

UNIVERSIDAD Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA: LA ECOEFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Gonzalo Dávila del Carpio



UNIVERSIDAD Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA: LA ECOEFICIENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Gonzalo Dávila del Carpio

RESUMEN:

Las universidades juegan un rol fundamental en la generación de conocimiento a través de la investigación y de la innovación tecnológica; pero el punto neurálgico está en la transferencia de esa tecnología que debe llegar a los usuarios, llámense empresas y la sociedad en general, lo cual generalmente no sucede. Además, se debe tener un irrestricto respeto por preservar el medio ambiente y mantener el equilibrio de los ecosistemas. En este contexto, un problema importante en el sector agrario, en la región Arequipa, es la quema de los residuos vegetales y la mala disposición de residuos pecuarios e industriales, los que originan contaminación ambiental. Para solucionar esta problemática, la UCSM planteó dos ejes de acción: un trabajo en el campo de formación académica a través del proyecto “Introducción de un programa de formación en la Tecnología de Biogás en la región Arequipa” orientado a la formación de estudiantes de pregrado, buscando concientizar a los estudiantes de áreas de ingeniería y ciencias biológicas sobre la necesidad de recurrir a la generación de energías renovables a través del concepto de “Ecoeficiencia: producción de bioenergía a través de la tecnología de biogás”. Para ello instaló, gracias a la cooperación inter-

nacional, una Planta de Biogás HPTC de doble cámara hidrolítica en el Fundo La Católica, en El Pedregal Majes. Dicha planta también sirvió para desarrollar el segundo eje, a través de proyectos de investigación que permitieron optimizar el uso de diversos substratos para la generación del Biogás. Este Biogás, a través de diversos procesos de purificación (tales como el uso de sales de hierro o inyección de aire para eliminar el H_2S , de un sistema de filtrado por depuración tipo Scrubber para eliminar el CO_2 y de un sistema Pressure Swing Adsorption (PSA) con zeolita para eliminar vapor de agua) nos permitieron obtener el Biometano como sustituto de combustibles fósiles.

Palabras clave: ecosistemas, medio ambiente, biogás, biometano, eco-eficiencia, energías renovables, biomasa

ABSTRACT:

Universities play a fundamental role in the generation of knowledge through research and technological innovation; but the neuralgic point is the transfer of this technology that must reach the users, companies and society in general, which generally does not happen. In addition, there must be an unrestricted respect for preserving the environment and maintaining the balance of ecosystems. In this context, an important problem in the agricultural sector in the Arequipa region is the burning of plant residues and the poor disposal of livestock and industrial residues, which cause environmental contamination. To solve this problem, UCSM proposed two lines of action: work in the field of academic training through the project "Introduction of a training program in Biogas Technology in the Arequipa region" aimed at training undergraduate students, seeking to raise awareness among students in the areas of engineering and biological sciences about the need to resort to the generation of renewable energy through the concept of "Eco-efficiency: bioenergy production through biogas technology". To this end, thanks to international cooperation, an HPTC Biogas Plant with a double hydrolytic chamber was installed at Fundo La Católica in El Pedregal Majes, which also served to develop the second axis, through research projects that allowed optimizing the use of various substrates for the generation of Biogas and then this, through various purification processes such as the use of iron salts or air injection to eliminate H_2S , a Scrubber-type purification filter system to eliminate CO_2 and a Pressure system Swing Adsorption (PSA) with zeolite to eliminate water vapor, allowed us to obtain Biomethane as a substitute for fossil fuels.

Keywords: ecosystems, environment, biogas, biomethane, eco-efficiency, renewable energies, biomass.

INTRODUCCIÓN

El rol fundamental de las universidades está dirigido a la formación académico - profesional, el desarrollo de la investigación y la innovación tecnológica, la extensión universitaria y la proyección social. Sin embargo, tradicionalmente en nuestro país se ha privilegiado la formación académico - profesional, descuidando el tema de investigación y la innovación tecnológica.

El Perú basa su economía en la exportación de materias primas, por lo tanto, se trata de una economía primaria. No le damos valor agregado a nuestros productos y esto tiene una de sus causas en que nuestra industria es básicamente extractiva, con una tecnología incipiente; no innovamos tecnológicamente. Sabiendo que la única forma de generar conocimiento es a través del desarrollo de la investigación, esta es una tarea pendiente en el campo educativo, donde las instituciones de educación superior, llámense universidades o institutos superiores tecnológicos, tienen una gran responsabilidad.

Aquí me permito sugerir algunos lineamientos de política, a mediano y largo plazo, que debe aplicar el Estado y las instituciones involucradas para incentivar la Investigación, el Desarrollo, la Innovación y el Emprendimiento:

- En primer lugar, debemos tener investigadores capacitados, por lo tanto, la formación de personal resulta el eje sustancial del éxito de la política de incentivo de la investigación e innovación.
- Se debe impulsar la investigación seria, que cumpla con estándares metodológicos internacionales estrictos. Esta puede ser de carácter básico (que permita generar conocimiento) o aplicada (que permita solucionar problemas específicos). Para ello debe contarse con financiamiento de parte del estado y de la empresa nacional.
- El conocimiento generado por las investigaciones debe terminar en publicaciones en revistas indizadas de impacto; para ello los investigadores deben saber comunicar el conocimiento; nos falta mucha práctica y entrenamiento en este campo.
- Igualmente, la investigación debe permitir la innovación tecnológica, es decir las universidades e institutos superiores tecnológicos deben solucionar problemas específicos de las empresas, la cual debe concluir con el respeto a la propiedad intelectual, la generación de patentes y esta innovación tecnológica debe transferirse para utilidad de los interesados.

- En todo este sistema debe existir la articulación entre el gobierno, la empresa y la academia, representada principalmente por las universidades, en lo que conocemos como el tradicional modelo de la triple hélice; sin embargo, este concepto ha quedado relegado, puesto que hoy se habla de la quintuple hélice, es decir, que además de los actores ya mencionados, debe estar inmersa la sociedad civil que debe ser la beneficiaria de esta articulación y que en nuestro país es uno de los temas pendientes; y el quinto componente viene ser el medio ambiente, que debe preservarse dentro de un ecosistema en perfecto estado de homeostasis, un poco el objeto central de este artículo.
- El rol de las universidades peruanas debe cambiar. Deben convertirse en universidades de tercera generación, modelo en el que predomina la transdisciplinariedad o interdisciplinariedad entre las carreras y la competencia entre las universidades por satisfacer las necesidades del desarrollo del país (empresas, estado, sociedad en general).
- La Universidad de tercera generación debe tener un fuerte componente de trabajo en red, colaborando activamente con las empresas, en actividades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i). Debe operar en un mercado internacional competitivo y convertirse en una universidad de doble vía, es decir, crea oportunidades especiales para los mejores y más brillantes estudiantes y académicos.
- El otro reto que debemos afrontar hacia el futuro es el emprendimiento, en el que se debe estimular la creación de empresas propias por parte de los estudiantes y para lo cual deben prepararse en las universidades, a través de modelos como las incubadoras de empresas, los semilleros de negocios, los Starups, los Spinoff, etc.

Los que nos consideramos académicos, tenemos un gran desafío por delante. Pero si queremos darle sostenibilidad al crecimiento económico del que nos jactamos en las últimas décadas, la única forma de lograrlo es fortaleciendo la Investigación, la Innovación, el Desarrollo y el Emprendimiento, y la Universidad Católica de Santa María es consciente del rol que le toca jugar en este escenario y está trabajando en ese sentido.

En este contexto académico y buscando la articulación con las empresas y la sociedad, debemos hacer un análisis de la situación en la región de Arequipa, donde el retroceso industrial ha dado lugar a una reprimarización (actividades extractivas) y a una tercerización (sector de servicios) de la economía, haciendo que el crecimiento regional se sustente en base a sectores no manufactureros. Si observamos la estructura de la economía regional, es notorio que el sector servicios representa más del 50% del to-

tal regional. Este sector, además de incluir actividades como el comercio, comprende “otros servicios”, donde se ubican las actividades terciarias de micro y pequeña escala con empleos de baja productividad y condiciones laborales precarias, además del alto nivel de informalidad.

Un sector que está adquiriendo importancia relativa, es la Agricultura de exportación, con un fuerte impulso de reciente data, la cual se ubica, principalmente, en las zonas de las pampas irrigadas y la campiña de Arequipa. El desarrollo de esta actividad es aún incipiente, dado que, del total de hectáreas cultivables del departamento, algo más del 5% se dedica a la exportación. No obstante, existe un enorme potencial exportador de esta actividad si se trabajara bajo el supuesto de la materialización de la segunda etapa del proyecto Majes-Siguas II. Los problemas de este sector son, entre otros, el escaso conocimiento de mercados internacionales y las dificultades sanitarias de la producción, que no nos permiten una producción orgánica de los productos agrícolas y a ello se suma una mala disposición de los residuos agropecuarios, lo cual podría originar una serie de problemas medioambientales con alteración del ecosistema.

Por lo tanto, uno de los rubros transversales a todos los ámbitos del quehacer humano es el de la protección del medio ambiente. En este contexto, el desarrollo de tecnologías limpias basadas en la preservación del medio ambiente es el vehículo fundamental para la mejora de la calidad de vida y el bienestar de la sociedad actual, así como para legar un futuro con perspectivas más optimistas a las futuras generaciones. Para ello, es básico comprender la importancia de la investigación y la innovación tecnológica en un sector tan importante como es el de la producción de energías renovables. Una de ellas, de singular importancia y de la que trataremos en este artículo, es el desarrollo de las tecnologías de tratamiento de la biomasa y biocombustibles y que está articulada con el quehacer agropecuario.

El Perú ha sido tradicionalmente un país cuya generación eléctrica se ha sustentado en fuentes renovables. Así, hasta el 2002, el 85% de la generación eléctrica estuvo representada por las centrales hidroeléctricas; con la llegada del gas de Camisea, la participación de las hidroeléctricas disminuyó hasta llegar al 61% en el año 2008. La meta es lograr en los próximos años un aumento entre un 10 a 15% de energías renovables (1).

El informe Climascopio del Fondo Multilateral de Inversiones (FOMIN), miembro del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la prestigiosa entidad Bloomberg New Energy Finance, consideran al Perú como el cuarto país de América Latina y del Caribe con mayores oportunidades para la inversión en energías limpias.

La demanda de energía eléctrica en el Perú venía creciendo en un promedio del 8% anual y se tenía asegurada la provisión energética hasta el período 2016 – 2018, pero la ejecución de muchos proyectos mineros impulsó la demanda en un 13% (valorizada en US\$ 50 000 millones), que pudo haber originado un déficit a partir del 2017. Para abastecer la demanda, el estado tenía previstos incrementos de 1324 GWh anuales para provisión eléctrica provenientes de fuentes renovables, divididos en 181 GWh de energía solar fotovoltaica, 320 GWh de energía eólica y 823 GWh producidos a partir de biomasa (biogás) (1).

La Política Energética del Estado Peruano plasmada en el Decreto Supremo No. 064-2010-EM planteó, entre otros, los siguientes objetivos (2):

- Contar con una matriz energética diversificada, con énfasis en las fuentes renovables y la eficiencia energética.
- Contar con un abastecimiento energético competitivo,
- Lograr la autosuficiencia en la producción de energía.
- Desarrollar un sector energético con un mínimo impacto ambiental y bajas emisiones de carbono en un marco de desarrollo sostenible.
- Fortalecer la institucionalidad del sector energético.

Sin embargo, hay que tener presente que las energías renovables no convencionales aún tienen una participación marginal en el abastecimiento de la demanda, porque sus costos están por encima de las tecnologías tradicionales, aunque su tendencia es a disminuir. Además, el mercado de proveedores para ellas es limitado en nuestro país; esta es la razón por la que su crecimiento debiera ser gradual, en la medida que el desarrollo tecnológico haga que los costos se hagan cada vez más asequibles.

De esta manera, se pretende fomentar la valorización y el empleo de los residuos de biomasa seca y húmeda generados en la Región Arequipa, mediante la producción de biogás y/o biometano, así como promover el empleo de biocombustibles en el transporte y otros usos industriales. Análogamente, pretendemos potenciar la inversión y financiación, tanto pública como privada, en biomasa y biocombustibles. Sin embargo, aquí nos encontramos con una seria limitación: la legislación energética peruana no permite que el exceso de energía generada por los inversores, tanto públicos como privados, luego de abastecer sus requerimientos, pueda ser vendida al sistema interconectado de distribución de energía eléctrica; la única forma de que esto suceda es a través de subastas públicas que realiza puntualmente el Ministerio de Energía y Minas y que ha permitido que

algunos parques de energía solar fotovoltaica y algunas plantas de biogás estén funcionando. Es necesario cambiar esta legislación (3, 4, 5, 6).

Teniendo en cuenta la generación de residuos agrícolas y agroindustriales tanto en la cosecha como en el procesamiento, tenemos un potencial energético disponible o aprovechable a nivel nacional de 850 548 524 Nm³/año (ver tabla, tomada Hidalgo, Dolores et.al. Programa Iberoamericano CYTED - España. ISBN/ISSN: 978-84-09-07532-4) provenientes de residuos de maíz, arroz, caña de azúcar, entre otros (3, 4).

Hay que tener en cuenta que el uso ineficiente de estos residuos de biomasa, tal como puede ser la quema de los residuos agropecuarios, puede conllevar a trágicas consecuencias, tanto ambientales, como sociales o económicas. Una de las consecuencias de los impactos negativos de la quema de biomasa en Perú, es la emisión de gases y partículas a la atmósfera, entre ellos los conocidos gases de efecto invernadero y precursores del smog fotoquímico (7).

Tabla Potencial disponible o aprovechable a nivel nacional en Perú de algunos residuos agrícolas y agroindustriales (UCSM, 2018).

Producto	(Cantidad (cabezas o ha)	Residuo (t/año)	Potencial biogás (Nm ³ /año)
Estiércol vacuno	5,565,454	10,628,072	318,842,168
Estiércol pollo	739,538,056	3,678,427	220,705,633
Residuos arroz	419,563	4,195,633	125,868,975
Residuos maíz	464,887	2,324,435	92,977,404
Resid. caña de azúcar	121,905	2,194,290	65,828,709
Residuos algodón	18,099	542,965	17,374,875
Resid. espárragos	31,967	319,670	8,950,760
Total		23,883,492	850,548,524

En este contexto, la Universidad Católica de Santa María (UCSM) asumió un rol protagónico formando profesionales en diferentes áreas como las de Ingenierías y Ciencias Biológicas, con los conocimientos suficientes para el desarrollo de la tecnología en la generación de Bioenergía a partir del Biogás, sobre todo teniendo en cuenta que el potencial de Biomasa en el Perú aún no ha sido plenamente estudiado. Considerando que el desarrollo más difundido es a través del uso de biodigestores de lagunaje, se abre un campo de investigación enorme en el aprovechamiento de los residuos

orgánicos de origen agrícola, agropecuario e industrial para la producción de energía eléctrica y calórica. Además, al utilizar como substratos materia orgánica, producto de desecho en diferentes actividades, estaríamos contribuyendo a la solución de un problema de contaminación, estaríamos sanitizando nuestros suelos y produciendo efluentes, tanto sólidos, el biosol, y líquidos, el biol, los cuales pueden ser utilizados como fertilizantes de los suelos, todo esto con un criterio de **Ecoeficiencia**.

FORMACIÓN ACADÉMICA

El inicio del trabajo en esta línea académica y de investigación, se dio en el marco del **proyecto académico “Introducción de un programa de formación en la Tecnología de Biogás en la región Arequipa”**, cofinanciado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania (BMZ) y Kepler Ingeniería y Ecogestión (España), cuyos fondos fueron gestionados por SEQUA, contando además como socios estratégicos con Snow Leopard Projects (Alemania), el Instituto de Investigación y Desarrollo del Sur (Arequipa) y la Universidad Católica de Santa María, lo que permitió la instalación de una Planta Experimental de Biogás HPTC de altas prestaciones en el Fundo “La Católica” de Majes propiedad de la Universidad Católica de Santa María, la cual entró en operación el 27 de agosto del 2014 (8, 9).

Planta HPTC
Fundo UCSE, Pedregales,
Majes, Perú.

Propósito base de la planta HPTC según la configuración a base e almacenamiento: optimización de Perú.

Planta de biogás para generación de biogás.
Cambio de materia orgánica en proceso de digestión anaeróbica de la tecnología de HPTC.
Módulos, accesorios y mantenimiento separados en unidades de proceso independientes.

Localización compuesta de las siguientes unidades:

Contenedor Técnico
- Reducción de pérdidas (H₂ y CH₄) de seguridad
- Unidad de control
- Control y control de temperatura
- Control de calidad
- Control de seguridad: compresor y válvulas de seguridad

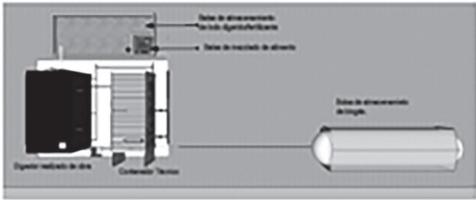
Digestor
- Sistema total de BioGas
- Insumos de alta calidad - 100% de biogás
- Sistema de regulación de biogás
- Sistema de medición
- Control de temperatura automática
- Operación 7 días por semana en 24 horas
- Operación 2 días por semana en 24 horas

Banco de almacenamiento de biogás
- Almacenamiento de biogás - 100% de biogás
- Entendido y protegido por techo
- Insumos de alta calidad - 100% de biogás
- El contenedor para el uso de biogás
- No utilizar un sistema de almacenamiento de biogás en función del tamaño y del uso del biogás

Banco de producción de efluentes
- Sistema de producción de efluentes
- Método de control y control de calidad de biogás (H₂)

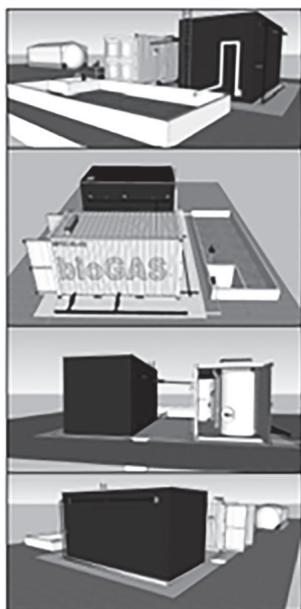
En el almacenamiento de biogás se realiza los siguientes datos claves:
- Dimensiones generales según el volumen de planta anaeróbica
- Operación de alta calidad de biogás (H₂)
- Sistema de alta calidad de biogás (H₂)
- Banco de alta calidad de biogás (H₂)



Vista en planta de la configuración de sistema

Vistas del modelo 3D





El objetivo principal del proyecto fue establecer, de forma duradera, medidas de cualificación, con el fin de capacitar a estudiantes, ingenieros, técnicos y operadores para que puedan diseñar, construir, operar y efectuar los trabajos de mantenimiento de las plantas de biogás, incluyendo las basadas en la tecnología de 2 etapas según el Rottaler Modell (doble cámara hidrolítica), de mucho mejor rendimiento y en períodos de tiempo más cortos (25 a 30 días para producir biogás). Todo con el fin de establecer las bases

para la utilización y distribución de esta tecnología en el Perú y otros países sudamericanos. La planta piloto de Biogás HPTC de una potencia eléctrica de 10 kW, con control de temperatura y de alto rendimiento fue diseñada y construida en la ciudad de Burgos (España) y posteriormente trasladada en diciembre del 2013 al Perú, al Fundo La Católica de Majes (10).

Los Programas Profesionales de Ingeniería Biotecnológica, Ingeniería Ambiental, Ingeniería Industrial, Medicina Veterinaria, Ingeniería Agronómica, Farmacia y Bioquímica de la Universidad Católica Santa María ofrecieron a sus estudiantes el curso de complementación curricular denominado: **“Ecoeficiencia: producción de bioenergía a través de la tecnología de biogás”**.

Los objetivos buscados con este curso de complementación curricular fueron (10):

- Concientizar a los estudiantes de diversas áreas de ingeniería en la necesidad de recurrir a la generación de energías renovables.
- Capacitar a los estudiantes de las diferentes áreas de ingeniería en la tecnología de generación de Bioenergía a partir del Biogás, utilizando el proceso de hidrólisis para aumentar la eficiencia.
- Proporcionar las herramientas necesarias para el desarrollo de investigaciones en el campo de la generación de Biogás a partir de substratos orgánicos propios de nuestra región.
- Entrenar a los estudiantes de las diferentes áreas de ingeniería en el manejo de plantas del tipo HPTC (Alto rendimiento y Temperatura Controlada) para la generación de Bioenergía a partir del Biogás.
- Ofrecer alternativas de tratamientos de los residuos orgánicos a nivel agrícola, agropecuario e industrial, con un criterio de ecoeficiencia que nos permita:
 - Producir enmiendas orgánicas de calidad, estables y maduras
 - Reducir los riesgos para la salud pública y medioambiental
 - Mejorar las características del manejo de los residuos
 - Incrementar el valor económico de los residuos orgánicos

Igualmente, la Escuela de Postgrado de la UCSM, viene desarrollando como una de sus líneas prioritarias de investigación y desarrollo, dentro del marco de las líneas prioritarias establecidas por el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (SINACYT) en el Perú, la del Medio Ambiente y específicamente la generación de Energías Renovables a partir de Biomasa, contando para ello con los programas de Maestría en Planificación y Gestión Ambiental, Sustentabilidad y Medio Ambiente, Química del Medio Ambiente y el Doctorado en Ciencias Ambientales; los

estudiantes de la Maestría en Química del Medio Ambiente, ganadora de tres subvenciones de Maestrías CTI por parte del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), se capacitaron en la generación de Bioenergía a través de la producción de Biogás. A través del Vicerrectorado de Investigación se han desarrollado y se vienen ejecutando muchos proyectos de investigación en esta línea, financiados tanto con fondos internos de la universidad, así como con fondos externos, ya que se ganaron subvenciones a través del Programa Nacional de Innovación Agraria (PNIA), el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) y el Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados (PROCIENCIA) del CONCYTEC.

INVESTIGACIÓN

La generación del Biogás es un proceso ecoeficiente, en el que se busca tratar los residuos orgánicos de diferente naturaleza (residuos sólidos – biomasa) de manera anaeróbica, impidiendo que estos sean dispuestos de manera inadecuada y generen así contaminación, para convertirlos en biogás que se aprovecha energéticamente (producción de energía eléctrica). El calor producido por el generador eléctrico se aprovecha para los diferentes procesos de todo el sistema, entre ellos el secado; también se generan el efluente sólido (biosol) que sale de la extrusora y es usado por su contenido de N, P, K y otros componentes, como abono de la tierra y el efluente líquido (biol) que es generalmente recirculado en el sistema, aunque en nuestro medio también se utiliza como fertilizante del suelo. Finalmente, el material tratado está libre de posibles contaminantes como bacterias, hongos y otros, habiéndose logrado un proceso de sanitización del suelo. De esta manera contribuiremos a mantener la integridad del medio ambiente, tratando de contribuir al equilibrio del ecosistema.

El Biogás es un gas producido mediante procesos bioquímicos que tiene un alto contenido en gases combustibles. Los componentes principales son Metano: 50-75% volumen y Dióxido de carbono: 35 – 50% volumen (8, 9).

• PROCEDIMIENTO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS (8, 9):

El proceso se inició con la puesta en operación de la planta HPTC en el Fundo La Católica de El Pedregal, Majes, para cuyo efecto se cargó la primera vez con slurry (mezcla de estiércol de animales con orines), que se colocó en el fermentador para que aprovechando las bacterias presentes se comience a dar tanto el proceso de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis simultáneamente, con el objeto de producir el biogás.

Se necesita una temperatura aproximada alrededor de 40° C en el fermentador para lograr el desarrollo de las bacterias, ya que estas pueden ser muy sensibles; esta primera vez no interesa mucho el proceso de hidrólisis. Después del tiempo necesario de digestión, que es variable, dependiendo del sustrato con que se trabaje, se comienza a producir biogás con alto contenido de metano \approx 55%, este se lleva al tanque de almacenamiento que se encuentra lleno de aire, se carga y descarga (purga) unas 2 a 3 veces para asegurarnos que el medio es anaeróbico y cuando tenemos un 45% de la capacidad de volumen en m³, recién arranca el proceso.

1. Alimentación: se puede colocar diferentes sustratos en el sistema: slurry, estiércol de vacas, caballos, pollos, etc., ensilados de maíz u otros vegetales, broza de paprika, poda de uva, gras, etc.; lo que varía entre unos y otros es la composición de materia orgánica presente, lo que influira en la cantidad de biogás que van a producir.

El material tuvo que ser previamente analizado; así se trabaja en función de la energía y la fibra. Por ejemplo, materiales como los residuos vegetales, el estiércol de cerdo y de vaca, están en campo bajo, por lo que requieren solamente tratamiento de una fase, es decir sin hidrólisis; pero productos como el salvado de arroz (alta fibra – alta energía), el estiércol de pollo (mediana fibra - alta energía) o el maíz ensilado (mediana fibra – altísima energía) deben ser tratados en sistemas de dos pasos, con hidrólisis.

Para seleccionar si es necesario un proceso de hidrólisis, deben considerarse los aspectos biológicos. Así, por ejemplo, el estiércol de vaca no vale la pena hidrolizarlo porque tiene muy baja energía; el slurry tampoco se hidroliza debido a que tiene capacidad buffer, entonces el pH se eleva y la hidrólisis debe darse en medio ácido. El estiércol de pollo en cambio es altamente energético y vale la pena hidrolizarlo, así como los aceites.

El slurry se alimenta directamente al tanque de fermentación, porque contiene muchas bacterias metanogénicas y en el primer paso, en la doble cámara hidrolítica, solo queremos hidrolizar.

La humedad de la muestra debe ser lo menos posible y el contenido de sólidos totales debe estar entre un 4 a 6%, dependiendo mucho del slurry. Otros datos afirman que se puede trabajar con materia sólida de hasta 8 – 10% (como máximo hasta 16%), lo que abre muchas posibilidades de experimentación con los diversos sustratos.

El sistema propio de alimentación está referido a tolvas de diferente capacidad (25, 30 m³), que es cargado en un sistema Batch con tractores, los cuales depositan el material en el interior; allí existe un dispositivo en espiral que mezcla la materia a tratar y, de allí, a través de un tornillo

(scrubb), es impulsado al tanque de hidrólisis 1. En algunos casos este dispositivo de tornillo permite exprimir la materia prima eliminando el agua que contiene, aumentando el contenido de sólidos.

- 2. Hidrólisis:** la desintegración e hidrólisis son procesos biológicos extracelulares y fisicoquímicos por los cuales se lleva a cabo la ruptura y disolución del material orgánico sólido a compuestos solubles. Los principales sustratos están constituidos por sólidos complejos, carbohidratos en partículas, azúcares de cadena larga, lípidos y proteínas, obteniéndose como productos, monosacáridos, aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga, compuestos inertes sólidos e inertes solubles.

La planta cuenta con dos tanques de hidrólisis. El tiempo de permanencia es variable y dependerá mucho del tipo de sustrato utilizado. Estos tanques pueden funcionar en línea, en cuyo caso el tiempo de hidrólisis es de 1:1 o en paralelo, en cuyo caso el proceso demora 2 días. Esto también varía con el sustrato, así, por ejemplo, para el maíz es de aproximadamente 1 a 2 días, para las papas es de 4 horas y para la sangre por el alto contenido de grasas y proteínas puede ser de 10 horas.

El tanque de hidrólisis 1 generalmente trabaja a una temperatura de 45°C y el tanque 2, a 50°C, mientras que en el digestor la temperatura llega a 42 o 43°C. Cada tanque tiene un sistema de agitación con 1 stirrer vertical tipo paleta, mucho más grande y uno más pequeño que es el diagonal (rührwerk), los que generalmente tienen una reducción de velocidad de 3 a 1. La agitación del sistema se da por períodos, de acuerdo con la necesidad por 4, 5 u 8 minutos. La velocidad del agitador vertical es de aproximadamente 16 rpm, mientras que el diagonal es de menos de 100 rpm.

El tipo de sustrato es el que define el tiempo de hidrólisis, y este puede entrar en una concentración entre un 8 a 10% P/P (recomendado) y hasta 18% de sólidos totales.

En la hidrólisis es importante un pH bajo para mejorar la ruptura de cadenas, una temperatura (T) alta y una buena actividad bacteriana para una más fácil producción de biogás.

Otro factor importante es el tamaño de las partículas que ingresan al tanque de hidrólisis 1, que puede ser variado, pero en el tanque 2 existe el rotacut, que las corta lo más finamente posible, a fin de aumentar la superficie de contacto.

En resumen, se pudo establecer que las condiciones óptimas para la hidrólisis son: temperatura entre 50 – 55°C; pH del medio óptimo: 4 – 5 y relación de C: N: 10 -45.

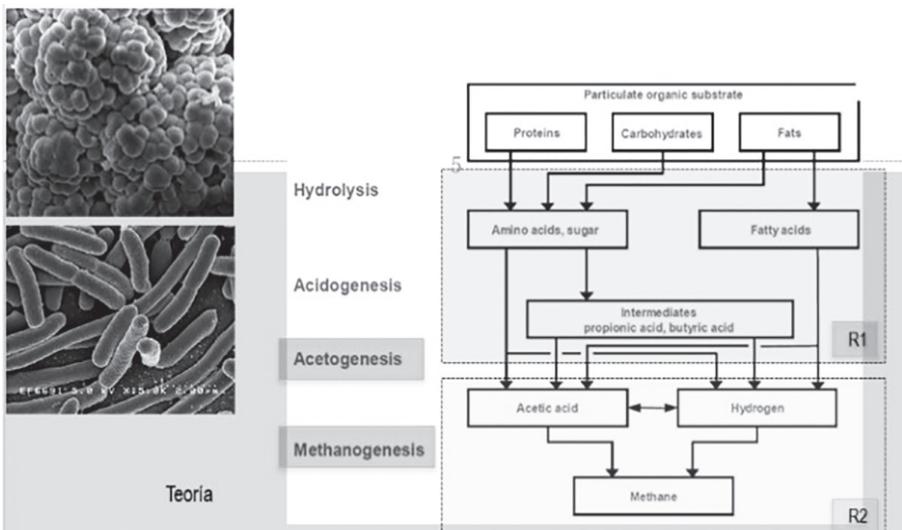
3. Fermentación: la primera etapa involucra la **acidogénesis**, en la cual los aminoácidos y los azúcares producidos en la hidrólisis son convertidos en ácidos grasos volátiles. Supone una generación de ácidos y una disminución del pH; esta etapa debe controlarse para no reducir en exceso el pH del proceso, lo que pondría en riesgo las siguientes etapas del mismo. En esta etapa, las condiciones óptimas son: temperatura entre 50 – 55°C; pH del medio óptimo: 5,5 – 6,7 y relación de C: N: 10 -45.

La segunda etapa es la **acetogénesis**, donde se produce la transformación de los ácidos grasos volátiles (AGV) y otros compuestos a AGV de cadena corta, mayoritariamente ácido etanoico (acético). También se genera ácido acético por consumo de aminoácidos y de otros azúcares. Las condiciones óptimas para la acetogénesis fueron: temperatura de 40 a 42°C; pH del medio óptimo: 5,5 – 6,7 y relación de C: N: 10 -45.

La tercera etapa involucra la **metanogénesis**, proceso que involucra la acción de películas de colonias estructuradas de bacterias que forman gránulos bacterianos anaeróbicos, de especies tales como la *Methanosarcina mazei* o la *Methanobrevibacter smithii*, que transforman los ácidos grasos volátiles, especialmente el acético, en metano y dióxido de carbono.

Las condiciones óptimas para la metanogénesis fueron: temperatura entre 32 y 40°C; pH del medio óptimo: 6,6 – 8,0 y relación de C: N: 20 – 30, además de la necesidad de ciertos elementos traza presentes.

El tiempo de permanencia dependerá del tipo de sustrato, así en el caso del maíz es de aproximadamente 15 días, pero podemos tener tiempos de residencia entre 18 a 40 días.



• **PARÁMETROS TECNOLÓGICOS DE PROCESO (8, 9, 11):**

1. **Tiempo de residencia hidráulico (TRH):** es el tiempo que una fracción diferencial (indivisible) de fluido está dentro del volumen de reacción. También se dice que es el tiempo que el sustrato o reactivo está disponible en el reactor. En el caso de que únicamente haya reacción en el reactor, es el tiempo que dura la misma.

Se ve afectado por volúmenes muertos y cortocircuitos hidráulicos. Se deben realizar estudios de TRH. Todo reactor real en el que este parámetro sea clave debe haber sido sometido a un estudio de Función de Distribución de Tiempo de Residencia, mediante el cual se modifica el modelo de flujo ideal para acercarlo al real.

De acuerdo a la heurística se recomiendan los siguientes tiempos de residencia en función del sustrato:

- Ensilado de maíz: 22-25 días.
- Estiércol: 10-12 días
- Paja: 40-60 días
- Cereales: 20-24 días
- Glicerina: 8-9 días

Dependerá de la calidad del sustrato y de la cantidad de materia biodegradable. En plantas de producción energética viene condicionado por la cinética de producción de biogás.

2. **Tiempo de retención de sólidos (edad de lodos) (TRS):** es una medida de la edad del lodo y es de difícil medición. Se entiende como el tiempo que el lodo anaeróbico activo está en el reactor. Tiene gran importancia en reactores donde hay problemas de lavado del mismo.

En el caso teórico de un grado de mezcla perfecta –modelo de flujo ideal, el TRS es equivalente al TRH

3. **Carga orgánica Volumétrica (COV):** está expresada en kg de sustrato / m³ de reactor por día y es la cantidad de sustrato introducido dentro del volumen de un reactor en un tiempo dado.
4. **Temperatura del proceso:** la heurística confirma la importancia de la temperatura; aproximadamente un incremento de 10°C en el proceso aumenta al doble la velocidad de los procesos. Los rangos principales de fun-

cionamiento están condicionados por las necesidades de las poblaciones metanogénicas: Psicrófilo: $< 20^{\circ}\text{C}$; Mesófilo: $25\text{-}42^{\circ}\text{C}$ y Termófilo: $>50^{\circ}\text{C}$, debiendo precisar que normalmente se trabaja en rango mesófilo (12).

5. **pH, acidez del medio:** cada familia de microorganismos tiene unas condiciones óptimas determinadas. En sistemas de una etapa, el pH está determinado por los microorganismos más sensibles: los metanogénicos. En teoría se manejan entre 6,8 – 7,8, pero en la práctica lo más usual está entre 7,3 – 8,0.

Hay que considerar que no sirve como un parámetro de seguimiento del proceso, ya que siempre avisa cuando ya es demasiado tarde, pues es un parámetro con mucha inercia.

- **PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS Y OBTENCIÓN DEL BIOMETANO (13, 14, 15, 16):**

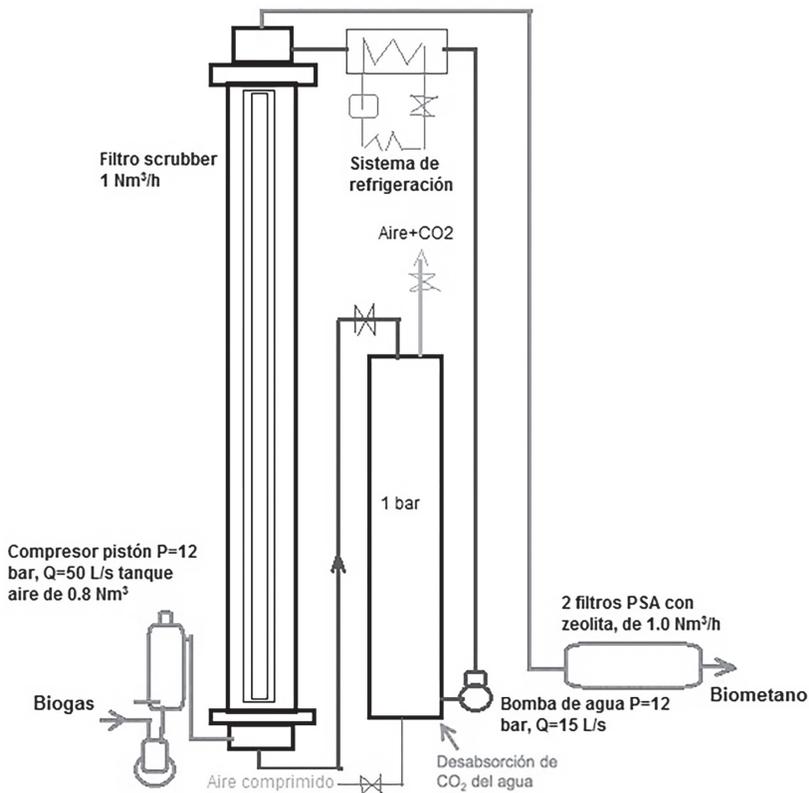
1. **Producción de Biometano a través de sistemas de filtración de CO_2 y vapor de agua:** Como sabemos el biogás es un gas producido mediante procesos bioquímicos de digestión anaeróbica, que tiene un alto contenido en gases, siendo sus principales componentes: metano: 50-70% en volumen (combustible) y dióxido de carbono: 30 – 45% en volumen; 1m^3 de metano tiene un poder energético neto de 10 kWh. El biogás tiene un poder calorífico bajo (18 MJ/Nm^3) y mejora cuando se convierte en biometano por eliminación de CO_2 , vapor de agua y H_2S (gas corrosivo para los motores).

Cuando se eliminan el dióxido de carbono y los contaminantes y se alcanza una concentración por encima del 90% de metano, el biogás se convierte en biometano, mejorando significativamente su poder energético. En la UCSM desarrollamos investigaciones sobre procesos químicos y tecnológicos, tales como el uso de sales de hierro o inyección de aire para eliminar el H_2S , un sistema de filtrado por depuración tipo Scrubber para eliminar el CO_2 y un sistema Pressure Swing Adsorption (PSA) con zeolita para eliminar vapor de agua.

En la investigación nos propusimos desarrollar tecnología para purificar el biogás obtenido en la planta HPTC del Fundo La Católica de El Pedregal-Majes, para lo cual se diseñó, construyó y evaluó un sistema de filtrado por depuración con agua presurizada (Scrubber), para reducir el contenido de CO_2 a valores menores a 5.0% V/V; para ello trabajamos a 03 presiones de operación (6, 9 y 10bar) combinadas con 03 temperaturas (10, 15 y 20°C), obteniéndose el mejor resultado de purificación, con un contenido de 4,3% V/V de CO_2 a 10°C y 10 bar de presión. El sistema toma el biogás, lo presuriza e introduce por un tubo de acero

de 0.05 m de diámetro y 3,0 m de altura ubicado en la parte inferior, en cuyo interior se encuentran 04 tubos de PVC de diámetros decrecientes, con perforaciones y separadores que aumentan la superficie de contacto y por ende la absorción del CO_2 . Igualmente, se desarrolló un sistema de filtrado PSA para el vapor de agua; se presuriza el biogás e introduce en la parte inferior por un tubo de acero de 0,2 m de diámetro y 0,5 m de altura, en cuyo interior se encuentra la zeolita como adsorbente. El flujo de biogás es controlado a través de válvulas y el filtrado se retira por la parte superior, logrando reducir el contenido de vapor de agua a 2.2% V/V a 8 bar de presión y temperatura ambiente.

En conclusión, se diseñó, construyó y validó una planta a escala reducida, con un sistema de filtrado por depuración, tipo Scrubber, para absorber el CO_2 del biogás y un sistema PSA con zeolita como adsorbente de vapor de agua, lo que nos permitió reducir la presencia de estos contaminantes en el biometano a proporciones aceptables y a costos por debajo de 0.2 S/Nm³ de biogás procesado.



Diseño de la planta piloto para filtrar CO_2 y H_2O contenidos en el Biogás



Sistema de Scrubber y PSA para la purificación del biogás.



Compresor para la compresión y almacenamiento en balones del biometano obtenido.



Luego el biometano fue presurizado y almacenado en balones de gas y utilizado para mover automóviles, tractores, motocultores, equipos de generación eléctrica, secadores, etc.



Referencias bibliográficas:

1. Assureira-Espinoza, E. G. y Assureira-Espinoza M. A., (2015), *Potencial energético de la biomasa residual en el Perú*, Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
2. Decreto Supremo N° 064-2010-EM. Aprueban la Política Energética Nacional del Perú 2010 – 2040.
3. Peña, G. & Salazar, I. (2009). *Digestión Anaeróbica aplicada al aprovechamiento de Residuos Agroindustriales*. Arequipa: Proyecto FINCYT.
4. Hidalgo, Dolores y Equipo del Proyecto BIOMETRANS (2018). *Producción de biometano para combustible de transporte a partir de residuos de biomasa: Diagnóstico de los recursos de biomasa disponibles en Iberoamérica*. Programa Iberoamericano CYTED - España. ISBN/ISSN: 978-84-09-07532-4.
5. Reategui, J., Peña, G., Cárdenas, L., Castro, J., Mejía, F., Mestas, S. & Roque, F. (2018). *Manual de Producción y Uso de Biometano Presurizado a Baja y Alta Presión*. Arequipa, Perú: UCSM.
6. Peña, G. & Soldevilla, S. (2012). *Desarrollo de tecnología para el procesamiento eficiente del biogás en la región Arequipa*. Arequipa.
7. Hidalgo Dolores y Equipo del Proyecto BIOMETRANS (junio 2018). *Producción de biometano para combustible de transporte a partir de residuos de biomasa: Actualización del estado del conocimiento en aprovechamiento de biomasa para producción de biogás en la Región Iberoamericana*. Programa Iberoamericano CYTED - España. ISBN/ISSN: 978-84-09-07533-1.
8. Danner Walter y Kilian David (2012). *Biogás y cultivo ecológico: la combinación perfecta*. Snow Leopard Projects GMBH – Alemania.
9. Danner Walter (2011). Practical experiences with the digestion of straw in 2-stage AD Plants-Extension of the value chain. Progress in Biogás Stuttgart-Hohenheim, pages 131 – 135.
10. Dávila del Carpio, Gonzalo (2012). Curso de complementación curricular. “Ecoeficiencia: producción de Bioenergía a través de la Tecnología de Biogás”. UCSM.
11. Kanokwan Boe (2010). Seminar on Digestion of Sludge. Finnish Environment Institute. Monitoring, control and optimization of the Biogás process. Bioenergy Research Group. Department of Environmental Engineering. Technical University of Denmark.

12. Goberna M., Schoen M.A., Sperl D., Wett B. Y Insam H (2010). Mesophilic and thermophilic cp-fermentation of cattle excreta and olive mill wastes in pilot anerobic digesters. *Biomass and Bioenergy* (Elsevier). 34 (2010): 340 - 346
13. Llanez H., Morís M. A., González Aspiroz L. Y González E. (marzo 2010). *Estudios de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás*. Capítulo 1: Caracterización, purificación y control de biogás. PSE PROBIOGÁS. Desarrollo de sistemas sostenibles de producción y uso de biogás industrial en España.
14. Niesner, J., Jecha, D., & Stehlík, P. (2013). Biogas upgrading technologies: State of art review in european region. *Chemical Engineering Transactions*, 35, 517–522. <http://doi.org/10.3303/CET1335086>.
15. TUV (2012). *Biogas to Biomethane Technology* review (2012). Vienna University of Technology. May 1-15. Retrieved from http://www.aile.asso.fr/wp-content/uploads/2012/06/wp3-1-1_technologyreview_english.pdf
16. Yousef, A.M.I., Eldrainy, Y.A., El-Maghlany, W.M., Attia, A. (2016). *Upgrading Biogas by a low-temperature CO₂ removal technique*. *Alexandria Engineering Journal*. 55 (2): 1143-1150. <http://doi.org/10.2016/j.aej.2016.03.026>.