

Evaluación del potencial energético de los residuos sólidos en Santiago de Cuba

Potential for energy valorization of solid waste in Santiago de Cuba

^I Ing. José Daniel Nieto-Columbié, jose.nieto@uo.edu.cu,
<https://orcid.org/0000-0002-2727-7611>;

^{II} Dr. C. Roberto René Moreno-García, rrmg@uo.edu.cu,
<https://orcid.org/0000-0002-3827-9575>;

^{III} Dr. C. Frank Medel-González, frankmedel@uclv.edu.cu,
<https://orcid.org/0000-0002-0669-9698>

^{I, II} Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba;

^{III} Universidad Central Marta Abreu, Villa Clara, Cuba

Resumen

El artículo tiene como objetivo evaluar el potencial energético de los residuos sólidos en la ciudad de Santiago de Cuba, a partir de las principales tecnologías de valorización energética de residuos sólidos utilizadas en el mundo, en correspondencia con los Objetivos del Desarrollo Sostenible, sus metas y la Agenda 2030 de la Organización de Naciones Unidas. Para ello se utilizaron los datos del Anuario Estadístico de Cuba 2019 edición 2020 e investigaciones científicas publicadas en las principales bases de datos y revistas de impacto referentes a la valorización de residuos sólidos. Dentro de los resultados más importantes se encuentran evaluar las diferentes tecnologías de valorización e identificar una reserva energética de hasta 827 657,22 Mega Watt, equivalente a 3 832 052,91 toneladas de combustible, lo que representa un impacto económico de 2 359 471 618,00 USD.

Palabras clave: Residuos sólidos, valorización de residuos sólidos, tecnologías de valorización.

Abstract

The objective of the paper is evaluate the energy potential of solid waste in the city of Santiago de Cuba, based on the main technologies of energy recovery of solid waste used in the world, consistent with the Sustainable Development Goals, its targets and the 2030 Agenda of the United Nations Organization. For this purpose, data from the Statistical Yearbook of Cuba 2019 2020 edition and scientific research published in the main databases and journals of impact referring to solid waste valorization were used. Among the most important results are the evaluation of the different valorization technologies and the identification of an energy reserve of up to 827 657.22 Mega Watt, equivalent to 3 832 052.91 tons of fuel, which represents an economic impact of 2 359 471 618.00 USD.

Keywords: Solid waste, solid waste recovery, recovery technologies.

Introducción

Garantizar una gestión adecuada de los residuos sólidos (RS) es crucial para los países en pos de lograr los Objetivos de Desarrollo Sostenible (DS), sus metas, sistema de indicadores y la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (ONU), específicamente los objetivos seis “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”, 11 “Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles”, 12 “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles” entre otros objetivos (ONU, 2018).

En el contexto actual, caracterizado por la crisis ocasionada por la pandemia de la COVID-19, investigaciones científicas corroboran que existe una relación causal inversa entre la calidad de los servicios de agua potable y el manejo y aumento de los volúmenes de residuos relacionados con la enfermedad, con los niveles de transmisión del virus y otras enfermedades contagiosas (Cooper, 2020; Miller et al., 2020; Molento, 2021).

La tendencia a la utilización de los RS como fuente alternativa para la generación de energía se ha incrementado en los últimos años. Esto se debe fundamentalmente a varios factores como, el incremento en los volúmenes de RS generados en la última década y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes de la generación por los métodos tradicional de energía eléctrica con su respectiva repercusión en el cambio climático y daños al medio ambiente.

La disminución de las reservas de combustibles fósiles y los crecientes índices de contaminación originados por el uso de estos recursos debido a la generación de gases de efecto invernadero ha impulsado el desarrollo e investigación de nuevas fuentes de energías con el objetivo de disminuir los impactos ambientales. Sin embargo, el uso de los combustibles fósiles no es la única fuente de generadora de gases de efecto invernadero. El biogás generado en los rellenos sanitarios como producto de la fermentación anaerobia de la materia orgánica vertida contiene aproximadamente un 50% de metano que según el Panel Internacional del Cambio Climático (IPCC) el metano tiene una equivalencia en cuanto a su contribución a este efecto de 21 veces la del CO₂ (Bitrán y Asociados, 2006 citado por Aguilar, Armijo y Taboada, 2009).

En este sentido, según Betancourt-Alayón y Somoza, (2018), a pesar de que Cuba es un contribuyente “menor” de las emisiones de GEI a la atmósfera con unos niveles medios per cápita de emisión de los tres gases iguales o mayores a la media de América Latina y el Caribe, lo cual es preocupante en temas de atención a las emisiones de GEI.

La transformación en energía eléctrica de los RS por alguno de los métodos conocidos, puede ser una solución a los crecientes volúmenes de RS y a la contaminación que producen los mismos al medio ambiente al mismo tiempo que se abaratan los costos de producción de electricidad.

La gestión inadecuada de los RS es un problema que afecta hoy a todo el planeta con más del 90 % de los desechos que se queman o se vierten a cielo abierto en los países de bajos ingresos según (Grupo Banco Mundial, 2018). La falta de gestión de los RS provoca un incremento en la transmisión de enfermedades y las afecciones respiratorias producto de la quema de estos recursos sin la supervisión por métodos controlados, contamina los océanos y aguas de ríos y arroyos con el vertido de lixiviados y a los animales que consumen estos residuos.

También como consecuencia de una mala gestión de los RS se provoca la degradación de los suelos, la acumulación de residuos de distintas procedencias, se combinan y generan una alteración de las propiedades físicas y químicas del suelo. Esta alteración reduce su fertilidad, capacidad de aireación, retención de agua y porosidad. También la acumulación de residuos de manera inapropiada en sectores no autorizados puede aumentar el riesgo de incendios. Alteración de los ecosistemas en donde la capacidad de carga y de regeneración del ecosistema se ve sobrepasada por la acumulación de residuos no controlada. Se ven afectados hábitats y las especies que los componen. Ejemplo de esto son aquellos residuos que por arrastre de las corrientes marinas se dispersan y muchos de ellos se acumulan en el fondo marino, lo que afecta la vida y las cadenas tróficas.

Las investigaciones indican que invertir en la gestión sostenible de los RS tiene sentido desde el punto de vista económico. Los residuos no recogidos y mal eliminados tienen un impacto significativo en la salud y el medio ambiente. El costo de abordar este impacto es muy superior al costo de desarrollar y poner en funcionamiento sistemas y tecnologías adecuadas para la gestión de residuos.

En la actualidad los gases de efecto invernadero provenientes de los depósitos a cielo abierto es un factor importante que contribuye al problema del cambio climático. El ritmo acelerado en el que se incrementa la generación de desechos sólidos aumenta la necesidad de implementar modelos de gestión que disminuyan los riesgos para el medio ambiente, según el (Grupo Banco Mundial, 2018) la rápida urbanización y el crecimiento de la

población y el desarrollo económico harán que la cantidad de desechos a nivel mundial aumenten en un 70 % en los próximos 30 años.

El objetivo de este artículo es evaluar el potencial energético de los residuos sólidos en la ciudad de Santiago de Cuba, a partir de las principales tecnologías de valorización energética de residuos sólidos utilizadas en el mundo.

Fundamentación teórica

Los residuos sólidos son aquellos en estado sólido, semisólido, que resultan de las diversas actividades del hombre (Rúa-Orozco *et al*, 2015) Bajo la denominación de residuos sólidos se agrupan solo los residuos que están en estado sólido, dejando fuera los que se encuentran en estado líquido y gaseoso. Se usa el término residuo sólido urbano para referirse a aquellos que se producen específicamente dentro de los núcleos urbanos y sus zonas de influencia. Estos residuos suelen ser producidos en los domicilios particulares.

Clasificación de los residuos sólidos

En función de sus características y orígenes, se les clasifica en tres grandes grupos: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP).

Residuos sólidos urbanos (RSU): Los residuos sólidos urbanos son los que se generan en las casas como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (por ejemplo: de los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques) o los que provienen también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias, y los resultantes de las vías y lugares públicos siempre que no sean considerados como residuos de otra índole.

Residuos de manejo especial (RME): Los Residuos de Manejo Especial (RME) son aquéllos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados residuos sólidos urbanos o peligrosos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

Residuos peligrosos (RP): Los residuos peligrosos, definidos como aquellos que poseen alguna de las características CRETIB que les confieren peligrosidad (corrosividad, C; reactividad, R; explosividad, E; toxicidad, T; inflamabilidad, I; o ser biológico-

infecciosos, B), así como los envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados.

Otra forma de clasificarlos es por su composición y se pueden clasificar como residuos orgánicos, residuos inorgánicos y residuos inorgánicos no reciclables.

Residuos orgánicos: Los residuos orgánicos son aquellos que están compuestos por desechos de origen biológico. Son aquellos residuos que provienen de restos de productos de origen orgánico, la mayoría de ellos son biodegradables (se descomponen naturalmente). Se pueden desintegrar o degradar rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica (Marquez Rodriguez, Obando Muñoz, y Acevedo Gaitan, 2019).

Residuos inorgánicos: Los residuos inorgánicos son aquellos que no tienen origen biológico sino industrial o artificial. Por su naturaleza, son residuos no biodegradables o degradables a muy largo plazo. En esta categoría entran los desechos químicos, basura eléctrica y electrónica, desechos metálicos, plásticos, papel y cartón, vidrio, telas sintéticas o neumáticos, entre otros (Castro, 2019).

Residuos peligrosos (inorgánicos no reciclables): Los residuos peligrosos son sustancias químicas de tipo corrosivo, ácidos o basura radioactiva son algunas de las basuras que se incluyen en esta tipología y que deben ser tratadas con especial cuidado pues pueden poner en serio peligro la salud de los ciudadanos.

Características físicas, químicas y biológicas de los RSU

Dentro de las características físicas, se presentan el peso específico aparente (kg/m^3), que es la relación entre el peso del residuo no compactado, y el volumen ocupado por el mismo. La generación per cápita (kg/hab/día) es la cantidad diaria de residuos generados por cada habitante, cuyo valor es importante para el dimensionamiento de los rellenos sanitarios, o para las plantas de incineración. La composición gravimétrica (%) relaciona la proporción de material dado, respecto a la masa total de residuos y es fundamental para el conocimiento de la proporción de cada material para el correcto gerenciamiento de los RSU, recolección selectiva, o plantas de incineración, lugares para compostaje, etc. Los materiales más frecuentemente encontrados son papel, plásticos, metales, vidrio, materiales orgánicos y otros. El contenido de humedad muestra la cantidad de agua presente en la masa de RSU, expresado como el porcentaje (%), respecto al peso de residuo seco (humedad base seca), o al peso de residuo húmedo (humedad base húmeda).

Dentro de las características químicas se encuentran el potencial de hidrógeno (pH). Resulta de gran importancia la capacidad tampón del medio, que es la propiedad de soportar cambios sin variaciones en el pH. La composición química presenta los valores de carbono, nitrógeno, contenido de cenizas, potasio, calcio, fósforo, residuo mineral total, grasas y residuos minerales solubles. Carbono y nitrógeno son metabolizados en distintas proporciones por los microorganismos, ya sea en condiciones de oxidación o de metabolismo fermentativo. El poder calorífico es la capacidad de desprendimiento de calor (energía) de la masa de los residuos sólidos al ser sometida a procesos de tratamientos térmicos, como, por ejemplo, la gasificación y la pirólisis.

Valorización energética de residuos

La valorización energética de residuos es un proceso mediante el cual los residuos se someten a ciertos tratamientos o tecnologías, de forma que se reduce su volumen y se genera energía útil. Según la Asociación de Empresas de Valorización Energética de Residuos Urbanos (AEVERSU) “La valorización energética es la conversión de aquellos residuos que no pueden ser reciclados en energía, ya sea en forma de electricidad, vapor o agua caliente para uso doméstico o industrial” (AEVERSU, 2019).

A la hora de valorizar los residuos es de suma importancia el aspecto ambiental, incluyendo las emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero. Las materias primas de los residuos pueden contener elementos tales como cloro, azufre y metales pesados, que podrían afectar la calidad de los productos que se forman en el proceso de tratamiento de residuos (por ejemplo, gas de síntesis, cenizas de fondo, escoria vitrificada, etc.). En consecuencia, las tecnologías especiales de reducción deben ser utilizadas para disminuir el contenido de contaminantes en los productos generados y/o en las emisiones al aire, agua y suelo. Un requisito básico para los procesos de tratamiento de residuos es la caracterización adecuada de los materiales contenidos en los flujos disponibles.

Los datos de caracterización dan una indicación de la idoneidad de un flujo de residuos, específico para las diferentes opciones de valorización. Además, estos datos son de importancia crucial para determinar la viabilidad técnica y económica. Otro aspecto importante en la valorización de residuos es la viabilidad económica de Minería de Relleno Sanitario Mejorada, que depende en gran medida del desarrollo de tecnologías innovadoras con altas eficiencias energéticas. Estas nuevas tecnologías tienen que demostrar su viabilidad económica antes de la implementación a escala completa.

Tecnologías de valorización de residuos

La valorización de residuos o su transformación en energía útiles es considerada una fuente de energía renovable, aunque más compleja que otras, por lo que cuenta con detractores y defensores. Entre los procesos tecnológicos tenemos los de tratamientos térmicos que incluyen la incineración, la gasificación, la pirólisis o la gasificación por plasma y las tecnologías de tratamientos biológicos como la biometanización o digestión anaerobia con valorización del biogás obtenido.

Entre las técnicas más usadas tenemos la incineración la cual constituye un sistema para tratar la basura consistente en quemar estos desechos a elevadas temperaturas, lo que consigue reducir su volumen hasta en un 90 % y su peso en un 75 %. La desventaja de este sistema es que se generan cenizas, residuos inertes y gases que pueden resultar tóxicos para las personas lo que hay que gestionar a través de otras tecnologías. Por lo que existe una tendencia creciente hacia el uso de tecnologías como la gasificación, la pirólisis y la gasificación por plasma, debido a que pueden alcanzar un mayor rendimiento energético.

La cultura de la valorización energética asociada a la protección medioambiental está muy asentada en los países europeos más avanzados y comprometidos con el medioambiente. De hecho, los países que más convierten los residuos en energía son también los que más reciclan, alcanzando cotas de vertido inferiores al 3 % (AEVERSU, 2019).

Incineración: En esta tiene lugar la combustión, reacción química que se basa en una oxidación térmica total en exceso de oxígeno. Las características generales de la incineración de residuos, son las siguientes: Se requiere un exceso de oxígeno respecto al estequiométrico durante la combustión, para asegurar una completa oxidación. La temperatura de combustión está, típicamente, comprendida entre los 850 °C y 1.100 °C después de la última inyección de aire secundario, en función de la composición en compuestos halogenados del residuo a tratar.

Como resultado del proceso de incineración se obtiene: Gases de combustión, compuesto principalmente por dióxido de carbono, agua, dióxígeno no reaccionado, dinitrógeno del aire empleado para la combustión y otros compuestos en menores proporciones procedentes de los diferentes elementos que formaban parte de los residuos. Los componentes minoritarios presentes dependerán de la composición de los residuos tratados. Así pues, pueden contener gases ácidos derivados de reacciones de halógenos,

azufre, metales volátiles o compuestos orgánicos que no se hayan oxidado. Finalmente, los gases de combustión contendrán partículas, que son arrastradas por los gases.

Residuo sólido, compuesto fundamentalmente por escorias inertes, cenizas y residuos del sistema de depuración de los gases de combustión.

Pirólisis: Consiste en degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno añadido, por lo que dichas sustancias se descomponen mediante calor, sin que se produzcan las reacciones de combustión. Como características básicas de dicho proceso se tiene que el único oxígeno presente es el contenido en el residuo a tratar y las temperaturas de trabajo, oscilan entre los 300 °C y los 800 °C.

Gasificación: Es un proceso de oxidación parcial (en defecto de oxígeno, por debajo del estequiométrico) de la materia combustible de los residuos. El resultado es un gas pobre, llamado *syngás*, y formado por una mezcla de varios gases: anhídrido carbónico como dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), vapor de agua, nitrógeno y otros posibles hidrocarburos (alquitranes) (Muruais y Maíllo, 2010). Este proceso también reduce de forma importante la cantidad sólida del residuo y sólo permanecen los inertes que entraron al gasificador. El *syngás* combustible tiene un alto porcentaje de vapor de agua y no muy alto poder calorífico. Puede ser quemado inmediatamente con exceso de oxígeno y, de esta manera, se impide que al enfriarse se formen los alquitranes que producen grandes problemas a los equipos mecánicos y a las tuberías.

Plasma: El plasma es un estado de la materia, formado a partir de un gas sometido a altas temperaturas y en el cual prácticamente todos los átomos han sido ionizados. El resultado es un fluido formado por una mezcla de electrones, iones y partículas neutras libres, siendo en conjunto eléctricamente neutro, pero conductor de la electricidad.

La generación de plasma se realiza al hacer fluir de un gas inerte a través de un campo eléctrico existente entre dos electrodos, formándose el denominado arco de plasma, las temperaturas de trabajo varían entre 5,000 °C y 15,000 °C. El plasma, como método térmico para el tratamiento de residuos, presenta tres posibilidades: tratamiento de gases peligrosos, vitrificación de residuos peligrosos y gasificación por plasma. Una antorcha de plasma consiste en el paso de gas y el contacto con una chispa eléctrica, el mismo principio que el motor de un automóvil.

La digestión anaerobia: Es un proceso que involucra la transformación de la materia orgánica en biogás (metano, 60-70 %; dióxido de carbono, 30-40 %). Durante este

proceso participan varios grupos de microorganismos que llevan a cabo un metabolismo coordinado en cuatro etapas: la primera es la hidrólisis, donde la materia orgánica es fermentada, produciendo compuestos sencillos (monómeros); la segunda es la acidogénesis, que produce ácidos orgánicos; la tercera es la acetogénesis, caracterizada por la formación de acetatos, propionatos y butiratos, y finalmente, la cuarta etapa es la metanogénesis, donde microorganismos producen metano a través de la ruta acetotrófica e hidrogenotrófica (González-Sánchez, Pérez-Fabiel, Wong-Villarreal, Bello-Mendoza, y Yañez-Ocampo, 2015).

El tratamiento de los residuos sólidos y los objetivos del desarrollo sostenible.

La evaluación del potencial energético de los residuos sólidos tienen su referente teórico en el concepto de sostenibilidad de la Comisión de Brundtland de 1987 como “el desarrollo que satisface las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades”, que básicamente se sustenta en tres axiomas fundamentales sobre los límites de los recursos naturales en relación con los ritmos que se explotan y consumen estos recursos para garantizar el ritmo de desarrollo actual, por lo que la evaluación y resultados deben considerar las tres dimensiones del desarrollo sostenible (ambiental, económica y social) que comprende las políticas o medidas correctivas (ONU, 2018).

El tratamiento de los residuos o desechos sólidos está explícitamente declarado en las Metas del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 11 “Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles”, específicamente en la Meta 11.6 que establece: “De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo” (ONU, 2018).

Para lo cual se definen los indicadores: 11.6.1 Proporción de desechos sólidos urbanos recogidos periódicamente y con una descarga final adecuada respecto del total de desechos sólidos urbanos generados, desglosada por ciudad y el 11.6.2 Niveles medios anuales de partículas finas en suspensión (por ejemplo, PM_{2.5} y PM₁₀) en las ciudades que deben ser ponderados según la población (ONU, 2018).

Además, el ODS 12 “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles” que establece el consumo y la producción sostenibles consisten en fomentar el uso eficiente de los recursos y la eficiencia energética, infraestructuras sostenibles y facilitar el acceso

a los servicios básicos, empleos ecológicos y decentes, y una mejor calidad de vida para todos, que incluye la metas e indicadores siguientes:

Meta: 12.4 De aquí a 2020, lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente. Con los indicadores:

Indicador: 12.4.2 Desechos peligrosos generados per cápita y proporción de desechos peligrosos tratados, desglosados por tipo de tratamiento.

Meta: 12.5 De aquí a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización. Indicador: 12.5.1 Tasa nacional de reciclado, en toneladas de material reciclado.

De forma general el tratamiento de los residuos sólidos también guarda una estrecha relación con los ODS seis “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos” y siete Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos (ONU, 2018).

El uso de indicadores para la gestión del tratamiento de residuos sólidos, difiere en dependencia del sistema de tratamiento usado, aunque se han identificado algunos que son comunes, relacionados fundamentalmente con su alineación causas o funcional al sistema de indicadores de los ODS, dentro de los que se encuentran: generación de residuos sólidos y productos residuales frente al PIB, tasa de reciclaje y nueva utilización del total de residuos sólidos generados, flujo de residuos hacia el ambiente, residuos sólidos per cápita, residuos sólidos por hogar, tasa de aprovechamiento entre otros indicadores alineados a los ODS (CEPAL,2018) (tabla 1).

Tabla 1. Relación de indicadores más usados la gestión de los sistemas de RSU.

Indicadores	Unidad	Alineado a los ODS
Residuos sólidos generados per cápita	kg/hab-día	Si
Energía eléctrica generada por tonelada de RSU	kWh	Si
Generación de residuos sólidos y productos residuales frente al PIB	Toneladas generadas /billones de pesos	Si
Tasa de reciclaje y nueva utilización del total de residuos sólidos generados	%	Si
Cobertura de saneamiento	%	Si
Tasa de aprovechamiento	%	Si

En Cuba, se han llevado a cabo investigaciones de evaluación para la aplicación de procesos de digestión anaerobia para el tratamiento de residuos sólidos agroindustriales (López Dávila, Jiménez Hernández, Romero Romero, y Dewulf, 2012). Los sistemas anaerobios en nuestro país han sido aplicados al tratamiento de residuos sólidos y líquidos.

También se han desarrollado estudios de factibilidad para la generación eléctrica, a partir de la gasificación de bagazo (Torres Fernández, Almazán del Olmo, y Hernández, 2015) y la biomasa forestal. La generación de electricidad en Cuba a partir de biomásas como bagazo de caña y recientemente el marabú, es una de las fuentes más importantes de energía renovable en el país. Aunque la producción de energía a base de bagazo se ha visto afectada en los últimos años como consecuencia de la disminución en la producción en sector azucarero cubano.

Métodos

La evaluación del potencial energético de los residuos sólidos requiere en primer lugar seguir una secuencia de trabajo que inicia con la selección de los indicadores a utilizar; fijar sus metas y estándares en base a los sistemas de tratamiento de residuales empleados a su potencial energético considerando las mejores prácticas nacionales e internacionales del sector (*Benchmarking*); realizar los cálculos de la valorización energética; identificar las brechas o desviaciones de los indicadores con respecto a las metas desde los puntos de vistas cuantitativo y cualitativo considerando las tres dimensiones del desarrollo sostenible (ambiental, económica y social) y proponer las políticas o medidas de corrección. Para dar cumplimiento al objetivo de la investigación solo se desarrollarán los tres primeros pasos de la secuencia descrita.

El anterior procedimiento de trabajo debe estar alineados de forma causal o funcional al marco de trabajo de los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), sus metas y sistema de indicadores. Para estimar el potencial de valorización de los residuos sólidos se tomarán como referencias otras investigaciones que abordan el tema a partir de las diferentes técnicas de tratamiento. Las cuales, a base de procedimientos experimentales, seguimiento y observación de las diferentes tecnologías lograron calcular cuanta energía se podría obtener de una tonelada de RS (tabla 2).

Tabla 2 Potencial de valorización por tecnología.

Tecnología	Potencial de valorización por T de RS	Fuente
Termo combustión	400-600 kWh	Soto (2013)
Biogás de rellenos sanitario	464-646 kWh	Cuesta (2015)
Gas por pirólisis	928-3230 kWh	Millan (2014) y Cuesta (2015)
Gasificación por plasma	600-900 kWh	Yassin, Lettieri, Simons y Germanà (2009) y Soto (2013)

Fuente: Elaborado a partir de las investigaciones consultadas.

Cabe aclarar que los resultados y cálculos de las investigaciones tomadas como referencias de las tecnologías tratadas en esta investigación pueden variar en dependencia de la composición gravimétrica y otras características físicas, químicas y biológicas de los RS empleados en tales procesos.

Esta información no está disponible para los RS recolectados en la provincia de Santiago de Cuba por lo cual los resultados obtenidos deben usarse como una referencia y aproximación al potencial real de la provincia. Debido a esta cuestión se estimará el potencial de valorización para cada tecnología estudiada en tres escenarios dentro de los límites inferiores y superiores obtenidos de las investigaciones tomadas como referencias para su evaluación según los beneficios energéticos que se podrían obtener.

Aunque aún no se conoce cuanta energía podría generar una planta de termo combustión, según Soto, (2013) una tonelada de desechos podría satisfacer una demanda de consumo entre 400 y 600 kilovatios (kWh).

En el caso biogás de rellenos sanitarios GRS se produce por descomposición anaeróbica de los residuos urbanos depositados en los rellenos sanitarios. Su generación depende del tiempo transcurrido desde su disposición, de la composición de los RSU, y de variables meteorológicas como la temperatura del ambiente y la humedad. El potencial de uso del GRS está determinado por su contenido de metano y el caudal capturado. Siendo SV el porcentaje de sólidos volátiles presentes en el sustrato y que equivale al contenido en materia orgánica. Para una fracción orgánica estándar de RSU (50 % en SV) se estima una cantidad de metano producido entre 550,00 y 650,00 m³ /t SV con un porcentaje del mismo del 60 % (Cuesta, 2015). Debido a estos aspectos y a la degradación biológica incompleta, generalmente se acepta que un volumen máximo aproximado de 200 Nm³ de biogás puede generarse a partir de una tonelada de residuos sólidos urbanos dispuestos en el relleno sanitario y 1,00 m³ de biogás puede generar como máximo 2,32 kWh de energía eléctrica y 3,23 kWh de energía térmica en motores de combustión interna con tecnología

alemana (Nzila, Dewulf, Spanjers, Kiriamiti y van Langenhove, 2010) por lo cual por cada tonelada de RSU se podría generar de 464,00 y 646,00 (kWh).

El volumen de gas producido por Pirólisis por tonelada de residuo depende del poder calorífico del mismo, para un poder calorífico de 6 MJ/kg se producen alrededor de 400 Nm³ de gas. Para un poder calorífico de 12MJ/kg se pueden alcanzar valores de hasta 900-1000 Nm³ por tonelada que el contenido en partículas de polvo en el gas limpio sea de 0,25mg/Nm³ lo cual es debido al aire de combustión (Millan, 2014).

En lo que respecta al tratamiento de residuos mediante gasificación por plasma representa el proceso que permite la obtención de energía (KWh) por tonelada de residuos sólidos hasta 1,5 veces mayor que el proceso mediante incineración por tratamiento de RSU al tener mejor eficiencia de generación eléctrica (Yassin, Lettieri, Simons y Germanà, 2009).

En el caso de los países de América Latina y el Caribe (ALC), los RSU tiene un mayor contenido de materia orgánica, una humedad que varía de 35% a 55% y un mayor peso específico, que alcanza valores de 125 a 250 Kg./m³ , cuando se miden sueltos (Pala Reyes, 2006, p. 17).

Resultados

De acuerdo con el volumen de residuos sólidos generados, la producción per cápita en la ciudad de Santiago de Cuba asciende para el 2019 a 0.93 kg/hab/día (tabla 3 y figura 1 y 2), ligeramente superior al promedio para América Latina y el Caribe (ALC) de 0.90 kg/hab/día (Grau, Terraza y Rodríguez Velosa, 2015). La generación de RSU por habitante en Santiago de Cuba, ha variado en su cantidad, a medida que ha ido creciendo las actividades económicas relacionadas con la prestación de servicios, principalmente los turísticos, incidiendo en el aumento de los volúmenes RS generados, provocando que el control de los residuos no sea del todo eficaz. Lo que ha aumentado el número de localizaciones utilizadas como vertederos no autorizados, con el agravante de que la cobertura de saneamiento de Santiago de Cuba según (ONEI, 2020) es la más baja del país con una cobertura solo del 88,2% por lo cual la generación de RS puede ser mucho mayor.

Tabla 3 Volumen de desechos sólidos recolectados Santiago de Cuba.

Años	Toneladas	Población media
2011	253217,2	1052618
2012	307398,8	1050401
2013	287395,6	1053914
2014	358346,8	1055658
2015	340092	1056878
2016	339152	1055160
2017	319957,2	1052518
2018	336933,6	1050163
2019	356748,8	1047946

Fuente: Elaborado a partir de los datos disponibles en el Anuario estadístico de Cuba 2019

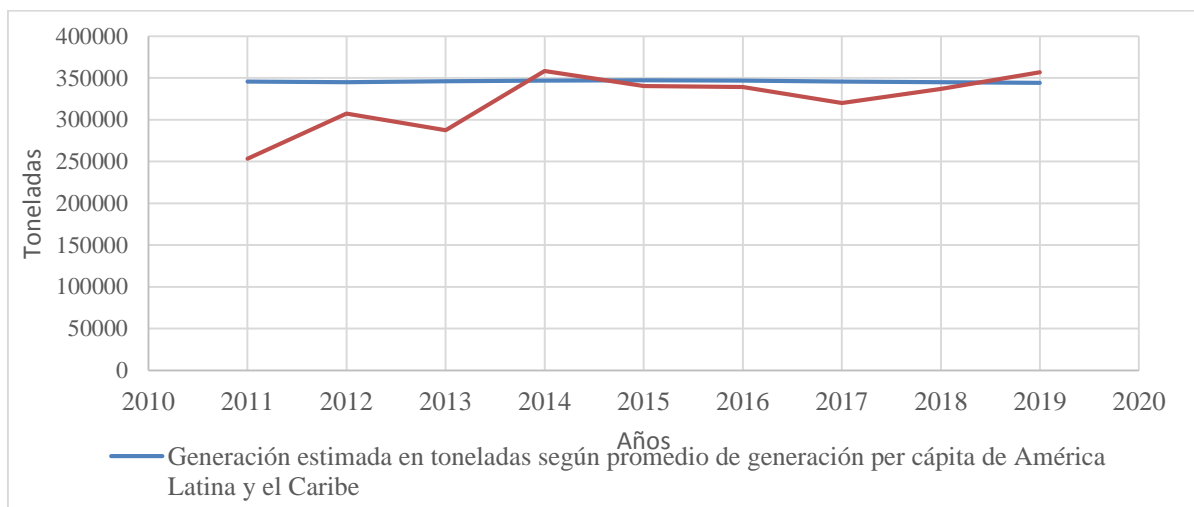


Figura 1. Toneladas recolectadas en Santiago de Cuba vs Generación estimada según el promedio de ALC.

Fuente: Elaborados a partir de los datos del Anuario Estadístico de Cuba 2019.

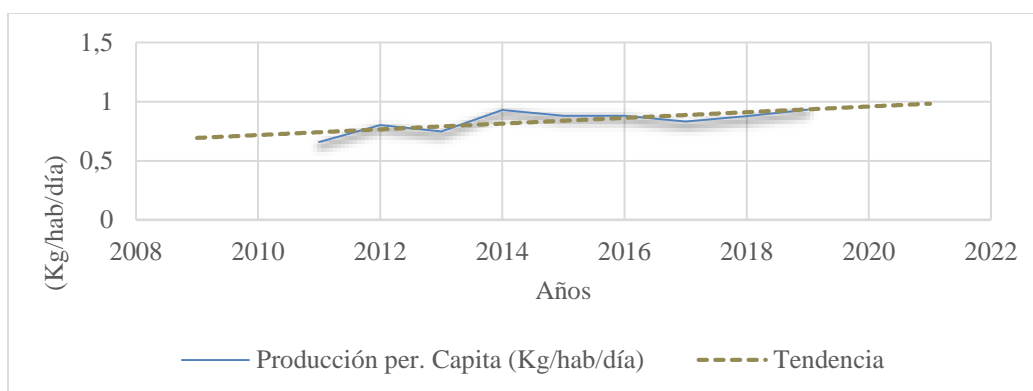


Figura 2. Producción per cápita en Santiago de Cuba (Kg/hab/día).

Fuente: Elaborados a partir de los datos del Anuario Estadístico de Cuba 2019.

En los gráficos anteriores se evidencia como en el último año analizado 2019 la generación per cápita de residuos sólidos en Santiago de Cuba ha superado por segunda

vez, en los últimos diez años, el promedio de generación per cápita de América Latina y el Caribe manteniendo una tendencia creciente para los próximos años.

Consumo de energía eléctrica

El consumo de energía eléctrica en los hogares de Cuba se ha incrementado en 5 años según los datos disponibles (ONEI, 2020) un 15,63 % con un incremento promedio anual de 2,96 % y un consumo promedio mensual de 191,1 (kW.h/cliente) (tabla 4 y 5).

Tabla 4 Consumo de energía en los hogares de Cuba.

Años	Electricidad (GW.h)
2014	8005,7
2015	8468,3
2016	8809,1
2017	8895,5
2018	9012,6
2019	9256,9

Fuente: Anuario Estadístico de Cuba 2019.

Tabla 5 Consumo promedio mensual (kW.h/cliente).

Años	Total	Residencial	Generación bruta Total per cápita (kW.h/hab)
2014	301,1	176,5	1723,2
2015	309,3	182	1805,1
2016	305,4	186,7	1820,3
2017	301,7	188,9	1832,1
2018	306,1	187,1	1858,8
2019	304,8	191,1	1849,6

Fuente: Anuario Estadístico de Cuba 2019.

Con los volúmenes de RS recolectados en Santiago de Cuba durante el año 2019 se estimó la valorización de los mismos para las distintas tecnologías de valorización, arrojando como resultados un potencial de generación de electricidad de entre 142 699,52 y 827 657,22 (MWh) de electricidad según la tecnología utilizada y los diferentes escenarios (tabla 6 y figura 3). Lo que representa un 7,36 % y 42,70 % de la generación bruta per cápita de la ciudad en ese año y un ahorro entre 660,70 y 3832,1 miles de toneladas de combustible lo que representa un ahorro económico entre 406 805 451,3 USD y 2 359 471 618 USD ver figura 4 según los precios actuales del barril de petróleo Brent del día 26 de octubre del 2021 (OPEC, 2021).

Tabla 6 Estimación de la generación de energía eléctrica según las tecnologías de valorización por T de RSU.

Tecnología	Recolección RSU (Toneladas) 2019	Escenario	Electricidad (MWh)	Toneladas de combustible ahorrado por generación a partir RS
Termo combustión	356748,8	Pesimista	142699,52	660698,7776
		Medio	178374,4	825873,472

		Optimista	214049,28	991048,1664
Biogás de rellenos Sanitarios		Pesimista	165531,44	766410,582
		Medio	198352,33	918371,3009
		Optimista	230459,72	1067028,526
Gas por Pirólisis		Pesimista	331062,89	1532821,164
		Medio	579360,05	2682437,037
		Optimista	827657,22	3832052,91
Gasificación por Plasma		Pesimista	214049,28	991048,1664
		Medio	267561,6	1238810,208
		Optimista	321073,92	1486572,25

Fuente: Estimado a partir de los datos de residuos sólidos recolectados Anuario Estadístico de Cuba 2019 y las distintas tecnologías de valorización.

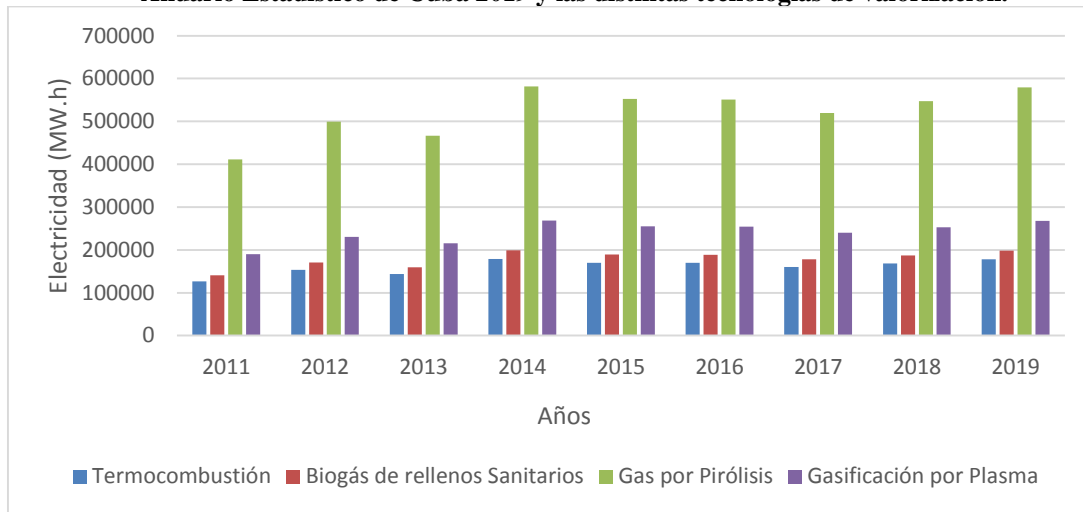


Figura 3. Estimación de la generación de electricidad (MWh) según el tipo de tecnología.

Fuente: Estimado a partir de los datos de residuos sólidos recolectados Anuario Estadístico de Cuba 2019 y las distintas tecnologías de valorización.

Como se puede apreciar, la pirólisis en teoría ofrece conseguir mayor rendimiento energético, sin embargo es una tecnología costosa, donde el rango de los costos de capital oscila entre 8 000,00 y 1 500,00 dólares por kW según (Tangri y Wilson, 2017). En Cuba se han desarrollado investigaciones sobre la pirólisis de residuos forestales o de arbustos considerados plagas como el marabú como recurso renovable de energía, de paja o bagazo de caña, así como de residuos sólidos de naranja.

Para poder tratar los residuos mediante pirólisis, se deben cumplir una serie de requisitos. Sin embargo, es difícil definir la tipología de residuos considerados como adecuados o inadecuados, dado que está muy relacionado con el tipo de reactor usado y de las condiciones de operación. Básicamente, se consideran como residuos más aptos: papel, cartón, astillas de madera, residuos de jardín y algunos plásticos seleccionados.

Los residuos deben proceder de un sistema de recogida selectiva y/o en su defecto, deben someterse a un sistema de clasificación previo a la planta de pirólisis. No son admisibles los residuos voluminosos, los metales, los materiales de construcción, los residuos

peligrosos, vidrio y algunos plásticos, como el PVC, se requiere triturar, secar y homogeneizar los residuos. En la ciudad de Santiago de Cuba no se cuenta con un sistema de recogida y clasificada en origen, causado por la situación económica, la falta de cultura y sensibilidad de la población, lo que, unido a la ausencia de plantas de tratamientos de residuos sólidos (RS), hacen que sean depositados en los vertederos, desechos de diversos orígenes, lo que complejiza la aplicación de esta tecnología.

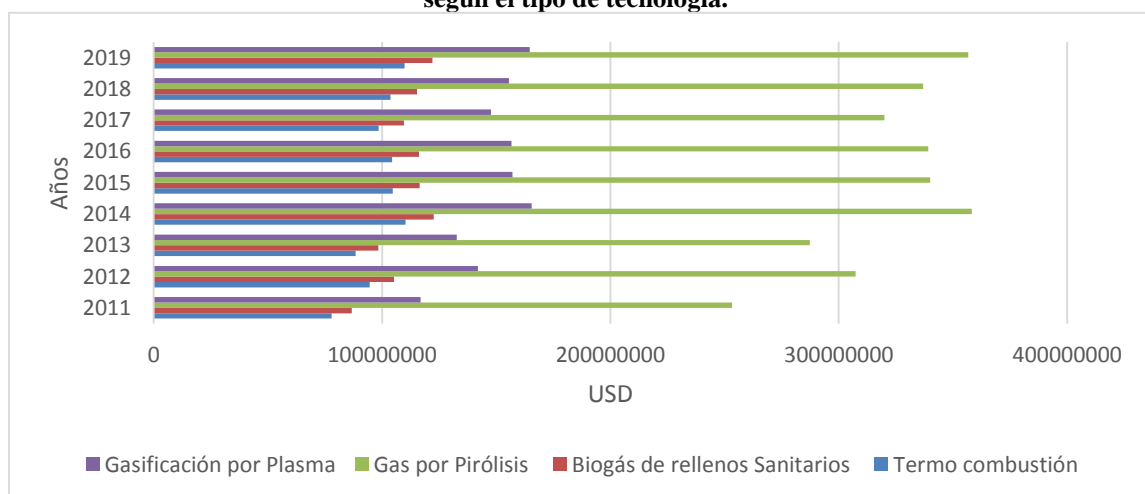
Las ventajas en el proceso de pirólisis incluyen:

1. La posibilidad de recuperar fracciones orgánicas, como por ejemplo el metanol.
2. La posibilidad de generar electricidad usando motores de gas o turbinas de gas para la generación, en lugar de calderas de vapor.
3. Reducir el volumen de los gases de combustión, para reducir el coste de inversión en el tratamiento de gases de combustión.
4. Las ventajas de emisión de los gases de combustión conseguidos en este proceso se verán reducidas, cuando se realice un proceso a altas temperaturas como la gasificación o la combustión.

Como inconvenientes, se puede decir que son:

1. Uso limitado a ciertos residuos.
2. Requiere buen control de operación del proceso.
3. La tecnología no está ampliamente probada.
4. Requiere un mercado para el gas de síntesis.
5. Normalmente se utiliza en una etapa posterior de combustión.

Figura 4. Estimación del ahorro económico en USD por la generación de electricidad según el tipo de tecnología.



Fuente: Precios actuales del petróleo Brent 26 de octubre del 2021 (OPEC, 2021).

Conclusiones

1. *El tratamiento de los residuales sólidos guarda una estrecha relación con los Objetivos del Desarrollo Sostenible y la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, sus metas y sistema de indicadores.*
2. *La estimación del potencial energético derivado de valorización de la posible generación de electricidad a partir del uso de los residuos sólidos en la ciudad de Santiago de Cuba refleja el impacto directo que tendría en la economía del país por concepto de ahorro de miles de toneladas anuales de combustibles, así como las mejoras en la salud y el cuidado del medio ambiente por el volumen significativo de gases de efecto invernadero que se dejarían de verter en la atmosfera.*
3. *Desde el punto de vista energético, se evaluó el potencial de valorización de los residuos sólidos generados en Santiago de Cuba para los cuatro tecnologías tratadas.*
4. *En el sistema de tratamiento por pirolisis, se identificó el mayor potencial de reserva de generación de energía eléctrica el cual pudiera aprovecharse para realizar inversiones en este sector que posibiliten su aprovechamiento.*
5. *En este sentido se deberían desarrollar futuras investigaciones para evaluar la factibilidad económica de la implementación de las mejores tecnologías de valorización de residuos según las características propias del territorio y proponer políticas públicas para lograr un adecuado sistema de recogida y clasificada en origen que facilite la implementación de estas tecnologías.*

Referencias bibliográficas

1. Aguilar, Q., Armijo, C., y Taboada, P. (2009). *El potencial energético de los residuos sólidos municipales*. 13, 59-62.
2. Asociación de Empresas de Valorización Energética de Residuos Urbanos (AEVERSU). (2019). ¿Qué es la valorización energética? <https://aerversu.org/valorización-energetica/>
3. Betancourt-Alayón, Y., & Somoza Cabrera, J. (2018). Cuba: políticas de mitigación y la Curva ambiental de Kuznets. *Anuario-Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales*, 9, 3-18, <https://anuarioeco.uo.edu.cu/index.php/aeco/article/view//247>
4. Castro, M. (2019). *Residuos inorgánicos: Características, clasificación, tratamiento*. <https://www.lifeder.com/residuos-inorganicos/>
5. CEPAL. (2018). *Indicadores relacionados a los ODS* https://www.cepal.org/sites/default/files/courses/files/2018-01_5.2_experiencia_flujo-materiales_colombia_bayron-cubillos.pdf
6. Cooper, R. (2020). *Water security beyond Covid-19.*, <https://opendocs.ids.ac.uk/opendocs/handle/20.500.12413/15240>

7. Cuesta López, J. (2015). *Obtención de biogás a partir de Residuos Sólidos Urbanos para su inyección a Red*. (Trabajo fin de grado). Carlos III de Madrid.
8. González-Sánchez, M. E., Pérez-Fabiel, S., Wong-Villarreal, A., Bello-Mendoza, R., y Yañez-Ocampo, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 229-235. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>
9. Grau, J., Terraza, H., y Rodríguez Velosa, D. M. (2015). *Situación de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe*. www.bancomundial.org/es/
10. Grupo Banco Mundial. (2018). *Los desechos: Un análisis actualizado del futuro de la gestión de los desechos sólidos*. www.bancomundial.org/es/
11. López Dávila, E., Jiménez Hernández, J., Romero Romero, O., y Dewulf, J. (2012). Aplicación de la tecnología de digestión anaerobia para tratar residuos sólidos agroindustriales utilizando inóculo de estiércol porcino, en condiciones mesofílicas. *Tecnología Química*, 32(3), 274-281. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-61852012000300011&lng=es&nrm=iso&tlng=es
12. Marquez Rodriguez, O. J., Obando Muñoz, G. A., y Acevedo Gaitan, G. A. (2019). *Definición de alternativas viables y sostenibles para la gestión y aprovechamiento de residuos alimenticios provenientes de diferentes fuentes generadoras de residuos orgánicos en el Municipio de Cajica – Cundinamarca*. (Thesis, Corporación Universitaria Minuto de Dios). Corporación Universitaria Minuto de Dios. <https://repository.uniminuto.edu/handle/10656/9883>
13. Millan Casas, T. B. (2014). Estudio de Factibilidad Técnica y Económica de una Planta de Pirolisis para la Valorización Energética de Residuos Sólidos Urbanos en el Distrito Federal—Bing (Universidad Autonoma Metropolitana). Universidad Autonoma Metropolitana, México D.F. http://energia.azc.uam.mx/images/PDF/ProyecINVES/Tec_Sust/Estudio-de-Factibilidad-Tcnica-y-Econmica-de-una-Planta-de-Pirolisis.pdf
14. Muruais, J., y Maíllo, A. (2010). *Guía de valoración energética de residuos*.
15. Miller, M. J., Loaiza, J. R., Takyar, A., & Gilman, R. H. (2020). COVID-19 in Latin America: Novel transmission dynamics for a global pandemic? *PLoS neglected tropical diseases*, 14(5), e0008265. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0008265>
16. Molento, M. B. (2021). Ivermectin against COVID-19: The unprecedented consequences in Latin America. *One Health*. doi:10.1016/j.onehlt.2021.100250
17. Nzila, C., Dewulf, J., Spanjers, H., Kiriamiti, H., y van Langenhove, H. (2010). Biowaste energy potential in Kenya. *Renewable Energy*, 35(12), 2698-2704. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.016>
18. Oficina Nacional de Estadística e Información. (2020). *Anuario estadístico de Cuba 2019. Edición 2020*.
19. ONU (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe* (LC/G.2681-P/Rev.3).
20. OPEC 2021. (2021, octubre 26). *Precio petróleo hoy*. www.opec.org
21. Pala Reyes, H. M. (2006). *Estudio del potencial energético a partir de los residuos sólidos en algunos distritos del cono norte de Lima Metropolitana*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
22. Rúa-Orozco, D., Palacio, J., Melo, A., Reyes, A., Barros, R., y Lora, E. (2015). *Generación de energía a partir de los residuos sólidos urbanos*.
23. Soto, M. (2013). *Tecnología de incineración o gasificación lo que persigue es generar calor*. <https://www.nacion.com/>
24. Tangri, N., y Wilson, M. (2017). *Gasificación-y-pirólisis*. <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Gasificaci%C3%B3n-y-pir%C3%B3lisis-2017-ESP-1.pdf>
25. Torres Fernández, A., Almazán del Olmo, O., y Hernández, B. (2015). Estudio de factibilidad económica de un proyecto de generación eléctrica, a partir de la gasificación de bagazo en un central azucarero cubano. *Centro Azúcar*, 42(1), 1-8. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2223-48612015000100001&lng=es&nrm=iso&tlng=en
26. Yassin, L., Lettieri, P., Simons, S. J. R., y Germanà, A. (2009). Techno-economic performance of energy-from-waste fluidized bed combustion and gasification processes in the UK context. *Chemical Engineering Journal*, 146(3), 315-327. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.06.014>