

70

Fecha de presentación: diciembre, 2021

Fecha de aceptación: enero, 2022

Fecha de publicación: marzo, 2022

BIOGÁS

Y SOSTENIBILIDAD EN CUBA

BIOGAS AND SUSTAINABILITY IN CUBA

Deny Oliva Merencio¹

E-mail: deny@mecanica.cujae.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8117-3605>

Ileana Pereda Reyes¹

E-mail: ileana@quimica.cujae.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6517-4202>

¹ Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” Cuba.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Oliva Merencio, D., & Pereda Reyes, I. (2022). Biogás y Sostenibilidad en Cuba. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(2), 597-609.

RESUMEN

Cuba mantiene un compromiso raigal con los Objetivos de Desarrollo Sostenible que conforman la Agenda 2030 de la ONU, y así lo ha plasmado en el Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social del país hacia el 2030, basado en la consolidación del modelo económico social y en los lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución, ratificados y verificados en el VIII Congreso del Partido Comunista de Cuba. En todos estos documentos rectores de la vida socioeconómica de la nación cubana, se establecen los ejes estratégicos y las prioridades para la consecución de un socialismo próspero y sostenible en los próximos años. Las tecnologías anaerobias han jugado, en varias partes del mundo, un rol importante de cara a alcanzar metas que caracterizan la sostenibilidad. En este trabajo se trata de demostrar el papel que pueden desarrollar las tecnologías productoras de biogás dentro del marco de sociedad socialista que Cuba ha decidido construir. Se presentan los rasgos que caracterizan las tecnologías anaerobias y su vínculo directo con el desarrollo sostenible, así como la contribución que pueden tener éstas en la solución de varios problemas que presenta nuestro país en lo energético, ambiental, social y económico.

Palabras clave: Biogás, desarrollo sostenible, sostenibilidad, tecnologías anaerobias.

ABSTRACT

Cuba maintains a deep commitment to the Sustainable Development Goals that make up the 2030 Agenda of the UN, and this has been reflected in the National Plan for Economic and Social Development of the country towards 2030, based on the consolidation of the social economic model and the guidelines of the economic and social policy of the Party and the Revolution, ratified and verified at the VIII Congress of the Communist Party of Cuba. In all these guiding documents of the socioeconomic life of the Cuban nation, the strategic axes and priorities for the achievement of a prosperous and sustainable socialism in the coming years are established. Anaerobic technologies have played, in several parts of the world, an important role in achieving goals that characterize sustainability. This paper attempts to demonstrate the role that biogas producing technologies can play within the framework of the socialist society that Cuba has decided to build. The features that characterize anaerobic technologies and their direct link with sustainable development are presented, as well as the contribution they can have in the solution of several problems that our country presents in the energetic, environmental, social and economic aspects.

Keywords: Anaerobic technologies, biogas, sustainability, sustainable development.

INTRODUCCIÓN

El imperativo de impulsar el desarrollo sostenible a nivel mundial ha promovido la nueva agenda de las Naciones Unidas para el año 2030. La meta es acabar con la pobreza, promover la prosperidad y el bienestar de todas las personas, además de proteger el medio ambiente. Para ello se han implementado los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), vigentes desde enero del 2016, a través de la estrategia MAPS (acrónimo por sus siglas en inglés: *Mainstreaming, Acceleration and Policy Support*). Estos ODS se basan en los Objetivos de Desarrollo del Milenio e incluyen esferas como el cambio climático, la desigualdad económica, la innovación, el consumo sostenible y la paz y la justicia, entre otras prioridades.

Por muchas décadas, la economía se ha apoyado en el petróleo como una fuente de energía económica y confiable. Sin embargo, la dependencia en la costosa energía fósil se está convirtiendo en un factor limitante para muchas economías emergentes y desarrolladas. Es un aspecto bien conocido, que el 90 % de las necesidades energéticas del planeta son satisfechas con la utilización de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón o el gas natural. Todos ellos extinguidos, fuertemente contaminantes y utilizados en forma ineficiente, por el interés predominante de la producción de energía sobre el de su efecto ecológico.

La disponibilidad energética segura, accesible, confiable, eficiente y que no perjudique al medio ambiente es esencial para el desarrollo sostenible de los pueblos y la mejora de su calidad de vida. En los últimos años, las Fuentes Renovables de Energía (FRE) han ido adquiriendo globalmente una importancia cada vez mayor, básicamente por razones energéticas y ambientales. El déficit de energía que sufre el mundo actual y en particular los países subdesarrollados, tiene una situación cada vez menos favorable. Las fuentes tradicionales de energía no son la solución a largo plazo.

Es indispensable que se utilicen las fuentes de energías propias y renovables que están al alcance como la energía eólica, la energía solar, la energía de la biomasa, entre otras. En este contexto, el empleo de tecnologías anaerobias para la producción de biogás debe ser prioritario pues son capaces de asumir como materia prima todo tipo de residuos orgánicos biodegradables para su aprovechamiento energético: ganaderos, domésticos, agroindustriales, entre otros. En definitiva, de lo que se trata es de utilizar todos los residuos orgánicos que actualmente no tienen un tratamiento adecuado, representando así un constante peligro de contaminación ambiental. Muchas son las experiencias en el tratamiento anaerobio

de residuos lignocelulósicos a escala industrial, principalmente en Europa (Tasmaganbetov, et al., 2020).

La agricultura goza de una posición única para poder satisfacer tanto las necesidades alimenticias como el suministro de energía en granjas, comunidades rurales, ciudades, sectores del transporte e industrial. La agricultura moderna y las comunidades rurales pueden adoptar tecnologías más avanzadas para producir alimentos y convertir la biomasa de residuo en fuente de energía limpia, biocombustibles y bioproductos. A pesar del enfoque hacia una agricultura sostenible, esta actividad es aún alta generadora de desechos. La producción integral de alimentos, biomasa, fibra y madera pueden hacer de la agricultura y la industria forestal el nexo para una nueva y sostenible revolución industrial (Oliva-Merencio, et al., 2015).

METODOLOGÍA

En este trabajo utilizando la revisión bibliografía de tipo integradora, panorámica, conceptual. Sistemática, sistematizada y comparativo de acuerdo a las condiciones de Cuba se pretende realizar un análisis de la relación directa e incidencia que tiene la aplicación y ejecución, a gran escala y fundamentalmente en el sector agroindustrial, de las tecnologías anaerobias, en varios elementos importantes.

Entre los aspectos primordiales se pueden citar: en la consecución de varios de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), en el avance y cumplimiento del Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social al 2030 (PNDES 2030), en la implementación de varios de los lineamientos de la política social y económica del Partido y la Revolución aprobados en el VIII Congreso del PCC, y en el incremento de los niveles de Sostenibilidad en Cuba, en aras de alcanzar una sociedad próspera y sostenible.

DESARROLLO

En 1776, Alessandro Volta encontró metano en el gas de pantano que se producía de forma natural bajo condiciones anaerobias (ausencia de O_2). En 1859 se realizó la primera utilización técnica del biogás en un hospital de Bombay (India). Ya en los años 20s y 30s del siglo XX, se aplicó el proceso de digestión anaerobia (DA) para el tratamiento y purificación de aguas residuales industriales. La crisis energética de los años 70s del siglo pasado llevó a la primera expansión e introducción de legislaciones medioambientales que promovían el empleo de las tecnologías anaerobias, lo que conllevó a que en los años ulteriores se diera un desarrollo importante que posibilitó lo que hoy se puede hacer. Actualmente se trabaja en el perfeccionamiento tecnológico, la eficiencia de los procesos,

la adecuación a nuevas materias primas, incluyendo algunos grupos de trabajo en Cuba (Oliva-Merencio, et al., 2015; Cabrera-Díaz, et al., 2016; González-Suárez, et al., 2016; Pérez, et al., 2016; Gómez-Salcedo, et al., 2021ab; Fuess, et al., 2021).

El biogás se produce por la acción de microorganismos en el proceso de biodegradación de la materia orgánica compleja hacia formas más simples bajo condiciones de ausencia total de oxígeno. Está compuesto por metano (50-70 %), dióxido de carbono (30-40 %), hidrógeno (< 5 %) y sulfuro de hidrógeno. Tiene un poder calorífico inferior de 25 740 kJ/m³ (60 % de metano) (Eklund, 2019).

Las soluciones que incluyen tecnologías anaerobias para la producción de biogás son generalmente versátiles, flexibles y eficientes en términos de costos desde una perspectiva social, y cuando se adaptan a las condiciones locales, pueden contribuir al desarrollo sostenible (Eklund, 2019). En la digestión anaerobia se suceden un número de procesos que implican la transformación de la materia orgánica compleja biodegradable a través de microorganismos en una mezcla de gases (metano y dióxido de carbono, fundamentalmente), además de un lodo digerido estabilizado rico en nutrientes. Se obtiene un portador energético capaz de sustituir combustibles fósiles y un biofertilizante ecológico capaz de sustituir fertilizantes químicos con todas las bondades que esto implica.

Experiencias exitosas en la producción de biogás y su conversión energética han sido reportadas, especialmente en Europa. Las fuentes más comúnmente usadas han sido los rellenos sanitarios, los lodos de depuradora, las plantas agroindustriales centralizadas, los residuos sólidos urbanos, las plantas para metanización, las plantas de codigestión y otras plantas multi-productos. Las principales formas en las que se recupera o usa el biogás son para energía eléctrica y térmica mediante la cogeneración, lo cual ha crecido en los últimos años (Havrysh, et al., 2020). Las principales aplicaciones para el calor desde el biogás han sido en las mismas plantas productoras, para secado de lodos, calefacción y mantenimiento de la temperatura óptima de los digestores. Alemania lidera la producción primaria de biogás en el mundo con más del 50 % del total producido, lo cual es un resultado de un exitoso esquema de apoyo e incentivos por parte del gobierno. Suecia es un líder en el uso del biogás como biocombustible para el transporte: aproximadamente el 13 % del consumo total de combustible para el transporte provenía del biogás en el 2013, manteniendo un plan que implica alcanzar el 50 % de toda la energía de uso final proveniente de las FRE, siendo un 10 % destinado al transporte. Otro uso del biogás en los países europeos

es su inyección en la red de gas natural como biometano (biogás refinado o purificado), lo cual parece que será una tendencia en los próximos años (Eklund, 2019).

Lo que se ha desarrollado en la Unión Europea, con relación a la aplicación de las tecnologías anaerobias, al biogás, su producción y uso, puede ser considerado como un ejemplo y una referencia para el presente y los años venideros en Cuba, en medio de la necesidad existente en el país de diversificar la matriz energética y aumentar la participación de las FRE en la obtención de energía primaria (Cabrera-Díaz, et al., 2016). Además de las bondades medioambientales que brinda en cuanto al tratamiento de residuos orgánicos, reducción de contaminación ambiental, eliminación de olores, generación de biofertilizante y sustitución de fertilizantes químicos. Las plantas de biogás a media y gran escala son más rentables que los digestores de biogás domésticos. Sus costos de producción de biogás son menores debido a las economías de escala y al uso de tecnologías avanzadas (Havrysh, et al., 2020).

En Cuba, desde los años 70 del pasado siglo se construyeron alrededor de 550 pequeñas instalaciones de biogás, con tecnologías tradicionales, china e hindú, en vaquerías y granjas porcinas. El propósito fundamental fue cocinar los alimentos en la casa o casas de campesinos, y/o cocinar la comida de los animales, además de sustituir el mechón o lámpara de kerosene artesanal para el alumbrado de las instalaciones durante la jornada del ordeño manual en horas de la madrugada. Ese programa fue ampliándose en los años 90 hasta llegar a unos cientos de instalaciones, de las cuales hoy sólo trabajan el 70 % de ellas.

En los últimos años se ha ido implementando un programa desde el MINAG que ha permitido instalar centenares de digestores de flujo pistón de polietileno, en granjas porcinas con la intención de tratar todos los residuales que se generen en éstas. El biogás producido no es cuantificado, ni su calidad. Industrialmente se han realizado algunos esfuerzos en territorios como Villa Clara, Camagüey, Sancti Spíritus, Matanzas y Santiago de Cuba, donde existen instalaciones de mayor escala para tratar residuales de destilería y ganaderos, donde el biogás se destina a generar electricidad y/o a los quemadores de generadores de vapor. Este alcance es aún muy limitado y debe extenderse mucho más.

Existe gran potencial en Cuba debido a los residuos orgánicos biodegradables que se generan en varios sectores económicos (agrícolas, agroindustriales, ganaderos, de la industria alimenticia, aguas residuales industriales y domésticas, residuos sólidos urbanos), que son mal

depuestos y/o no son explotados. El inmenso potencial existente en el país aún no se aprovecha y deben darse pasos para hacerlo por lo que significa en contribución energética y mejoría medioambiental. Las grandes oportunidades que implica la aplicación de las tecnologías anaerobias en Cuba, con decenas de MWh por generar, miles de toneladas de contaminantes por evitar y miles de toneladas de CO₂ por dejar de emitir, aun no son asumidas y deben serlo con el acompañamiento de las autoridades pertinentes y la comunidad científica de la nación.

La recuperación de energía y la producción de múltiples productos son principios inherentes del concepto de Biorefinería, que han sido desarrollados recientemente. La Biorefinería integra los procesos biológicos para la producción de bioenergía (biocombustibles), y subproductos químicos a partir de la biomasa, análogos a una refinería de petróleo. La generación de varios productos es un beneficio a la Biorefinería, al maximizar el valor de los subproductos de los procesos biológicos. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, la digestión anaerobia es adecuada para añadir valor a varios procesos agroindustriales, con basamento en materias primas biomásicas (industria productora de azúcar de caña, de etanol o alcohol, de café, arroz, granos, industria alimenticia, productores de carne, leche, mataderos, etc.) pues además del tratamiento adecuado medioambientalmente hablando de las aguas residuales generadas, e incluso de algunos de los residuos orgánicos biodegradables que se producen, esta también posibilita la generación de energía a través del uso del biogás y la generación de otros subproductos desde ese proceso biológico (biofertilizantes, entre otros) (Feiz, et al., 2020; Fuess, et al., 2021).

Todo ello permite explotar al máximo la opción de cerrar ciclos obteniendo procesos productivos en los cuales se recuperen, reciclen y/o reúsen los residuos generados de manera que, como sistema integral, no haya flujos de salida en forma de rechazo. Estos elementos posibilitan un acercamiento a la llamada economía circular, y si tienen basamento en la biomasa como materia prima, también se estarían dando pasos hacia la consolidación de la bio-economía que promueve la Agenda 2030 de la ONU.

El empleo de las tecnologías anaerobias, productoras de biogás, en cualquiera de sus soluciones o participación, dentro de esquemas integrales de tratamiento ambiental de residuos o contribución energética, presenta un grupo de ventajas o bondades que hacen que éstas tengan una capacidad difícilmente igualable en cuanto a sus aportaciones al desarrollo sostenible y la prosperidad.

En la tabla 1 se presentan varias de esas ventajas o beneficios que traen aparejados la aplicación de las tecnologías anaerobias. Se corrobora que tienen un impacto positivo en lo energético, en lo económico, en lo medioambiental y en lo social, siendo estas las dimensiones que incorpora el concepto de Sostenibilidad.

Tabla 1. Revisión de los beneficios que presenta la aplicación de las tecnologías anaerobias y algunas de las fuentes encontradas en parte de la literatura científica consultada.

Beneficio	Fuente o referencia
Produce un portador energético renovable (no fósil)	Moraes, et al., 2015.
Produce un fertilizante orgánico y ecológicamente estabilizado	Cabrera-Díaz, et al., 2016; González-Suárez et al., 2016.
Tratamiento a residuos orgánicos y aguas residuales	Moraes, et al, 2015.
Reduce contaminación ambiental	Feiz, et al., 2020 ; Fess, et al., 2021.
Reducción de las emisiones de CO ₂	Moraes, et al., 2015.
Reduce olores	Perez, et al., 2021.
Reduce la emisión de metano natural desde la ganadería	Pérez, et al., 2016; Pérez, et al., 2021.
Contribuye a la independencia y soberanía energética nacional	González-Suárez, et al., 2016; González-Suárez, et al., 2020.
Incrementa la creación de empleos	Moraes, et al., 2015 ; Fess, et al., 2021.
Puede generar energía en varias formas (eléctrica, calor, frío, etc.)	Eklund, 2019; Havrysh, et al., 2020
Puede impulsar el transporte sostenible	Lönnqvist, et al., 2015; Eklund, 2019.
Mejora la circulación de nutrientes naturales	González-Suárez, et al., 2016; González-Suárez, et al., 2020.

Pueden ser tecnologías apropiadas exportables	Oliva-Merencio, et al., 2015; Pérez, et al., 2016; Cabrera-Díaz, et al., 2016; González-Suárez, et al., 2016
Reduce el uso de combustibles fósiles	Moraes, et al., 2015.
Reduce el uso de fertilizantes químicos	Cabrera-Díaz, et al., 2016; González-Suárez, et al., 2016.
Mejoría de la composición de los suelos mejorando fertilidad	Cabrera-Díaz, et al., 2016; González-Suárez et al., 2020.
Contribuye al desarrollo de las áreas rurales	Oliva-Merencio, et al., 2015; Pérez, et al., 2016.; Cabrera-Díaz et al., 2016; González-Suárez, et al., 2016.
Incremento en la investigación e innovación propia	Pérez, et al., 2016; Cabrera-Díaz, et al., 2016; González-Suárez et al., 2016.
Tecnologías sostenibles	Moraes, et al., 2015; González-Suárez, et al., 2016.
Mejora la eficiencia de los sistemas productivos de campesinos	González-Suárez, et al., 2016; Pérez, et al., 2016; Cabrera-Díaz, et al., 2016.
Impulsa el desarrollo local	Pérez, et al., 2016; Cabrera-Díaz, et al., 2016; González-Suárez, et al., 2016.
Posibilita la pequeña empresa y el cooperativismo	Pérez, et al., 2016 ; Pérez, et al., 2021.
Sostenibilidad a los procesos de producción al cerrar ciclos	Moraes, et al., 2015 ; Pérez, et al., 2021.

En la tabla 2, se muestra la tendencia de los costos asociados a las diferentes tecnologías que permiten el aprovechamiento de las principales fuentes renovables de energía para la generación de electricidad, a lo largo de la década del 2010 al 2020. Se puede observar que se mantiene una declinación permanente para las tecnologías solares y la eólica en 2020, a pesar de la influencia negativa de la pandemia de COVID 19 en muchos sectores económicos. La disminución de los costos de la potencia instalada en estos últimos 10 años ha sido muy importante. Se pueden encontrar valores considerables de caída en las cifras lo cual también se refleja en el costo nivelado de la energía eléctrica generada a través de esas mismas tecnologías que han ido a baja con valores desde el 48 hasta el 85 %.

En el caso de las tecnologías para la generación de electricidad a partir de fuentes biomásicas, lo que muestra International Renewable Energy Agency (2021), es que los costos de instalación prácticamente no han cambiado con una caída a lo largo de la década en estudio, de un 3 %. En cuanto al costo nivelado de la energía eléctrica generada se presenta sin cambio a lo largo de estos 10 años analizados. Ahora bien, el tema de la disponibilidad tecnológica para el aprovechamiento de los recursos energéticos de la biomasa, tiene tal diversidad como diversa son las posibles materias primas. Por ello se hace imprescindible desarrollar un análisis particular para cada una de las tecnologías dedicadas a la biomasa para ver el comportamiento de las mismas en cuanto a costos.

Hay que definir cómo se comportan los costos de instalación para las tecnologías para e; aprovechamiento de recursos biomásicos que ya tienen plena madurez comercial como lo son: la combustión directa en calderas, la co-combustión de bajas emisiones, la incineración de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), la producción de biogás en rellenos sanitarios, las plantas cogeneradoras de electricidad y energía térmica, así como las plantas de digestión anaerobia para producción de biogás, que son en las que se centra este artículo. Es interesante conocer que ha sucedido en el mundo, y que cabe esperar para las condiciones cubanas, en cuanto a la posibilidad de implementar las tecnologías para la producción de biogás en nuestro país.

Está claro que las tecnologías que aprovechan la biomasa, con todo su potencial y su enfoque dirigido al uso o tratamiento de materias primas o combustibles biomásicos, residuos orgánicos, etc., precisan de un ambiente regulatorio más favorable para que puedan desplegarse en todas sus posibilidades en el mercado. En muchas ocasiones, la información sobre los costos y el desempeño de las tecnologías de fuentes renovables no son del dominio público para poder comparar y verificar. A menudo no es suficiente los datos conocidos que podrían permitir a los decisores y los hacedores de política, tomar las mejores decisiones sobre el papel de las FRE. La capacidad para la generación de electricidad a partir de biomasa se incrementó entre 2016 y 2017 un 7 %, hasta llegar a 122 GW, según Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2018).

Tabla 2. Tendencias del costo total del kW instalado, del factor de capacidad y del costo nivelado de la electricidad para diversas tecnologías que permiten aprovechar las Fuentes Renovables de Energía (FRE), 2010-2020.

	Costos totales del kW instalado			Factor de capacidad			Costo nivelado de la electricidad			
	(2020 USD/kW)			(%)			(2020 USD/kWh)			
	2010	2020	Diferencia (%)	2010	2020	Diferencia (%)	2010	2020	Diferencia (%)	
Bioenergía	2619	2543	-3	72	70	-2	0,076	0,076	0	
Geotérmica	2620	4468	71	87	83	-5	0,049	0,071	45	
Hidráulica	1269	1870	47	44	46	4	0,038	0,044	18	
Solar Fotovoltaica	4731	883	-81	14	16	17	0,381	0,057	-85	
Concentración Solar	9095	4581	-50	30	42	40	0,34	0,108	-68	
Eólica en tierra	1971	1355	-31	27	36	31	0,089	0,039	-56	
Eólica en mar	4706	3185	-32	38	40	6	0,162	0,084	-48	

Fuente: International Renewable Energy Agency (2021).

Las principales características en los costos totales de inversión de las plantas de biomasa para la generación de electricidad son: planeación, los costos de ingeniería y de construcción, la maquinaria de preparación y manejo del combustible o la materia prima, y otros equipos (ej., el sistema de conversión energética). Los costos adicionales derivados de la infraestructura de conexión a la red (ej., obras civiles y caminos). Los costos del equipamiento tienden a dominar, pero podrían tener valores importantes otros elementos específicos en dependencia de la ubicación del sitio de la planta, con relación a la conexión a la red, logística y otras infraestructuras si, por ejemplo, la planta queda en un lugar apartado de la red. Las plantas que aprovechan recursos biomásicos que podrían tener la capacidad de cogenerar, como lo son las tecnologías anaerobias para la producción de biogás, pueden alcanzar eficiencias globales más altas y así mejorar considerablemente sus parámetros económicos (International Renewable Energy Agency, 2021).

La inmensa mayoría de los proyectos que sirven de base para los cálculos referenciados en este trabajo (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2018) se desenvuelven en los países desarrollados por lo que esto debe ser considerado en el momento de hacer un análisis dirigido a los países en América Latina, fundamentalmente el caso cubano, con todas sus peculiaridades. El costo de capital de las tecnologías de combustión simples estuvo entre los 660 y los 1860 USD/kW. Los costos totales de las tecnologías de lecho fluidizado circulantes estuvieron entre los 2170 y 4500 USD/kW. Los sistemas de generación de electricidad a partir de la digestión anaerobia (biogás) tuvieron costos de capital entre los 2570 y 6100 USD/kW. Las tecnologías de

gasificación, incluyendo las de lecho fijo y las soluciones con lecho fluidizado, tuvieron un costo de capital entre los 2140 y 5700 USD/kW.

El costo total de las tecnologías anaerobias depende principalmente de los precios de las materias primas y de la capacidad de la planta. En general, tanto el capital como los de explotación y mantenimiento (O&M) disminuyen significativamente con la escala de la planta, mientras que los costos relacionados con el consumo (especialmente para el suministro de materia prima) sólo disminuyen ligeramente con una mayor capacidad de la planta.

Por lo general, los costos relacionados con el capital para la producción de biogás son menores a partir de residuos orgánicos industriales que cuando se emplean cultivos energéticos. En diferencia es de entre el 25 % y el 30 % en capacidades de producción de biogás similares. En el caso de los residuos orgánicos industriales, la manipulación y el almacenamiento suelen estar ya instalados o deben ser construido independientemente (es decir, no especialmente para producción de biogás, por lo que no supone costos adicionales). Cuando se produce biogás a partir de residuos municipales, el costo global depende en gran medida de la definición de los límites económicos, por ejemplo, qué inversiones se incluyen en la factura de la producción de biogás. Por ejemplo, la recogida de residuos (que debe hacerse de todos modos, incluso sin la producción de biogás) y el compostaje del digestato (que a menudo se hace sin digestión anaerobia de los residuos como primer paso antes del compostaje) pueden considerarse como costos de producción de biogás o como costos independientes. En casi todos los casos, el costo del digestor representa la mayor parte de

la inversión total para la tecnología anaerobia (40-45 % para los cultivos energéticos y 55-60 % para los residuos agrícolas o industriales, para capacidades de producción de biogás análogos (International Renewable Energy Agency, 2018).

En función de la biomasa digerible que se use como materia prima, la eficiencia global típica del suministro de biogás como combustible está entre 70 % y 85 %. La eficiencia está principalmente determinada por: las pérdidas durante el transporte de la biomasa y el almacenamiento; la eficiencia del proceso de digestión anaerobia, las pérdidas de metano y las necesidades energéticas auxiliares del proceso; las pérdidas de metano y las necesidades de energía de la purificación del biogás, y las necesidades de energía para el transporte del biogás (a través de la red de gas o por camiones).

Según International Renewable Energy Agency (2018), los costos de producción del biogás son normalmente de 0,22 USD/m³CH₄ a 0,39 USD/m³CH₄ para producción de biogás a partir de estiércol y de 0,11 USD/m³CH₄ a 0,50 USD/m³CH₄, para la producción de biogás a partir de residuos industriales. Un punto primordial en el balance económico de las plantas anaerobias es la producción de biofertilizante y lo que significa en ingresos, además de los beneficios ambientales, de recuperación y de productividad de los suelos. Es un tema que complementa los elementos de sostenibilidad de los sistemas productivos que implementan soluciones anaerobias.

Lograr la sostenibilidad en el desarrollo representa el principal desafío que debe solucionar la humanidad, de forma urgente, en el presente siglo. La gran batalla se decide a escala local, regional, por lo que se debe buscar respuestas en ese nivel, ensayando vías de desarrollo que puedan ser ejemplares.

En Cuba, se han desarrollado numerosas investigaciones acerca de sus recursos naturales, la diversidad biológica, los peligros naturales y la situación ambiental que aportan una excelente base informativa para la realización de análisis más integrales, vinculados con la sostenibilidad actual del país. Sin embargo, como objeto de estudio, el desarrollo sostenible ha sido menos examinado, dada la complejidad de esta categoría, sus vínculos con otras dimensiones, particularmente la económica, la productiva, la social y la cultural, así como la carencia de indicadores pertinentes para su evaluación y seguimiento. Un grupo de reconocidos expertos en diferentes disciplinas identificaron un conjunto de problemas de carácter ecológico y ambiental que frenan el desarrollo sostenible de Cuba (Díaz-Duque, et al., 2013), entre estos hay tres que son muy importantes de cara a la realización de este trabajo:

- Bajos niveles de tratamiento de los residuales industriales y agrícolas, y de aprovechamiento de los mismos como insumos para generar energía o como sustitutos de materiales.
- Incremento de los problemas sanitarios, de salud y de calidad de vida en los núcleos urbanos, provocados, entre otras causas, por los deficientes sistemas de recolección de desechos sólidos y líquidos, de la contaminación atmosférica y del ruido.
- Incremento en la producción agropecuaria del desarrollo de combinados porcinos, huertos urbanos o semiurbanos, o desmonte de vegetación en zonas inadecuadas por su posicionamiento topográfico, lo que implica contaminación del manto freático, captación de residuos urbanos peligrosos, o afectaciones a cuencas hidrográficas y laderas montañosas.

A lo largo de la década 2001-2010 fueron identificados en Cuba alrededor de dos mil fuentes contaminantes principales de diversos tipos y categorías que incluyen tanto los residuales de origen doméstico como los industriales y agropecuarios. Estos residuales han provocado, por diferentes causas, determinada contaminación de las aguas interiores y marinas, los suelos y la atmósfera. Un aspecto notable en ello ha sido la concentración de instalaciones industriales en zonas urbanas, favoreciendo el empleo de las corrientes superficiales como receptoras de residuales crudos o parcialmente tratados, los que con frecuencia terminan en las cuencas hidrográficas y en la zona costera.

Los sectores socioeconómicos con mayor incidencia en la contaminación a nivel nacional han sido el agropecuario, la industria azucarera, la industria básica, la industria alimentaria, los hospitales y los asentamientos humanos. La caracterización, el manejo (recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento, disposición final) y el aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos (RSU) han presentado serias dificultades, principalmente en las mayores ciudades del país, como La Habana y Santiago de Cuba, en las que los niveles de generación y acumulación de desechos domésticos se han ido incrementando con el transcurso del tiempo debido a la reactivación paulatina de la economía. La recolección de los RSU se mantiene por encima de los 25 millones de metros cúbicos al año, según la Oficina Nacional de Estadísticas (ONE), en el año 2011, para un promedio anual de unos 2,3 m³ por habitante, con incrementos del orden del 1 % por año. Solo un 82 % de esos residuos urbanos reciben tratamiento sanitario.

En septiembre de 2015, con la coordinación y los esfuerzos de la Organización de Naciones Unidas (ONU) se asumió un acuerdo internacional sin precedentes donde

se estableció un grupo de metas que se constituyeron en los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) para ser cumplidos por todos los países con el 2030 en el horizonte. En la consecución de estos objetivos se plantearon 3 grandes pilares: la lucha contra la pobreza, el cuidado del medio ambiente y la disminución de las desigualdades.

En la agenda hacia el 2030, hay 5 elementos fundamentales: las personas, no dejar a nadie atrás y todos deben crecer en igualdad, con dignidad, en un medio ambiente saludable; el planeta, colocando la protección del mismo en el centro de todas las acciones; prosperidad, colocando las economías en un punto de equilibrio que posibilite disfrutar de una vida próspera y en armonía con la naturaleza; paz, propiciando sociedades pacíficas; y alianzas, creando una alianza mancomunada internacional que permita alcanzar los objetivos planteados.

Los ODS abarcan las tres dimensiones que incorpora el concepto de Desarrollo Sostenible: la economía, donde se desarrollan los procesos productivos y de servicio; la sociedad, donde las personas establecen sus relaciones interpersonales y su desarrollo como ciudadanos; y la biosfera, donde se enmarca toda la vida de la humanidad, que se constituye en el escenario donde ocurren todos los procesos y fenómenos, que provee de recursos naturales como materias primas y que recibe todos los residuos que expelen los sistemas que llevamos a cabo. Para Cuba la consecución de la Agenda 2030 y sus objetivos ha constituido desde ese momento un compromiso de Estado que se concreta en la alineación de los 17 ODS con el Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta 2030 (PNDES 2030) (Figura 1).

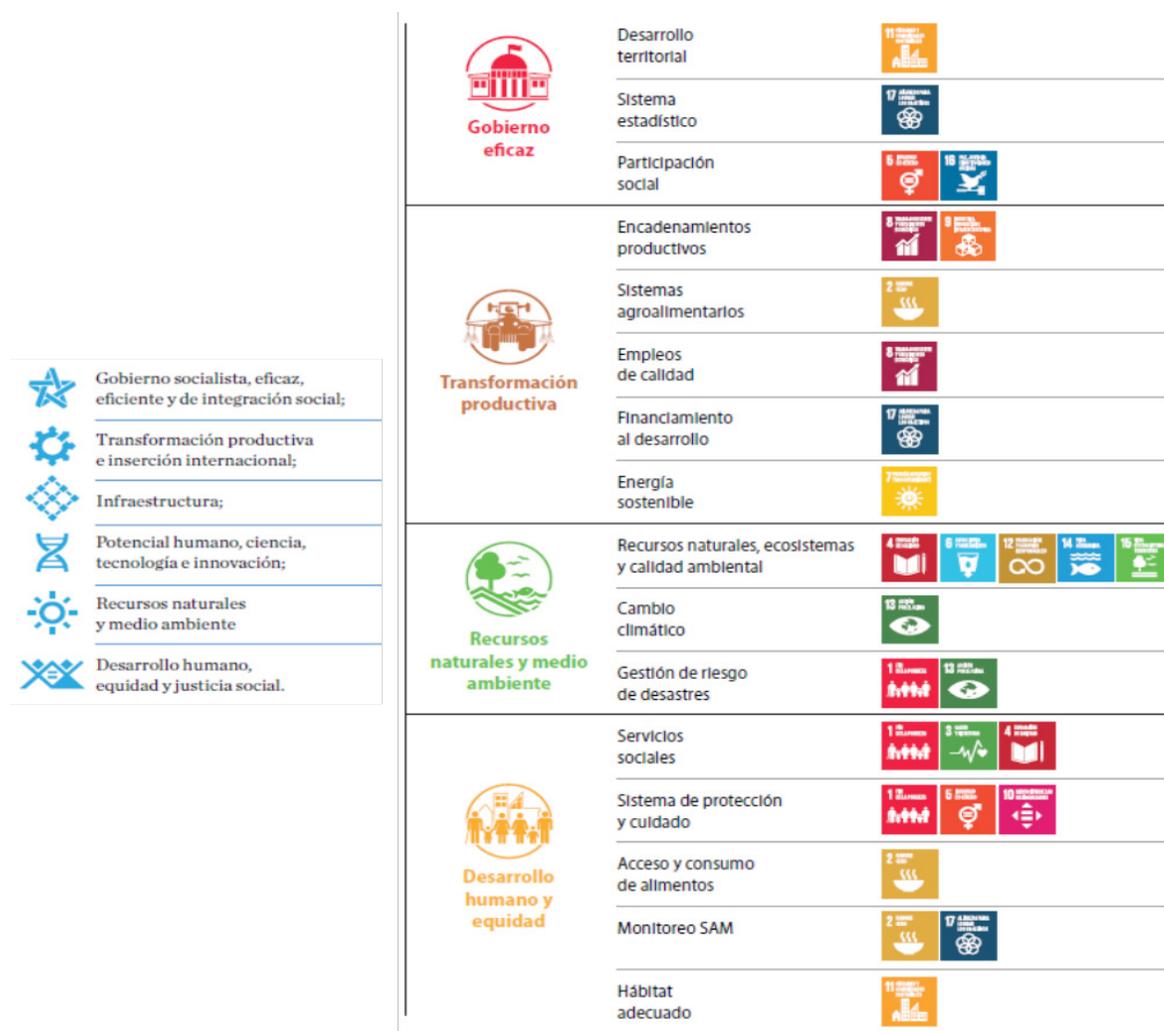


Figura 1. Ejes estratégicos y prioridades del PNDES 2030 de Cuba, y su correspondencia con los ODS 2030 de la ONU.

Asimismo, la Constitución de la República de Cuba de 2019 incluye elementos que brindan soporte jurídico al cumplimiento de los ODS en el país. Por su alto grado de prioridad, en el año 2017 se decidió actualizar la conformación del Grupo Nacional para la Implementación de la Agenda 2030 (GN) en el país, el cual está integrado, bajo la dirección del Ministerio de Economía y Planificación (MEP), por Organismos de la Administración Central del Estado (OACE), entidades nacionales, parlamentarios, académicos, representantes de la sociedad civil y otros actores de la sociedad.

En el año 2019, Cuba publicó su primer Informe sobre la implementación de la Agenda 2030 en el sitio web de la Comisión Económica para América Latina (CEPAL), en el marco de la III Reunión del Foro de los Países de América Latina y el Caribe sobre el Desarrollo Sostenible, y mostró su interés en presentar su I Informe Nacional Voluntario en el Foro Político de Alto Nivel de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible a celebrarse en 2021. Durante este año 2021, Cuba entregó su II Informe Nacional Voluntario, ratificando su compromiso con la consecución de los ODS.

Tabla 3. Contribución de las tecnologías anaerobias a las prioridades identificadas y atendidas por el PNDES 2030.

 Gobierno eficaz	Desarrollo territorial	La producción de biogás tiene una fuerte componente de desarrollo local pues se desenvuelve tecnológica, ambiental, energética y socialmente, justo donde se generan las materias primas (residuos orgánicos biodegradables), en la comunidad, en la industria, en la granja, en la empresa de transformación.
	Participación social	Es indispensable concebir la implementación de las tecnologías anaerobias para la producción de biogás con un vínculo indisoluble con la sociedad, con los beneficiarios directos o con sus explotadores (obreros, trabajadores, etc.). La participación de los niños es indispensable de cara al futuro, sea cual sea la escala tecnológica.
 Transformación productiva	Encadenamientos productivos	La simbiosis industrial es un fin ideal si se emplean las tecnologías anaerobias. La implementación de una planta de biogás suele ser el vínculo natural entre los que generan las materias primas (residuos) y los que emplean sus productos (biogás, biofertilizante, u otros).
	Sistemas agroalimentarios	Las plantas de biogás permiten cerrar ciclos, fundamentalmente en los sistemas productivos agroalimentarios, agregándole valor a subproductos ya carentes en sus procesos de origen.
	Empleos de calidad	Es uno de las principales contribuciones en el orden social. La aplicación de las tecnologías anaerobias posibilitan incrementar el empleo decente, calificado o no, en las localidades o comunidades.
	Energía sostenible	EL biogás puede emplearse para generar electricidad, para producir calor, para el transporte o para aplicaciones de baja temperatura.
 Recursos naturales y medio ambiente	Recursos naturales, ecosistemas y calidad ambiental	La capacidad de aumentar la eficiencia de los recursos naturales es una de los aportes más importantes de las tecnologías para la producción de biogás. Su aplicación permite incrementar la eficiencia de los recursos naturales por cuanto añade valor a lo que ya se desechaba. Mejora la calidad ambiental de los ecosistemas productivos, naturales o no, promoviendo la bioeconomía y la economía circular.
	Cambio climático	La implementación de los sistemas tecnológicos anaerobios siempre evitará la emisión de gases efecto invernadero.
 Desarrollo humano y equidad	Acceso y consumo de alimentos	Una virtud importante es que el biofertilizante producido, mayor cantidad y volumen, según la escala productiva, siempre posibilitará aumentar la producción local de alimentos, y el consumo nutricional de mayor calidad.
	Hábitat adecuado	Las grandes contribuciones en lo ambiental es la mayor bondad de todas las que se han verificado en este trabajo. La aplicación de las tecnologías anaerobias actúa, indudablemente, en la misma dirección que lleva a un hábitat, natural o construido, más adecuado y sostenible.

Es importante verificar el impulso que puede ofrecer las soluciones anaerobias para la producción de biogás, a varios de los ejes estratégicos del PNDES 2030, al ser aplicadas a varios sectores socioeconómicos del país (Tabla 3).

El desarrollo de tecnologías que permitan un mejor aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, de bajos costos y que propicien la obtención de subproductos que incrementen su valor agregado, constituyen un reto para la comunidad científica internacional, y en particular en países en vías de desarrollo, como Cuba. La disponibilidad energética segura, accesible, confiable, eficiente, y que no perjudique al medio ambiente, es esencial para el desarrollo sostenible de los pueblos y la mejora de su calidad de vida. Por tanto, es indispensable que se utilicen las fuentes de energías propias y renovables que están al alcance como la energía eólica, la energía solar, la energía de la biomasa, etc. En este contexto, el empleo de tecnologías anaerobias para la producción de biogás debe ser prioritario pues son capaces de asumir como materia prima todo tipo de residuos orgánicos biodegradables para su aprovechamiento energético: ganaderos, domésticos, biomasa, agroindustriales, entre otros. En definitiva, de lo que se trata es de utilizar todos los residuos orgánicos que actualmente no tienen un tratamiento adecuado, representando así un constante peligro de contaminación ambiental.

Existe gran potencial en Cuba debido a los residuos orgánicos biodegradables que se generan en varios sectores económicos (agrícolas, agroindustriales, ganaderos, de la industria alimenticia, aguas residuales industriales y domésticas, residuos sólidos urbanos), que son mal depuestos y/o no son explotados. El inmenso potencial existente en el país aún no se aprovecha y deben darse pasos para hacerlo por lo que significa en contribución energética y mejoría medioambiental. Las grandes oportunidades que implica la aplicación de las tecnologías anaerobias en Cuba, con decenas de MWh por generar, miles de toneladas de contaminantes por evitar y miles de toneladas de CO₂ por dejar de emitir, aun no son asumidas y deben serlo con el acompañamiento de las autoridades pertinentes y la comunidad científica de la

nación. Para ilustrar las potencialidades para aumentar los niveles de sostenibilidad que existen en determinados sectores, a continuación, se ponen dos (2) ejemplos: uno relacionado a la industria azucarera y el otro a la industria de procesamiento de carne y sus derivados.

En este primer caso que se presenta, se realizaron acciones de investigación con el objetivo de evaluar la sostenibilidad de una empresa azucarera, con destilería anexa, mediante el desempeño de una planta anaerobia que permita el tratamiento de varios de los residuos biodegradables generados por los procesos productivos asociados (cachaza, vinaza y paja). En este caso, se estudian dos escenarios: el primer escenario, cuando la planta de biogás trata la cachaza + vinaza; y el segundo escenario, cuando la planta de biogás trata cachaza + vinaza + paja. Estos dos escenarios se comparan con el caso base, que es el de la empresa en el punto exacto donde se encuentra hoy.

Se identificó un número de indicadores biofísicos para caracterizar la sostenibilidad de este tipo de industria, y se propuso un sistema de los mismos para aplicarlo en el caso analizado. Se demostró que los indicadores biofísicos aplicados, que valoraron la implementación del tratamiento anaerobio de los residuos generados en los procesos estudiados, pueden complementar los análisis integrales que se realicen y contribuir a la toma de decisiones, para la evaluación de alternativas en términos de sostenibilidad.

Se demuestra que las soluciones anaerobias contribuyen a la sostenibilidad de los sistemas energéticos ya que son instalaciones donde se combina el tratamiento de residuos, la fabricación de un portador energético para reemplazar combustibles fósiles (biogás) y la producción de biofertilizante, valorizando corrientes residuales.

El gráfico radial (Figura 2) demuestra que las variantes de solución para tratamiento anaerobio de los residuos orgánicos biodegradables de la producción de azúcar y etanol, en los dos escenarios estudiados con la aplicación de la tecnología anaerobia, son más sostenibles que el actual esquema de ese sistema productivo.

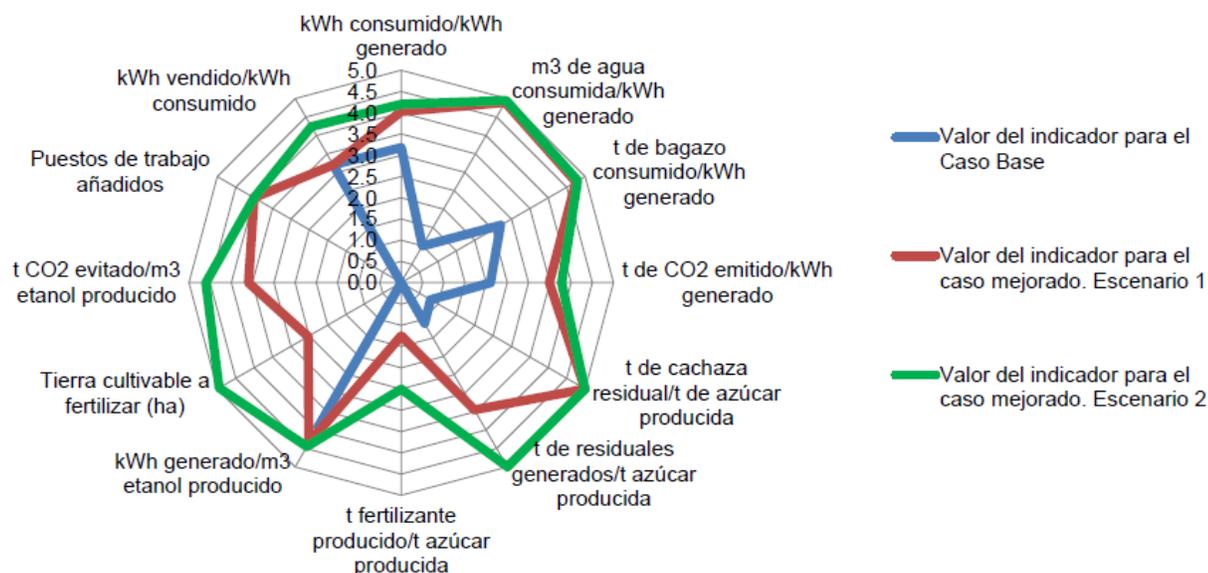


Figura 2. Gráfico radial comparando los indicadores biofísicos de sostenibilidad obtenidos para el caso base y para los casos mejorados al instalar la planta de biogás con dos aplicaciones y escenarios, en una fábrica típica de azúcar, con una destilería anexa en el contexto nacional.

En este segundo caso, se analiza una empresa cárnica que no tiene una adecuada situación con relación a su tren de tratamiento de residuos. Se realiza el estudio de cómo impacta en su sostenibilidad, la implementación de la tecnología anaerobia para la producción de biogás y biofertilizante a partir de los residuos orgánicos biodegradables generados en la misma. El enfoque del análisis ubica a las instalaciones de tratamiento anaerobio de residuos orgánicos biodegradables como el corazón de un esquema tecnológico complementario, buscando mayores niveles de sostenibilidad empresarial.

En el acercamiento que se realizó durante el trabajo, se identificaron los criterios que caracterizan a la economía circular para su aplicación a través de la instalación de una planta de biogás para el tratamiento de los residuos generados en la empresa. Se propuso un sistema de indicadores biofísicos de sostenibilidad que permiten valorar, de manera integral, la implementación de la propuesta tecnológica anaerobia en la empresa. Estos indicadores cubren los principales impactos sobre la sostenibilidad, tocando aspectos como la energía, las emisiones, temas sociales y económicos.

Se demuestra que los indicadores biofísicos de sostenibilidad aplicados a industrias en las que se pueden implementar plantas anaerobias para el tratamiento de residuos, pueden contribuir a los análisis que se llevan a cabo para tomar decisiones, desde el proceso de inversión hasta durante la explotación de las mismas.

Con los resultados que se muestran en el gráfico radial (Figura 3) se pone de manifiesto que las soluciones anaerobias, aplicadas a empresas del sector cárnico, contribuyen a la sostenibilidad de esos sistemas productivos, resolviendo problemas ambientales al mejorar todo lo relacionado con los impactos negativos al medio, así como añadiendo valor a recursos que carecían de ello, al producir biogás y biofertilizante, como productos que incrementan los ingresos de los esquemas de producción.

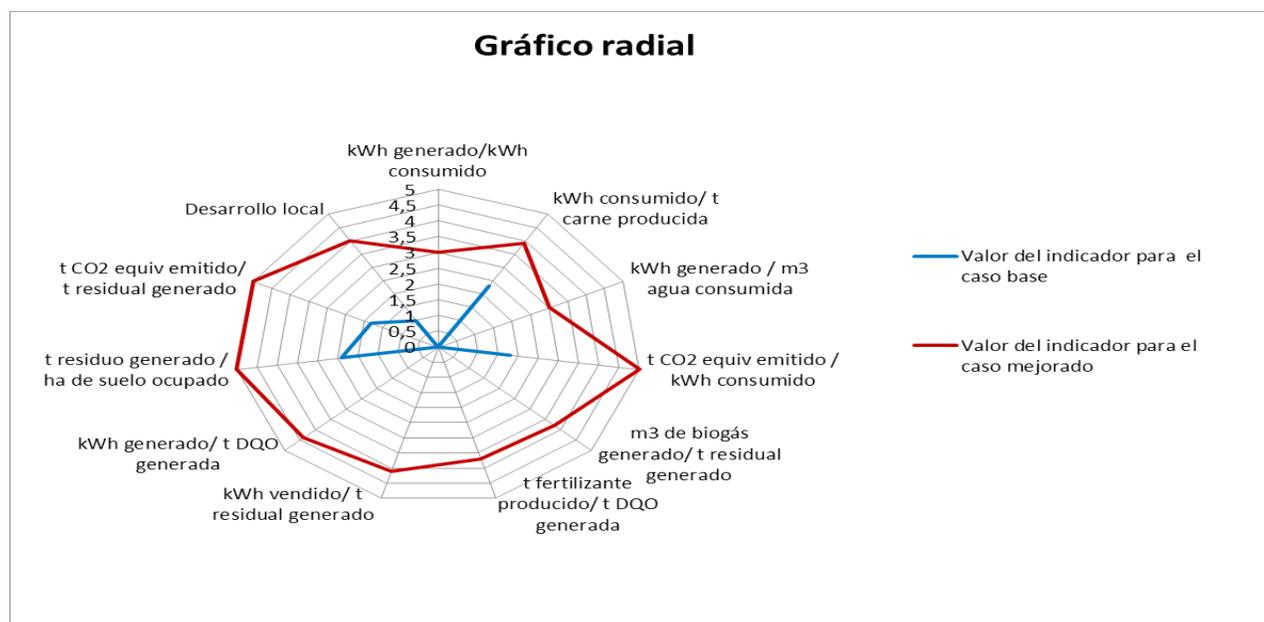


Figura 3. Gráfico radial comparando los indicadores biofísicos de sostenibilidad obtenidos para el caso base y para el caso mejorado al instalar la planta de biogás en una empresa cárnica en el contexto nacional.

CONCLUSIONES

Cuba desperdicia recursos materiales porque no convierte los residuos orgánicos generados, en materias primas para los procesos productivos, aumentando así su dependencia del exterior a partir de las importaciones, al seguir necesitando recursos iniciales, causando importantes problemas de contaminación y salud. Esta situación acentúa las características lineales de la economía y exige la aplicación de conceptos de economía circular. La aplicación de las tecnologías anaerobias contribuye a superar este contexto imperante y puede constituir un elemento importante para la creación de una economía sostenible, para reducir la vulnerabilidad del modelo económico y para el cumplimiento sólido del PNDES 2030 y de los ODS de la ONU en su agenda 2030.

Las tecnologías anaerobias tienen un futuro promisorio en su implementación en el entramado agrícola e industrial de Cuba al favorecer el desarrollo de la economía circular, potenciando la recuperación de recursos. Estas tecnologías contribuyen a la independencia y soberanía energética nacional al producir un portador energético renovable y un lodo estabilizado, rico en minerales y nutrientes, que es un excelente biofertilizante. Todo esto, a partir de los propios residuos orgánicos, que muchas veces no han tenido solución definitiva. El principal impacto se tiene en las zonas rurales, allí donde se generan los residuos, por lo que tributa directamente al desarrollo de esas áreas, impulsando el desenvolvimiento local, al incrementar la creación de empleos, posibilitar la pequeña empresa y el cooperativismo, por ser un esquema adecuado para

enfrentar las entidades que deben ser creadas en la implementación de este tipo de tecnologías.

Es conveniente subrayar que para aumentar la aplicación de este tipo de tecnologías se hace necesario un esfuerzo importante de la comunidad científica, especializada, empresarial y los decisores en el país para apropiarse de las mismas y para "tropicalizar" las soluciones tecnológicas, además de adecuar la industria nacional para asumir parte de los componentes necesarios para su expansión. Es imprescindible incrementar la investigación científica y la innovación propia que permita ajustar la implementación a las condiciones específicas del país. En este camino se pueden y deben obtener tecnologías apropiadas exportables con protagonismo de varios actores nacionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cabrera-Díaz, A., Dueñas-Moreno, J., Véliz-Lorenzo, E., Díaz-Marrero, M.A., Menéndez-Gutiérrez, C.L., Oliva-Merencio, D., Pereda-Reyes, I., & Zaiat, M. (2016). Combined treatment of vinasse by upflow anaerobic filter-reactor and ozonation process. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 33(4).
- Díaz-Duque, J. A., Menéndez-Carrera, L., Guzmán-Menéndez, J. M., & García, E. E. (2013). Principales problemas de carácter ecológico y ambiental que influyen en el desarrollo sostenible de Cuba. En, C. Gómez Gutiérrez y A. Gómez Sal, Reflexiones sobre el desarrollo sostenible en Cuba: una mirada desde el mundo académico. (pp. 19-48). Universidad de Alcalá.

- Eklund, M. (2019). One solution to many challenges – A book about: Biogas in the sustainable society – The Nordic Way. Biogas Research Center (BRC) Linköping University.
- Feiz, R., Johansson, M., Lindkvist, E., Moestedt, J., Påledal, S.N., & Svensson, N. (2020). Key performance indicators for biogas production methodological insights on the life-cycle analysis of biogas production from source separated food waste. *Energy* 200.
- Fuess, L.T., Cruz, R., Zaiat, M., & Nascimento, C.A.O. (2021). Diversifying the portfolio of sugarcane biorefineries: Anaerobic digestion as the core process for enhanced resource recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14.
- Gómez-Salcedo, Y., Baquerizo-Crespo, R. J., Da Silva, A. J., Oliva-Merencio, D., & Pereda-Reyes, I. (2021b). Digestión anaerobia de residuales sólidos del beneficio húmedo del café. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37, 281-292.
- Gómez-Salcedo, Y., Oliva-Merencio, D., Rodríguez-Díaz, J.M., & Pereda-Reyes I. (2021a). Contribution of the Environmental Biotechnology to the Sustainability of the Coffee Processing Industry in Developing Countries. En, N.R. Maddela, L.C. García Cruzatty y S. Chakraborty (eds) *Advances in the Domain of Environmental Biotechnology. Environmental and Microbial Biotechnology*. Springer.
- González-Suárez, A., Pereda-Reyes, I., Oliva-Merencio, D., & Montalvo-Martínez, S. J. (2020). Speciation of iron, nickel and cobalt in the anaerobic biodegradation of rice straw. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 101, 55-63.
- González-Suárez, A., Pereda-Reyes, I., Pozzi E., Da Silva, A.J., Oliva-Merencio, D., & Zaiat, M. (2016). Effect of natural mineral on methane production and process stability during semi-continuous mono-digestion of maize straw. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Part A: Enzyme Engineering and Biotechnology, 78, 1522–1533.
- Havrysh, V., Kalinichenko, A., Mentel, G., & Olejarz, T. (2020). Commercial Biogas Plants: Lessons for Ukraine. *Energies*, 13.
- International Renewable Energy Agency. (2018). Biogas for road vehicles: Technology brief. IRENA.
- International Renewable Energy Agency. (2021). Renewable power generation costs in 2020. IRENA.
- Lönnqvist, T., Sanches Pereira, A., & Sandberg, T. (2015). Biogas potential for sustainable transport - A Swedish regional case, *Journal of Cleaner Production*, 108, 1105-1114.
- Moraes, B. S., Zaiat, M., & Bonomi, A. (2015). Anaerobic digestion of vinasses from sugar cane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 888–903.
- Oliva-Merencio D., Pereda-Reyes I., Schimpf U., Koehler S., & Da Silva A.J. (2015). Cellulase effect on anaerobic digestion of maize silage under discontinuous operation. *Revista Engenharia Agricola. Eng. Agric.*, 35 (5), 951-958.
- Pérez, T., Texeira, G., Hong, W., Pereda, I., Oliva D., & Zaiat, M. (2016). Effects of the support material addition on the hydrodynamic behavior of an anaerobic expanded granular sludge bed reactor. *Journal of Environmental Sciences*, 54, 224-230.
- Pérez-Pérez, T., Pereda-Reyes, I., Correia, G. T., Pozzi, E., Kwong, W. H., Oliva-Merencio, D., & Huiliñir, C. (2021). Performance of EGSB reactor using natural zeolite as support for treatment of synthetic swine wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9 (1).
- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. (2018). Renewables 2018 Global Status Report. A comprehensive annual overview of the state of renewable energy. REN21 Secretariat.
- Tasmaganbetov, A.B., Ataniyazov, Z., Basshieva, Z., Muhammedov, A.U., & Yessengeldina, A. (2020). World Practice of Using Biogas as Alternative Energy. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10 (5), 348-352.