

Destilería diversificada de alcohol

Pedro A. Rodríguez R. , Gerardo Lombardi** , Romeu Corsini** ,
Osney Pérez Ones****

(Recibido el 6 de septiembre de 2002)

Resumen

Se presenta el proceso tecnológico y la evaluación de la factibilidad económica y emergética de una destilería diversificada de alcohol (DDA) proyectada para operar como agroindustria. El proyecto está concebido bajo la concepción de máxima eficiencia termodinámica y productiva, calidad ambiental y social, con lo que se da respuesta a los conceptos de desarrollo sostenible y producción más limpia. Se emplean el control biológico de plagas y procesos regenerativos y reciclables, con significativos resultados económicos y ecológicos. El proyecto tiene en cuenta las normas internacionales de preservación ambiental, pues destina el 20% de sus áreas para este fin.

----- *Palabras clave:* etanol, diversificación, tecnología, alcohol, destilería, proceso, evaluación económica, evaluación emergética.

Diversified alcohol distillery

Abstracts

The technological, economical and emergetic evaluations of a diversified alcohol distillery (DAD) projected as an agroindutry is presented. This project is conceived for high thermodynamic and productive efficiencies, ambiental and social quality, giving answer to concepts of sustainable development and cleaner production. Plague biological control, regeneratives and recycles process, with outstanding economic and ecologic results are used. It accounts for ambiental preservation international norms, dedicated 20% of its areas to this end.

----- *Key words:* ethanol, diversification, technology, alcohol, distillery, process, economical evaluation, emergetic evaluation.

* Facultad de Ingeniería Mecánica. ISPJAE. Cuba. pedro_jandro@yahoo.com.

** Laboratorio de Termodinámica y Fluidos, EESC. Universidad San Pablo. Brasil.

*** Grupo Azúcar. Facultad de Ingeniería Química. ISPJAE. Cuba. osney@quimica.ispjae.edu.cu.

Introducción

Las excelentes cualidades fisicoquímicas y termodinámicas del alcohol combustible y las favorables propiedades ambientales del cultivo de la caña sorgo, del cual se produce, lo hacen ideal para sustituir los derivados del petróleo. Este hecho justificó el apoyo de la FAPESP, en su proceso No. 1999/10913-4, para iniciar un estudio que justifique la producción de alcohol como un proceso económicamente más factible.

La directriz principal de los procedimientos en una destilería diversificada de alcohol (DDA) está basada en la integración entre la industria y el sector agropecuario [4], bajo la premisa de racionalizar métodos, procesos y equipamientos, así como por emplear tecnologías de punta, que estén ya consagradas por su utilización.

Una DDA no es una simple reducción en escala de una destilería grande [2]. El efecto de economía de escala aparecerá, potencialmente, cuando se posibilite la producción en serie de su equipamiento, reduciendo así los costos de producción, de implantación y de mantenimiento [13].

La sustitución del petróleo importado es posible con la potencia térmica, equivalente, del alcohol ($0,258 \text{ m}^3 \text{ alcohol} = 1 \text{ barril petróleo}$) que serían producidos por la DDA, cubriendo tan sólo un mínimo porcentaje del territorio nacional.

Las potencialidades de la DDA son claras y significativas [11]:

- En términos energéticos, estarán disponibles 10,52 MW de electricidad excedente para el SEN —Sistema Electroenergético Nacional.
- En beneficios al ecosistema, se dejan de incorporar a la atmósfera 1.616 t/d de CO_2 [6, 12], y otros contaminantes que, de forma acumulativa, van incrementando el efecto invernadero y la calidad de vida en el planeta. Asimismo, los cañaverales y áreas cultivadas con sorgo enriquecen la atmósfera con O_2 , además de retirar de ella CO_2 de forma

estable durante toda su vida operacional; este hecho convierte al alcohol en el combustible ecológico por excelencia.

- En términos de beneficios sociales, se generarán nuevos empleos fijos y contrataciones. La DDA mantiene fijos los empleos durante los 365 días del año: seis meses en el cultivo de la caña, cuatro meses en el cultivo del sorgo y dos meses para hacer el mantenimiento. Se producirán alimentos variados para 34.625 habitantes: 2.268 t/año de levadura seca para alimento humano, excelente para alimentación infantil por su valor proteico, 7.553 t/año de frutas y hortalizas, variados y renovables (el cultivo de sorgo dura cuatro meses y quedan ocho meses libres para cultivar frutas y hortalizas de corto ciclo) y asegura la cría de 5.625 cabezas de ganado, semiconfinado, para producir carne y leche.
- En términos financieros, se ahorrarían dólares por concepto de importaciones y se recaudarían, por impuestos directos, contribuciones tributarias e impuestos sobre renta.
- En términos estratégicos, las DDA distribuidas por todo el país evitarían apagones.
- En términos de igual tiempo de retorno económico, una DDA de 800 hL/d ocupa un área sembrada de 6.805 ha, en tanto que una destilería de 4.000 hL/d (Brasil), que produce sólo alcohol, ocupa 14.673 ha, lo que demuestra la superioridad productiva del concepto de la diversificación.

Por último, diez años después de la reunión de Río de Janeiro de 1991, se consiguió un inusitado éxito en la reunión de Marrakesh [5] sobre cuestiones ecológicas y sociales, de importancia para el desarrollo sostenible del planeta. Por tanto la sustitución del petróleo por el alcohol, bajo el concepto diversificado de la DDA, servirá no sólo para mejorar el balance económico nacional, sino también, para dar respuesta concreta a la posición del país dentro del contexto del protocolo de Kyoto, confiriéndole una posición de liderazgo

mundial en el trato ecológico y social del planeta.

Proceso tecnológico

El proyecto conceptual de la DDA considera ciclos operacionales optimizados. Se propone, siempre que sea posible, el empleo de procesos regenerativos y reciclables, tanto en el sector agrícola como en el industrial; así, los cogollos de la caña se aprovechan en la alimentación del ganado y las excretas de éste, junto con la vinaza, son biodigeridos y reciclados en la fertiirrigación. El bagazo, 50% húmedo, pasa por un secador de lecho en suspensión con la potencialidad de reducir la humedad hasta 35%, para utilizarse en la caldera. Todos los equipamientos se accionan con motores eléctricos. Los intercambiadores de calor utilizan vapor de proceso o vegetal y el condensado que sale de ellos se reaprovecha en otros sectores del proceso, por lo que ninguna potencialidad se pierde. De hecho, el proyecto constituye un dimensionamiento, selección y aplicación de equipamientos, procedimientos y procesos todos, con tecnología de punta.

El diagrama de flujo para el procesamiento de la caña y del sorgo, desde el corte hasta los productos finales, como alcohol, levadura seca, ganado, etc., se muestra en la figura 1.

Cosecha

La DDA posee 6.805 ha de área industrial y agrícola, 3.179 para el cultivo de caña, 3.626 para el cultivo del sorgo, 375 destinados a la cría del ganado semiconfinado, 1.362 de reserva forestal, 2 para el complejo industrial, edificaciones variadas, calles internas, infraestructura, instalaciones sociales e industriales y 69 para otros.

La caña es fertiirrigada por goteo, con una solución acuosa compuesta por el biofertilizante y por otros aditivos necesarios, definidos previamente en el análisis de la tierra. El goteo propicia condiciones de excelencia al cultivo, reduce el crecimiento de hierbas dañinas, duplica el tiem-

po de vida útil de la caña, que llega hasta los ocho cortes o más. La productividad agrícola se eleva hasta 120 t/ha (media en ocho años) [1, 3, 15], reduciendo el área necesaria de plantío de caña. Las pérdidas de nutrientes y la contaminación del manto freático se minimizan. Este proyecto consideró valores conservadores; por ejemplo, la productividad media asumida para la caña fue de 90 t/ha, (usual en el estado de San Pablo), con ocho cortes. La productividad de alcohol es de 67 L/t de caña. El costo adicional de implantación del sistema de goteo se paga en cuatro zafras [14].

Las características vegetativas del sorgo no satisfacen la irrigación por goteo, por lo que se empleó el sistema Fregat. La productividad agrícola del sorgo es de 50 t/ha y la del alcohol es de 60 L/t de sorgo.

Corte mecanizado y transportación de la caña y del sorgo (materia prima)

La recogida es mecánica. La DDA dispone de una combinada que corta la caña-sorgo a 3 cm de altura del suelo, y, cortando simultáneamente, los cogollos. La paja se separa y se deja en el campo para dificultar la germinación de hierbas dañinas, reducir el uso de herbicidas, la contaminación del suelo y la evaporación del agua de irrigación. La caña-sorgo permanece entera para satisfacer las exigencias de su procesamiento industrial. Los cogollos se envían para el sector pecuario. El transporte de la materia prima se realiza por el sistema de módulos. Cada módulo está constituido por un tractor con dos remolques abiertos y se dispone de siete tractores más un tractor de reserva; la capacidad media de transporte es de 640 t/d. Cada treinta minutos llega un módulo a la industria con 40 t de materia prima. La capacidad total de transporte es de 80 t/h, con lo que se satisfacen todas las necesidades internas de la MDDA. Para el funcionamiento de los vehículos de transporte se utiliza alcohol vaporizado.

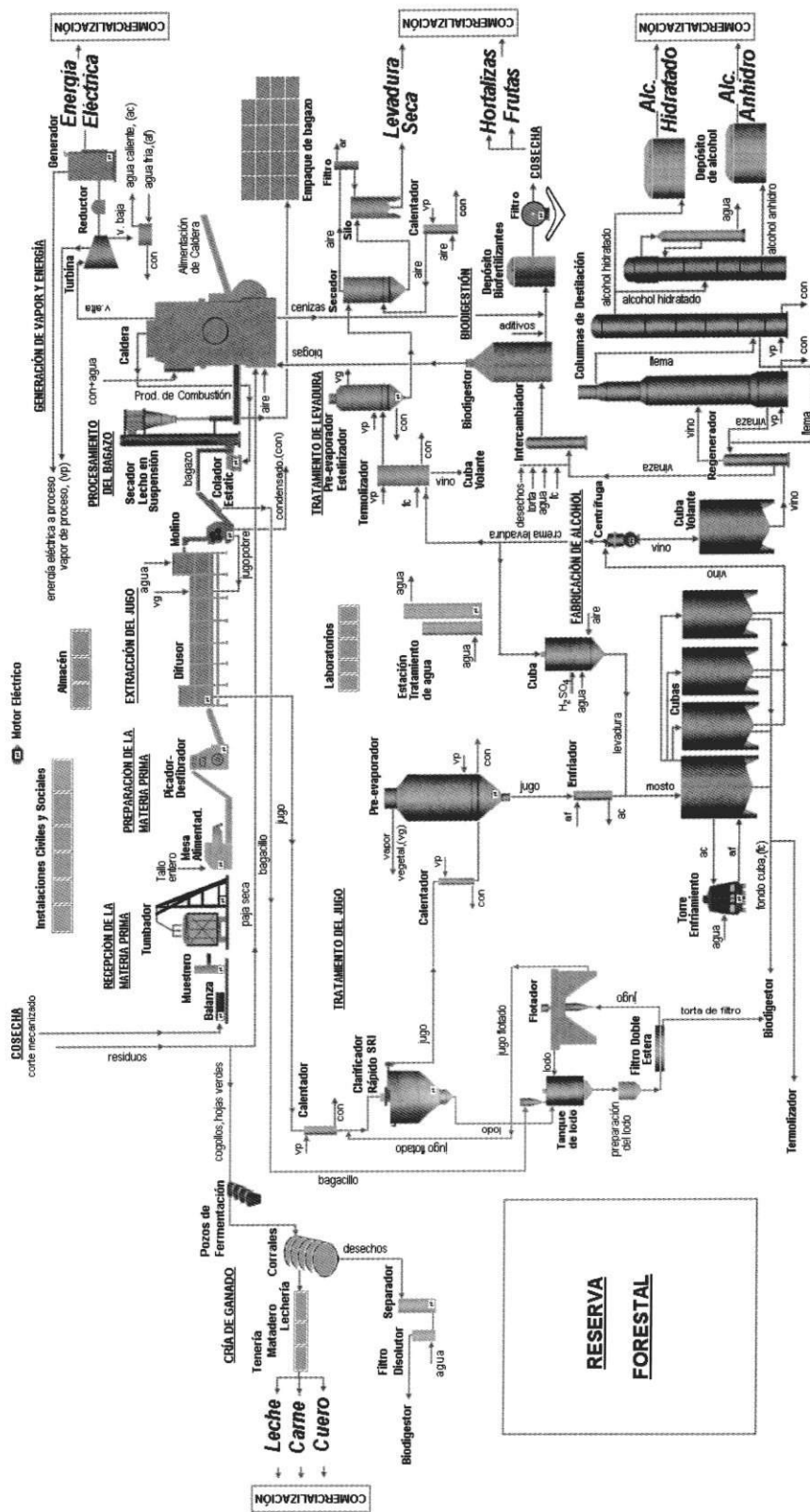


Figura 1 Diagrama de Flujo de la MDAD

Generación de vapor y energía

Pasado el tiempo suficiente para que se haya secado la paja dejada en el campo, el 40% de la misma se recoge y se envía, junto con el bagazo, a la caldera de quema en semisuspensión. La caldera produce vapor sobrecalentado de 62 atm y 450 °C, para una turbina de extracción-condensación de varias etapas. La transferencia de potencia de la turbina al generador de energía eléctrica se realiza a través de un reductor, para adecuar su rotación a las características de la cogeneración. La caldera está preparada para usar el metano que recibe del biodigestor y gas natural.

Recepción y preparación de la materia prima

La caña y el sorgo se llevan enteros a la industria para facilitar el procesamiento y la descarga. Se pesan y se toman muestras para verificar el brix, se descargan por tumbamiento en una mesa de alimentación, con 15° de inclinación, y después continúan hacia el picador-desfibrador vertical.

Extracción del jugo

El material desmenuzado en el picador-desfibrador se lleva al difusor; allí se calienta, con vapor vegetal, regenerativamente, para lograr una buena extracción del jugo y alcanzar un rendimiento de 98%. El bagazo húmedo que sale del difusor pasa por molinos que reducen su humedad hasta un 50%. El agua extraída retorna al difusor y el bagazo sigue hacia el secador. El jugo de salida del difusor, con 15° brix, se bombea hacia la sección de tratamiento del jugo.

Tratamiento del bagazo

El proyecto conceptual de la DDA contempla la quema del 100% del bagazo de caña y el 40% de la paja seca, para la producción de vapor. El bagazo que sale de la molienda, con humedad del 50%, se envía a un secador de lecho en sus-

pensión, con presión positiva y potencia de secado hasta de 35%. Los productos de combustión de la caldera, libres de O₂, son el medio empleado para el secado y tienen una temperatura de salida del secador que es, potencialmente, próxima a 80 °C, valor que permite el mejor proceso regenerativo del ciclo. Del secador, el bagazo necesario se inyecta en la caldera. El sobrante va hacia la sección de empaque, para su uso, cuando no hay zafra.

Tratamiento del jugo

Después de pasar por un calentador y por el clarificador rápido, el jugo pasa por otro calentador, de donde se le lleva al pre-evaporador (concentrador) para ajustarle el brix y, paralelamente, producir vapor vegetal que se utiliza en otros procesos. El lodo pasa por un proceso de extracción del jugo residual. Del fondo del clarificador rápido, el jugo sigue para un tanque de almacenamiento y de ahí pasa por un filtro con estera doble, donde sale la torta que, después de ser diluida convenientemente va hacia el biodigestor. El jugo que sale del filtro va a un flotador, donde se separa del lodo. El jugo flotado retorna al clarificador rápido, para efectuar un nuevo ciclo de limpieza y, con esa misma finalidad, el lodo del flotador retorna al tanque de lodo. Del pre-evaporador el jugo sigue hacia la sección de fermentación.

Fermentación

Primero, el jugo pasa por un enfriador para ajustar la temperatura y, paralelamente, recibe la levadura con la que se forma el mosto. Este sector tiene cuatro cubas de fermentación, enfriadas con agua recirculada en una torre de enfriamiento. En la mayor, de operación continua, es donde se inicia la fermentación. Las otras tres cubas, secuencialmente, operan por el sistema batch. Reciben el mosto de la primera, reteniéndolo hasta que la fermentación se complete. El vino formado, se bombea hacia la centrífuga, para retirarle la levadura y, después, sigue hacia una cuba volante, que alimenta la primera columna

de destilación. El conjunto de cubas opera en forma sincronizada, de modo tal que el jugo fluye en régimen permanente del difusor hacia la sección de fermentación, a la centrifuga y a las columnas de destilación.

Biodigestión

La torta parte del fondo de las cubas y las excretas del ganado se diluyen y se tratan convenientemente; la vinaza, con pH de 3,5 a 4, y el agua del deshidratador se mezclan y se pasan por un intercambiador de calor para ajustar la temperatura. Después, la mezcla entra al biodigestor anaeróbico, de operación continua, donde se produce un gas rico en metano y el biofertilizante neutro. A este último se le adicionan las cenizas de la caldera y otros componentes definidos por el análisis químico de la mezcla y del suelo, y de esta forma se regenera el fertilizante ideal para el cultivo de la caña y el sorgo, devolviendo a la tierra todo lo que se retira de ella.

Tratamiento de levadura

La levadura que sale del fondo de la primera cuba y de la centrifuga se bombea hacia el termolizador para separarle el vino residual y, a continuación, pasa por un evaporador para aumentar su concentración. Allí se produce vapor vegetal, antes de su entrada al secador tipo *spraydryer*. Después de secada es almacenada en un silo, hasta ser ensacada.

Destilación

La destilación del vino es fraccionada y se realiza en dos columnas, cuyos productos finales son el alcohol hidratado, la vinaza y la flema. Al salir del destilador, la vinaza y la flema pasan por un regenerador donde se enfrían a la vez que se calienta el vino que entra a la primera columna. Esta sección dispone, además, de un deshidratador para la producción de alcohol anhidro con extracción de agua por solvente (con etilenoglicol, consume 200 mL por m³ de alcohol) con doble cambio. Los destiladores usan vapor de proceso para el calentamiento. De la destilería, los

dos alcoholes siguen hacia los tanques de almacenamiento. La vinaza y el agua extraída a la salida de regenerador retornan a la sección de biodigestión.

Atención al ganado

El ganado se cría en semiconfinamiento; son 5.625 animales para leche y sus derivados, carne, cuero, etc., que permanecen siete meses internados en corrales y cinco meses en pastoreo. El confinamiento parcial permite duplicar el número de animales, evita el estrés, reduce la incidencia de enfermedades y eleva la calidad del producto. La DDA tiene 9.382 m² de corrales para el ordeño y la alimentación del ganado. Los cogollos y las hojas verdes van al proceso de biodigestión anaeróbica, acondicionándolos para la alimentación del ganado. Se les adicionan granos de sorgo y, eventualmente, parte de la levadura utilizada en fermentación del jugo, para lograr mayor calidad proteica. La biodigestión adecuada es la láctica, que ocurre en condiciones de humedad de la materia prima entre 30 y 40%. El material debe ser compactado firmemente en pozos de fermentación y, después, se cubre con una lona de plástico impermeable para su completo aislamiento del ambiente. La DDA dispone de cuatro pozos estanques, construidos con hormigón reforzado. El alimento resultante mantiene sus propiedades por largo tiempo, siempre que esté protegido del aire.

Está prevista la industrialización de la producción de leche y de sus derivados, para lo cual se dispone de un frigorífico y un matadero.

En la tabla 1 se presenta la producción de la DDA.

Como ya se comentó, es el alcohol el que crea las condiciones para la existencia de los otros productos. Ello ocurre gracias a la diversificación responsable y al balance económico positivo de la DDA.

En la tabla 2 se presenta el desempeño esperado de la DDA.

Tabla 1 Producción

Conceptos	Total anual
Alcohol (hL)	252.000,00
Electricidad excedente (MW)	10,52
Grano de sorgo (t)	7.253,00*
Leche (L)	3.695.967,00
Carne (kg)	701.231,00
Cuero curtido (pz)	3.071,00
Frutas y hortalizas (t)	7.553,00
Levadura seca (t)	2.268,00
Fertilizantes (m ³)	880.367,00*

* Reciclados internamente.

Para el sorgo no están registradas todas las experiencias en la producción de alcohol. Los valores anteriores se estiman a partir de datos obtenidos en consultas a destilerías, empresas de calderas, firmas de proyectos, etc. Para que sean confiables deben confirmarse en la práctica.

La DDA debe someterse a pruebas preliminares y, después de las correcciones y mejoras pertinentes, estudiarse la fabricación seriada de la unidad industrial.

Todos los cálculos sobre temperatura, presión, brix, características técnicas de los equipos, etc. que fundamentan el proyecto, pueden encontrarse en el informe técnico de los autores [11].

Tabla 2 Desempeño esperado

		Caña	Sorgo
<i>Molienda</i>	Flujo (t/d)	598,00	666,00
	Flujo (t/h)	24,91	27,75
<i>Materia prima</i>	Productividad agrícola (t/ha)	90,00	50,00
	ART (%)	15,77	12,46
	Pol (%)	13,70	
	Brix (%)	17,80	15,00
	Fibra (%)	14,52	
	Pureza (%)	80,41	
<i>Jugo</i>	ART (%)	19,30	
	Pol (%)	15,85	
	Brix (%)	13-15	
	Pureza (%)	8,41	
	Acidez (%)	1,48	
	PH (%)	5,20	
<i>Bagazo</i>	Flujo (t/d)	105,00	117,00
	ART (%)	11,87	
	Pol (%)	9,33	
	Fibra (%)	27,23	
	Humedad (%)	35,00	35,00

Tabla 2 (continuación)

<i>Pie de cuba</i>	Fermento (%)	5,76	
	Viabilidad celular (%)	78,29	
	PH (%)	4,2-4,5	
	Bacterias por mL	150. 10 ⁶	
<i>Vino de la cuba</i>	Brix (%)	0,95	
	Acidez sulfúrica (g/L)	2,92	
	PH (%)	3,21	
	Fermento (%)	2,96	
<i>Mosto</i>	Grado alcohólico (°GL)	6,26	5,20
	Brix (%)	19-21	
	ART (%)	19,27	
	PH (%)	4,10	
<i>Alcohol</i>	Producción (L/año)	7,8. 10 ⁶	4,8. 10 ⁶
	Ciclo de destilación (h)	8,00	12,00
	Grado alcohólico	96-99 ^a	90-94 ^a
	Acidez acética (mg/100 mL)	3,00	4,00
	Residuo fijo (mg/100 mL)	1,56	
<i>Vinaza</i>	Brix (%)	12,70	14,60
	Grado alcohólico (°GL)	0,14	0,16
<i>Eficiencia</i>	Fermentación (%)	88,00	76,00
	Destilación (%)	99,00	94,00
	Extracción (%)	98,00	
	Tiempo molienda (%)	97,00	

Factibilidad económica

Se resaltan a continuación los resultados económicos de la DDA [11].

La tabla 3 presenta los costos operacionales (USD)-\$.

La tabla 3 resalta la ventaja económica de la diversificación. Se observa que el costo unitario del alcohol es de 0,68 \$/\$. Este es el mismo valor que se obtiene en una destilería de alcohol tradicional de 800 hL/d. Entretanto, la diversificación permite que los otros conceptos tengan bajo costo;

por ejemplo, la cogeneración cuesta 5,18 \$/MW/h, 5,21 veces menor que para una termoeléctrica tradicional (27 \$/MW/h), [4], con un costo unitario de 0,13 \$/\$. La diversificación garantiza un costo unitario global bajo (0,41 \$/), 40% menor que el del alcohol.

En el caso de las inversiones (consideradas para veinte años de vida útil) ocurre algo similar, como muestra la tabla 4.

Se obtiene un valor para la inversión unitaria de la diversificación de 0,05 \$/\$, valor 28% menor que el del alcohol (0,07 \$/)\$ el cual es el respon-

Tabla 3 Costos

Conceptos	Costo total anual (mil \$)	Costo unitario (\$/u)	
Productos agrícolas	491	0,35	\$/
Productos pecuarios	713	0,24	\$/
Alcohol	5.316	0,68	\$/
		0,21	\$/L
Cogeneración	568	0,13	\$/
		5,18	\$/MWh
Diversificación	7.088	0,41	\$/

Tabla 4 Inversiones

Conceptos	Inversión total anual (mil \$)	Inversión unitaria (\$/u)			
Productos agrícolas	2.812	0,10	\$/		
Productos pecuarios	1.090	0,02	\$/		
Alcohol	11.680	0,07	\$/	0,02	\$/L
Cogeneración	3.382	1,56	\$/MWh	0,04	\$/
Diversificación	18.964	0,05	\$/		

sable de la mayor inversión. El cálculo de la tabla 4 se elabora considerando que para cada producto los costos de los equipamientos de cada concepto es estrictamente el necesario para producirlo. Ejemplo, la inversión para el alcohol es de 11,6. 10⁶ \$, la mayor de todas, y considera el costo de una caldera de 20 atm, necesaria y suficiente para producirlo, además de los costos del cultivo de la caña, del sorgo y de los equipamientos afines para la cosecha y la producción del alcohol. Si se produce electricidad mediante cogeneración para la venta al Sistema Electroenergético Nacional (SEN), es necesario adicionar 3,38. 10⁶ \$, agregando aquí la diferencia de costo entre la caldera de 20 atm y la de 62 atm, que sería necesaria para la cogeneración, incluido el resto del equipamiento directo necesario para la generación de electricidad. La cosecha, el corte y la recogida, además de los equipos asociados, tienen los costos repartidos entre el alcohol, los productos agropecuarios, hortifrutícolas y la cogeneración.

En la tabla 5 se presentan los valores de los ingresos.

Tabla 5 Ingresos

Conceptos	Ingreso total anual (mil \$)
Alcohol	7.812
Electricidad excedente	4.457
Grano de sorgo	0*
Leche	1.459
Carne	1.307
Cuero curtido	175
Frutas y hortalizas	1.407
Levadura seca	766
Fertilizantes	0*
Diversificación	17.386

* Sorgo y biofertilizante. Materiales reciclados internamente.

Se puede apreciar que el 44,9% de los ingresos lo produce el alcohol y el 55,1% por el resto (electricidad y otros productos). Como ya se comentó, es el alcohol el que crea las condiciones de existencia de los otros productos, que en conjunto, incluso, generan un ingreso superior al del propio alcohol. Este hecho ocurre gracias a la *diversificación* responsable y al balance económico positivo de la DDA.

Se presentan en la tabla 6 los principales índices de eficiencia económica (datos de la Dirección de Infraestructura del BNDES, junio de 2001): Plazo de pago: ocho años. Período de gracia: tres años. Tasa de interés: 12,75%/año.

Todos los cálculos sobre costos, ingresos, inversiones, así como temperatura, presión, brix, características técnicas de los equipos, etc. que fundamentan el proyecto, pueden ser encontrados en el informe técnico de los autores [3].

Factibilidad energética

En la búsqueda de un modelo de producción más ecológico, que emplee la caña de azúcar y el sorgo, bajo el concepto de la diversificación, para la producción de alcohol combustible, energía eléctrica, productos agropecuarios y frutícolas, etc., y dentro del contexto del desarrollo sostenible, en este trabajo también se evaluó el impacto medioambiental de este ecosistema.

La evaluación de la factibilidad medioambiental se ha convertido en una extensión de la contabilidad económica tradicional. Las fuentes para el financiamiento de proyectos arriesgan su dinero en riesgo, sólo si además se les presenta la evaluación de la factibilidad ecológica (el impacto ambiental) del proyecto en cuestión.

Comprender las funcionalidades entre todas las energías empleadas y los ciclos productivos, pue-

Tabla 6 Índices de eficiencia económica

Alternativa	1	2	3	4
Financiamiento [%]	0,00	50,00	70,00	80,0
Valor actual neto, VAN. [10^6 \$]	26,74	18,35	15,42	13,95
Tasa interna de retorno, TIR. [%/año]	36,03	28,07	25,30	23,95
Margen de contribución, MC. [\$/\$]	0,32	0,30	0,29	0,29
Rendimiento económico, RN. [%/año]	25,12	23,47	23,10	22,91
Período de recuperación, PR. [año]	3,6	3,8	3,9	3,9
Punto de equilibrio, P*. [%]	27,61	30,55	30,89	31,07
Flujo de caja acumulado, FCA. [10^6 \$]	105,01	88,53	83,14	80,45

Se destaca lo siguiente:

VAN. Todas las alternativas muestran un valor positivo, atestando el buen empleo del capital. Por tanto, todas las alternativas son factibles.

TIR. Para todas las alternativas los valores son superiores a la tasa de interés (12,75%/año) de financiamiento.

PR. El período de recuperación es adecuado para las cuatro alternativas, éstas sólo presentan pequeñas diferencias.

FCA. Este índice muestra que al final de la vida útil de la DDA, veinte años, la utilidad financiera líquida es significativa.

de posibilitar mejor entendimiento de la compleja relación entre la biosfera y la sociedad. De hecho, la sociedad usa, de forma directa o indirecta, la energía que proviene del medio ambiente, sea de fuentes de energía renovables o de fuentes de materiales y energías que resultan de anteriores procesos productivos.

La evaluación de la factibilidad emergética tiene como objetivo analizar los flujos de energía y de materiales, en cualquier sistema productivo humano, para mostrar su dependencia de las fuentes de energía naturales y fósiles, y descubrir su viabilidad bajo una concepción económica y ecológica.

Para el análisis de la factibilidad ecológica se aplica la metodología energética [8-10], la cual estima los valores de las energías naturales incorporadas a los productos, procesos y servicios, que hasta hoy, generalmente, no se han contabilizado en la economía clásica. El análisis de la factibilidad ecológica considera todos los insumos, incluyendo las contribuciones de la naturaleza (lluvia, agua de manantiales y pozos, suelo, sedimentos, biodiversidad) y las suministradas por la economía (materiales, maquinarias, combustible, servicios, dinero, etc.) en función de la energía solar incorporada (energía) medida en joules de energía solar equivalente (Energía solar = 1 sej).

En la tabla 7 se presenta el resultado de los cálculos.

Los recursos naturales empleados constituyen el 54,20% del total de recursos utilizados; éstos están formados por la suma de los recursos renovables, 49,77%, y los no-renovables, 4,44%. Se puede observar que el 91,82% de los recursos naturales útiles en el contexto productivo son renovables lo que expresa la nobleza ecológica del sistema.

Los recursos económicos constituyen el 45,80% del total de recursos utilizados, formado por la suma de los recursos materiales, 13,50%, y los servicios, 32,30%. De ahí que el 70,52% de los recursos económicos en el contexto productivo

Tabla 7 Utilización emergética de recursos

<i>Recursos</i>	<i>Valor (sej/ha-a)</i>	<i>%</i>
Recursos naturales	4,16 E + 15	54,20
Renovables	3,82 E + 15	49,77
No renovables	3,41 E + 14	4,44
Recursos económicos	3,52 E + 15	45,80
Materiales	1,04 E + 15	13,50
Servicios	2,48E+15	32,30
Energía total	7,68 E + 15	100,00

sej/ha-a: joules de energía solar equivalente por hectárea al año.

sean servicios. Se constata nuevamente la nobleza ecológica de la DDA.

La metodología emergética emplea indicadores denominados índices de eficiencia emergética, a partir de los cuales se desarrolla una imagen dinámica de los flujos anuales, de los recursos naturales y de los servicios ambientales, en la generación de riquezas y en su impacto ambiental, para identificar y cuantificar la contribución de los recursos naturales, y para comprender los límites de cada ecosistema, posibilitando el establecimiento de metas que garanticen la sustentabilidad del proceso productivo analizado.

En la tabla 8 se presenta el resultado de los cálculos.

Transformabilidad. La transformabilidad de la DDA es de 5,13.104 sej/J, lo que muestra un valor relativamente bajo (bueno), debido a la gran eficiencia de la caña de azúcar y el sorgo para capturar energía solar. Adicionalmente, los procedimientos ecológicos adoptados, como no quemar la caña ni el sorgo, el mantenimiento de la biodiversidad, la biodigestión de la vinaza y la fertiirrigación por goteo, la preparación del suelo con el mínimo uso de herbicidas y otros aspectos técnicos del procesamiento, indican que la DDA no es un gran consumidor de energía para elaborar sus productos.

Tabla 8 Índices de eficiencia emergética

Transformabilidad	sej/J	5,13.104
Tasa de rendimiento emergético	-	2,18
Tasa de inversión de emergencia	-	0,84
Tasa de carga ambiental	-	1,01
Sustentabilidad	%	216,00
Tasa renovabilidad	%	49,70
Tasa intercambio emergético	-	1,04
Precio ecosistémico	\$/t	120,00
Razón de costos	\$em/\$ec	2,52
Rentabilidad ecosistémica	\$/	1,43

Tasa de rendimiento emergético. Un rendimiento de 2,18 muestra que la producción de alcohol de caña de azúcar o sorgo y de otros productos de la DDA fijan energía solar, pudiendo considerarse como un buen absorbedor de energía. El valor 2,18 de este índice muestra que la utilización de los recursos naturales en relación con los recursos económicos (materiales y servicios) presenta un valor intermedio (valores comunes para productos agrícolas: 1,0-4,0 y menores: 1,0-2,0, cuando incorporan los valores industriales). Así, la DDA es capaz de retroalimentar parte de la producción, ya que la mayoría de los insumos son renovables. Este índice muestra el beneficio al medio ambiente en la medida en que ocurren los procesos de reciclaje.

Tasa de inversión de emergencia. El valor obtenido de 0,84 es un buen resultado, y muestra que la DDA utiliza pocos recursos económicos (insumos comprados) si se compara con los recursos naturales ("gratuitos"). Además de eso, se debe tener en cuenta que los valores de este índice para la agricultura están entre (3,0-7,0) y es más bajo cuando incorporan los valores industriales.

Tasa de carga ambiental. Este índice presenta un valor de 1,01 y está vinculado con el índice de sustentabilidad, cuyo valor obtenido, 216%, muestra óptimo resultado. Estos valores no son comunes en el sector del azúcar y el alcohol. La DDA utiliza una cantidad de emergencia de recursos no renovables mucho menor que la cantidad proveniente de los recursos naturales renovables. Esto reduce la carga sobre el ecosistema y el impacto ambiental. Este hecho confirma que el impacto ambiental es pequeño.

Tasa de renovabilidad. La DDA, como cualquiera otra actividad agroindustrial, depende de fuentes externas e internas de energía, las cuales pueden ser renovables o no. Sólo el 7,34% de los recursos naturales utilizados provienen de fuentes no renovables, lo que le confiere a este sistema un adecuado valor de sustentabilidad. El valor 50,12% obtenido, aunque no es un valor bajo de renovabilidad, hace necesario el mejor planeamiento agropecuario industrial.

Tasa de intercambio emergético. El valor 1,04 (energía contenida en el producto/emergencia que se paga) muestra que el sistema DDA entrega a los consumidores más energía que la recibida de ellos en términos monetarios. Además, la naturaleza se beneficia porque no sólo se la explota, ya que hay un retorno (monetario) que es el reciclaje del proceso.

Otros índices de interés:

Precio ecosistémico (costo justo): 120 \$/t, muestra el costo que el producto debía tener para pagar todos los gastos ambientales y económicos; inclusive los recursos naturales (que generalmente son gratuitos).

Ratio de costos: (relación entre costo emergético y el costo económico): 2,45 \$em/\$eco, es un buen resultado. Muestra cómo el costo emergético, que considera todos los recursos empleados, es sólo dos y media veces mayor que el costo económico.

Rentabilidad ecosistémica: presenta buena utilidad neta por unidad de costo emergético empleado: 1,43 \$/\$.

Conclusiones

1. El concepto DDA permite aprovechar las potencialidades de la integración (industria, pecuaria y agricultura) en el contexto de la producción de alcohol. La diversificación es la responsable del éxito económico y social de una DDA de 800 hL/d.
2. La factibilidad económica de una DDA, de 800 hL/d de alcohol con financiamiento de 80% o menor es evidente. La inversión es relativamente baja, 18,9. 10⁶ de dólares por DDA. Con 70% financiado (BNDES) el período de recuperación es 3,9 años.
3. Su implantación es posible por medio de cooperativas o empresas de participación, formadas por pequeños productores rurales.
4. La DDA posibilita incorporar a la economía nacional los territorios marginados y puede constituir un polo de desarrollo regional, autónomo y estratégico.
5. El alcohol es un combustible ecológico. A pesar de tener un poder calorífico (21,2 MJ/L) apenas 2/3 del correspondiente a la gasolina es el combustible por excelencia para sustituir los petroderivados (motores de alcohol, alcoquímica, etc.). El alcohol, además de ser renovable, es potencialmente no contaminador, pues además de oxigenar la atmósfera, evita la emisión acumulativa de gases tóxicos, particularmente el CO₂, máximo responsable del efecto invernadero. La adición de un 10% de etanol a la gasolina reduce el nivel de NOx en un 22%, el de CO en un 50% y el de hidrocarburos en un 3% [7].

Referencias

1. Corsini, Romeu. *Viabilidade econômica de Mini Usina de álcool Integrada*. Monografia. EESC, Brasil, 1999.
2. Horta, L. A. et al. *Estudio alternativo de la caña de azúcar como recurso alimenticio y energético - un modelo integrado*. Escuela Federal de Ingeniería de Itajubá - EFEI, Itajubá - MG - Brasil. <http://www.fao.org/sd/SPdirect/EGre0056.htm>. 2000.
3. Ramos, P.A.R. e Lombardi, G. *Viabilidade Econômica do Projeto Conceitual para Execução do Projeto Dimensional da MUAI*. Relatório de Pesquisa FAPESP. NETeF, Escola Engenharia São Carlos. USP, S.P. Brasil. 2001.
4. Especificaciones técnicas de 31 fabricantes.
5. Informaciones de 49 sitios web (febrero/2001-noviembre/2001).
6. JESP, Sardemberg, RM-16/11/01.
7. Ocampo, Aquiles. "Gasohol: un combustible limpio para Colombia". *Revista Facultad de Ingeniería*, No.17. Noviembre, 1998.
8. Odum, H. T. *Environmental Accounting, Emery and Decision Making*. New York, USA. John Wiley & Sons Inc. 1996. 370 p.
9. Ortega, E. y M. Miller, *Avaliação ecossistêmica - emergética de processos agrícolas e agroindustriais. Estudo de caso: a produção de soja*. UNICAMP, 2001.
10. Ortega, E. <http://www.unicamp.br/fea/ortega/engenhariaecologica/>, 20/09/01.
11. CONSPEL. *Destilaria Autônoma com Capacidade de Produção de 60000 L/d de Alcool Anidro*. Pres-Analise Econômica. 1984.
12. Samuelson, A. P. *Fundamentos da Análise Econômica*, Nova Cultural, S.P, 1986.
13. Raznjevic, K. *Handbook of Thermodynamics Tables and Charts*, McGraw-Hill, 1976.
14. Obert, E.F. *Internal Combustion Engines*, International Textbook Co- 2nd Ed, 1955.
15. Vasconcelos, J.N. y J.S. Torres, "Retrospectiva e Resultados Experimentais de Avaliação da Viabilidade Técnica de uma Microdestilaria de Alcool Etilico", *Revista Tecnológica da Indústria Açucareira e Alcooleira*, Año VIII, No. 39. 1985.