

**Universidad Tecnológica Nacional**

Facultad Regional Tucumán

Escuela de Posgrado

**LA TASA DE RETORNO ENERGÉTICO: SU  
IMPORTANCIA EN EL CONTEXTO ENERGÉTICO  
MUNDIAL Y NECESIDAD DE SU ANÁLISIS EN LA  
PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES**

**Ing. Qca. Romina A. Salazar**

Trabajo Final Integrador para optar al Grado Académico Superior de  
Especialista en Ingeniería Bioenergética

Tutor: Ing. Gerónimo J. Cárdenas

San Miguel de Tucumán

Año 2017

## **Resumen**

La sociedad que conocemos se sustenta con grandes cantidades de energía, y si bien se han diversificado sus fuentes, aún posee una gran dependencia de los combustibles de origen fósil como el carbón y el petróleo. Existe un indicador de gran utilidad conocido como Tasa de Retorno Energético (TRE), el cual enuncia que dada una determinada fuente de energía, su Tasa de Retorno Energético representa la cantidad de energía recuperada por cada unidad de energía invertida. Este trabajo introduce el concepto de TRE y realiza un análisis minucioso del mismo, destacando su importancia en el contexto energético mundial, con especial énfasis en la producción de biocombustibles. Hacia el final del mismo se presenta una comparación entre los valores de TRE obtenida para el etanol que se produce en la provincia de Tucumán cuando se considera o no a las energías vinculadas a la producción de los insumos necesarios para la fabricación, de modo de evaluar su incidencia en el indicador estudiado.

## ÍNDICE

Introducción _____	4
Objetivo del trabajo _____	5
La Tasa de Retorno Energético y la Energía Neta _____	5
La TRE del petróleo _____	7
La curva de la Energía Neta _____	9
El verdadero valor de la TRE _____	11
TRE de las energías renovables _____	12
El panorama de los biocombustibles _____	13
La tasa de retorno energético del bioetanol producido en Tucumán _____	16
Conclusiones _____	21
Bibliografía _____	23

## **Introducción**

El mundo actual funciona consumiendo grandes cantidades de energía, y si bien se han diversificado sus fuentes, aún tiene una gran dependencia de los combustibles de origen fósil como el carbón y el petróleo.

Se considera que existe carbón mineral en importantes cantidades para ser extraído, pero se busca limitar su empleo dado que los gases de combustión que produce son altamente contaminantes (Mander, 2009).

El petróleo, símbolo del desarrollo económico del mundo occidental desde la segunda mitad del siglo XX, ha comenzado a escasear. Su extracción se ha hecho cada vez más complicada y más cara en términos económicos, pero además, es necesario gastar cada vez mayores cantidades de energía para extraerlo y obtener de él los combustibles que la sociedad demanda.

Por otro lado, debe tenerse muy presente que el complejo conjunto de energías renovables (eólica, solar, hidroeléctrica, biomasa, undimotriz, etc.) nunca alcanzará la capacidad de sustituir un sistema de combustibles fósiles que, a causa de su temporal abundancia y bajo precio, ha hecho adictos a los países industrializados en el siglo XX a una muy intensa producción, consumo y muchas veces derroche, que está llevando al mundo a una difícil situación energética (Mander, 2009).

Una sociedad moderna podría estar cien por ciento basada en energías renovables (principalmente aquellas que provienen del sol y el viento), a pesar de que para ello tendrá que someterse a profundos cambios con el fin de adaptarse a la nueva infraestructura energética (García-Olivares, 2015).

Los combustibles fósiles deben ser eliminados tan pronto como sea posible, pero todavía deben ser utilizados para construir la infraestructura renovable que los reemplazará.

La mejor manera de evitar un desastre climático aún mayor a los que el mundo ya ha padecido hasta aquí es hacer una transición a una economía 100% renovable, para lo

cual es conveniente que la energía renovable acabe siendo más barata que la energía fósil. (García-Olivares, 2015).

Ante esta preocupante situación surge la necesidad de contar con un criterio que pueda servir de guía en la búsqueda de soluciones. Existe un indicador de gran utilidad conocido como Tasa de Retorno Energético (abreviada TRE) y cuyo concepto se fue comenzando a definir décadas atrás por Cleveland *et al.* y Hall *et al.* (Murphy *et al.*, 2010). El mismo posee variantes conocidas como *evaluación del excedente de energía*, *balance energético* o *análisis de energía neta*. La TRE plantea que dada una determinada fuente de energía, su Tasa de Retorno Energético representa la cantidad de energía recuperada por cada unidad de energía invertida.

### **Objetivo del trabajo**

El objetivo de este trabajo es presentar un análisis del concepto de la TRE, su importancia en el contexto energético mundial, con especial énfasis en la producción de biocombustibles. Se plantea además la discusión del verdadero valor de la TRE y su estrecha relación con el impacto ambiental generado. Hacia el final del mismo se presenta una comparación entre los valores de TRE obtenida para el etanol que se produce en la provincia de Tucumán cuando se considera o no a las energías vinculadas a la producción de los insumos necesarios para la fabricación, de modo de evaluar su incidencia en el indicador estudiado.

### **La Tasa de Retorno Energético y la Energía Neta**

Frente al panorama planteado en la introducción, aparece entonces un importante concepto a considerar en el campo de la energía: la Energía Neta (EN), que es la diferencia entre la cantidad de energía producida u obtenida y la cantidad de energía invertida para obtenerla, lo cual queda representado en la ecuación 1:

$$EN = E \text{ obtenida} - E \text{ invertida} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Esta ecuación indica que cuanto más energía se obtenga y menor sea la inversión energética necesaria para ello, mayor será la Energía Neta y por ello más auspiciosa es la fuente explotada.

Un segundo concepto importante es el mencionado anteriormente, la *Tasa de Retorno Energético* - abreviada en adelante como TRE, EROI o EROEI en sus siglas en inglés - que es la relación entre la energía disponible de una fuente de energía y la energía gastada en su producción. Esto queda expresado en la ecuación 2:

$$\text{TRE} = \frac{E_{\text{obtenida}}}{E_{\text{invertida}}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Un cociente menor o igual que 1 en la TRE indica que la energía obtenida de la fuente es menor o igual a la energía invertida. Por el contrario, un cociente mayor que 1 indica que la energía obtenida es mayor que la energía invertida y queda, en consecuencia, un saldo neto positivo para ser aprovechado. Lo importante es que este valor sea lo más grande posible, pues su magnitud determinará la viabilidad del combustible evaluado.

Con referencia a la Energía Neta, la energía de salida (obtenida) debe exceder a la energía de entrada (invertida) tanto como sea posible. La Energía Neta es aquella que queda y es la que puede destinarse a generar más trabajo. Puede ser considerada como el “beneficio” de la inversión de los recursos de energía para generar más energía. Aquí también importa que el valor de la Energía Neta sea lo más grande posible (Mander, 2012).

Con esto nos referimos a que si la Energía Neta es una pequeña fracción del total de energía producida (por ejemplo si la misma posee un valor en una proporción de 10:1 o menos con respecto a la energía invertida), implica que una parte relativamente grande de la energía disponible debe dedicarse a más producción de energía, y solo una pequeña parte de la energía disponible para la sociedad se puede dirigir a otros objetivos. Este principio se aplica con independencia del tipo de energía del que dependa la

sociedad, ya sea energía fósil, energía eólica o energía en la forma de cosechas de alimentos.

### **La TRE del petróleo**

En el caso del petróleo, materia prima de los combustibles que usa el transporte del mundo, su obtención se ha ido haciendo más complicada y por lo tanto su TRE ha ido decreciendo. En el año 1930, época en que el principal productor de petróleo del mundo era Estados Unidos, la TRE de dicho fluido era 100, lo cual significaba que para extraer un barril de crudo sólo era necesario invertir un 1% de la energía contenida en el mismo y a su vez la Energía Neta aprovechable era el 99%. Esto se explica en que los primeros yacimientos contenían un petróleo de altísima calidad a escasas profundidades, en lugares accesibles y fáciles de explotar, por lo que la energía necesaria para la búsqueda, prospección, perforación, bombeo y transporte del crudo era muy poca.

A medida que los yacimientos más accesibles se fueron agotando, fue necesario buscar y explotar petróleo situado a mayores profundidades y difícilmente accesible u optar por los llamados petróleos no convencionales, entre los cuales se incluye la extracción de hidrocarburos dispersos en arenas, esquistos u otros materiales (López, 2008).

En la actualidad la energía requerida ha aumentado y la TRE se sitúa, en promedio, por encima del valor 10. Esto se debe a que hoy en día se extraen volúmenes cada vez mayores de yacimientos localizados a gran profundidad y también en el mar. Las TRE de los nuevos yacimientos son cada vez menores y la tendencia es que sigan disminuyendo (López, 2008).

En cuanto a los petróleos no convencionales, su rendimiento energético medido a través de la TRE, resulta claramente inferior, debido a la gran cantidad de energía que es necesaria invertir en el tratamiento térmico y en la manipulación de enormes cantidades del material en el que están embebidos los hidrocarburos (López, 2008).

La tabla 1 muestra como han ido variando las TRE para el petróleo en diferentes épocas con valores determinados en EEUU. Cabe destacar que este tipo de cálculo se ha venido efectuando desde hace más de 30 años.

Tabla 1: Evolución de la TRE del petróleo a través del tiempo.

<b>Evolución de la Tasa de Retorno Energético (TRE) del Petróleo</b>
Petróleo de Estados Unidos en 1930 = 100/1
Petróleo de Estados Unidos en 1970 = 30/1
Petróleo de Estados Unidos en 2000 = 11/1
Petróleo del Mundo en 1999 = 35/1
Petróleo del Mundo en 2006 = 18/1
Shale Oil (petróleo de esquisto bituminoso) = 5/1
Tar Sands (arenas bituminosas) = 2 - 4/1

Fuente: St Angelo (2011).

Existe a su vez un aspecto significativo que no debe dejar de inquietarnos: el impacto ambiental que genera la obtención de cada unidad de energía que cada individuo consume. Una fuente de energía con una TRE igual a 100 no produce el mismo impacto que otra fuente con una TRE igual a 20, dado que el gasto energético realizado es mayor en la última y por lo tanto lo es también el impacto sobre el medio ambiente. El cálculo de la TRE por lo que vemos no sólo se trata de hacer un cociente de energías sino que implica además otras consideraciones.

Entre las alternativas que se presentan al empleo de petróleo para uso combustible, los biocombustibles ocupan un lugar importante, ya que pueden reemplazar parcial o totalmente a las naftas o al gasoil. Si bien resultaría imposible un reemplazo total de los volúmenes de combustibles derivados del petróleo que hoy el mundo consume, es posible avanzar con los niveles de mezcla de naftas y gasoil con bioetanol y biodiesel respectivamente, lo que permitiría ir resolviendo problemas de abastecimiento en momentos en los que el precio internacional del petróleo se ha incrementado fuertemente, como así también moderar su consumo por motivos ambientales ya que las manifestaciones cada vez más agresivas del cambio climático hacen necesarias acciones de esta naturaleza.



Existen diversas propuestas para el reemplazo de los combustibles derivados del petróleo. Un ejemplo de ello son los vehículos equipados con motores eléctricos, pero restan aún resolver diversos problemas técnicos vinculados al almacenamiento de energía. Además hasta aquí resulta imposible transformar o adaptar los motores convencionales hacia los del tipo eléctrico. En cambio, en el caso de los biocombustibles, esto ha tenido un importante desarrollo y hoy existen vehículos que pueden usar en forma indistinta nafta pura o mezclada con bioetanol o bien este último en forma exclusiva. Lo mismo ocurre con los motores diesel que pueden operar con gasoil, biodiesel o sus mezclas.

Surge entonces la necesidad de analizar las Tasas de Retorno Energético de los biocombustibles para ver la relación existente entre sus valores y los de los combustibles de origen fósil.

### **La curva de la Energía Neta**

Con referencia a los niveles a los que podría descender la TRE de un combustible sin que su explotación deje de ser viable, numerosos autores han fijado ya su posición (Mearns, 2008 y Murphy *et al.*, 2010).

En primer lugar debemos comprender que la TRE es una relación adimensional que no describe los flujos reales de la energía, siendo estos los que actualmente preocupan mucho a la sociedad. Más precisamente, la economía energética trabaja con los flujos de Energía Neta. Es necesario entonces analizar qué puede indicarnos el concepto de la TRE sobre los flujos de Energía Neta.

Para entender cómo la TRE influye en el flujo de la Energía Neta, primero hay que examinar tanto la ecuación de Energía Neta como la de TRE, es decir las ecuaciones 1 y 2 planteadas anteriormente.

Si despejamos el término E invertida de la ecuación 2 y lo sustituimos en la ecuación 1, obtenemos la relación entre la Energía Neta y la TRE:

$$EN = E_{\text{obtenida}} * ((TRE-1) / TRE) \quad \text{Ecuación 3}$$

A partir de esta ecuación se elaboró un gráfico al que se denominó "The Net Energy Cliff" o "Curva de Energía Neta" (Mearns, 2008). Dicha curva puede observarse en la figura 1.

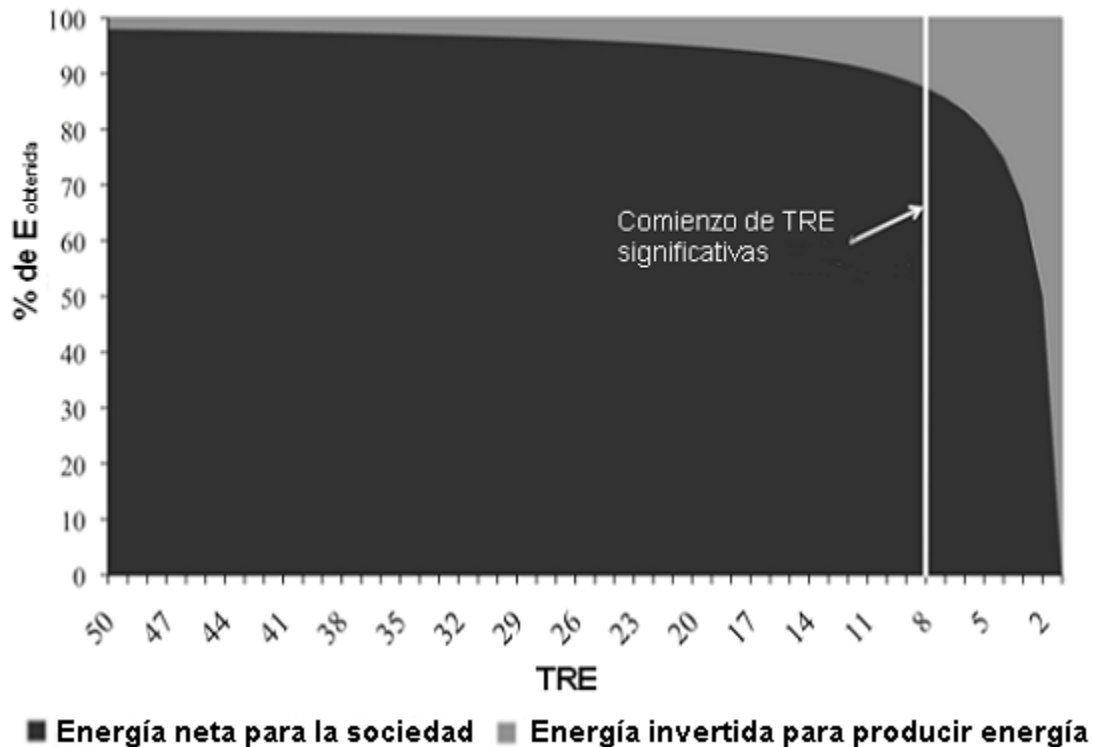


Figura 1: Curva de que expresa la relación entre la TRE, la Energía Neta y la Energía Obtenida.

La figura 1 muestra el porcentaje de energía entregada como energía neta (representada en el eje y, zona gris oscuro) y el porcentaje de energía utilizada para obtener energía (representada en el eje y, zona gris claro) como una función de la TRE (representada en el eje x).

Se puede observar que la relación exponencial entre la energía neta y la TRE crean lo que se denomina el *umbral de la TRE* a un valor aproximadamente de TRE de 8. Debido a la naturaleza asintótica de la curva para TRE mayores a ese valor, hay poca diferencia en el flujo real de energía neta entregada por combustibles que tienen TRE

mayores de 8. El corolario es que los procesos de extracción/conversión con TRE por debajo de 8 generan flujos diferentes de energía neta (Murphy, 2011).

Por ejemplo, una caída de la TRE de la extracción de petróleo de un valor de 50 a 10 daría lugar a un cambio en el flujo de energía neta de 98% a 90% del flujo de energía bruta. Sin embargo, una caída de la TRE de 10 a 2 daría lugar a un cambio de energía neta de 90% a 50% del flujo de energía bruta (Murphy, 2011).

Esto significa que la relevancia de la TRE como una comparación significativa de las tecnologías de extracción/conversión disminuye a medida que aumenta su valor. Esta es también la razón por la que el carbón mineral, con un TRE de 80, no es dos veces mejor que la hidroeléctrica, que tiene un TRE de 40, ya que la diferencia real en el flujo de energía neta entre estas dos es muy pequeña. La verdad es que ambos producen más del 90% de energía neta (Murphy, 2011).

Lo que este efecto umbral significa es que, al sustituir los combustibles fósiles por energías renovables, es menos importante que coincidan las TRE (por ejemplo la sustitución del carbón por una fuente renovable que también tenga una TRE de 80), y más importante centrarse simplemente en evitar las tecnologías de muy baja TRE (aquellas que permitan obtener una TRE menor a 8) (Murphy, 2011).

### **El verdadero valor de la TRE**

Existe una importante advertencia para toda esta discusión. La lógica detrás del umbral de la TRE sólo se aplica si las tasas que se comparan en realidad son conmensurables, es decir, que los análisis de las TRE utilicen el mismo conjunto de hipótesis. Sin embargo, este a menudo no es el caso (Murphy, 2011).

Un problema fundamental de la definición de la TRE es calcular el denominador de los cocientes, algo difícil y que tras décadas de estudios no se ha conseguido uniformizar. La prueba es la enorme dispersión en los cálculos de las diferentes TRE que se encuentran en la bibliografía científica (Castro Carranza, 2012).

El otro gran problema es el cálculo de la energía total o neta, porque tampoco son claras sus definiciones, especialmente cuando queremos identificar con la palabra “útil” a esa energía total o neta (Castro Carranza, 2012).

La TRE representa una medida útil para comparar a todas las tecnologías de extracción/conversión de energía, o para comparar el proceso de extracción/conversión de un determinado recurso en el tiempo. Pero a medida que aumenta la TRE, y especialmente a medida que se incrementa mucho más allá del valor de 8 antes mencionado, su relevancia, en lo que respecta a los flujos netos de energía, se desvanece. Por otra parte, debido a la naturaleza estadística de la TRE, todos los análisis realizados han implicado supuestos. Es importante que quienes utilizan estas estadísticas de la TRE tengan claro lo que esas suposiciones son y lo que indican sobre la utilidad de la TRE producida (Murphy, 2011).

### **TRE de las energías renovables**

Las energías renovables tienen valores bajos de TRE si se los compara con combustibles fósiles. La energía eólica tiene un alto valor de TRE (en el orden de 18) y la fotovoltaica (eléctrica solar) sigue siendo relativamente baja, tal vez sólo 7 o menos. Si consideramos a los biocombustibles, el etanol de maíz tiene un valor de TRE menor a 2 mientras que el obtenido a partir de caña de azúcar alcanza niveles entre 9 y 12.

Como aspecto positivo a destacar de la mayoría de las energías renovables es que generan directamente electricidad. Asimismo no debe dejar de tenerse en cuenta que una diferencia significativa entre las TRE calculadas para los combustibles fósiles y para las tecnologías renovables está en la naturaleza intermitente de las estas últimas, aunque en el caso de la biomasa se ha logrado en los últimos tiempos una generación continua de energía, tanto térmica como eléctrica.

Comúnmente se piensa que la energía renovable de gran escala requerirá la adopción de algún tipo de sistema de almacenamiento para tener en cuenta tiempos de sobre y subproducción. La TRE del viento o de la energía solar fotovoltaica seguramente disminuirá si asignamos los costos de energía de los sistemas de almacenamiento de la

energía solar fotovoltaica o del proceso de conversión del viento. La pregunta que surge ante este planteo es si este coste energético añadido disminuirá la TRE de estos sistemas por debajo del umbral de la TRE (cuyo valor es de 8). Otro aspecto fundamental que no debe dejar de tenerse en cuenta es el impacto ambiental que involucra todo el proceso de obtención de energía.

### **El panorama de los biocombustibles**

#### *- Bioetanol*

El bioetanol, que es un alcohol hecho de materia vegetal y que puede ser empleado como combustible, tiene la portabilidad y la flexibilidad del petróleo y se puede usar actualmente en los vehículos ya existentes mezclado con naftas (en dichas mezclas se lo emplea deshidratado). La infraestructura de distribución de las naftas se podría ir cambiando gradualmente a etanol a medida que los nuevos vehículos que funcionan con mayores concentraciones de etanol se introduzcan paulatinamente en el parque automotor (Mander, 2009).

El bioetanol producido a partir de maíz se ha convertido en algo muy controvertido a causa de los problemas asociados con el uso con fines energéticos de plantas de consumo alimentario como el maíz, y el desvío de grandes cantidades de tierra de la producción de alimento a la de combustible. Otro problema es que estas fábricas de etanol en sí mismas utilizan combustibles fósiles. Sin embargo, por estos días existe un creciente interés en hacer etanol a partir de vegetales, lo que se conoce como etanol de segunda generación, siendo su materia prima la celulosa (Mander, 2009).

La producción de etanol con un alto grado de pureza a partir de granos de cereal exige el consumo de una gran cantidad de energía previa, ya que se requiere de la producción de semillas, abonos, plaguicidas, transporte y tratamiento del producto hasta llegar al combustible listo para su uso. La TRE en este caso es bastante pobre, siendo la energía neta obtenida, según la mayoría de los expertos, únicamente un pequeño porcentaje de la energía invertida. Este escaso remanente energético que, en el mejor de los casos, se obtiene convirtiendo grano de cereal en bioetanol es un importante factor

que se deberá tener muy presente al momento de enfrentar la transición energética hacia las fuentes renovables.

No ocurre lo mismo con el etanol producido a partir de materias primas azucaradas ó amiláceas (conocido como etanol de primera generación). El bioetanol de caña de azúcar es de una elaboración más eficiente desde el punto de vista energético y de menor impacto sobre el sector alimentario ya que no compite con la producción de alimentos y posee además una TRE de entre 8 y 10. Similar es el caso del llamado bioetanol de segunda generación, que se obtendrá cuando se desarrolle la tecnología a escala industrial.

En cuanto al sorgo sacarino o dulce, si bien todavía no existe una producción significativa de bioetanol a partir del mismo a nivel mundial, algunos expertos internacionales lo reconocen como potencial fuente de materia prima para la fabricación de bioetanol. Sin embargo, su utilización con este objetivo aún está en una etapa de desarrollo relativamente temprana y se requiere una intensa actividad de investigación para disponer de materiales genéticos adecuados y adaptar su manejo agronómico.

El etanol celulósico o de segunda generación por su parte, el cual se elabora a partir de biomasa celulósica procedente de residuos orgánicos o de plantas leñosas o herbáceas, es ampliamente considerado una fuente de energía prometedora puesto que potencialmente tiene menos impacto medioambiental con respecto al uso de la tierra y al ciclo de vida de las emisiones de gas de efecto invernadero que los combustibles fósiles. Sin embargo, tales proyecciones deben ser vistas con cautela, dada la escasa información disponible sobre las instalaciones en funcionamiento para su producción.

Por otro lado se debe tener en cuenta que en la fabricación de bioetanol, la destilación requiere mucha energía, e incluso más en el caso del etanol celulósico debido a la baja concentración de etanol al finalizar la fermentación (alrededor de un 4 por ciento comparada con el 10 a 12 por ciento en el caso del maíz, de la caña de azúcar y del sorgo dulce). Esto aumenta notablemente la cantidad de energía necesaria para vaporizar el agua restante (Mander, 2009).

**Trabajo Final Integrador de la carrera**  
**“Especialización en Ingeniería Bioenergética”**  
**Facultad Regional Tucumán – Universidad Tecnológica Nacional**

Alumno: Romina A. Salazar

---

- *Biodiesel*

En el caso del biodiesel, sus características medioambientales generalmente son más favorables que las del gasoil. A lo largo de su ciclo de vida, el biodiesel emite una quinta parte del dióxido de carbono que emite el gasoil y contiene menos sulfuro. Cuando el biodiesel se hace de materiales de desecho como el aceite vegetal, los beneficios netos medioambientales son aún más pronunciados. En contrapartida, el principal impacto negativo de la expansión de su producción es la necesidad de grandes cantidades de tierra para producir productos oleicos (Mander, 2009).

La tabla 2 muestra los valores de TRE evaluados para algunos de los biocombustibles desarrollados y en vías de desarrollo.

Tabla 2: Tasa de Retorno Energético de algunos biocombustibles y de la nafta.

Etanol de Maíz	0,8-1,6
Etanol de Caña de Azúcar	8-10
Etanol Celulósico	12
Biodiesel	1,3
Nafta	0,9

Fuente: información extraída de apuntes de clase sobre TRE de la asignatura “Introducción a la Bioenergía” (Cárdenas, 2014).

Vale la pena señalar que los valores anteriores pueden en realidad exagerar la ganancia de energía neta del biocombustible estudiado, ya que se incluye el valor de la energía del o los subproductos de la producción en la columna como energía de salida; pero si el foco del análisis trata simplemente de valorar la cantidad de energía utilizada para producir una unidad de biocombustible, y se descarta por tanto el valor de los subproductos, la TRE es incluso menor. Debemos destacar que las TRE informadas del etanol están referidas al que se obtiene luego de la destilación (96°GL), sin pasar por la deshidratación.

En un trabajo realizado por Macedo *et al.* (2008), los autores calculan una TRE del etanol de 8,24 para el escenario actual de ese entonces (años 2005/2006) mientras que el mismo parámetro asciende a un valor de aproximadamente 12 en una proyección

realizada para el año 2020 donde se estima que existirán grandes mejoras en el procesamiento de la caña, donde se tiene en cuenta no sólo al etanol y al bagazo como proveedores de energía sino también a la energía eléctrica excedente.

En cuanto a la TRE de la nafta podemos decir que el mismo difiere de la TRE del petróleo ya que lo que la sociedad consume en realidad son productos refinados y almacenados del petróleo. El mismo no es una fuente energética útil tal y como se lo extrae. Por lo tanto, el numerador en la ecuación de la TRE calculada para los derivados del petróleo en realidad es mucho más pequeño de lo que se supone. De allí que la TRE de la nafta posea un valor tan bajo (Castro Carranza, 2012).

### **La tasa de retorno energético del bioetanol producido en Tucumán**

Para poder analizar a la TRE del etanol anhidro que se elabora en Tucumán tomaremos como referencia al trabajo “Balance energético de la producción de alcohol combustible a partir de caña de azúcar para las condiciones de Tucumán” de Cárdenas y Ruiz (1986). Dicha publicación posee datos de producción con el nivel de detalle necesario para poder realizar la comparación propuesta en el objetivo de este trabajo.

En el artículo citado se calcula la relación entre la energía contenida en los productos obtenidos y la energía insumida durante el proceso de obtención e industrialización de la caña de azúcar, en otras palabras lo que actualmente se como tasa de retorno energético (TRE). En el mismo sólo se menciona el concepto de *balance energético*, dado que el de TRE comenzó a surgir recién a mediados de la década de 1980. Los datos proporcionados en ese estudio permitieron realizar el análisis que se presenta a continuación.

El caso de estudio a tener en cuenta es el que más se asemeja al sistema actual de producción empleado por fábricas de la provincia: se supone una molienda de 308.500 t de caña/año y se considera el caso en el que se tiene 14% de azúcares reductores totales (ART) en caña con un sistema de evaporación de tres efectos, donde todo el jugo azucarado es destinado a producción de alcohol anhidro (destilería autónoma). Para nuestro caso de estudio también se considero que el bagazo obtenido cubre toda la



**Trabajo Final Integrador de la carrera**  
**“Especialización en Ingeniería Bioenergética”**  
**Facultad Regional Tucumán – Universidad Tecnológica Nacional**

Alumno: Romina A. Salazar

---

demanda energética de la fábrica de alcohol e incluso se indica la porción del bagazo y vapor sobrantes, y que por lo tanto serán tomados como créditos del proceso.

Este trabajo tiene en cuenta en su desarrollo lo que se conoce como *Energías Asociadas*, las cuales representan el costo energético total de un insumo y que para el caso considerado corresponden al valor total anual para insumos energéticos para la construcción y mantenimiento del equipamiento y también los productos químicos empleados. Se indica entonces que para nuestro caso de estudio deben imputarse 35.680 kJ a cada tonelada de caña procesada (kJ/TC). El consumo energético en productos químicos fue calculado en un valor de 14.712 kJ/TC.

La energía consumida en el proceso fabril proviene en su gran mayoría del aprovechamiento del bagazo para producir vapor que se transforma en energía eléctrica, trabajo en las maquinas térmicas y que sirve además como elemento calefactor.

Se tiene entonces que ingresan al sistema industrial caña de azúcar e insumos químicos además del equipo industrial que se desgasta a través del proceso. La caña aporta ART que se transforman en etanol, y fibra que se quema para producir energía, quedando bagazo y vapor remanentes. En la tabla 3 se resume la energía que se consume en el proceso y la obtenida al final del mismo para el caso antes descripto, expresándose todos los valores en kJ/TC.

Tabla 3: energía que se consume en el procesamiento de la caña de azúcar y la obtenida al final del mismo.

ART% Caña	ENERGÍA CONSUMIDA [kJ/TC]				ENERGÍA OBTENIDA [kJ/TC]			
	Combustión Bagazo	Prod. Quím.	Equipamiento	Total	Alcohol	Bagazo Excedente	Vapor Excedente	Total
14	1.589.146	14.712	35.680	1.639.538	1.473.105	574.956	115.221	2.163.282

Debe agregarse además a la energía consumida el valor correspondiente a los insumos de campo y al transporte de la caña hasta la destilería. Se usara aquí el valor de 233.343 kJ/TC (Scandalariis y Alonso, 1983).

Resulta importante destacar que la mayoría de la energía consumida en la etapa industrial es provista por el bagazo, es decir que los insumos energéticos exógenos que se requieren son mínimos, lo que representa una gran ventaja con respecto a otras materias primas vegetales.

Sin duda la propiedad más importante a determinar aquí es el balance de energía del proceso ya que permite conocer la cantidad de energía que ingresa al sistema y la que puede obtenerse de él. En la figura 2 se representa el sistema global con los insumos y los productos que salen del mismo y que son considerados en estos cálculos (líneas llenas).

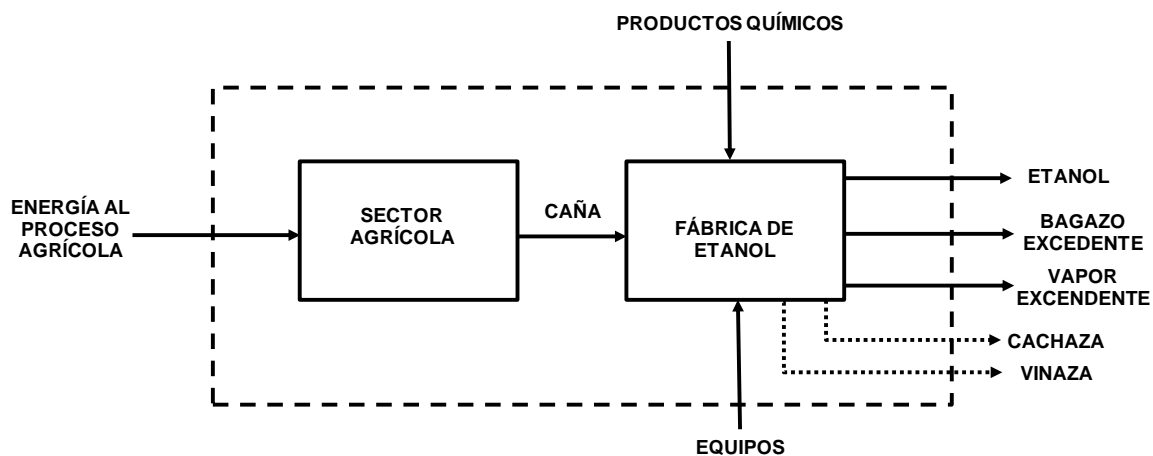


Figura 2: sistema global de producción e industrialización de la caña de azúcar con los insumos y productos tenidos en cuenta en este análisis.

Efectuando el cociente entre la energía que sale del proceso y la que ingresa al mismo se puede obtener entonces el balance energético o TRE del sistema. Cabe destacar que en el análisis que se plantea en esta sección del trabajo se realizará el cálculo de la TRE del etanol combustible empleando los datos que proporciona el artículo al que nos estamos refiriendo.

La relación entre la energía obtenida y energía consumida es importante realmente cuando esta última es provista desde afuera del sistema pero cuando, como en el caso de

la caña, una muy importante porción de la misma la provee el bagazo, su significación se relativiza.

Se considera entonces que el concepto de balance energético tal como se definió aquí es más adecuado pues permite expresar mejor que ocurre en el proceso global y qué cantidad de energía se obtiene a partir de cada Joule invertido.

En la tabla 4 se exponen las energías consumidas tanto en la etapa agrícola de producción de caña como las insumidas durante el procesamiento (productos químicos y equipamiento) y la energía contenida en el etanol combustible obtenido por tonelada de caña en kJ. Posteriormente en la misma se presenta el cálculo de la TRE del etanol al considerar las energías asociadas y sin tenerlas en cuenta de modo de evaluar su incidencia en el indicador estudiado. Estos últimos se expresan como kJ de etanol combustible producido por cada kJ invertido.

Tabla 4: energías consumidas en la etapa agrícola de producción de caña, durante el procesamiento (productos químicos y equipamiento), energía contenida en el etanol combustible obtenido expresada por tonelada de caña en kJ y TRE del etanol calculada con y sin considerar a las energías asociadas.

Energía consumida [kJ/TC]			Total [kJ/TC]	Energía obtenida en el etanol [kJ/TC]	TRE del etanol con energías asociadas [kJ/kJ]	TRE del etanol sin energías asociadas [kJ/kJ]
Etapa agrícola	Energías Asociadas					
	Prod. Quím.	Equipamiento				
233.343	14.712	35.680	283.735	1.473.105	<b>5,19</b>	<b>6,31</b>

Los valores calculados de TRE del etanol resultaron de 5,19 y 6,31 respectivamente, siendo evidentemente superior el que no considera las energías asociadas por encontrarse las mismas en el denominador de la relación evaluada. Si se calcula además la diferencia porcentual entre ambos valores podemos observar que se ha producido un incremento de 21,6%, lo que demuestra su gran incidencia.

El proceso para obtener alcohol a partir de caña resulta positivo en su balance energético, y puede resultar aun mejor en la medida que se aplique la tecnología

**Trabajo Final Integrador de la carrera  
“Especialización en Ingeniería Bioenergética”  
Facultad Regional Tucumán – Universidad Tecnológica Nacional**

Alumno: Romina A. Salazar

disponible y se ajusten rendimientos. Resulta oportuno aquí mencionar que dos residuos del proceso, cachaza y vinaza, tienen también la posibilidad de hacer aportes positivos de energía por lo que son esquematizados en la figura 2 en línea de puntos.

Si comparamos ahora estos resultados con los obtenidos por otros autores, los cuales se muestran en la tabla 5 y que corresponden a valores calculados de la TRE del etanol producido en Brasil, observamos inmediatamente las diferencias en las energías consumidas tanto para la etapa agrícola como la industrial.

Tabla 5: comparación de estudios de tasas energéticas para el Etanol de Caña de Brasil.

Estudio	Pimentel & Patzek. 2008	Macedo <i>et al.</i> 2008. Análisis de la relación energética (caso 2005/2006)	Boddey <i>et al.</i> 2008. Análisis de la relación energética	Olivera <i>et al.</i> 2005. Análisis de la relación energética
<b>A</b>				
Unidad original	kcalx1000/m <sup>3</sup> etanol	MJ/t	MJ/ha	GJ/ha
Ingreso de acuerdo a la etapa				
Agrícola	1.102	210	12.709,74	35,98
Industrial (sin distribución)	809	23,6	2.611,2	3,63
Distribución	331			2,82
Total	2.242	233,6	15.320,94	42,43
Relación de Energía original (TRE)	2,29	8,24	8,80	3,64
<b>B</b>				
Unidades estandarizadas	GJ/ha			
Ingreso de acuerdo a la etapa				
Agrícola	25,36	16,19	12,71	35,98
Industrial (sin distribución)	18,62	1,82	2,6	3,63
Distribución	7,62	0,00	0,00	2,82
Total	51,60	18,01	15,32	42,43
<b>C</b>				
Egreso asumido	135,44	135,44	135,44	135,44
Relación de Energía recalculada (TRE)	2,62	7,52	8,84	3,19

Fuente: Tabla traducida del trabajo de Ramírez Triana (2012).

Las diferencias mencionadas pueden atribuirse a que pueden haberse tenido en cuenta o no a las energías asociadas en los cálculos efectuados. Esto se debe fundamentalmente a la inexistencia de una metodología estándar a nivel internacional de determinación del indicador en estudio. Lo mismo ocurre con el cálculo de la TRE del petróleo y sus derivados.

Es reconocido que en la etapa de producción, los gastos en materia prima, mano de obra y consumo energético son de importante incidencia en el costo final. Si consideramos además que la elaboración de bioetanol para uso combustible tiene como objetivo el reemplazo de un combustible fósil, su balance energético final o TRE cobra primordial importancia, ya que un objetivo básico en esta dirección significa minimizar los consumos energéticos (especialmente los vinculados a los usos de combustibles fósiles) en todas las etapas de producción de modo de poder maximizar este indicador.

## **Conclusiones**

Los altamente prometedores sistemas de energía alternativos, que en muchos aspectos son, con diferencia, seguramente mucho más limpios que los combustibles fósiles, no pueden rendir de ninguna forma tasas de energía neta que se encuentren cerca de lo que es posible con los combustibles fósiles. En otras palabras, requieren para su funcionamiento de un volumen significativo de entradas de energía que hacen que las salidas o egresos de energía lleguen a un nivel muy modesto.

Además no debe dejar de considerarse que no habrá ninguna combinación de soluciones energéticas alternativas que pueda permitir a largo plazo la continuación del crecimiento económico, o de sociedades industriales en su forma y escala actuales.

La conservación de la energía (usando menos energía y también menos recursos materiales) combinada con una disminución gradual, humana, de la población deben convertirse en las estrategias principales para conseguir la tan necesaria sostenibilidad.

Hacen falta iniciativas que conviertan todos los sistemas en funcionamiento en esfuerzos para una conservación activa, que minimicen el consumo de materiales y de

energía, protegiendo los recursos escasos y de energía, mientras nos movemos hacia unos sistemas de producción y de consumo energético que sean conscientes y reaccionen a un conjunto alternativo de valores.

Como autora de este trabajo y tras realizar la revisión y el análisis propuesto en las secciones anteriores, puedo afirmar que la eficiencia del uso de la energía es un importante indicador de sustentabilidad por lo que, ante todo el escenario planteado, la TRE debería adquirir mucho mayor protagonismo.

Quisiera resaltar una vez más otro punto importante a tener en cuenta en la determinación de la tasa de retorno energético: el aspecto ambiental de la obtención de energía. No sólo debe prestarse atención al resultado obtenido tras realizar la relación de energías sino a la cantidad de unidades energéticas invertidas ya que la misma nos está dando la pauta del impacto generado en la obtención, además del costo económico vinculado a tal inversión. Es aquí donde cobra fuerza la necesidad de poseer una metodología estandarizada de cálculo a nivel internacional, que incluya a todas las energías asociadas y tenga en cuenta los aspectos ambientales, de modo de poder realizar estimaciones y comparaciones reales de todas las fuentes de energía disponibles y en estudio.

En mi opinión resulta necesario enfatizar en la definición de la metodología de cálculo de la TRE. Considero fundamental que dicha metodología tenga en cuenta las “energías asociadas”, como también los procedimientos apropiados para dichos cálculos.

Debemos tener presente que si la transición de las actuales fuentes de energía a las alternativas se gestiona mal, las consecuencias pueden ser graves ya que existe una innegable conexión entre los niveles de consumo de energía per cápita, la contaminación ambiental y el bienestar económico. Una herramienta fundamental para llevar adelante esa gestión en forma eficiente es tener presente en forma permanente la TRE no solo de los procesos globales, sino además de cada subsistema involucrado en los procesos.

## Trabajo Final Integrador de la carrera

### “Especialización en Ingeniería Bioenergética”

Facultad Regional Tucumán – Universidad Tecnológica Nacional

Alumno: Romina A. Salazar

---

#### Bibliografía

- Boddey, R., et al., 2008. Bio-Ethanol Production in Brazil in Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems Benefits and Risks D. Pimentel, Editor. Springer Netherlands. p. 321- 356.
- Cárdenas, G.J. y R.M Ruiz. 1986. Balance energético de la producción de alcohol combustible a partir de caña de azúcar para las condiciones de Tucumán. Publicación Especial N° 9. EEAOC.
- Cárdenas, G.J.. 2014. Apuntes de clases de la asignatura “Introducción a la Bioenergía” (Especialización en Ingeniería Bioenergética – FRT – UTN).
- Castro Carranza, Carlos de. 2012. Una crítica al concepto de la TRE (Tasa de Retorno Energético). Consultado en el sitio <http://www.eis.uva.es/energiasostenible/?p=373>
- Dias De Oliveira, M.E., B.E. Vaughan, and E.J. Rykiel. 2005. Ethanol as Fuel: Energy, Carbon Dioxide Balances, and Ecological Footprint. BioScience, 55(7): p. 593-602.
- García-Olivares, Antonio. 2015. Potencial global de las energías renovables. Hacia una economía pos-carbono. Consultado en el sitio <http://crashoil.blogspot.com.ar/2015/12/potencial-global-de-las-energias.html>
- López, Cayetano. 2008. El coste energético de la producción de energía. Diario El País. España. Consultado en el sitio [http://www.elpais.com/articulo/opinion/coste/energetico/produccion/energia/elpepuopi/20080618elpepiopi\\_4/Tes](http://www.elpais.com/articulo/opinion/coste/energetico/produccion/energia/elpepuopi/20080618elpepiopi_4/Tes)
- Macedo, I.C., J.E.A. Seabra, and J.E.A.R. Silva. 2008. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. Biomass and Bioenergy, 32(7): p. 582-595.
- Mander, Jerry. 2009. En busca de un milagro: Los límites de la ‘energía neta’ y el destino de la sociedad industrial (versión traducida). Post Carbon Institute & International Forum on Globalization. Consultado en el sitio <http://www.resilience.org/stories/2012-02-22/en-busca-de-un-milagro-los->

l%C3%ADmites-de-la-%E2%80%98energ%C3%AD-neta%E2%80%99-y-el-destino-de-la-socieda

- Mearns, E. 2008. In the global energy crises and its role in the pending collapse of the global economy, Royal Society of Chemists, Aberdeen, Scotland, October 29th.
- Murphy, David J. y Charles A. S. Hall. 2010. Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. Ann. N.Y. Acad. Sci., 1185, 102–118.
- Murphy, David. 2011. The Energy Return on Investment Threshold. Consultado en el sitio <http://www.theoil drum.com/node/8625>
- Pimentel, D. and T.W. Patzek. 2008. Ethanol Production: Energy and Economic Issues Related to U.S. and Brazilian Sugarcane, in Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems. p. 357-371.
- Ramírez Triana, Carlos A.. 2012. Balance energético del etanol brasilero: comparación entre métodos de medición. Revista Punto de Vista. Vol. III., no. 5, pp. 7 - 30. Colombia.
- Scandalariis, J. y J. Alonso. 1983. Insumos energéticos en el cultivo de la caña de azúcar. Boletín 145. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes.
- St Angelo, Steve. 2011. Peak Silver Revisited: Impacts of a Global Depression, Declining Ore Grades & a Falling EROI. Consultado en el sitio <http://www.marketoracle.co.uk/Article30905.html>