

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
	Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	N° Doc BC-INF-16-10

## Una planta de biogas en base de estiércol animal en mezcla de silaje forrajeras de maíz en el marco agropecuario argentino.

### Resumen:

El objetivo de este trabajo es una descripción y breve discusión de un proyecto específico de biogas en el marco agropecuario argentino. Este proyecto esta evaluado en base de una co-digestión de estiércoles con silaje de maíz. El trabajo incluye fichas técnicas, económicas y ecológicas sustentables. La planta evaluada tiene un valor de inversión de 3 millones U\$. Los beneficios del cálculo económico dependen mas del precio de maíz y del precio de venta de energías que de la inversión. La planta de biogas discutida es de alta eficiencia con mezcla completa y calefacción dentro del digestor. El proyecto tiene un beneficio económico. El calculo económico brindaría mejores resultados, si se incluiría la venta de energía térmica producida y lo de los efluentes del proceso, como los bio-fertilizantes. Desde punta de vista de la sustentabilidad la inclusión del aprovechamiento de la energía térmica incrementaría la eficiencia global ya que se pasaría de una eficiencia del 40 % a una muy superior.

Key words: biogas, digestión anaeróbica, co-digestión, energia eléctrica y térmica, energias renovables, GENREN, beneficio económico

### Introducción

La Argentina posee una ley nacional conocida como Ley 26.190, que apunta a cumplir con el 8% del consumo de fuentes renovables en 10 años. Esta normativa busca crear incentivos para la generación eléctrica a partir de fuentes renovables de energía

El Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, instruyó oportunamente a ENARSA a que suscriba *contratos de abastecimiento mem para generación eléctrica a partir de fuentes renovables de energía* por un total de 1.015 MW de potencia. Dicha potencia, solicitada a través de una licitación específica, se dividió en nueve renglones de acuerdo a las siguientes tecnologías: Eólica (500 MW), Térmica con Biocombustibles (150 MW), Residuos Sólidos Urbanos (120 MW), Biomasa (100 MW), Pequeños Aprovechamientos Hídricos (60 MW), Geotermia (30 MW), Solar Térmica (25 MW), Biogás (20 MW) y Solar Fotovoltaica (10 MW). Como resultado del proceso denominado GENREN, se han recibido ofertas por 1.436,5 MW, superándose en más del 40% la potencia solicitada. A su vez, se ha destacado el carácter distribuido de las Fuentes Renovables de Energía ya que se han presentado proyectos para las provincias de Buenos Aires, Catamarca, Chaco, Chubut, Corrientes, Entre Ríos, Jujuy, Mendoza, Neuquén, Río Negro, San Juan, Santa Cruz y Santa Fe.

Fuente <http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3291>

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
	Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	N° Doc BC-INF-16-10

Las licitaciones ya adjudicadas arrojaron como resultado 17 proyectos de Energía Eólica seleccionados a un promedio de u\$s/MWh 126,9; 4 proyectos Térmicos con Biocombustibles promedio ponderado de u\$s/MWh 287,6); 5 Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos u\$s/MWh 162,4); y 6 proyectos de Energía Solar Fotovoltaica 571,6). Los valores que se mantienen por 15 años son muy atractivos y abren enormes posibilidades de crecimiento.

Con estos antecedentes y la posibilidad de nuevos llamados a licitación u ampliaciones se encaró el presente estudio teniendo en cuenta un valor ponderado de energía para biogas a un precio de 189 U\$ por MWh eléctrico.

El biogas es un producto de la digestión anaeróbica, que se generan a través de la actividad de bacterias metanogenas. Las condiciones anaeróbicas ocurren solamente en ausencia de oxígeno. Para reproducir estas condiciones se emplean plantas de biogas o biodigestores como unidades bien cerradas, como una laguna cubierta o un silo de hormigón con techo de lona o de membrana. Unidades mas simples son baldes o barriles cerrados. El biogas generado, es una mezcla de metano y dióxido de carbono. EL metano es el vector energético y su composición oscila entre el 50 hasta 75 %. El metano brinda el poder calorífico que oscila entre los 5500 y 6000 Kcal y es posible utilizarlo en todas las aplicaciones de este gas.

La producción de biogas es un tema muy actual, en Argentina, como en Latinoamérica y también en el resto del mundo. En gran parte de las estrategias energéticas el biogas esta en el la consideración de los decisores políticos, dadas las implicancias energéticas y medioambientales de esta tecnología. En comparación de otras fuentes de energías renovables, como la de eólica o la de fotovoltaica, el biogas puede generar electricidad durante las 24 horas del día. Los molinos eólicas tienen una ocupación de 15 hasta 25 % del tiempo, los equipos solares, como los de fotovoltaica también trabajan con una ocupación limitante y solamente durante un parte del día. El biogas constituye una parte muy importante en el "mix" de distintas tecnologías para generar energía limpia y para cuidar al medioambiente y para baja el efecto invernadero.

La Argentina se caracteriza por un sólido sector agropecuario y agroindustrial, la producción de granos, carnes, productos lácteos, alimentos, etc. Esta actividad genera una gran cantidad y diversidad de residuos y subproductos agropecuarios, como residuos de procesos agroindustriales y estiércoles (materia fecal animal y agua). Si bien los guanos y estiércoles son muy buenos para la producción de biogas, porque contienen bacterias que provienen de los tractos digestivos de los animales su fracción orgánica se ve reducida y por lo tanto, no tienen un alto potencial de producción de biogas, Indudablemente las materias primas con las cuales son alimentados estos animales poseen un potencial de producción de gas mucho mas elevado.

La mezcla de los estiércoles con sustancias de alto potencial para la generación de biogas se denomina co-digestión. La misma aumenta significativamente la capacidad de producción de biogas por cada planta de tratamiento.

A modo de ejemplo, un metro cubico de estiércol de cerdos (provenientes de una explotación de ciclo completo, estabulado todo el año muy común en nuestro país) tiene una concentración de materia seca de 1 hasta 2 %. Esta materia seca contiene 40 hasta 50% de materia orgánica volátil, clave para la digestión anaeróbica, ya que esta fracción es la base del consumo y metabolismo de

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
	Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	N° Doc BC-INF-16-10

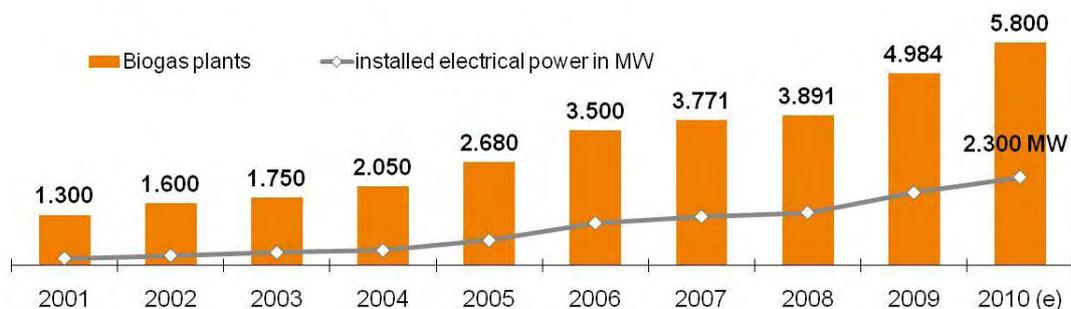
las bacterias anaeróbicas. Una de las razones de la baja concentración se produce debido a al sistema de manejo de lavado las instalaciones con una significativa cantidad de agua. El resultado es un efluente con baja potencia por la producción de biogas. Un metro cubico de esta materia fecal generar 1 hasta 2 m3 de biogas, con 55 hasta 60 % de metano.

Una tonelada de silaje de maíz (con la planta entera, con un promedio de 32 % materia seca), como se utilizan en tambos como forraje de vacas lecheras, produce 190 hasta 200 m3 de biogas. El proceso de digestión anaeróbica solamente en base a silaje de maíz no funciona correctamente dado que no se generan las condiciones ideales para la degradación por parte las bacterias por lo tanto el agregado de otros elementos que reduzcan el porcentaje de sólidos y aporten inóculo de bacterias como son los estiércoles. De esta manera de logra llegar a una mezcla semilíquida con porcentajes de sólidos entre 5 hasta 15 % de materia seca.

Por las razones mencionadas, la mezcla de estiércoles con materia de alta potencial como los silajes de plantas enteras, constituyen una forma de sumar dos materias. El uso de este tipo de mezclas para la producción de biogas es una forma muy común en Europa, particularmente en Alemania.

En este país casi 6.000 plantas Alemania están trabajando en base a este tipo de mezclas con una generación global de 2300 MW e implica el uso de casi 600.000 hectáreas de mái 15 millones de toneladas de estiércoles. La energía generada es suficiente para abastecer 3 millones de hogares.

Figura 1 Evolución de la instalación de plantas agrícolas de biogas en Alemania



Fuente (Fachverband Biogas e. V., Juli 2010)

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
	Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	N° Doc BC-INF-16-10

### **Información sobre la producción de biogas**

La producción de biogas necesita una provisión de materia orgánica con alta capacidad de ser degradada. Los digestores pueden alimentarse con distintas materias primas. Existen variables técnicas medibles en cada tipo de sustrato entre los cuales puede mencionarse el porcentaje de sólidos, sólidos volátiles digeribles, demanda química de oxígeno, sólidos volátiles degradables. De acuerdo a las características del sustrato y a las condiciones de operación existen otros parámetros que nos brindan información sobre la eficiencia y modo de trabajo de las plantas como son el pH, alcalinidad etc.

La biomasa en degradación dentro de un digestor requiere de una cierta cantidad de tiempo que varía en función del tipo de materia prima y la temperatura de funcionamiento. En digestores que se alimentan en forma continua a estos días de permanencia se le da el nombre de tiempo de retención hidráulica.

Las materias con una alta concentración de materia volátil (materia orgánica digestible) producen en un mismo tiempo de digestión (tiempo retención hidráulica = TRH) una mayor cantidad de biogas. Generalmente existen muchas ecuaciones y reglas por el manejo de plantas de biogas (<http://es.wikipedia.org/wiki/Biogas>). Si bien el presente trabajo no tiene como enfoque el entrar en el análisis de estos parámetros y reglas, para entender bien el sistema de cálculo propuesto, es necesario tomar en cuenta por ejemplo la carga diaria de los digestores medido en materia volátil. Este valor se calcula sobre la base de “kg de materia orgánica/por metro cubico de volumen de fermentación/por dia” (kg/m<sup>3</sup>/d). Representa como parámetro la carga de alimentación con respecto al volumen del digestor y su eficiencia de digestión. Es posible una sobrealimentación del proceso, como también una alimentación insuficiente. La carga diaria con materia orgánica depende mucho de la tecnología empleada en la planta instalada y la producción de biogás es función de la misma.

Generalmente existen muchas variaciones en la tecnología de digestores y así como en las metodologías y equipos empleados en el (pre-) tratamiento de estos materiales. En ambientes agropecuarias normalmente se trabaja con digestores de tecnología de mezcla completa. Estos digestores funcionan mejor con una temperatura en el interior de 36 grados Celsius y con una buena agitación de la materia prima para evitar una sedimentación y/o un efecto de una capa flotante de materias livianas, como fibras, paja, hojas, etc.

Este trabajo esta enfocado hacia plantas de alta eficiencia con mezcla completa, con una carga de 3 hasta 5 kg de materia orgánica por metro cubico de volumen de digestión por día. Este valor es producto de una mezcla pre establecida de estiércoles y silo de maíz respondiendo a una concentración de diseño de materia seca.

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
	Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	N° Doc BC-INF-16-10

**Tabla I:** Producción estimada de biogas proveniente de distintas materias primas sobre la base de digestores de mezcla completa y calefaccionados.

	Materia seca (%)	Materia orgánica (%)	m3 de biogas t MS org.	Potencia (m <sup>3</sup> ) de BG cada t de materia fresca
Silaje de maíz	32 %	94 %	642 m3	193 m3
Estiércol de cerdos estabulados en la RA	1 %	45 %	354 m3	1,6 m3
Estiércol de vacas lecheras en la RA	2 %	60 %	354 m3	4,2 m3
Estiércol de vacunas / feed lot (posible)	8 %	80 %	400 m3	25,6 m3
Guano de gallinas ponedoras	45 %	75 %	500 m3	169 m3
Granos / cereales (off spec)	87 %	98 %	700 m3	597 m3

En Argentina la difusión de esta tecnología no ha llegado a números significativos la mayoría de las plantas a nivel agropecuario son de baja eficiencia tipo lagunas cubiertas. A nivel agroindustrial existen grandes digestores una de las mas grandes esta ubicada en Tucumán, en la planta de procesamiento de citrus de empresa de Citrus Vil ([www.citrusvil.com.ar](http://www.citrusvil.com.ar)), Existen adaptaciones y desarrollos que siguen los lineamientos de equipos con calefacción y agitación como el de Guadalupe de Norte, en la Provincia Santa Fe, cerca de Reconquista. Este establecimiento se llama "Naturaleza Viva" ([www.inta.gov.ar/info/bioenergia/bio.htm](http://www.inta.gov.ar/info/bioenergia/bio.htm)). También en distintos lugares del INTA se han instalado, por ejemplo en las Estaciones Experimentales de Marcos Juárez y Rafaela, también en Crespo, Reconquista y Castelar. Todas estas plantas usan residuos de producción agropecuaria para la alimentación de los mismos. En muchos casos es muy factible, una integración de un tratamiento anaeróbico para lograr una baja sustancial de la contaminación. Un avance de estos sistemas radica en la captura del metano que se generaría en las lagunas de tratamiento contaminando la atmosfera generando efecto invernadero.

Cuando se prioriza la producción de energía renovable como el biogás para reemplazar energías no-renovables, como gas natural y gas oíl se requiere lar mezcla de los efluentes como los estiércoles con materia de alta potencia de producción de biogas.

Para investigar el potencial de producción real en la Argentina en base de sustancias y sus mezclas de diferente potencial como fue mostrado en la Tabla 1, Se ha desarrollado a modo de ejemplo una planta con una capacidad de 1 MW de electricidad. Este valor también es el mínimo de capacidad regulando bajo el programa GENREN. Estos criterios que pueden cambiar en el futuro se basan en los valores obtenidos de los últimos llamados del programa 189 U\$ por una hora megavatio (MWh) de electricidad ([www.enarsa.com.ar/licitaciones15.htm](http://www.enarsa.com.ar/licitaciones15.htm))

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
	Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	N° Doc BC-INF-16-10

### **Ficha técnica de la evaluación de estudio de caso de la planta de 1 MW de capacidad para la generación de energía eléctrica**

El programa GENREN establece un tamaño de unidades. En el caso de biogas licitación ENARSA 01/2010, las plantas tienen una dimensión mínima de 1 MW de producción de electricidad. Sobre esta base se seleccionó el tamaño así como para lograr una economía de escala ([http://en.wikipedia.org/wiki/Economies\\_of\\_scale](http://en.wikipedia.org/wiki/Economies_of_scale)).

La electricidad es generada a través de motores de combustión interna instalados en la planta de biogas. Estos motores funcionan con el biogas generado por la digestión anaeróbica y se alimentan con el biogas directamente del digestor o de un gasómetro externo, que posee una reserva de dos o tres días de capacidad.

El biogas requiere de un sistema de acondicionamiento para purificar el contenido de sulfídrico y vapor de agua. Esto requiere de instalaciones específicas en la línea de distribución así como de la implementación de inyección regulada de oxígeno en el gasómetro para reducir el sulfídrico.

Un valor clave en los cálculos de consumo de biogas para la generación de energía eléctrica es la concentración de metano en mismo. Mientras que el gas natural tiene entre 90 y 99 % de metano las proporciones de este gas en la mezcla son variables. Un metro cúbico de gas natural con casi 100 % de metano contiene alrededor 10 kWh de energía térmica.

Un parámetro clave es la eficiencia de transformación del metano en electricidad. La misma está conformada por la eficiencia de transformación de energía térmica (poder calorífico) en energía mecánica (como la energía de transmisión) y en base de esta la eficiencia de generación de energía eléctrica en el generador.

Las eficiencias son menores en los motores generadores de tamaños pequeños. Para el caso de motores de 1 MW de capacidad, la eficiencia aproximada es del 40 % en la transformación de energía térmica en electricidad. Esto significa que planteado como único aprovechamiento el eléctrico se desperdicia una gran cantidad de energía térmica que se libera a través del escape en forma de aire caliente (más o menos 18%) y en los sistemas de refrigeración 42%. Estos valores dependen de distintos equipos y proveedores de motores y pueden cambiar hasta 5 % dentro del mismo proveedor.

Por lo tanto si alimentamos un motor generador con biogas que contenga un 50 % de metano y partiendo de una eficiencia del 40 % en la transformación de energía térmica en electricidad, obtendríamos un factor de conversión de 2 kWh de electricidad (1 m<sup>3</sup> de biogas \* 50% \* 40% \* 10 kWh). Por lo tanto, para la generación de 1 MWh, (electricidad producida por un equipo de 1 MW de capacidad durante una hora de trabajo), se requerirían 500 m<sup>3</sup> de biogas (Tabla II). Al mismo tiempo se produce una gran cantidad de calor a una temperatura cercana a los 90 grados, que en parte es empleada para la propia calefacción de la biomasa ingresante y el mantenimiento de la temperatura de fermentación dentro del digestor.

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
	Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	N° Doc BC-INF-16-10

**Tabla II:** Valores de producción de una planta de 1 MW de electricidad.

	Potencia MW	por día (24 h)	por semana (7 d)	por mes (30,5 d)	por año (8760 h * 90%)
Demanda de biogas (m <sup>3</sup> con 50 % de metano)	500 m <sup>3</sup>	12.000 m <sup>3</sup>	84.000 m <sup>3</sup>	366.125 m <sup>3</sup>	3.943.350 m <sup>3</sup>
Producción de energía eléctrica	1,0 MW	24,0 MWh	168 MWh	732 MWh	7.908 MWh
Producción energía térmica	1,1 MW	25,2 MWh	176 MWh	769 MWh	8.304 MWh

La planta en consideración produciría entonces 24 MWh, 168 MWh por semana y 732 MWh de electricidad por mes. La ocupación de una planta se calcula sobre la base de las horas de operación anual. De las 8760 horas del año y considerando una operación estable del 90 % implicarían 7.900 horas por año produciéndose 7.900 MWh (Tabla II).

El cálculo prosigue en una segunda etapa estimando la cantidad de materia prima necesaria para generar los volúmenes de gas ya identificados: (Tabla III).

Si un metro cubico de estiércol de cerdos generar 1 hasta 2 m<sup>3</sup> (en el calculo hemos trabajado con un promedio de 1,6 m<sup>3</sup>) de biogas y la planta tiene una demanda de 12.000 m<sup>3</sup> de biogas por día, necesitaríamos un ingreso de 7.500 m<sup>3</sup> de estiércol por dia. Si bien es un valor teórico equivalente al residuo generado por un establecimiento de 75.000 cerdas en ciclo completo con todas sus reproductores y crías. En el caso de silaje de maíz, una tonelada de materia verde produce 193 metros cúbicos de biogas. El silaje de maíz tiene 32% de materia seca (Tabla I). Debido a los problemas comentados de manejo de este tipo de sustratos con alta concentración de sólidos se lo mezclaría hasta alcanzar una concentración en un rango entre el 10 y 15 % de materia sec.

**Tabla III:** Ocupación de la planta y las demandas de materia prima relacionada, silaje de maíz y estiércoles de producción de cerdos.

	año I	año II	año III	año IV	año V	año VI	año VII	año IIX	año IX	año X
Ocupación de la planta	80%	80%	100%	90%	100%	90%	100%	100%	90%	100%
Demanda de Maíz (t)	17.920	17.920	22.400	20.160	22.400	20.160	22.400	22.400	20.160	22.400
Demanda de Estiércol (m <sup>3</sup> )	28.000	28.000	35.000	31.500	35.000	31.500	35.000	35.000	31.500	35.000

A fin de lograr este tipo de mezclas el uso de agua es desaconsejable. Una complementación ideal son los residuos de animales que típicamente contienen entre un 1 y 2 % de materia seca.

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
	Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	N° Doc BC-INF-16-10

También sería posible mezclar el silaje de maíz con estiércoles de otro tipo de animales como vacas lecheras o de feedlots. En este caso bajo estudio se seleccionó el estiércol de cerdos ya que este tipo de animal generalmente se produce en forma confinada con pisos ranurados y sistemas de limpieza recolección y conducción que facilitan su empleo. De acuerdo a los relevamientos efectuados en la Argentina el residuo promedio de los criaderos de cerdos oscilan entre el 1 hasta 2 % de materia seca.

Para generar una mezcla final del 13 % de materia seca usaremos por una parte de estiércoles 0,7 partes de silaje de maíz. Con estos valores estimamos el volumen necesario del digestor. Con un promedio de 35 días del tiempo retención hidráulico y una carga máxima de 4 kg de materia orgánica por metro cubico de volumen de digestor por día.

Todos los valores hasta el momento considerados corresponden a números de diseño. La digestión anaeróbica depende de procesos realizados por organismos vivos como las bacterias por lo tanto existen rangos de funcionamiento. También se requieren tiempos de revisión de equipos (bombas, etc.), repuestos, cambio de aceite del motor generador y otros trabajos. Entonces se ha trabajado con ocupaciones variables en los distintos años de operación. En la Tabla III están considerados los márgenes de seguridad sobre la base de los valores estimados de ocupación de la planta en los primeros 10 años de funcionamiento. Estos 10 años también coincide con el lapso de amortización de la inversión.

Para un año de producción a plena capacidad la demanda de la materia prima por la digestión son unas 22.400 toneladas de silaje de maíz (Tabla III). Esta cantidad de maíz producirá unos 4.400.000 metros cúbicos de biogas por año (22.400 t \* 196 m<sup>3</sup>). Para generar un ambiente liquido / semi-liquido, con 13% de materia seca, mezclaremos esta cantidad de silaje con 35.000 m<sup>3</sup> de efluentes de la granja de cerdos. Este volumen coincide con el generado por una granja de cerdos de ciclo completo de 1.000 madres.

La estimación de volumen del digestor se realizó sobre la base de un tiempo de retención hidráulico de 35 días (TRH) y con una carga diaria de 4 kg de materia orgánica por metro cubico de volumen de digestión. Ingresamos con un flujo de 157 m<sup>3</sup> de la mezcla de estiércoles y con silaja de maíz cada día, el volumen evaluado tiene 5.500 metros cúbicos. En el dimensionamiento de plantas con digestores de mezcla total se trabaja con un volumen total de 20% superior al de la biomasa que contendrá o biomasa activa para el caso bajo estudio implicaría un volumen estimado de 6.600 m<sup>3</sup>.

La temperatura óptima dentro del digestor es 36 grados Celsius parte del calor generado por los motores serán en este caso empleado en la como fuente de calefacción del mismo digestor que produce el biogas y además para suministrar otros lugares de consumo, como por ejemplo para desactivar soja o para secar materias y/o otros procesos. Con estos empleos se logra elevar la eficiencia global del sistema pudiendo llegar a una eficiencia del 82 % y con 18% de perdidas cuales salen del escape del motor en forma de los residuos gaseosos.

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
	Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	N° Doc BC-INF-16-10

Los valores de referencia de Argentina y Alemania indican que un 15 a 20 % de la energía térmica es suficiente para mantener la temperatura de 36 grados del digestor

### **Fichas económicas del proyecto y del la operación de la planta**

Un tema clave para el caso bajo análisis es el nivel de inversión inicial así como la posibilidad de su recuperación. Con respecto al tiempo de amortización se trabajará con un período de 10 años, común por plantas energéticas. La vida útil de la planta manejada adecuadamente sería de 20 años.

El valor de la inversión se realizó empleando valores específicos por un metro cubico de volumen de digestión así como por kW instalado. Estos valores específicos varían en relación del tamaño de la planta, con valores específicos más bajos, si la planta es más grande, mientras la inversión total sube (economías de escala).

Hemos trabajado con valores del mercado domestico de la Argentina y también con valores y estimaciones propias. Los valores incluyen la planta entera, llave en mano, con las cuatros aéreas típicas de plantas de biogas:

- El área de tratamiento de materias primas por la alimentación,
- El área de proceso con los digestores,
- La planta de aprovechamiento de biogas con los motores generadores
- El área de post-tratamiento de efluentes, como los bio-fertilizantes.

Los valores específico para la inversión del digestor se estimó en 450 U\$ por m<sup>3</sup> instalado, con respecto a la generación de electricidad se empleó 3.000 U\$ por kW instalado de capacidad de producción de energía eléctrica.

Para un volumen de 6.600 m<sup>3</sup> la inversión llave en mano rondaría los 3 millones de U\$, de la misma forma para el valor de 3.000 U\$/kW instalado para la generación de 1 MW de energía la inversión será también 3 millones de U\$.

Se utilizó una amortización lineal de 10 años y una tasa de retorno del capital de inversión del 8 % valores comunes en este tipo de proyectos, para cada caso en particular podrían sufrir modificaciones.

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
		N° Doc BC-INF-16-10
Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg		

**Tabla IV:** Valores por el servicio de capital, repago y interés en U\$ para una inversión de la planta de 2.970.000 U\$, llave en mano.

	año I	año II	año III	año IV	año V	año VI	año VII	año IIX	año IX	año X
pago por la amortización de inversión	297.000	297.000	297.000	297.000	297.000	297.000	297.000	297.000	297.000	297.000
pago por los intereses	237.600	213.840	190.080	166.320	142.560	118.800	95.040	71.280	47.520	23.760
pago total por el capital por año	534.600	510.840	487.080	463.320	439.560	415.800	392.040	368.280	344.520	320.760

La ocupación de la planta varía en el cálculo entre 80 y 100 % (Tabla III) e influye en la producción de energía eléctrica y también en el output de energía térmica y la de las fertilizantes.

En un año al 100% de capacidad el output de electricidad alcanzaría a 7.900 MWh y 8.300 MWh de energía térmica. Utilizando como valor de referencia del programa de GENREN en Argentina (189 U\$ por MWh), la planta generaría por venta de electricidad de 1.493.100 millones U\$. El programa GENREN no compensa ni da valor a la energía térmica por lo tanto se empleo para darle un valor económica al mismo el reemplazo de gas natural para generar la misma cantidad de energía. En el cálculo usamos un precio de 20 U\$ por un MWh de calor. Sobre la base de estos valores la planta produciría un beneficio adicional a plena capacidad de 124.556 U\$ anuales que se sumarían a la venta de electricidad.

El cálculo también ofrece la posibilidad de evaluar los costos variables, como las compras de materia prima o la de repuestos. Debido a que no hay experiencias en este tipo de plantas en el país se asumieron datos de otros países.

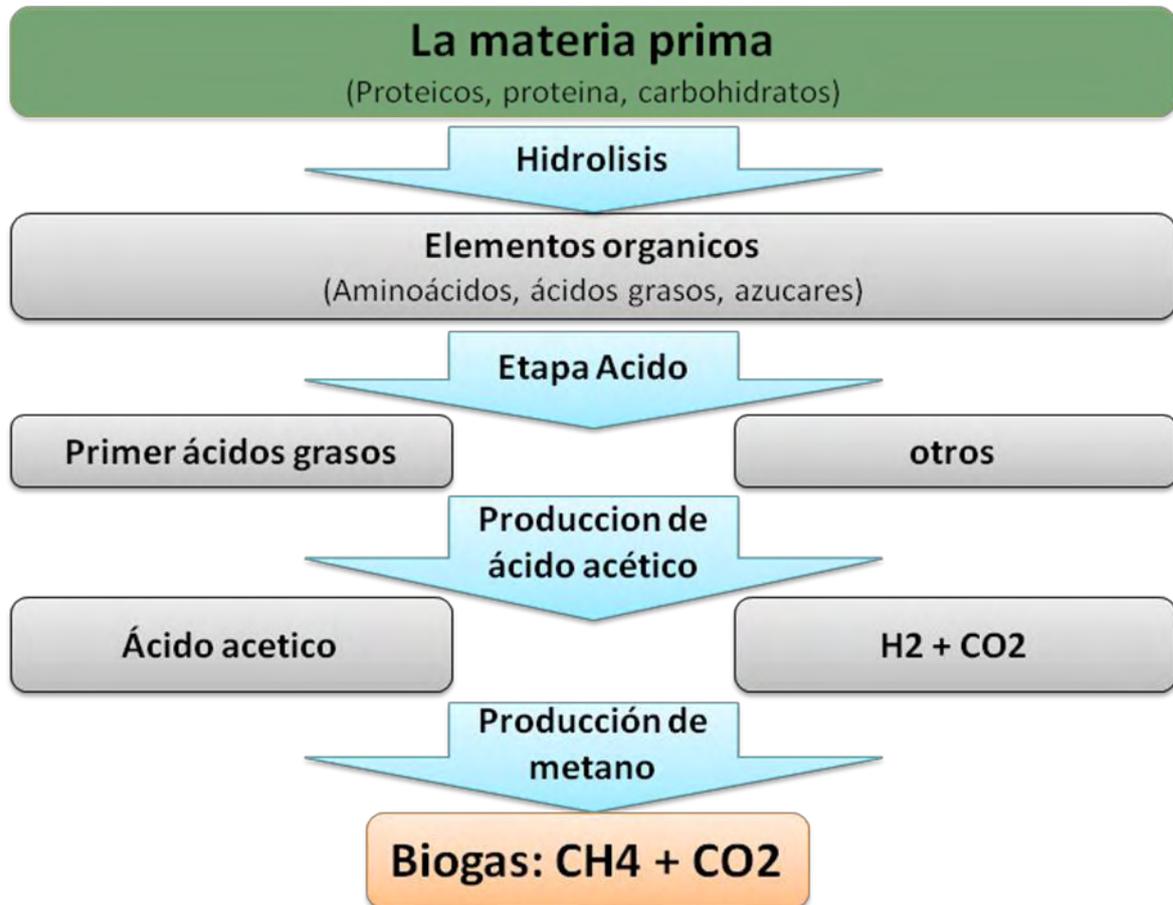
Los costos de compra del maíz son claves en el caso bajo estudio. Para el calculo se tomó un precio inicial de 18 U\$ por tonelada de maíz Fuente márgenes agropecuarios costo del cultivo y de servicio completo de silo por parte de contratista externo. Previendo un incremento de estos valores a lo lago de la vida del proyecto se estimo a lo largo de los 10 años de ciclo de amortización un aumento de precio de 2%/año. De este modo en el ultimo año el precio seria 23,5 U\$ por tonelada lo cual brinda un mayor grado de seguridad al proyecto en el caso de que este pronóstico no se cumpla.

Por año de producción necesitaríamos en promedio 431.666 U\$ para la compra de silaje de maíz.

Los subproductos de la generación de electricidad serán calor y los efluentes del proceso anaeróbico, los bio-fertilizantes. Para estos últimos que reemplazan el uso de otro tipo de fertilizantes se le dio un valor conservador de 1 U\$/tonelada.

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
	Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	N° Doc BC-INF-16-10

**Figura II:** Orden de proceso de la digestión anaeróbica



**Tabla V:** composición de biogas.

Componentes	Concentración, porcentaje
Metano ( CH4)	50 – 75 %
Dioxido de carbono (CO2)	25 – 45 %
Agua (H2O)	2 – 7 Vol. %, (a 20-40 °C)
Acido sulfhidrico	20-20.000 ppm
Nitrógeno (N2)	< 2 Vol.-%
Oxigeno (O2)	< 2 Vol.-%
Hidrogeno (H2)	< 1 Vol. -%

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
	Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	N° Doc BC-INF-16-10

Figura II: Orden de las diferentes etapas del desarrollo del proyectos de biogas, las etapas 1 a 5 son claves para asegurar el éxito

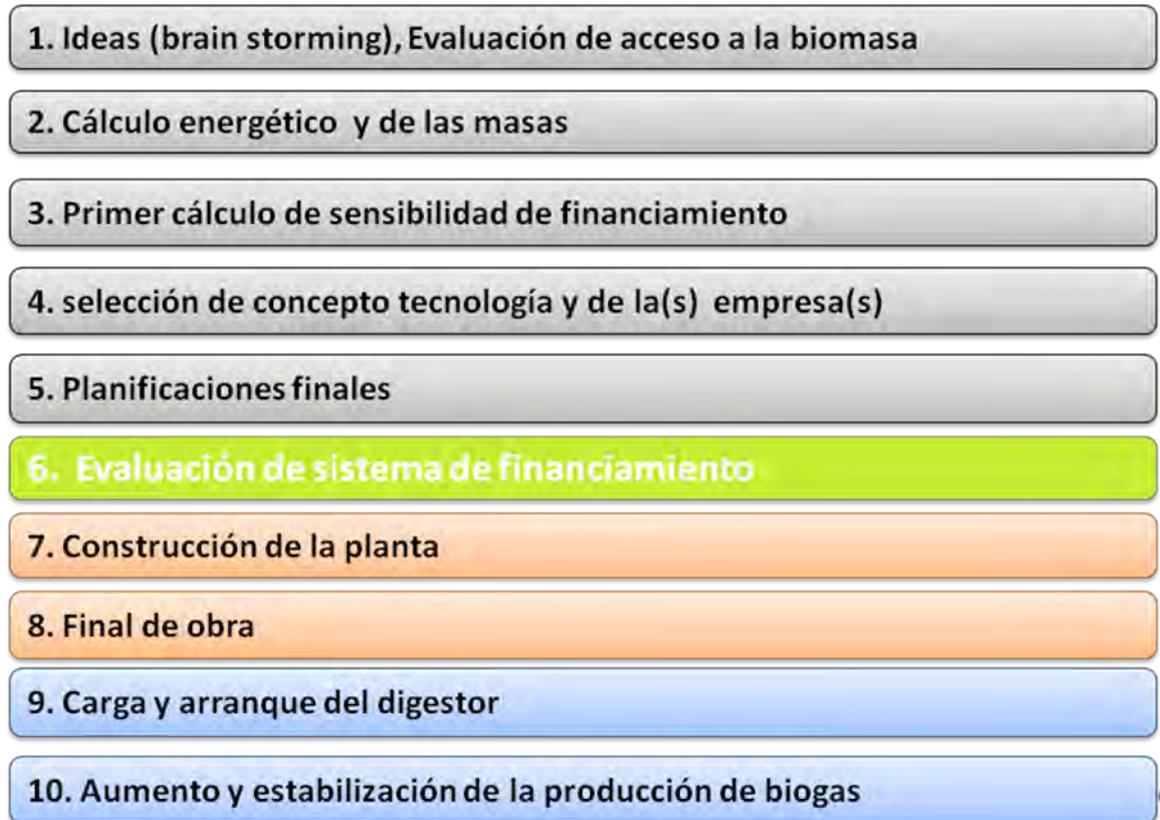
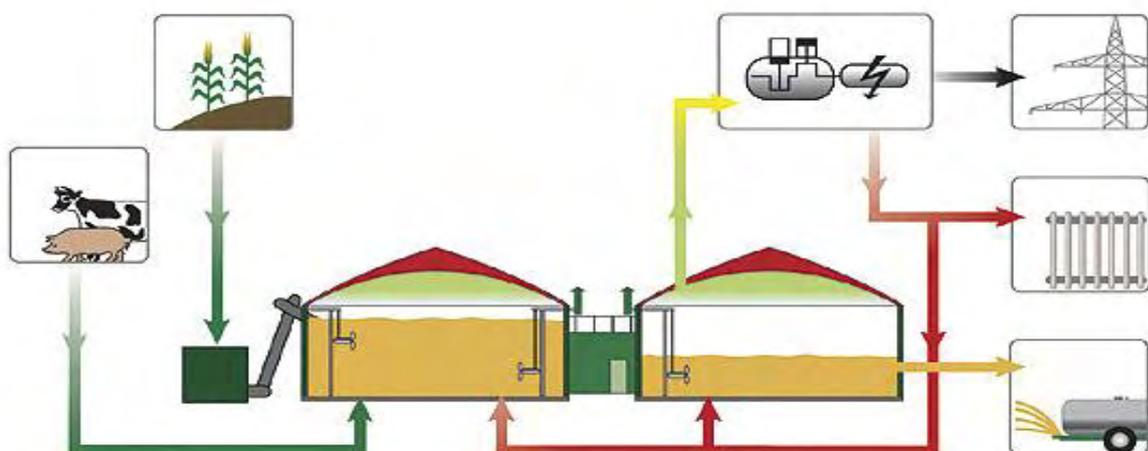


Figura III Concepto de la planta evalluada



	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>  Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	Fecha: 28/10/2010
		N° Doc BC-INF-16-10



**Tabla VI:** Valores de ocupación de la planta durante del tiempo de amortización de la planta (10 años), demanda de materia verde para una producción de 1 MW de energía eléctrica teniendo en cuenta ocupación de la planta y producción de energía térmica.

	año I	año II	año III	año IV	año V	año VI	año VII	año IIX	año IX	año X
<b>Ocupación de la planta</b>	<b>80%</b>	<b>80%</b>	<b>100%</b>	<b>90%</b>	<b>100%</b>	<b>90%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>90%</b>	<b>100%</b>
<b>Producción de MWh elec.</b>	<b>6.327</b>	<b>6.327</b>	<b>7.908</b>	<b>7.117</b>	<b>7.908</b>	<b>7.117</b>	<b>7.908</b>	<b>7.908</b>	<b>7.117</b>	<b>7.908</b>
<b>Producción de MWh term.</b>	<b>6.643</b>	<b>6.643</b>	<b>8.304</b>	<b>7.473</b>	<b>8.304</b>	<b>7.473</b>	<b>8.304</b>	<b>8.304</b>	<b>7.473</b>	<b>8.304</b>
<b>Demanda de silaje de maiz (t)</b>	<b>17.920</b>	<b>17.920</b>	<b>22.400</b>	<b>20.160</b>	<b>22.400</b>	<b>20.160</b>	<b>22.400</b>	<b>22.400</b>	<b>20.160</b>	<b>22.400</b>
<b>Ingreso de estiércoles semilíquidos (m3)</b>	<b>28.000</b>	<b>28.000</b>	<b>35.000</b>	<b>31.500</b>	<b>35.000</b>	<b>31.500</b>	<b>35.000</b>	<b>35.000</b>	<b>31.500</b>	<b>35.000</b>

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>  Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	Fecha: 28/10/2010
		N° Doc BC-INF-16-10

**Tabla VII** Flujo financiero

		año I	año II	año III	año IV	año V	año VI	año VII	año IIX	año IX	año X
Pago de la amortización de inversión (U\$)		297.000	297.000	297.000	297.000	297.000	297.000	297.000	297.000	297.000	297.000
Resto de crédito (U\$)			2.673.000	2.376.000	2.079.000	1.782.000	1.485.000	1.188.000	891.000	594.000	297.000
Pago por los intereses (U\$)		237.600	213.840	190.080	166.320	142.560	118.800	95.040	71.280	47.520	23.760
Pago total capital por año (U\$)		534.600	510.840	487.080	463.320	439.560	415.800	392.040	368.280	344.520	320.760
Demanda de maíz (t/a)		17.920	17.920	22.400	20.160	22.400	20.160	22.400	22.400	20.160	22.400
Precio silaje de maíz (U\$/t)		18,00	18,54	19,10	19,67	20,26	20,87	21,49	22,14	22,80	23,49
Costos totales por maíz (U\$)		322.560	332.237	427.755	396.529	453.805	420.677	481.442	495.885	459.686	526.085
Generación MWh el		6.327	6.327	7.908	7.117	7.908	7.117	7.908	7.908	7.117	7.908
Costos totales por MWh en U\$		197,86	195,45	165,28	175,75	162,27	172,14	159,45	158,12	167,10	155,63
Ventas de electricidad U\$ / a ( GENREN)	189	1.195.736	1.195.736	1.494.670	1.345.203	1.494.670	1.345.203	1.494.670	1.494.670	1.345.203	1.494.670
CAJA (beneficios menos costos)		-56.054	-40.783	187.581	94.288	211.427	120.036	233.686	244.191	155.871	263.887
Producción de calor		6.643	6.643	8.304	7.473	8.304	7.473	8.304	8.304	7.473	8.304
Uso de potencia de calor exportada	75%	4.982	4.982	6.228	5.605	6.228	5.605	6.228	6.228	5.605	6.228
Retorno por el calor (U\$)	20,0	99.645	99.645	124.556	112.100	124.556	112.100	124.556	124.556	112.100	124.556
Ventas de Bio-fertilizantes	100%	45.920	45.920	57.400	51.660	57.400	51.660	57.400	57.400	51.660	57.400
precio por Bio-fertilizante	-1,0	-45.920	-45.920	-57.400	-51.660	-57.400	-51.660	-57.400	-57.400	-51.660	-57.400

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
		N° Doc BC-INF-16-10
Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg		

## Modelo Económico – Financiero

Para complementar la evaluación de nuestra planta piloto de biogas, que asume la posibilidad de vender energía a la red a través de la modalidad de licitación en el marco del programa GENREN, planteamos un modelo de flujo de fondos y tasa de retorno. A tal fin se han incorporado todos los supuestos previamente descriptos en una planilla de cálculo que permite con facilidad realizar análisis de sensibilidad sobre diversas variables. En nuestro escenario base planteamos el siguiente grupo como variables de control:

**Tabla VIII** Valores de referencia tomados para el ejercicio

Tasa de Interes	6%
Potencia puesta a Disposición (kW)	1.000
Precio de venta de la energía (US\$/kWh)	0,19
Precio de la tonelada de compost (US\$/ton)	2,0
Precio de venta de la energía térmica US\$/MMBTU	5,6
Costo de maíz o sorgo (US\$/ton)	12,0
Costos salariales (US\$ per cápita)	24.000

Los precios utilizados reflejan situaciones de mercado. En el caso de la electricidad se asume el valor de la licitación del programa GENREN para generación a partir de biomasa de 0.19 US\$/kWh. La energía térmica se valoriza en 5.6 US\$ por millón de BTU, que si bien es un valor superior al pagado por algunas industrias, constituye una buena referencia del costo de oportunidad del gas natural a partir del precio del gas que entra en el mercado bajo el programa Gas Plus (4.5 US\$/MMBTU en boca de pozo). Por otra parte, hoy en día el GLP a precios subsidiados para los consumidores tiene un precio que triplica al anterior cuando lo medimos en equivalente calórico, y en general éste es el combustible que se espera sustituir con biogas en la función de generación de calor. En este sentido, el proyecto asume el supuesto fuerte que existe un mercado para colocar toda la generación de energía (térmica y eléctrica), así como la posibilidad de vender el bio fertilizante (a 2 dólares la tonelada).

A los valores de los parámetros energéticos se deben agregar las condiciones de financiamiento y una serie de supuestos de tipo fiscal. Por otra parte el Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, el Ministerio de Producción y el Ministerio de Economía y Finanzas Públicas, han puesto en marcha el Régimen de Promoción de Inversiones en Bienes de Capital y Obras de Infraestructura en el marco de la Ley N° 26.360. La Ley establece beneficios fiscales para aquellas empresas que presenten proyectos de inversión en obras de infraestructura y actividades productivas de alto impacto económico y social vinculadas a la generación de energía, producción y explotación de hidrocarburos, obras hídricas, viales, ferroviarias y demás proyectos que permitan la expansión de la capacidad productiva en todos los sectores económicos del país.

Como este proyecto podría enmarcarse en este régimen de promoción, hemos considerado tanto el caso en que el proyecto no reciba beneficios adicionales como el caso que sí los reciba. En este último escenario los beneficios que recibiría el proyecto serían los de la devolución anticipada del IVA por el monto de la inversión y/o amortización acelerada de bienes en el cálculo de Impuesto a las Ganancias.

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
		N° Doc BC-INF-16-10
Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg		

El modelo de flujo de fondos constituye una estructura financiera con la que los inversionistas están muy familiarizados y que tiene como premisa el hecho que el valor de los activos está determinado por el Valor Presente Neto de los flujos de fondos que dicho activo genera. Para llevar los flujos de distintos períodos a un valor actual (que homogeneiza las corrientes monetarias de los distintos períodos) se utiliza una tasa de descuento determinada. Dicha tasa puede asimilarse al rendimiento de distintos activos financieros con mayor o menor riesgo, o bien con el rendimiento de un Bono del Tesoro. Inclusive existen modelos (como el CAPM) para determinar su valor, que implican cierta complejidad cuyo tratamiento excede los alcances del presente ensayo.

Asimismo, este modelo permite resolver el interrogante acerca de cuál es el rendimiento del proyecto (o activo), es decir su Tasa Interna de Retorno, dados los supuestos utilizados y los flujos de fondos esperados. Este último es el mecanismo elegido a partir de valorizar todos los flujos en dólares constantes (es decir asumiendo que los precios se mantienen constantes en dólares estadounidenses).

Suponemos que el proyecto se financia con un crédito bancario que se amortiza en 6 años, mientras que contablemente el bien de uso lo hace en 10 años y que al valor de la inversión en equipos de 3 millones de dólares, que incluye el biodigestor y el generador, debemos adicionar un gasto del 20% (cuyos conceptos pueden incluir costo de fletes y seguros, entre otros). Por otra parte, en el caso general (sin beneficios por la Ley de Promoción) existe un costo financiero dado por el anticipo de IVA.

Finalmente, existen supuestos técnicos que son los que determinan los rendimientos de los equipos para generación de energía, de los residuos orgánicos y el del silaje de maíz (que eventualmente puede sustituirse con sorgo). También se imputa un pequeño beneficio ambiental de 20 mil dólares/año por efectos de la contaminación evitada por el proceso de biodigestión de residuos. Naturalmente, estos valores que no generan cambios significativos en el flujo de fondos, son mucho más significativos en los países desarrollados donde la legislación ambiental es mucho más estricta. Todos los parámetros mencionados son fácilmente modificables en la planilla de cálculo desarrollada para este ejercicio.

A continuación se presenta para el caso base, a partir de los supuestos arriba señalados, la rentabilidad económica del proyecto, estimada en un 6.6% anual en dólares.

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>  Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	Fecha: 28/10/2010
		N° Doc BC-INF-16-10

**Tabla IX** Calculo de la TIR con los supuestos del proyecto

<b>CASO GENERAL</b>											
<b>Período</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Ingreso por venta		1.367	1.367	1.367	1.367	1.367	1.367	1.367	1.367	1.367	1.367
Costo operativo	-1.356	-522	-522	-522	-522	-522	-522	-522	-522	-522	-522
EBITDA		845	845	845	845	845	845	845	845	845	845
Amortización		-300	-300	-300	-300	-300	-300	-300	-300	-300	-300
Intereses		-261	-224	-184	-142	-97	-50				
Resultado bruto		283	321	360	402	447	494	545	545	545	545
Impuestos		-99	-112	-126	-141	-156	-173	-191	-191	-191	-191
Resultado Neto		184	208	234	262	291	321	354	354	354	354
Rcupero de IVA		287	287	182	0	0	0				
<b>Gasto de Capital</b>											
Amortizaciones		300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Repago del Crédito		-624	-662	-702	-744	-788	-836				
Caja	-1.356	147	133	15	-182	-198	-214	654	654	654	654
<b>TIR</b>	<b>6,6%</b>										

El cálculo con beneficios de la Ley de Promoción N° 26360 mejora la rentabilidad elevándola al 8%.

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>	Fecha: 28/10/2010
	Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	N° Doc BC-INF-16-10

CASO Con Beneficio Promoción Ley 26422											
Período	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingreso por venta		1.367	1.367	1.367	1.367	1.367	1.367	1.367	1.367	1.367	1.367
Costo operativo	-1.356	-522	-522	-522	-522	-522	-522	-522	-522	-522	-522
EBITDA		845	845	845	845	845	845	845	845	845	845
Amortización Acelerada		-1.000	-1.000	-1.000							
Intereses		-261	-224	-184	-142	-97	-50				
Resultado bruto		-417	-379	-340	702	747	794	845	845	845	845
Resultado Acumulado			-796	-1.136	-433	314	1.108	1.953	2.797	3.642	4.487
Impuestos		0	0	0	0	0	-278	-296	-296	-296	-296
Resultado Neto		-417	-379	-340	702	747	516	549	549	549	549
Gasto de Capital	0										
Amortizaciones		1.000	1.000	1.000							
Repago del Crédito		-516	-547	-580	-615	-652	-691				
Caja	-1.356	67	74	80	88	96	-174	549	549	549	549
TIR	8.0%										

	<b>Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW<sub>el</sub> con una planta de biogas de alta eficiencia</b>  Dr. Steffen Gruber Ing. Jorge A Hilbert Lic. Sebastian Sheimberg	Fecha: 28/10/2010
		N° Doc BC-INF-16-10

### Conclusiones:

- El actual marco presenta posibilidades concretas de desarrollo de esta tecnología como aportante de energía al sistema argentino.
- Los beneficios del cálculo económico dependen mas del precio de maíz y del precio de venta de energías que de la inversión inicial de la planta.
- El proyecto tiene un beneficio económico.
- El calculo económico puede dar como resultado beneficios mayores, si se incluye la venta de energía térmica producida y lo de los efluentes del proceso, como los bio-fertilizantes.
- Desde punta de vista de la sustentabilidad la inclusión del aprovechamiento de la energía térmica incrementaría la eficiencia global ya que se pasaría de una eficiencia del 40 % a una muy superior.
- Los resultados obtenidos ameritan un estudio de caso específico en el cual ajustar todos los parámetros en evaluación.