

# 48

Fecha de presentación: octubre, 2021

Fecha de aceptación: diciembre, 2021

Fecha de publicación: enero, 2022

## ASPECTOS METODOLÓGICOS

PARA LA CONDUCCIÓN DE PROYECTOS LOCALES QUE GENERAN Y UTILIZAN ENERGÉTICAMENTE EL BIOGÁS

### METHODOLOGICAL ASPECTS FOR THE MANAGEMENT OF LOCAL PROJECTS THAT GENERATE AND USE BIOGAS FOR ENERGY PURPOSES

Omar Pérez Navarro<sup>1</sup>

E-mail: [opnavarro@uclv.cu](mailto:opnavarro@uclv.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6963-1327>

Lisbet M. López González<sup>2</sup>

E-mail: [llopez@uniss.edu.cu](mailto:llopez@uniss.edu.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2362-5703>

Maité Rodríguez Lorenzo<sup>2</sup>

E-mail: [mrlorenzo@uniss.edu.cu](mailto:mrlorenzo@uniss.edu.cu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1526-1396>

Josep Maria Chimenos<sup>3</sup>

E-mail: [chimenos@ub.edu](mailto:chimenos@ub.edu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9625-1511>

<sup>1</sup> Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Cuba.

<sup>2</sup> Universidad de Sancti Spiritus “José Martí Pérez”. Cuba.

<sup>3</sup> Universidad de Barcelona. España.

#### Cita sugerida (APA, séptima edición)

Pérez Navarro, O., López González, L. M., Rodríguez Lorenzo, M., & Chimenos, J. M. (2022). Aspectos metodológicos para la conducción de proyectos locales que generan y utilizan energéticamente el biogás. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(1), 474-483.

#### RESUMEN

Las tecnologías de biogás han alcanzado un amplio desarrollo, pero la conducción metodológica asociada a los estudios previo-inversionistas en proyectos locales, que utilizan esta opción energética, no ha sido efectiva. El objetivo del presente trabajo es establecer un procedimiento metodológico que facilite la conducción de las decisiones empresariales, técnicas, e inversionistas en proyectos locales, nuevos o de reconversión industrial y con generación y uso de biogás. La metodología tiene sus antecedentes en la gestión tecnológica, el análisis complejo de procesos y la adopción (asimilación) tecnológica y tiene un enfoque novedoso y heurístico. Se efectúa un diagnóstico integrado que conceptualiza el escenario inicial y se consideran las estrategias de desarrollo y el análisis técnico y económico de alternativas. El tamaño de los proyectos se define por sus demandas energéticas y disponibilidad de residuos atractivos para la digestión anaeróbica. El procedimiento facilita la definición de la demanda energética, el tipo y disponibilidad de sustratos, los pretratamientos, el diseño y el escalado, la cogeneración y el estudio de factibilidad y sensibilidad. La propuesta fue aplicada satisfactoriamente a un caso de estudio para la producción de harina de yuca, utilizando biogás generado con los residuales porcinos como opción energética para su secado.

**Palabras clave:** Desarrollo local, metodología, diagrama heurístico, biogás.

#### ABSTRACT

Biogas technologies have reached a wide development, but the methodologies applied in pre-investment studies in local projects that use this energy alternative have not been effective. The objective of the present work is to establish a methodological procedure that facilitates the conduction of business, technical and investment decisions in local projects, new or of industrial reconversion and with generation and use of biogas. The methodology has its antecedents in technological management, complex process analysis and technological adoption (assimilation) and has a novel and heuristic approach. An integrated diagnosis is carried out that conceptualizes the initial scenario and considers development strategies and the technical and economic analysis of alternatives. The size of the projects is defined by their energy demands and availability of attractive waste for anaerobic digestion. The procedure facilitates the definition of energy demand, type and availability of substrates, pretreatments, design and scale-up, cogeneration, and feasibility and sensitivity study. The proposal was successfully applied to a case study for the production of cassava flour, using biogas generated from swine waste as an energy option for drying.

**Keywords:** Local development, methodology, heuristic diagram, biogas.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, es vital que todas las disciplinas científicas colaboren en la solución de las problemáticas económicas, sociales, energéticas y ambientales globales. La gestión tecnológica (GT), y dentro de ella, la Vigilancia Tecnológica (VT) y la Asimilación de Tecnologías (AT), deben jugar un papel decisivo en función del logro de mayor eficiencia y efectividad asociadas a los incrementos productivos, tanto globalmente, como a escala local y regional. Las acciones de desarrollo local demandan la participación activa y el liderazgo de las diferentes formas de gobierno, el sector empresarial en todas sus modalidades y las instituciones de investigación y dentro de ellas, las universidades. Por las razones anteriores, la gestión de proyectos debe impactar el ámbito económico y productivo y el ámbito sociocultural e institucional y propiciar el aprovechamiento de los recursos endógenos abarcando al sector estatal y al no estatal (Gorina, et al., 2018).

Para lograr un funcionamiento estable y sostenido de una economía descentralizada y circular, como se requiere en Cuba y como está prevista por los órganos de gobierno, el diseño estratégico de las actividades de desarrollo local tiene que explotar todas las potencialidades endógenas, incluidos los recursos humanos y la gestión de los residuos agroindustriales. Es necesario que se incremente el nivel de gestión de la investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), insertar en ello a las universidades e incluir un modelo único o integrado para la gestión energética, la inocuidad o calidad total y el medio ambiente (Pérez, et al., 2020).

Por las características del sector agroindustrial y el crecimiento descentralizado de la producción porcina en Cuba, se generan residuos que constituyen una importante fuente de recursos que se pueden destinar a la explotación de fuentes renovables de energía (Suárez & Álvarez, 2019). En ese escenario, la generación y uso del biogás es una importante vía que permite incrementar la efectividad energética y ambiental de las inversiones previstas y que favorece de manera decisiva el incremento de la efectividad técnico-económica de la pequeña industria de procesamiento agrícola y de la industria alimentaria en sentido general.

Disciplinas como el Análisis Complejo de Procesos (ACP) y actividades como la GT, constituyen importantes herramientas que contribuyen a la creación y desarrollo de estrategias en función de los proyectos de desarrollo (Pérez, 2018). Dentro de estas herramientas, el desarrollo e investigación de procesos y la intensificación y reconversión industrial, permiten seguir estrategias adecuadas durante la AT (Ley & González, 2006). A los principios del ACP, de la GT y de la AT, se ha sumado recientemente un análisis metodológico que incorpora la gestión de la inocuidad al análisis de proyectos de desarrollo local (Pérez, et al., 2020; Pérez, et al., 2021).

Los procesos que generan biogás a partir de la digestión anaeróbica (DA) de residuos de la industria agroalimentaria y otros sustratos, como los residuos sólidos urbanos (RSU), han sido tratados ampliamente por la literatura científica. Las tecnologías del biogás tienen un fuerte impacto científico, debido a que, además de la producción de un gas con alto valor combustible, se cuenta con una fuente energética muy versátil que sustituye parte de los combustibles fósiles en la producción de energía y por lo tanto se facilita una gestión ambiental correcta de los residuos orgánicos biodegradables disponibles (Kayhanian & Tchobanoglous, 2007).

La recuperación o restauración de la industria agroalimentaria y de la producción porcina cubanas, lograda a inicios de la segunda década del presente siglo, permite incrementar la disponibilidad de sustratos idóneos para la producción de biogás a partir de la DA. Es urgente elevar la efectividad de las inversiones, insertando esquemas energéticos más efectivos y sostenibles a partir del incremento de la competitividad en el uso de las energías renovables, la integración material y energética y el encadenamiento productivo en esquemas económicos de ciclo cerrado.

Sobre los sistemas productores de biogás, a través de DA, se ha reportado la digestión con mono y co-sustratos de diferentes fuentes (Yono, et al., 2010; Adiga et al. 2012; Díaz, et al., 2014; Dareioti & Kornaros, 2015), el mejoramiento de los procesos y su optimización (Patil, et al., 2012) e investigaciones relativas al pretratamiento de sustratos para favorecer la efectividad de la DA (López, et al., 2018). Sin embargo, los autores no encontraron publicaciones que den un tratamiento metodológico adecuado a los proyectos con generación y uso de biogás a escala local ni la inclusión en los mismos de la reconversión energética de procesos existentes.

Por todo lo anterior, el objetivo del trabajo es establecer una metodología que facilite la conducción de la toma de decisiones de carácter técnico, empresarial e inversionista en proyectos nuevos o de reconversión industrial con generación y uso de biogás a escala local.

## DESARROLLO

Una estrategia integrada, secuencial y coherente que permita conducir un proyecto para la reconversión energética, o un nuevo donde se incluya la generación y uso de biogás a escala empresarial y local, requiere partir de un escenario claro, bien identificado en términos de sus fortalezas y perspectivas así como de sus puntos débiles. Para ello, es imprescindible desarrollar un diagnóstico de la situación real anterior al proyecto. El diagnóstico permite establecer las direcciones más probables para el desarrollo, las acciones productivas o asociadas al conocimiento y al personal disponible, que estén consolidadas en la empresa o región, los precedentes empresariales o sectoriales y la experiencia en la actividad prevista. Ya

desde la fase de diagnóstico es vital la definición energética basada en las potencialidades para la DA y el destino del biogás como fuente energética. Los destinos fundamentales son la producción de energía eléctrica o calórica o sus combinaciones. Cuando se combinan ambos destinos, el excedente energético disponible en los gases de escape del generador eléctrico es utilizado en los procesos calóricos (Budzianowski, 2016). Por esas razones, es conveniente considerar dos posibles escenarios en la propuesta metodológica: un primer escenario para los nuevos desarrollos o la reconversión energética de procesos instalados que se encuentran en funcionamiento pero que se precisa mejorar o intensificar y un segundo escenario basado en nuevos procesos expresados como proyectos de desarrollo empresarial o local.

Morales, et al. (2013), han reportado que la reconversión puede seguir una secuencia de VT, análisis comparativo entre la nueva tecnología y la existente y solución de compromisos entre el mercado, la capacidad instalada y la nueva capacidad. Dichos autores, también plantean que la reconversión precisa de la ejecución de un profundo análisis técnico y estudios previo-inversionistas detallados y que los diseños tecnológicos y el escalado deben considerar los impactos de la reconversión sobre la calidad. En la misma investigación, se hace referencia a la importancia del análisis de fiabilidad y de riesgo y de la integración material y energética como apoyo al estudio de factibilidad.

Por otra parte, la reconversión energética de la industria química o sus nuevos desarrollos necesita determinar con precisión los consumos energéticos de los procesos existentes y los correspondientes a los nuevos programas de desarrollo. Además de lo anterior, el análisis de sensibilidad contribuye de forma decisiva a establecer los límites de seguridad del estudio de factibilidad. Especial interés dentro de dichos límites alcanzan las variables capacidad o tamaño de la instalación y tipo de tecnología. Finalmente, es preciso conducir las demandas de la sostenibilidad energética y ambiental, tanto en reconversión, como en los nuevos desarrollos.

Los principios generales que se han establecido para las iniciativas municipales de desarrollo local (Gorina, et al., 2018), pueden ser aplicados a este tipo de proyectos. A ello puede unirse el logro de la inocuidad alimentaria, como sistema de gestión y con sus prerrequisitos (Pérez, et al., 2020) y la asimilación o adopción de tecnologías (Pérez, et al., 2021). A estos aspectos se suma la necesidad de un enfoque secuencial y heurístico que facilita las decisiones relativas al proyecto, incluidas las referidas al tipo y magnitud de las fuentes energéticas renovables. En este último aspecto, entran las proyecciones y decisiones metodológicas referidas para a las características de los sustratos disponibles o aquellos recursos que requieren vías, acciones u otros proyectos para elevar su disponibilidad. Entre los materiales disponibles es útil establecer

diferencias y tipología entre los recursos que son conocidos y los que son menos conocidos.

A través del análisis técnico y económico, así como del análisis de sensibilidad del proyecto, es posible determinar las condiciones y parámetros operacionales más efectivos, ponderando opciones locales que deriven en cambios de escala, precios, etc. Por las mismas vías y a través de selección de tecnologías, su adaptación o desarrollo, es posible definir las mejores alternativas tecnológicas y sus impactos ambientales (Ley & González, 2006).

En las condiciones de un determinado caso, incluso cuando las opciones de mejora previstas en el procedimiento han sido aplicadas, es posible que no sea aplicable o factible la generación y el uso de biogás. En dicho caso, no se limita el uso de otras fuentes energéticas renovables a los programas previstos y no se limita la combinación entre el biogás y dichas fuentes. La situación anterior no implica necesariamente que el proyecto no pueda alcanzar resultados positivos cuando el escenario de partida es diferente al considerado. Los factores que más influyen en un proyecto de esta naturaleza están dados en el precio y/o valor agregado de los productos o servicios, la cercanía, la accesibilidad o distancia requerida para las transportaciones tanto por logística como por procesos tecnológicos, la calidad, y la disponibilidad y potencialidad de los sustratos. Son igualmente definitorios la eficiencia energética alcanzada, tanto por el proceso principal como por los sistemas auxiliares, la escala o tamaño del proyecto y la efectividad inversionista.

En la Figura 1 se muestra el diagrama heurístico del procedimiento propuesto. El mismo comienza con el diagnóstico de la situación existente antes de ejecutarse ninguna acción o decisión. En el diagnóstico se presta especial atención a la situación existente en términos tecnológicos y energéticos. También se analizan los usos presentes o potenciales de energías renovables, especialmente biogás. Los consumos y demandas energéticas se determinan por herramientas típicas de la GT, como la integración energética y la auditoría tecnológica y energética.

Partiendo de los resultados del diagnóstico inicial se revisan o confeccionan las estrategias de desarrollo de los procesos existentes o de instalaciones a remodelar. Para las nuevas proyecciones, estén referidas a procesos existentes o estén previstas nuevas instalaciones, es imprescindible considerar biogás u opciones energéticas renovables. Las estrategias de desarrollo deben conciliar los intereses empresariales y gubernamentales. De acuerdo a los pasos anteriores se definen las demandas energéticas. Las demandas energéticas pueden ser actuales o referidas a los proyectos de desarrollo. Las demandas actuales se pueden cubrir de forma parcial o total con biogás, las asociadas a los proyectos de desarrollo precisan cubrirse totalmente con fuentes renovables. El procedimiento de la Figura 1, está diseñado para biogás, pero

modificaciones ligeras al mismo permiten la adaptación a otras fuentes renovables o la combinación de biogás y energía solar, fundamentalmente.

Luego de cuantificada la demanda energética, se define la disponibilidad energética actual. Esta disponibilidad puede expresarse como un excedente energético para los procesos existentes o como una función de los consumos totales, en cuyo caso la demanda energética del paso anterior también hace referencia al total de los procesos (actuales y en proyecto). Posteriormente, se cuestiona si la disponibilidad energética actual permite cubrir las demandas. Si la respuesta es afirmativa, puede analizarse la sustitución de fuentes energéticas convencionales por biogás. En caso de que la acción anterior sea conveniente y posible, se definen las demandas energéticas que deben ser cubiertas con biogás. En el caso contrario, el procedimiento concluye debido a que se cubren las demandas energéticas y no es posible o conveniente utilizar la opción del biogás. En ese caso se ejecuta el proyecto local previsto con opciones energéticas convencionales lo cual, aunque no es ambientalmente compatible con las nuevas direcciones del desarrollo es, en última instancia, una decisión no óptima pero posible. Si la disponibilidad energética actual no cubre las demandas, se definen entonces las demandas energéticas del proceso que deben ser cubiertas con biogás. Estas últimas, constituyen la diferencia entre la demanda y la disponibilidad y deben generarse a través de los nuevos desarrollos previstos en el proyecto local y representan, en términos energéticos, una aproximación inicial al tamaño de la instalación productora de biogás.

Cuando se han determinado las demandas de energía que deben ser cubiertas con biogás, se definen los tipos y las características de los sustratos y/o co-sustratos que están disponibles en la zona prevista para el proyecto. Ello dependerá del tipo de actividades generadoras de residuos orgánicos biodegradables existentes localmente. Con ello, se define la disponibilidad de sustratos en flujos másicos o volumétricos. Estos pueden ser estables o estacionales debido a la existencia de zafas o picos en las cosechas o en la recogida de RSU. Dependiendo de la magnitud de la disponibilidad de sustratos biodigeribles, pueden implementarse acciones, vías o proyectos locales nuevos, que permitan elevar la disponibilidad de sustratos, tanto en la forma estable como en la estacional.

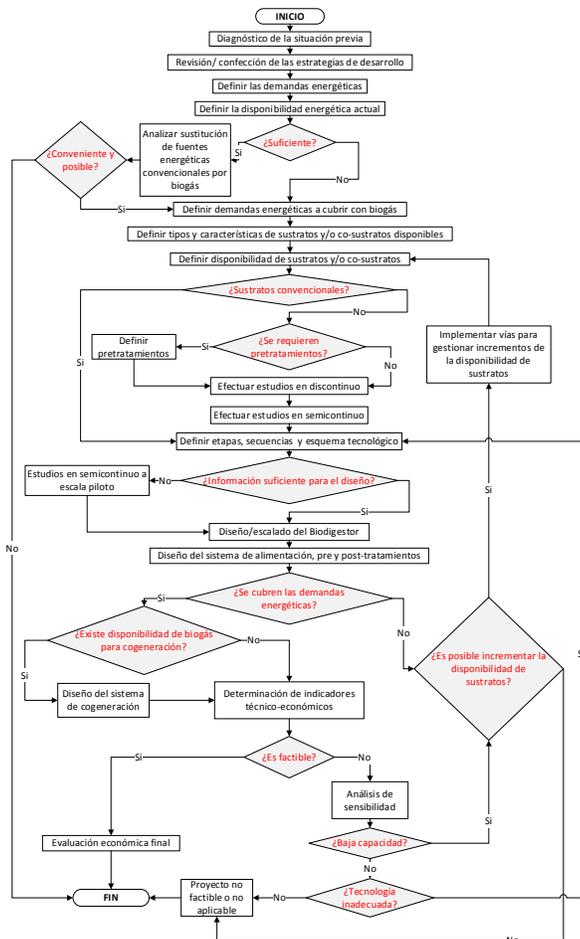


Figura 1. Diagrama heurístico del procedimiento para la conducción de proyectos locales que generan y utilizan energéticamente el biogás.

Dichas acciones pueden estar dirigidas también a incrementar la composición de la fracción de interés en dicho sustrato. La definición de la disponibilidad de sustratos es la segunda y definitiva forma de establecer la escala o tamaño de la instalación productora de biogás.

Posteriormente, se define si los sustratos disponibles se clasifican como convencionales o no. A los efectos del procedimiento de la Figura 1, un sustrato (o un co-sustrato) se clasifica como convencional cuando existe información suficiente sobre su comportamiento ante la DA. Dicha información, debe incluir la necesidad y características de los pretratamientos y sus posibles sinergias en la codigestión. Con la información anterior, se puede proceder directamente a la AT, definiendo las etapas, secuencias de etapas y el esquema tecnológico de la planta.

Si los sustratos (o co-sustratos) disponibles no son convencionales se decide si es necesario utilizar pretratamientos. Si es necesario usarlos, se definen y efectúan los mismos. Luego se desarrollan los estudios en discontinuo y en cultivo semicontinuo. A través de los estudios experimentales y el tratamiento estadístico de sus resultados se establecen las mejores condiciones operacionales, las características idóneas de la alimentación y el diseño del biodigestor. Adicionalmente, se determina el rendimiento esperado de biogás y se modela la cinética del proceso para los sustratos no convencionales. Posteriormente, se procede a la definición de las etapas, secuencias de etapas y esquema tecnológico de la instalación, incluido el tipo y características de operación del biodigestor. Puede apreciarse que la información científica necesaria para el proyecto, puede haberse determinado por investigación de procesos cuando el sustrato es no convencional. Sin embargo, cuando el sustrato es convencional puede obtenerse por revisión de la literatura científica o por las herramientas propias de la VT.

Siguiendo la secuencia de la Figura 1, si se tiene información suficiente, se pasa a la etapa de diseño tecnológico del biodigestor. Cuando la información es insuficiente, se ejecutan ensayos en semicontinuo, manteniendo constantes los criterios de escalado requeridos. La relación de volumen, entre el modelo y el prototipo debe garantizar comportamientos que sean escalables (Rodríguez & Blázquez, 2010).

Posteriormente, se diseña el biodigestor aplicando los resultados del escalado y las consecuencias de los criterios considerados. El diseño debe incluir un sistema de alimentación adecuado y los pre y post-tratamientos que se requieran de acuerdo al tipo y características de los sustratos y co-sustratos utilizados. Cuando se ha completado el diseño y por lo tanto se dispone de toda la

información necesaria para reajustar las capacidades y potencialidades productivas, se cuestiona si se cubren, en dichas condiciones, todas las demandas energéticas previstas inicialmente. Si la respuesta es afirmativa, se buscan los posibles excesos de disponibilidad utilizables en la cogeneración de energía eléctrica y térmica. Ante esta situación se diseña el sistema de cogeneración y se evalúa técnica y económicamente el proyecto. En el caso de no contar con excesos de disponibilidad de biogás se efectúa una evaluación técnico-económica sin cogeneración.

Cuando no se cubren las demandas energéticas, se cuestiona si es posible elevar el tamaño del proyecto incrementando la disponibilidad de sustratos. Si la respuesta es afirmativa, se implementan vías para el incremento de la disponibilidad del sustrato y se considera una disponibilidad incrementada. Si la respuesta es negativa, se declara el proyecto como no factible o no aplicable debido a que no existe disponibilidad de sustrato, ni nuevas opciones para su incremento y no se logran cubrir las demandas energéticas.

Para la evaluación técnico-económica se calculan los indicadores técnicos-económicos del proyecto para la nueva instalación o para la instalación reconvertida, con sus correspondientes proyectos de desarrollo. A los efectos de la evaluación y de acuerdo con los resultados del diseño y condiciones operacionales determinadas con anterioridad, se estima la inversión fija y total y se calculan los costos de producción que demanda el sistema completo. Se incluye la preparación y transporte de los sustratos y del biogás, en caso de ser necesario y los costos asociados la reconversión industrial o los nuevos procesos productivos. Luego de estimadas la inversión, los costos y el valor de la producción y los servicios económicos, energéticos y ambientales, se calculan los periodos estáticos y dinámicos de recuperación de la inversión y el resto de los indicadores dinámicos de factibilidad en las condiciones fijadas con anterioridad. Los beneficios de la propuesta se calculan considerando la reducción de los consumos energéticos, el incremento de la producción, la productividad o la eficiencia y la entrada de nuevos productos y servicios al escenario diagnosticado inicialmente.

Finalmente, se cuestiona si la tecnología es factible. Si la propuesta inversionista es factible, se pasa a la evaluación económica final con lo cual el procedimiento concluye. Si la propuesta inversionista no es factible, se efectúa el análisis de sensibilidad. Cuando las razones de la baja efectividad técnico-económica son causadas por bajas capacidades del proyecto se cuestiona si es posible implementar vías que faciliten el incremento de la

disponibilidad de sustratos. Si esa opción es posible, se considera una disponibilidad de sustratos incrementada, ejecutándose nuevamente todos los pasos metodológicos en esa nueva condición. En el caso contrario, se cuestiona si las razones de la ineffectividad tienen su origen en el uso de una tecnología inadecuada. Si se determina que la tecnología propuesta es inadecuada se ejecutan nuevamente todos los pasos metodológicos a partir de la definición del esquema tecnológico. En el caso en que los resultados inadecuados de factibilidad no son causados por bajas capacidades o por tecnología inadecuada, el proyecto es declarado no factible o no aplicable.

El procedimiento presentado en la Figura 1, presenta un carácter novedoso y constituye una opción metodológica y práctica que facilita la conducción de proyectos donde juega un papel determinante la generación y el uso energético del biogás. Es importante destacar que el mismo resuelve la problemática de la generación y el uso, cuestión que aunque puede parecer obvia no siempre se ha logrado en la práctica productiva cubana, sobre todo para proyectos vinculados al sector porcino (Suárez, et al., 2021), donde con frecuencia se han desarrollado total o parcialmente plantas productoras de biogás pero su uso como opción energética ha sido muy limitado. Finalmente y resultante de las demandas metodológicas, el procedimiento antes expuesto es aplicable en un escenario de gestión económico-productiva a escala empresarial y local, donde la opción energética puede ser cualquier alternativa renovable.

El primer paso del procedimiento de la Figura 1 es el diagnóstico de la situación previa. El mismo, puede conducirse como una auditoría o un análisis energético, que permite determinar de forma cualitativa y cuantitativa las anomalías energéticas (Smith, et al., 2007). Dicho análisis incluye una revisión histórica detallada de los antecedentes en el uso energético previsto, un diagnóstico operacional de los sistemas de generación y uso de la energía instalados, la confección de un esquema termoenergético y la ejecución de la auditoría tecnológica y energética en los procesos principales y en los sistemas auxiliares. Posterior a las auditorías y basado en sus resultados, es posible el cálculo de los consumos por balances de materiales y energía. Una vez que se dispone de resultados reales de consumo y comportamiento de la eficiencia energética se efectúa la comparación de los mismos con los resultados históricos o medidos en condiciones similares y se proponen y simulan las opciones de mejora energética resultantes.

Durante la auditoría, es recomendable utilizar las especificaciones técnicas para procesos con ciclos de generación y utilización energética a partir de biomasa

(Kayhanian & Tchobanoglous, 2007). De la experiencia práctica de la industria química pueden adaptarse otras vías para la identificación de las demandas y los consumos energéticos. Para ello es conveniente el análisis del uso y consumo de la energía que debe incluir:

- La confección del esquema termoenergético adecuado al proceso y el registro del comportamiento de las variables operacionales.
- La inspección tecnológica para detectar deficiencias en la recuperación de calor, fallas de aislamiento y pérdidas de vapor y calor.
- Registro de especificaciones técnicas para generadores de vapor, maquinas primarias y otros equipos tecnológicos y registro de consumos de portadores energéticos.
- Actualización del desempeño energético a través de balances de materiales, balance de vapor de agua de calderas y de calor.

El procedimiento de la Figura 1 fue aplicado a un proyecto para la producción de harina de yuca con destino a la alimentación porcina en el municipio de Placetas, Villa Clara, Cuba. A través del diagnóstico de la situación previa se analizó el estado técnico-productivo de las entidades agropecuarias del municipio, fundamentalmente la UEB Porcina Placetas, el Centro Genético Porcino y la Empresa Agropecuaria "Benito Juárez". El proyecto seleccionado se adapta a las estrategias de desarrollo municipal que convergen con las estrategias nacionales y con las demandas materiales de la localidad. El gobierno local, es el rector del proyecto y además de las empresas mencionadas anteriormente, participan la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, el Instituto Nacional de Investigaciones en Viandas Tropicales y el Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales de la Universidad de Sancti Spíritus.

Según el diagnóstico, el caso de estudio constituye un nuevo desarrollo y se condujo en dicho sentido. A continuación, se resumen los resultados de la aplicación de la metodología de la Figura 1 a dicho caso.

Siguiendo la metodología, la consolidación y desarrollo de la producción porcina constituye una de las principales estrategias de desarrollo de Placetas. Ello demanda el incremento de la producción local de alimentos para la masa porcina por lo que se requiere la creación de varias plantas dedicadas a la producción de harina de yuca, como suplemento energético de los piensos y mieles proteicas. De acuerdo con necesidades nacionales, las instalaciones se consideraron modulares de forma que puedan ser replicadas en el propio municipio y en todo el país. Para el secado de la harina de yuca se requiere la

creación de capacidades tecnológicas que aprovechen energéticamente los residuales porcinos por lo cual, la DA para la producción de biogás, es una variante energética aplicable.

La estrategia prevista cumple funciones económicas de naturaleza empresarial, sociales, energéticas y ambientales y requiere un proyecto agrícola y un proyecto industrial que interactúen entre sí. La fase agrícola crea capacidades de cultivo y cosecha tecnificadas y tiene la función de garantizar un suministro estable de yuca para el procesamiento y secado. El segundo proyecto comprende las instalaciones industriales para la recepción, beneficio y secado y los servicios auxiliares. Entre los sistemas auxiliares se encuentra la recolección de residuos porcinos, las plantas productoras de biogás y el bio-gasoducto.

Para la etapa de diagnóstico, se consideraron los aspectos tecnológicos y energéticos demandados por ambas fases. El resto de las etapas metodológicas se aplicaron a la fase industrial del proyecto. Para ello, se determinaron las demandas energéticas estableciendo los procesos consumidores y sus características. Las tecnologías de procesamiento industrial de harina de yuca fueron sometidas a VT, estableciendo que el consumo energético de este proceso corresponde solo al secado, pero el mismo es elevado. Dicho consumo se debe al elevado contenido de humedad de las raíces frescas (65 % como promedio) y a las exigencias de conservación de la harina durante largos periodos de tiempo, que provocan una demanda de humedad final no superior a 12 %. Durante el secado de yuca, en forma de trozos o pastas, se necesita eliminar el 53 % del agua contenida en raíces de tendencia a la gelatinización y por lo tanto a la aglomeración dentro del secadero (Pérez, 2018).

Adicionalmente, cuando se procesan raíces de yuca es preciso considerar la presencia de los glucósidos cianogénicos linamarina y lotaustralina que en presencia de linamarasa y en medio ácido hidrolizan produciendo ácido cianhídrico. A escala industrial y específicamente en el proceso de la harina, el método más efectivo para reducir la cianogénesis es el secado. El secado se produce por transferencia de calor y masa, en presencia de una corriente de gas caliente que se pone en contacto con el sólido. Dicho proceso se favorece reduciendo el tamaño de la partícula sólida.

Para secar raíces de yuca hay que lograr un compromiso entre la velocidad y la tendencia del material a aglutinarse durante el proceso. Por esa razón, en la elaboración de harina de yuca son posibles dos variantes tecnológicas: el secado de pastas y el secado de trozos. El secado de trozos minimiza la aglomeración e incrementa la facilidad

constructiva del equipamiento. Sin embargo, en el secado de pastas de yuca la velocidad es muy superior debido a la facilidad de contacto entre el gas y el sólido y la aglomeración de la pasta puede evitarse recirculando parte de la harina seca a la entrada de un equipo neumático (Pérez, 2018). Por esa razón, se seleccionó una instalación industrial con secado en pastas cuyo equipo principal es el secadero neumático. El esquema tecnológico de este proceso requiere recepción de las raíces, lavado-descascarado, trituration en seco, secado, molienda y envasado y es mostrado en la Figura 2.

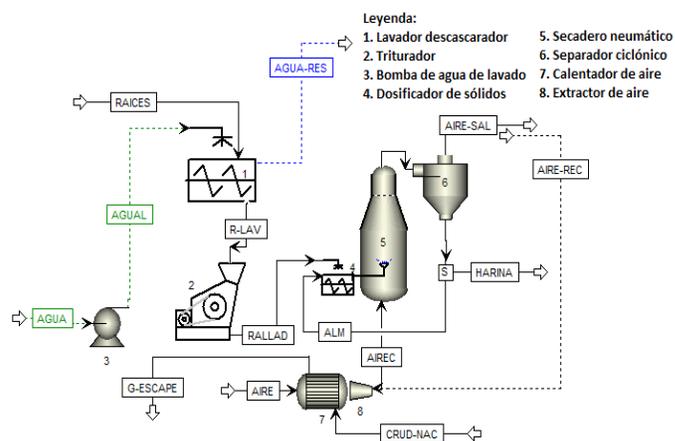


Figura 2. Esquema tecnológico para el secado de pastas de yuca.

Fuente: Pérez (2018).

Debido a la composición físico química de la pasta de yuca, rica en amilosa y amilopectina, como componentes fundamentales de su almidón y que gelatinizan a temperaturas del orden de los 60 °C (Pérez, 2018), se propuso un esquema de secado con mezclas de gases de combustión de biogás y aire a 120 °C y tiempos de contacto del orden de 4-6 segundos que no afectan la harina, ni en el aspecto sensorial ni en el físico químico. En la Tabla 1 se resumen los balances de materiales y energía, cuando se procesan 8 t<sub>raíces</sub>/d, para 20 horas diarias de operación, durante 300 días al año.

Tabla 1. Resumen de los resultados del balance de materiales y energía para una planta de harina de yuca con secado en pastas.

|                 |                                |          |
|-----------------|--------------------------------|----------|
| Producción      | Harina (t/d)                   | 2,773    |
| Materias primas | Raíces de yuca (t/d)           | 8,0      |
| Requerimientos  | Agua<br>Agua de lavado (m3/d)  | 9,60     |
|                 | Aire<br>Gases de secado (m3/d) | 87 765,6 |

|                     |                                |                             |       |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------|
| Residuos            | Sólidos                        | Raíces desechadas (t/d)     | 0,391 |
|                     |                                | Cáscara y cascari-lla (t/d) | 0,461 |
|                     | Líquidos                       | Agua de lavado (m3/d)       | 9,92  |
| Pérdidas de proceso | Pérdidas (t/d)                 |                             | 0,158 |
|                     | Rendimiento en base a yuca (%) |                             | 34,66 |

De acuerdo a la metodología de la Figura 1 y a las exigencias térmicas del secado de yuca, el tamaño de un proyecto de este tipo debe ser fijado de acuerdo a la demanda energética y la disponibilidad de sustratos para cubrir la misma. Por otra parte, se ha demostrado que la efectividad técnico-económica de una planta de harina de yuca es función de su tamaño (Pérez, 2018). Por esa razón, se determinaron las demandas energéticas del proyecto en un rango entre capacidad entre 2 y 10  $t_{\text{harina}}/d$ . En la Figura 3 se muestra el comportamiento gráfico de las demandas de materia prima y de energía en dichas condiciones. La misma permite establecer las demandas energéticas del proyecto en función de la capacidad de producción del proceso principal y no existen demandas para la reconversión energética.

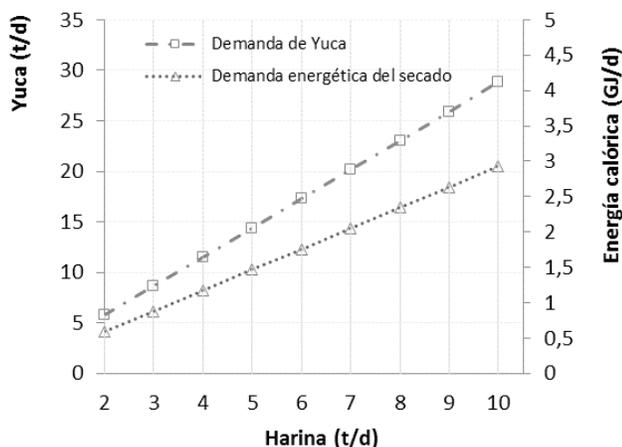


Figura 3. Comportamiento gráfico de las demandas de materia prima y energía en función del tamaño de la planta de harina de yuca con secado en pastas.

A través de regresión lineal de los comportamientos de la demanda de yuca y de energía mostrados en la Figura 3, se obtuvieron las ecuaciones (1) y (2) que relacionan dichos valores con la capacidad de producción de harina.

$$\text{Demanda de Yuca} \left(\frac{t}{d}\right) = 2,88 \cdot \text{Harina} \left(\frac{t}{d}\right) + 6,06 \quad (1)$$

$$\text{Disponibilidad energética} \left(\frac{GJ}{d}\right) = 0,293 \cdot \text{Harina} \left(\frac{t}{d}\right) + 0,512 \quad (2)$$

Para determinar las demandas energéticas que den ser cubiertas con biogás y siguiendo la guía metodológica de la Figura 1, se definieron los tipos y las características de los sustratos que están disponibles en la región de localización del proyecto. Se determinó que la única fuente atractiva disponible son los residuales del Centro Genético Porcino “La Pastora”, siendo la misma del orden de los 3000 cerdos. Considerando que los residuales de 7 a 10 cerdos, dependiendo del peso y régimen de alimentación producen en el orden de 1  $m^3$  diario de biogás (Guardado, et al., 2007), se estimó que la disponibilidad teórica de biogás es del orden de los 300  $m^3/d$ , los cuales se pueden utilizar en el secado de harina de yuca y en otros usos, incluyendo la cogeneración.

Para un poder calórico inferior del biogás de 22,3 MJ/ $m^3$  (Cacua, et al., 2011), en las condiciones del proyecto se dispone de 6,69 GJ/d. Considerando un 85 % de aprovechamiento de dicho material por causa de interrupciones y pérdidas en el proceso y en el bio-gasoducto (Suárez, et al, 2021), se disponen de 5,68 GJ/d. Con ello, utilizando la ecuación (2), la disponibilidad energética existente permite producir 17,6  $t_{\text{harina}}/d$ . Para dicha producción, utilizando la ecuación (1), la demanda diaria de yuca es de 57 t.

Los resultados anteriores permiten establecer la capacidad productiva de la instalación en términos energéticos. Sin embargo, para disponer de 57  $t_{\text{raíces}}/d$  habría que extender la zona de cultivo hasta distancias considerables sin que exista una infraestructura de viales y equipamiento de transporte habilitado para ello.

El análisis de sensibilidad de la producción de harina de yuca con secado en pastas a la capacidad productiva, realizado por Pérez (2018), demostró que a partir de 20  $t_{\text{raíces}}/d$  el proyecto comienza a alcanzar resultados favorables de rentabilidad, logrando en dicha condición, un valor actual neto de 547 615 USD, tasa interna de retorno del 25 % y un período de recuperación al descuento de 5,2 años.

Atendiendo a los aspectos anteriores, si se fija el tamaño de la instalación productora de yuca en 20  $t_{\text{raíces}}/d$ , se producen, de acuerdo a la ecuación (1), 4,84  $t_{\text{harina}}/d$ , con un consumo energético, según la ecuación (2), de 1,93 GJ/d y un excedente de biogás de 213  $m^3/d$  que pueden utilizarse para la cogeneración o gasificar parte del asentamiento poblacional de “Benito Juárez”, con un impacto ambiental y social muy importante.

## CONCLUSIONES

Se presentó un procedimiento metodológico que permite conducir la reconversión industrial y el desarrollo de nuevos proyectos, en escenarios locales donde se utilizan energías renovables y constituye una novedosa guía que permite un análisis secuencial y lógico para los estudios previo-inversionistas de este tipo de proyectos. La metodología presentada requiere de un diagnóstico de la situación previa que constituye una vía muy efectiva para minimizar la incertidumbre en el diseño y establecer el alcance de la propuesta desde el momento en que arranca la toma de decisiones. Los aspectos novedosos del procedimiento consisten en la visión integradora de las demandas de energía, la consideración de la reconversión industrial y energética unida al análisis de los nuevos desarrollos y la búsqueda de la economía cíclica y de escala en función de los consumos energéticos y la propia disponibilidad de sustratos que logre cubrir dichos consumos.

Otros aspectos novedosos respecto a los precedentes metodológicos de estas actividades están dados por la definición exacta, secuencial y decisoria de los pasos que facilitan la selección y clasificación de los sustratos, la reconversión energética y su conveniencia, el uso seguro y combinado de pretratamientos, codigestión y cogeneración y sus vínculos decisorios con la demanda y la disponibilidad energética. Otros aspectos tratados son la necesidad del escalado y la extensión del análisis de sensibilidad como consolidación de los límites de seguridad del estudio de factibilidad técnico-económica, abordando una serie de opciones tecnológicas y de escala.

Cuando el procedimiento propuesto se aplica a un caso de estudio para la producción de harina de yuca se facilita la conducción metodológica de los estudios previo-inversionistas y se generan impactos socio-económicos, técnicos, energéticos y ambientales debido a la integralidad que se alcanza en el plano técnico y de dirección. La integralidad que confiere el análisis metodológico incluye el logro de efectividad en la consideración de los nuevos procesos, aprovechamiento de todos los recursos potencialidades e integración material y energética como herramienta básica para el logro de efectividad en el análisis tecnológico, energético y ambiental y reducción de la incertidumbre en el diseño y en el análisis financiero con máximo aprovechamiento de los recursos endógenos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adiga, S., Ramya, R., Shankar, B. B., Patil, J. H., & Geetha, C. R. (2012). Kinetics of anaerobic digestion of water hyacinth, poultry litter, cow manure and primary sludge: A comparative study. *Proceeding of the 2nd International Conference on Biotechnology and Environment Management*, 14, 73-78.
- Budzianowski, W. M. (2016). A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1148-1171.
- Cacua, K., Amell, A. & Olmos, L. (2011). Estudio comparativo entre las propiedades de combustión de la mezcla biogás-aire normal y biogás-aire enriquecido con oxígeno. *Ingeniería e Investigación*, 31 (1), 233-241.
- Dareioti, M. A., & Kornaros, M. (2015). Anaerobic mesophilic co-digestion of ensiled sorghum, cheese whey and liquid cow manure in a two-stage CSTR system: Effect of hydraulic retention time. *Bioresource technology*, 175, 553-562.
- Díaz, Y., Sosa, R., Chao, R., Cruz, M. T., & De La Fuente, J. L. (2014). Producción de biogás a partir de bioresiduos porcinos ricos en grasa. Aspectos tecnológicos. *Revista Computarizada de Producción Porcina*, 21 (1), 34-38.
- Guardado, J. A. (2007). Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas. CUBASOLAR. <http://www.cubasolar.cu/wp-content/uploads/2020/10/Dise%C3%B1o-y-construcci%C3%B3n-de-plantas-de-biog%C3%A1s.pdf>
- Gorina, A., Martín, M. E., Alonso, I., & Gorina, N. (2018). Retos del desarrollo local en Cuba. Estudio de caso en el municipio Contramaestre *Batey: Revista Cubana de Antropología Sociocultural*, 11(4), 89-114.
- Kayhanian, M., & Tchobanoglous, G. (2007). Chapter 25. Biomass Conversion Processes for Energy Recovery. *En: F. Kreith, Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*. (pp 1234-1248). Taylor and Francis Group, LLC. CRC press.
- Ley, N., & González, V. (2006). Aspectos metodológicos para la transferencia tecnológica de un proceso químico. *Revista Ingeniería Química del Uruguay*, 29, 30-34.

- López, L. M., Pereda, I., Escobar, R., Pedraza, J., & Romero, O. (2018). Efecto de la aplicación de métodos de pretratamientos en el proceso de digestión anaeróbica de la biomasa lignocelulósica. *Tecnología Química*, 38(2), 376-389.
- Morales, M., González, E., Mesa, L., & Castro, E. (2013). Estrategia de reconversión de la industria diversificada de la caña de azúcar para la producción conjunta de bioetanol y coproductos. *Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia*, 66, 189-198.
- Patil, J. H., Ral, M. A., Muralidhara, P. L., Desai, S. M., & Raju, G. K. M. (2012). Kinetics of anaerobic digestion of water hyacinth using poultry litter as inoculum. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3(2), 94-98.
- Pérez, O. (2018). Procedimiento estratégico de desarrollo de procesos agroindustriales complementado con asimilación tecnológica aplicado a los productos de *Manihot esculenta Crantz*. (Tesis Doctoral). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Pérez, O., Chaviano, M., Corzo, I., Velázquez, M., Miño, J. E., & Reymond, A. (2020). Gestión de Inocuidad y Asimilación de Tecnologías en Fábrica de Helados desde el Desarrollo Local. *Revista de Ciencia Tecnología e Innovación +ingenio. Fac. de Ingeniería. UNAM*, 2 (1), 23-41.
- Pérez, O., Ley, N., & González, E. (2021). Procedimiento estratégico de desarrollo de procesos agroindustriales complementado con asimilación tecnológica. *Centro Azúcar*, 88 (1), 47-58.
- Rodríguez, I., & Blázquez, G. (2010). Escalado de reactores químicos y biológicos, Clemont. Gonzalo Gallas.
- Smith, C. B., Capehart, B. L., & Rohrer, W. M. (2007). Chapter 14. Industrial Energy Efficiency and Energy Management. *En*, F. Kreith, Handbook of Energy Efficiency of Renewable Energy. (pp 824-953).CRC press.
- Suárez, V., & Álvarez, M. (2019). Estimación de la producción de biogás a partir de un modelo de simulación de procesos. *Centro Azúcar*, 46 (1), 73-85.
- Suárez, V., Morales, M., Díaz, I., & Álvarez, M. (2021). Modelo integrador para el diseño de una planta de producción de biogás a partir del residual porcino. *Afinidad*, 78 (593), 165-173.
- Yono, B., Widiasta, N. I., & Sunarso, S. (2010). The kinetic of biogas production rate from cattle manure in batch mode. *International Journal of Chemical and Biological Engineering*, 3 (1), 39-44.