales sobre el clima del planeta. Es decir, se movería el balance del consumo de combustibles hacia el lado de la sustentabilidad.

Sin embargo, es necesario considerar que el bioetanol es el único biocombustible producido actualmente a escala comercial, aproximadamente 6,540 millones de kilogramos en el mundo [1]. Además, al emplearse en mezclas de gasolina en un porcentaje menor del 10% de etanol anhidro, los motores de los vehículos actuales no requieren adecuaciones para su uso. Así, la transición en su incorporación a la canasta de combustibles, no requiere mayores inversiones del lado del consumidor final.

El bioetanol es un biocombustible que tiene una historia comercial madura, lo que implica que las materias primas empleadas para su producción son productos agrícolas conocidos; además de que su proceso de producción es relativamente simple. En la actualidad, éste se obtiene principalmente de aquellas materias primas agrícolas que contienen sacarosa como la caña de azúcar, el betabel, el sorgo dulce; así como de materias agrícolas ricas en almidón como el maíz, el trigo, la cebada o la papa. Una tercera ruta puede partir de los materiales ricos en celulosa como el bagazo de caña, la madera, la paja del trigo, algunos tipos de pastos, y una variedad amplia de residuos agrícolas. Por ello se puede afirmar que existe una amplia disposición de materias primas para su producción.

A nivel mundial, Estados Unidos y Brasil son los principales productores de etanol. De acuerdo a cifras de la Asociación de Combustibles Renovables (RFA), Estados Unidos logró una participación del 52% en la producción mundial, seguido por Brasil con una aportación del 34% al mercado y en menor medida se tiene a la Unión Europea y China

con una participación del 5% y 3% respectivamente, y de acuerdo con estas cifras los productos agrícolas más utilizados para obtener etanol son caña de azúcar y maíz [1].

El interés por la producción de biocombustibles en México no es ajeno a una tendencia mundial. Este interés se refleja tanto en el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 como en el Programa Sectorial de Energía 2007-2012, donde se reconoce la necesidad de fortalecer la seguridad energética de nuestro país, mediante el uso de fuentes renovables de energía y un uso extendido de bioenergéticos que sean social, económica y ambientalmente viables.

Estas metas quedan patentes en la licitación pública que PEMEX Refinación realizó para la compra de etanol anhidro para oxigenar la gasolina de la Zona Metropolitana de Guadalajara. El proyecto indica una compra prospectiva de inicio de 37 millones de litros incrementándose esta cantidad hasta un total de 162 millones de litros al final de un periodo de cinco años [2] que representa el 6% del volumen de la gasolina que se vende en esa ciudad. De forma similar existe un plan para oxigenar las gasolinas que se venden en Monterrey y el D.F.

En este contexto, surgen una serie de preguntas sobre el potencial y la viabilidad comercial de producir y consumir biocombustibles en México. Las principales preguntas en torno a esto son:

1. ¿Podrán los biocombustibles ser producidos a nivel nacional a un costo competitivo en comparación con los combustibles tradicionales?
2. ¿La obtención del bioetanol con las materias primas disponibles nacionalmente es comercialmente viable?
3. ¿Esta opción se presenta como una alternativa rentable en conjunción con los objetivos nacionales de seguridad energética en términos de abasto seguro e independencia energética?

2.- Producción de Bioetanol con base a materiales lignocelulósicos

El bioetanol es producido por fermentación, usando levaduras u otros microorganismos para convertir los azúcares en etanol. En realidad, hay poca diferencia entre los procesos base para obtener cerveza o vino y aquellos para obtener etanol de grado industrial, todos tiene la misma base. El etanol grado combustible o anhidro requiere de una destilación adicional y luego un proceso de deshidratación como se muestra en el figura 1. Asimismo se muestran las diferencias del proceso de acuerdo a los tres tipos de materias primas disponibles en la actualidad.

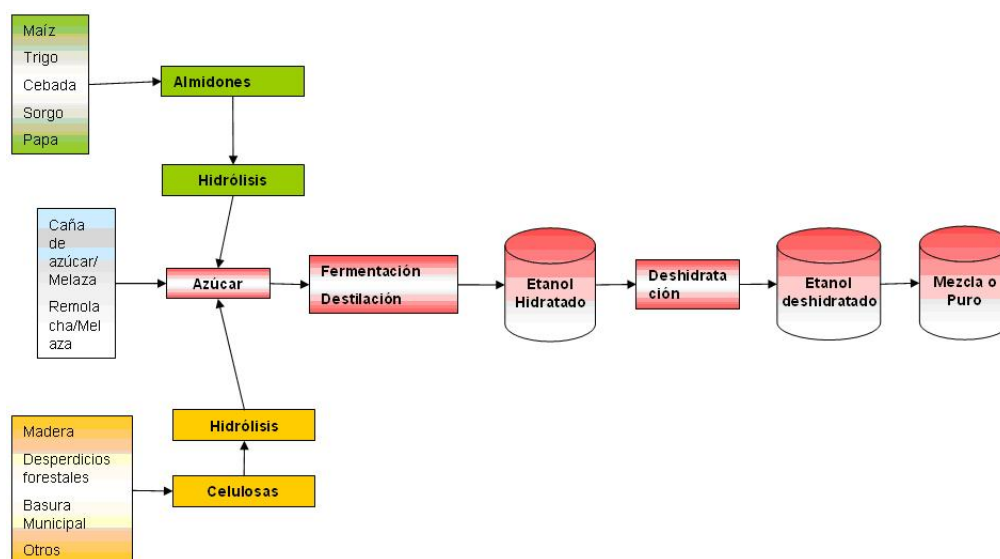


Figura 1. Proceso de Producción de Bioetanol

La base de todas las fermentaciones para obtener bioetanol es el azúcar, tradicionalmente una hexosa (una molécula con seis moléculas de carbono o azúcar “C6”) como la que se presenta de forma natural en la caña de azúcar y la remolacha. En México, el etanol tradicionalmente ha sido producido a partir de melaza, o miel de caña, que es un subproducto del azúcar refinado, es decir un residuo de las cubas de extracción y que históricamente posee bajo valor en el mercado.

En trabajos anteriores [3], se ha demostrado que los requerimientos de bioetanol como oxigenante de la gasolina del sector autotransporte mexicano para las zonas metropolitanas

son mucho mayores que nuestra capacidad actual de producción de bioetanol. Es necesario recordar que la producción de etanol anhidro en México es de 115 mil litros por día (91 mil kg/día) y PEMEX ha estipulado [2] una compra mínima de 630 mil litros por día (499.2 mil kg por día) de etanol anhidro. Por ello, la capacidad de producción actual disponible es mínima. Así, es necesario considerar utilizar nuevas tecnologías como el uso de materiales lignocelulósicos para que su producción con materias primas nacionales sea factible sin alterar el mercado alimentario ni ampliar la frontera agrícola.

Si bien, la materia lignocelulósica está disponible en mayores cantidades que las materias primas que contienen azúcar C6 y almidón, la recuperación de los azúcares que contiene esta biomasa es más complicada. El complejo lignocelulósico está compuesto principalmente de una matriz cristalina de carbohidratos integrada por celulosa y lignina enlazadas por cadenas de hemicelulosa. Así, es necesario un pretratamiento con el objetivo de desintegrar esta matriz de tal manera que la celulosa reduzca su grado de cristalinidad y aumente la cantidad de celulosa amorfa, que es la más adecuada para el posterior proceso enzimático.

Así, una parte de la hemicelulosa se hidroliza durante el pretratamiento y la lignina se libera o puede incluso descomponerse. En la etapa siguiente, la celulosa liberada es sometida a una hidrólisis enzimática con celulasas exógenas, con lo cual se obtiene una solución de azúcares fermentables que contiene principalmente glucosa, así como pentosas (azúcares C5) resultantes de la hidrólisis inicial de la hemicelulosa. Estos azúcares son posteriormente convertidos en etanol mediante microorganismos que pueden utilizar uno o varios de los azúcares presentes en el material lignocelulósico pretratado e hidrolizado.

En la actualidad, la investigación y desarrollo tecnológico para la producción del etanol teniendo como base biomasa lignocelulósica presenta como reto principal el obtener procesos a nivel industrial que permitan realizar un pretratamiento e hidrólisis de la materia prima a bajo costo y de rápida acción. El pretratamiento permite que los

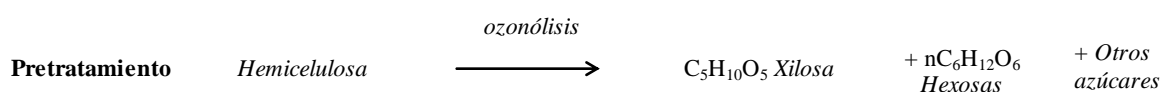
rendimientos teóricos de la hidrólisis de celulosa aumenten en al menos un 20% y en algunos casos la hidrólisis alcanza un rendimiento de 90% [4].

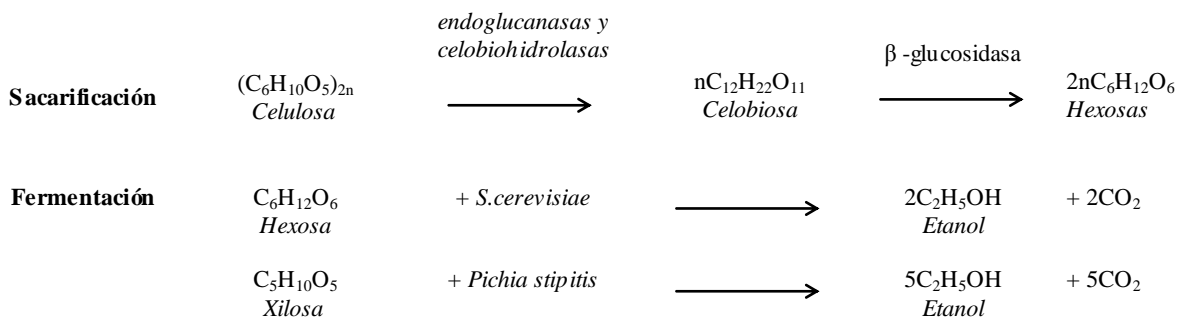
Sin embargo, ninguno de los métodos de pretratamiento propuestos se puede aplicar en forma genérica a las diferentes materias primas [5], por lo que es necesario un análisis detallado de estas tecnologías para cada caso en particular. En este caso, se seleccionó la ozonólisis porque es un pretratamiento que hidroliza la lignina sin afectar la celulosa y la hemicelulosa aumentando la accesibilidad a la etapa de hidrólisis siguiente. Así, luego del pretratamiento, la celulosa liberada es degradada hasta glucosa (sacarificación), lo cual puede hacerse con ácidos o enzimas (celulasas).

La mayoría de las celulasas comerciales son producidas a partir de *Trichoderma reesei*, del cual se obtiene básicamente una mezcla de celobiohidrolasas y endoglucanasas [6, 7]. Las primeras hidrolizan los enlaces β (1,4) de la cadena de celulosa liberando celobiosa o inclusive glucosa, mientras las endoglucanasas rompen estos mismos enlaces en forma aleatoria dentro de la cadena. Las celobiohidrolasas son inhibidas por la celobiosa liberada, por lo que se agrega β -glucosidasa para complementar la acción de las celulasas de este hongo. La β -glucosidasa hidroliza la celobiosa obtenida en dos moléculas de glucosa.

3.- Simulación del proceso para la producción de bioetanol

La simulación de procesos puede aportar las herramientas necesarias para descartar las opciones con menos perspectivas en forma preliminar. Así, el proceso de producción de bioetanol mediante lignocelulósicos se simuló mediante la utilización del software SuperPro Designer, donde se incluyeron todas las operaciones unitarias necesarias para la producción de bioetanol, pero solamente se optimizaron las de corriente arriba (*upstream*) de la fermentación de azúcares. Las reacciones que ocurren se muestran a continuación:





Sí sólo se utiliza *Sacharomyces cerevisiae*, que es la levadura más común, sólo fermentaría a la glucosa y como se presenta hidrolizado de Hemicelulosa que está compuesto no sólo por glucosa, sino también principalmente de xilosa; esta última se fermenta entonces con *Pichia stipitis*. Cabe mencionar que la hidrólisis enzimática y la fermentación pueden llevarse a cabo simultáneamente (sacarificación-fermentación).

La simulación se realizó con bagazo de caña de azúcar, el cual está compuesto en aproximadamente un 45% de material lignocelulósico (46.6% de Celulosa, 25.2% de Hemicelulosa y 20.7% de Lignina), un 50% de humedad, de un 2 a 3% de sólidos insolubles y de 2 a 3% de sólidos solubles [8].

Las variables experimentales fueron una ozonólisis a una temperatura de 25° C y dos reacciones: la eliminación de lignina al 100% y la hidrólisis de la hemicelulosa con una conversión del 5 al 15%. La sacarificación, a una temperatura de 25° C con cuatro reacciones: la hidrólisis de celulosa con una conversión del 20 al 100%, la de la hemicelulosa con una conversión del 20 al 100%, la de la sacarosa y la de la pectina al 100%. Y por último, la fermentación de hexosas (glucosa y fructuosa) y pentosas (xilosa) que se llevó a cabo a una temperatura de 32° C, con una conversión del 20-60%.

Las operaciones corriente abajo (*downstream*) de la fermentación se mantuvieron constantes ya que se consideró que son procesos convencionales que impactan en menor medida la producción del bioetanol con base en lignocelulósicos en su conjunto. Estas operaciones son la destilación del etanol y la deshidratación del bioetanol, así como la

recuperación y uso de los sólidos generados en el proceso (biomasa y residuo lignocelulósico).

Los balances de materia y energía los llevó a cabo el software y se utilizó un diseño de experimentos por el método de Superficie de Respuesta por medio del software Statgraphics para simular diferentes condiciones de operación para estimar el rendimiento de cada una de las operaciones unitarias seleccionadas. Al finalizar, esto permitió conocer la sensibilidad de cada variable y su impacto en el costo de producción del bioetanol. El diseño que se utilizó para la simulación es el de Box-Behnken con 4 factores experimentales (ozonólisis, sacarificación, fermentación de hexosas y pentosas) a tres niveles, 3 respuestas (rendimiento del bioetanol, costo de producción e inversión) y 27 corridas experimentales y los resultados del mismo se reportan en un trabajo previo y que se presentan a continuación [9].

Como se menciona arriba, el modelo de superficie de respuesta se estableció para minimizar el costo del etanol y la inversión de capital así como maximizar el rendimiento de bioetanol. En primer lugar, se analizó el costo de producción de bioetanol en función de la ozonólisis y la sacarificación. Así se determina que la severidad de la conversión de la ozonólisis sólo requiere de un valor de 5% para minimizar el costo del bioetanol y no es una operación determinante ya que el valor de la respuesta no cambia después de alcanzar este nivel de conversión. Aunado a esta respuesta, la sacarificación se vuelve el factor determinante ya que la inversión de capital se minimiza mientras más se hidrolice la celulosa. Entonces, la sacarificación se debe de llevar a cabo completamente, es decir al 100%; con estos dos parámetros fijos, el análisis muestra que para minimizar el costo del bioetanol se requiere una eficiencia constante de la fermentación de hexosas y pentosas, determinada al 60%.

El conjunto de rendimientos para la simulación es una fermentación tanto de hexosas como de pentosas al 60%, una ozonólisis mínima (al 5%) y una sacarificación alrededor del 100%. Así, el rendimiento óptimo que se obtiene de la simulación es de 0.2382 kilogramo (kg) de etanol por kg de bagazo, el costo es de 0.3228 dólares por litro de etanol y se

requiere una inversión de alrededor de 48.264 millones de dólares por planta para procesar 470 mil toneladas de bagazo al año [9].

4.- Escenarios de consumo de etanol en el sector transporte mexicano

El consumo del bioetanol en México tendrá dos impulsores, en el corto plazo su demanda será derivada de la cantidad de oxigenante que se requiera para adicionarse a las gasolinas; en el mediano y largo plazo, su función de demanda dependerá de otras variables económicas, sociales y ambientales derivadas de contextos nacionales e internacionales.

Por ello, y para evaluar la cantidad de bioetanol que se requeriría producir en México y la cantidad de bagazo de caña necesaria para producirlo se desarrollan tres escenarios, de acuerdo a las siguientes líneas:

- a) Escenario E-1: el bioetanol sustituye completamente al metil terbutil éter (MTBE) como oxigenante de las gasolinas de la Zona Metropolitana de Guadalajara, Monterrey y Ciudad de México, 2% en peso (5.6% en volumen).
- b) Escenario E-2: el bioetanol sustituye completamente al MTBE en todo el país, respetando las exigencias de oxigenación de 2% de peso.
- c) Escenario E-3: México asume compromisos de reducción de emisiones tipo Protocolo de Kyoto utilizando el bioetanol como combustible para el sector transporte. El escenario se construye teniendo como meta la reducción de emisiones y se lleva a cabo mediante mezclas de gasolina-etanol donde el bioetanol representa en promedio el 38% del consumo nacional.

Escenario 1: Oxigenante de Zonas Metropolitanas (E-1)

El etanol sustituye al MTBE como oxigenante, resultando en una mezcla con 5.7% en volumen de bioetanol. La demanda inicial de bioetanol son 426 millones de litros (aproximadamente 337.6 millones de kg). Esta cifra aumenta en un 3.4% anual para situarse en el 2030 en 853 millones de litros (aproximadamente 676 millones de kg).

La producción anual en México de caña de azúcar es de 42'516,838 toneladas [10] y ésta contiene el 16% de fibra, entonces la producción potencial de bagazo en México es de 6.8

millones de toneladas. Así, utilizando bagazo de caña como material lignocelulósico es factible que el bioetanol sea usado como oxigenante en gasolinas para las zonas metropolitanas de Guadalajara, Monterrey y la Ciudad de México.

$$6'802,694 \times 10^3 \text{ kg biomasa/año} * 0.2382 \text{ kg etanol/kg biomasa} = 1,620 \text{ millones kg etanol/año}$$

Escenario 2: Oxigenante para todo el país (E-2)

Se considera la misma proporción volumétrica que en E-1. Sí en la construcción del escenario, se hubiera considerado que el consumo como oxigenante fuera al 100% en todo el país en el primer año, se hubiera presentado una demanda inicial de 1,193 millones de litros (945.3 millones de kg) que implicaría casi triplicar la producción inicial con respecto al escenario E-1. Esto no resulta factible por el tiempo requerido para la construcción de plantas de producción, por ello se determinó una entrada gradual como oxigenante. La introducción empieza por las zonas metropolitanas y crece gradualmente hasta cubrir todo el territorio nacional.

Así, este escenario toma como base el primer año del E-1 y de forma gradual introduce el bioetanol como oxigenante con una tasa de crecimiento promedio del 8.7% anual, para que en 2030 toda la gasolina que se consume en el país contiene etanol como oxigenante. En la figura 2 se muestra el crecimiento de los requerimientos de bioetanol en ambos escenarios.

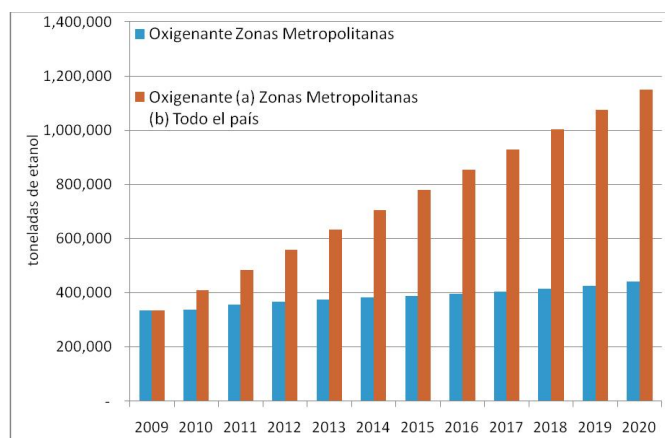


Figura 2. Requerimientos de bioetanol escenarios E-1 y E-2.

Al realizar nuevamente el cálculo de requerimientos de materia prima para producir el bioetanol, ahora se considera que la producción promedio de caña de azúcar entre 2000 y 2009 ha sido de 75 millones de toneladas al año y también se asume que existe un potencial de producción máximo en el país de 257 millones de toneladas de caña de azúcar bajo las mismas condiciones de producción [10]. Por ello, para abastecer de bioetanol sería necesario que la producción de caña de azúcar aumente a un ritmo del 4.3% anual entre 2020 y 2050 para cubrir los requerimientos de este escenario y que es la tasa de crecimiento del consumo de gasolinas esperado [11].

Escenario 3: Opción para reducir emisiones del sector transporte mexicano (E-3)

En este escenario, se considera la producción de bioetanol como un instrumento para reducir las emisiones de gases de efecto de invernadero (GEI). Por ello, además de emplearse como oxigenante, se considera que sustituirá el 10% de las ventas de gasolina entre 2012 y 2020; y que a partir del 2021 hasta el 2050, se tendrá una sustitución del 15% de las ventas totales de gasolina por etanol. La reducción de emisiones considerando estas sustituciones es del 15% con respecto a un escenario base de consumo de gasolina [3].

Este escenario es mucho más agresivo que los anteriores en su introducción de bioetanol ya que el plazo en el que se tienen que cumplir con los compromisos ambientales es corto. Para ello, el primer año se inicia con la sustitución de importaciones de gasolina por etanol y además se considera que el 5% de los autos en circulación utilizan etanol al 85% (E85). Se continúa con esta política aumentando el número de vehículos que empleen etanol como combustible base. Así, el E-3 inicia con un valor de 1,193 millones de litros (942.8 millones de kg) como requerimiento base y aumenta a una tasa anual del 5%.

Sin embargo la cantidad de caña de azúcar que se requeriría estaría en el límite de la producción máxima arriba señalada para el 2023, después de ese año no existiría como posibilidad emplear mayor cantidad de bagazo de caña. Sin embargo, se supone que para ese año, y debido a que el uso del bagazo ha sido exitoso y se ha planeado de antemano,

que se pueden empezar a utilizar otros materiales lignocelulósicos para la producción de bioetanol.

4.- Resultados y discusión

Aún en el caso de abastecer bioetanol en el caso del escenario más moderado, el denominado E-1, no se cuenta en la actualidad con la producción nacional necesaria por medios tradicionales. Las importaciones de bioetanol comenzarían desde el primer día, así es que si se quisiera tomar en cuenta el concepto de seguridad energética, tampoco se contaría con la investigación y tecnología necesaria para hacer frente a esta opción.

En la siguiente tabla, se muestran los resultados de cruzar los requerimientos de los escenarios de consumo de bioetanol con los resultados de la simulación de procesos para la obtención de bioetanol con bagazo de caña. Como se observa, otro punto que no se debe menospreciar es el del nivel de inversiones requeridas, pero los ahorros posibles por dejar de importar gasolinas y MTBE deberían de motivar una consideración especial para comenzar el proceso de investigación y desarrollo tecnológico y obtener bioetanol base materiales lignocelulósicos a escala industrial en México.

Tabla I. Requerimientos de etanol y ahorros obtenidos de acuerdo a diversos escenarios

ESCENARIO	[valor promedio entre 2009-2030]		(miles de dólares de 2005, promedio anual)		
	Demanda de etanol para un crecimiento de demanda de gasolina del 4.3% (miles de kg etanol)	Plantas que se requiere construir anualmente para cubrir la demanda	Ahorros generados por reducción de importaciones de gasolina y MTBE	Inversión en plantas	Ahorros potenciales
E-1. Sustitución del MTBE por bioetanol para tres zonas metropolitanas	465,595	4	255,085	200,721	54,364
E-2. Sustitución del MTBE por bioetanol en todo el país (sustitución gradual)	1' 113,469	10	715,745	480,023	235,722
E-3. Como energético (10% de etanol en sustitución de gasolinas)	7' 391,097	66	4' 052,755	3' 186,343	866,411

5.- Conclusiones

Queda patente que la actual forma de producir y consumir energía es no-sustentable. Los biocombustibles se presentan como un energético ideal donde se puede proteger al medio ambiente, reactivar la economía rural, ampliar el espectro de combustibles y generar empleos. Sin embargo, en este trabajo se ha presentado un panorama realista respecto a diversas metas que se han planteado en diversos foros y que podrían existir alrededor de los biocombustibles en el sector transporte mexicano.

¿Qué conclusión práctica se puede obtener? Si se quiere modificar el consumo energético, ya sea por razones medioambientales, de seguridad energética o de agotamiento de recursos, lo más efectivo es actuar directamente sobre el consumo y los usos finales de la energía.

Pero, el uso de bioenergéticos en México presenta oportunidades interesantes desde el punto de vista socioeconómico y ambiental. También presenta retos importantes que no se deben menospreciar. Es necesario resolver la situación más simple del E-1 y entonces considerar las posibilidades de los demás. Los otros dos escenarios se deben dejar de considerar como viables en el corto plazo tanto en los discursos de comunicólogos y políticos, como en círculos académicos. Si se busca establecer cualquiera de los escenarios en el futuro del país, es necesario un esfuerzo encaminado a mejorar los rendimientos agrícolas en cuanto a caña de azúcar, maíz amarillo y otros cultivos energéticos, por lo menos a los niveles que se producen en Brasil y EUA.

6.- Agradecimientos

El presente estudio formó parte del proyecto D.00463 del Instituto Mexicano del Petróleo. El primer autor expresa un agradecimiento a la Dirección de Ingeniería de Proceso, en especial al Ing. Rubén Mancilla por el apoyo otorgado durante el desarrollo de este trabajo. Así mismo, un agradecimiento a Raúl Cruz de la Oficina de Gestión de la Propiedad Intelectual del IMP.

7. - Referencias

- [1] Renewable Fuels Association, *2010 Ethanol Industry Outlook*, 36, RFA, Washington D.C., (2010).
- [2] PEMEX Refinación, Subgerencia de Adquisiciones B, *Licitación Pública Nacional, No.18576112-022-09*, Diario Oficial de la Federación, (2009).
- [3] E. Mar Juárez, F. Murrieta, N. Domínguez, C. Juárez Soto, 1er Congreso Nacional de Investigación e Innovación Tecnológica Ambiental, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, CD-ROM, Toluca, México, (2010).
- [4] L.R. Lynd, *Annual Review of Energy and the Environment*, 21, 403, (1996).
- [5] P.A.M. Claassen, J.B. van Lier, A.M. Lopez-Contreras, E.W.J. van Niel, L. Sijtsma, A.J.M. Stams, S.S. de Vries, R.A. Weusthuis, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 52, 741, (1999).
- [6] L.R. Lynd, P.J. Weimer, W.H. van Zyl, I.S. Pretorius, *Microbiology and molecular biology reviews*, 66, 506, (2002).
- [7] Y. Zhang, L.R. Lynd, *Biotech. Bioeng.* 30, 797, (2004).
- [8] E. Valdez Barrón, *Caña de azúcar: factores de cultivo-cosecha*. 58, Universidad Autónoma de Chapingo, México, (1996).
- [9] J. Aburto, T. Martínez, F. Murrieta, *Tecnología, Ciencia, Educación*, 23, 23, (2008).
- [10] Secretaria de Agricultura, Ganadería, Recursos Pesqueros y Alimentación, *Producción nacional varios cultivos*, consultado en la página electrónica http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=346, (2010).
- [11] Secretaria de Energía, *Prospectiva de Petrolíferos 2008-2017*, 198, SENER, México, (2008).