

# Review of electric power generation technologies from urban solid waste in Costa Rica

Juan Luis Solís-Calvo, Licenciado<sup>ORCID</sup>, Erick Guillén-Murillo, Licenciado, and Joel Alpízar-Castillo, Máster<sup>ORCID</sup>  
Universidad Fidélitas, Costa Rica, Juan02palm@gmail.com, ErickGuillenMurillo@gmail.com, JAlpizar30427@ufide.ac.cr

*Abstract– Solid waste management is a problem in Costa Rica. Multiple solutions have been proposed, but the Costa Rican lifestyle requires more efficient methods and less environmental impact. This work evaluated incineration, gasification, plasma gasification, and pyrolysis as energy generation solutions for solid waste in Costa Rica. We used quantitative and qualitative criteria to compare the methods, including economic, energy, environmental elements, solid waste management, and technology maturity. In cases where it was not possible to establish a direct relationship or comparison, we established an indirect relationship or comparative based on information between technologies. Plasma gasification had the optimal results in power generation capacity, applicability of available waste, and caloric value. Additionally, the plant required the lowest installation area, with few emissions of pollutants to the environment, and the best in terms of waste-reducing capacity, the latter being a notable characteristic that puts it first to the problem and solution in the elimination of the landfills and landfills. This would release large land extensions, in addition to the great benefit of relieving the environment of large amounts of waste that would take many years to disintegrate.*

*Keywords– Generation from waste, urban solid waste, WTE.*

# Review of electric power generation technologies from urban solid waste in Costa Rica

## Revisión de las tecnologías de generación de energía eléctrica a partir de los residuos sólidos urbanos en Costa Rica

Juan Luis Solís-Calvo, Licenciado<sup>ORCID</sup>, Erick Guillén-Murillo, Licenciado, and Joel Alpízar-Castillo, Máster<sup>ORCID</sup>  
Universidad Fidélitas, Costa Rica, Juan02palm@gmail.com, ErickGuillenMurillo@gmail.com, JAlpizar30427@ufide.ac.cr

**Abstract**— *Solid waste management is a problem in Costa Rica. Multiple solutions have been proposed, but the Costa Rican lifestyle requires more efficient methods and less environmental impact. This work evaluated incineration, gasification, plasma gasification, and pyrolysis as energy generation solutions for solid waste in Costa Rica. We used quantitative and qualitative criteria to compare the methods, including economic, energy, environmental elements, solid waste management, and technology maturity. In cases where it was not possible to establish a direct relationship or comparison, we established an indirect relationship or comparative based on information between technologies. Plasma gasification had the optimal results in power generation capacity, applicability of available waste, and calorific value. Additionally, the plant required the lowest installation area, with few emissions of pollutants to the environment, and the best in terms of waste-reducing capacity, the latter being a notable characteristic that puts it first to the problem and solution in the elimination of the landfills and landfills. This would release large land extensions, in addition to the great benefit of relieving the environment of large amounts of waste that would take many years to disintegrate.*

**Keywords**— *Generation from waste, urban solid waste, WTE.*

**Resumen**— *El manejo de residuos sólidos es un problema en Costa Rica. Múltiples posibles soluciones se han propuesto, pero debido al modo de vida de la sociedad costarricense requiere métodos más eficientes, y con menor impacto ambiental. Este trabajo evaluó la incineración, la gasificación, la gasificación por plasma y la pirólisis como soluciones de generación de energía a partir de residuos sólidos para implementarse en Costa Rica. Se plantean once criterios cuantitativos y cualitativos, incluyendo elementos económicos, energéticos, medioambientales, manejo de residuos sólidos y subproductos de la tecnología. En los casos en los que no se logró establecer una relación o comparación directa, se estableció entonces una relación o comparativa indirecta con base en información entre las tecnologías. La gasificación por plasma tuvo los resultados óptimos en la capacidad de generación eléctrica, la aplicabilidad de los residuos disponibles y valor caloríficos de los mismos. Adicionalmente fue la planta que requería menor área de instalación, con pocas emisiones de contaminantes*

*al ambiente, y la mejor en cuanto a la capacidad reductora de residuos, siendo esta última una característica especial que la pone de primera ante la problemática y solución en la eliminación de los rellenos sanitarios y vertederos. Esto liberaría grandes extensiones de terreno, además del gran beneficio que significaría para el ambiente el deshacerse de grandes cantidades de desechos que tardaría muchos años desintegrarse.*

**Palabras clave**— *Generación a partir de residuos, Residuos sólidos urbanos, WTE.*

### I. INTRODUCCIÓN

La generación de electricidad en Costa Rica tiene como fuente principal la energía hidroeléctrica, alcanzando una producción anual cercana al 100 % de generación renovable [1]. El uso de hidrocarburos se da solamente cuando las energías limpias no son suficientes para abastecer la demanda del país. Sin embargo, existen en otras opciones que tienen un valor agregado, el cual es tratar un problema inminente como lo son los residuos sólidos urbanos (RSU). Alrededor del mundo existen tecnologías que utilizan los RSU, ya sean orgánicos o inorgánicos, de manera tal que se conviertan en energía. Esta puede ser en forma de combustible o convertirse en una fuente directa de generación eléctrica. Este tipo de tecnologías se dividen en dos tipos: conversión biológica y conversión térmica, en la primera la más conocida es el biogás, esta trabaja solamente con desechos orgánicos aprovechando el gas que aparece cuando estos se encuentran en ausencia de oxígeno, este gas se llama metano y se utiliza para generar energía eléctrica. En la conversión térmica aparecen las tecnologías WTE, por sus siglas en inglés de “desecho a energía”, estas tienen la capacidad de convertir los desechos orgánicos y los inorgánicos en energía eléctrica y además generan algunos subproductos en el proceso. Las cuatro tecnologías WTE más importantes son la incineración, la pirólisis, la gasificación convencional y la gasificación por plasma.

En la actualidad existen diferentes tecnologías que son utilizadas para la valorización energética de los residuos. En su mayoría, estas tecnologías trabajan con procesos de tratamiento térmico, como lo son la incineración, la pirólisis, la gasificación y la gasificación por plasma [2]. Los procesos térmicos mencionados anteriormente se caracterizan por la conversión del carbono contenido en los desechos, bajo diferentes condiciones de temperatura y aire principalmente. La recuperación de la energía por medio de los residuos, o WTE, es una alternativa importante para el manejo de los RSU, ya que reduce la cantidad de materiales enviados a los vertederos, disminuye la contaminación del aire y agua, requiere mucho menos espacio, y sirve para sustituir la generación de energía por medio de los combustibles fósiles [3].

En el 2012 se contabilizaban en el mundo más de 1200 plantas WTE funcionando en más de 40 países [4] incluyendo plantas con instalaciones para recuperar gases de los vertederos, plantas de digestión anaeróbica y plantas que usaban pirolisis o gasificación. El desarrollo de las plantas WTE se ha incrementado en los últimos 30 años como resultado de la necesidad de disponer de las crecientes cantidades de desperdicios sólidos, y de las necesidades de encontrar fuentes sostenibles de energía. En los Estados Unidos, para 2014 habían 87 plantas WTE manejando 30 millones de toneladas de desechos cada año; convirtiéndola en aproximadamente 15 billones de kilowatts-hora de energía, [5]. Eso da un rendimiento de 15 000 kWh de energía por cada tonelada de desecho sólido. En Europa, por su parte, existen alrededor de 400 plantas incineradoras, no obstante, esta tecnología desempeña un papel secundario. De las 2600 millones de toneladas métricas de RSU generados en la Unión Europea, el 48 % fue eliminado directamente y el 36 % reciclado, mientras que un 10 % se dispuso en rellenos sanitarios y un 6 % se trató por incineración [6].

Singapur, Taiwán y Japón también han hecho uso de la tecnología WTE. Alrededor del 70 % de los residuos sólidos urbanos de Japón es procesado a través de las plantas WTE. En el año 2014 se comenzó el primer proyecto de una planta industrial en África, destinada para producir energía a partir de los desechos sólidos urbanos. Financiado por el gobierno de Etiopía con una inversión aproximada de unos 118 millones de dólares, las instalaciones permiten procesar 1400 toneladas de desechos por día; los desperdicios se queman a alta temperatura para calentar el agua que luego se convierte en vapor, para que este, finalmente gire una turbina que produce electricidad, siendo capaz de generar unos 25 MWh al día, [7]. En el año 2015 la compañía Estadunidense PHG energy (PHGE) tenía 13 plantas operando, gasificando cualquier tipo de desecho (excluyendo los materiales radioactivos) sin necesidad de una separación de materiales, debido que todo se mezcla y se tritura al mismo tiempo para ser convertido en energía. De una tonelada de este tipo de residuos se produce aproximadamente 800 kWh, [8].

Las implicaciones social de las tecnologías WTE también ha sido investigada en la literatura. En [9] se estudiaron las implicaciones sociales y en políticas que conlleva la generación de energía a partir de los desechos municipales en Pakistán. Se concluye que la generación de empleo producto de plantas de WTE en grandes ciudades mejoraría las condiciones de los trabajadores en medidas tradicionales de recolección de basura. Similarmente, la aceptación social del uso de desperdicios alimenticios para la generación de energía en Jiangsu, China, fue evaluada por [10]. Los resultados demostraron que la región (urbana, semiurbana y rural), no afecta significativamente la aceptación, a diferencia de la edad e ingreso, donde un mayor ingreso y edades entre 31 y 40 años tienden a una mayor aceptación.

En Costa Rica existe un marco regulatorio para el uso tecnologías WTE que establece de forma rigurosa todos los requisitos para que entre en funcionamiento una planta de esta categoría. Este marco legal está compuesto principalmente por el Plan Nacional de Energía 2015-2030, la Ley de Regulación del Uso Racional de la Energía, la Ley de Biocombustibles, la Ley para la Gestión Integral de Residuos, el Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos 2016-2021, la Estrategia Nacional de Cambio Climático, el Programa País Carbono Neutral, y la Política Nacional de Agua potable, [11]. A pesar de dicho marco legal, los intentos de implementar tecnologías WTE en Costa Rica en el pasado no contaron con el apoyo suficiente para concretarse, ya que, aunque se menciona la posibilidad de implementar las tecnologías WTE, se priorizan otro tipo de factores. No obstante, la realidad país demuestra poco control del manejo de los desechos, como la carencia de políticas que obligan a los ciudadanos a separar de los residuos adecuadamente, como sí se hace en otros países.

Este trabajo busca proponer un estudio preliminar que, basado en la evaluación de múltiples métodos, recomiende posibles acciones para darle un uso a los RSU en este caso, para generar energía eléctrica en Costa Rica. De este modo, las contribuciones de este artículo se centran en:

1. Establecer un marco integral para comparar las tecnologías WTE existentes.
2. Recomendar la tecnología para generar energía eléctrica a partir de los RSU que se considere la óptima para el caso de Costa Rica.

## II. METODOLOGÍA

Para analizar los aspectos que se deben de considerar para la elección de la tecnología comparativamente más ventajosa, se examinará por separado cada uno de estos, de tal forma que se establecerá un puntaje a cada tecnología. Se le asignará el mayor puntaje (4 puntos) a la tecnología que posea mejores ventajas para el país, y al contrario el menor puntaje (1 punto) a la que se considere menos apta, esto basado en la documentación existente, y en estudios ya realizados. Los valores intermedios se asignarán de forma linealmente proporcional. Además, se descartará cualquier opción que cuente con impedimentos legales de operación. Solamente se

analizarán las tecnologías WTE basadas en desechos sólidos urbanos, y se omitirán las que utilizan únicamente desechos orgánicos, como por ejemplo la generación eléctrica con biogás. Esto porque el interés principal de esta investigación es indagar más en las opciones de plantas de termovaloración de desechos de todo tipo, dado que en país es algo que actualmente no existe, y en muchas partes del mundo está siendo una alternativa para la generación eléctrica y producción de combustibles. De este modo, se evaluarán: la incineración, la gasificación, la gasificación por plasma y la pirólisis.

Los aspectos para analizar en cada una de las tecnologías WTE son:

- A. *Legalidad*: si tiene o no impedimento para operar en Costa Rica, y su compatibilidad con el marco legal existente en el país, según el Decreto Ejecutivo N° 39136-S-MINAE Reglamento sobre Condiciones de Operación y Control de Emisiones de Instalaciones para Coincineración de Residuos Sólidos Ordinarios. La existencia de un impedimento expreso a nivel legal descartará la tecnología, independientemente de los valores de los otros aspectos. La no mención de la tecnología le otorga un valor neutro o autorización tácita.
- B. *Accesibilidad*: de acuerdo con el posicionamiento mundial de cada una de las tecnologías WTE, se le asignará el máximo puntaje a la tecnología más sólida en el mercado, y proporcionalmente se asignará un puntaje inferior a las otras tecnologías.
- C. *Generación*: se evaluará la capacidad de producción de energía eléctrica por cada tonelada métrica de RSU (kWh/ton). Se le asignará el máximo puntaje a la tecnología más capaz, y proporcionalmente se asignará un puntaje inferior a las otras tecnologías.
- D. *Poder calorífico*: el perfil, o constitución, de los residuos sólidos urbanos locales van a dar mejores resultados dependiendo de las características intrínsecas de la tecnología que las procese. Se cotejarán las características de ambos, el tipo de materia prima (residuo) disponible, y las diferentes tecnologías a considerar, con el fin de evaluar la mejor compatibilidad posible. El mayor puntaje lo determinará el mayor grado de compatibilidad obtenido, y así para el resto de manera decreciente.
- E. *Costo*: se determinará el costo de construcción de la infraestructura y sistemas, para determinar la más costosa, y la menos costosa, en términos de inversión inicial; sin contemplar costos posteriores como los son los de operación.
- F. *Dimensiones físicas*: se determinará el espacio requerido para la construcción y operación de la planta, prefiriendo la menor área.
- G. *Rentabilidad*: se analizarán los estudios financieros que evalúan el retorno de la inversión para determinar cuál de las tecnologías tiene la mejor rentabilidad, siendo la más rentable la de mayor puntaje.

- H. *Emisiones*: la emisión de sustancias químicas tóxicas, tales como arsénico, amoníaco, hidrácidos varios, dioxinas y otros; tendrán una connotación especial en esta sección; siendo la tecnología con más emisiones de este tipo la de menor puntaje.
- I. *Reducción de residuos*: se cuantifica el volumen de entrada y de salida de residuos, y se establece una relación de reducción del volumen procesado. La tecnología con mayor relación de reducción es la que va a tener el valor más cercano a cero y mayor puntaje.
- J. *Reutilización de residuos*: el grado de reutilización de los residuos del proceso de convertir los desechos en energía, dependiendo del grado de aprovechamiento de esta nueva materia prima en procesos secundarios, se les asignará un valor numérico que estará directamente relacionado con su utilización, es decir, a mayor aplicabilidad de los residuos mayor va a ser su puntaje.
- K. *Huella de carbono*: que al proceso termoquímico con menor emisiones de carbono se le asignará el mayor puntaje posible.

### III. RESULTADOS

Esta sección analizará de forma independiente cada uno de los criterios para las tecnologías WTE a comparar. En la Tabla I se resumen las puntuaciones obtenidas por tecnología, así como su puntuación final. Nótese que la puntuación máxima posible es de 52 puntos, y el aspecto de legalidad no suma puntos, sino que determina si la tecnología es implementable o no en Costa Rica.

#### A. *Legalidad*

En el Decreto Ejecutivo N° 39136-S-MINAE se deja claro que las tecnologías como incineración, la pirólisis, la gasificación y la gasificación por plasma forman parte del proceso de coincineración, en el tanto las sustancias resultantes se incineren al final.

#### B. *Accesibilidad*

Según la literatura, la incineración es la tecnología la más utilizada, los inicios de la gestión de valorización de desechos fueron con la incineración, y es una tecnología que está madura, ya que ha sido altamente usada, por lo tanto, obtiene el mayor puntaje posible. En menor escala, algunos países de América como México y Chile, que están en procesos de implementación de plantas WTE, están eligiendo la gasificación para posibles proyectos de plantas de valorización de residuos, por lo que a esta tecnología se le asignan 3 puntos. Si bien la gasificación por plasma es la tecnología más reciente entre las comparadas, ha tenido un crecimiento importante en los últimos años. Algunos de los beneficios más importantes es que se puede meter prácticamente cualquier tipo de desechos, y aparte de esto se eliminan prácticamente todas las cenizas resultantes. Sin embargo, en los estudios que se han realizado en diferentes partes del mundo sigue siendo una tecnología que está iniciando, y por lo tanto no termina de

convencer la implementación de esta, inclinándose comúnmente a la gasificación y a la incineración, asignando una puntuación de 2. Finalmente, la pirólisis es una excelente opción para el aprovechamiento de los residuos a energía, sin embargo, el fuerte de este proceso es convertir la biomasa en una mezcla de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, la proporción de cada uno de ellos depende de la temperatura del reactor, del tipo de materia prima, y la velocidad en que se le aporta temperatura. Este proceso es más aprovechado para la generación de combustibles, que, para la generación de electricidad, por lo que se le asigna la puntuación mínima.

### C. Generación

La literatura reporta rangos estimados de generación para cada tecnología [10-11]. De este modo, la gasificación por plasma tiene una tasa de conversión estimada de 820 kWh/ton RSU, la incineración 700 kWh/ton RSU, la gasificación 525 kWh/ton RSU y la pirólisis 490 kWh/ton RSU. De este modo, se asigna la puntuación máxima a la gasificación por plasma, la mínima a la pirólisis, y se interpola linealmente para la incineración y gasificación.

### D. Poder calorífico

Para analizar este aspecto se toma en cuenta la capacidad de cada una de las tecnologías para manejar los desechos y se toman en cuenta para esto un estudio realizado por [14]. Dicho estudio concluye que la incineración admite gran diversidad de tamaños y composiciones de residuos, pero la composición de los mismos determinará las condiciones de operación de la planta, llegando inclusive a necesitar combustible externo. La gasificación convencional, por su parte, requiere un preprocesado de los residuos, de modo que estos tengan tamaños entre 1 y 50 mm, pero es poco susceptible al tipo de residuo. La gasificación por plasma es igualmente independiente del tipo de residuo, pero cuenta con la ventaja de no requerir preprocesado en cuanto al tamaño de los residuos. Finalmente, la pirólisis solamente es capaz de trabajar con materia orgánica preprocesada.

Por otra parte, [15] recomienda contenidos energéticos mayores a 6000 MJ/ton para valorar la rentabilidad energética de la planta, mientras que el Decreto Ejecutivo N° 39136-S-MINAE establece que los residuos a ser utilizados en el proceso de incineración deben tener como mínimo un poder calorífico inferior de 8000 MJ/ton. Dichos contenidos energéticos dependen de la composición de los RSU. Teniendo en cuenta el estudio previo al Plan de Residuos Sólidos (PRESOL), es posible extrapolar la composición de los residuos de la Gran Área Metropolitana (GAM) con el resto de Costa Rica. Un estudio realizado por [16] menciona que La Municipalidad de San José recolecta 500 toneladas de residuos diarias, y de acuerdo con ANAI (Asociación Nacional de Intendencias y Alcaldías), las campañas de reciclaje solo le dan disposición al 30 % de los residuos que se

producen. Lo que deja disponible el 70 % restante. Esto se traduce a 350 toneladas al día. Un estudio realizado por [17], registra los datos de los residuos por distrito; y muestra que la Municipalidad de San José desecha 309,673 toneladas de RSU por día. Estos datos indican que solo para la capital se podría diseñar una planta con una capacidad de procesamiento de 300 toneladas al día. Ahora, tomando en cuenta el pronóstico de generación de residuos sólidos ordinarios realizado por PRESOL, proyecta una tasa de crecimiento anual del 3,125 %. Se considera una capacidad aproximada en la actualidad de 579 toneladas diarias desechados por la municipalidad de San José. Y dejando en el horizonte una producción de casi 1500 toneladas por día para el 2050, lo cual significa un incremento de casi un 200 % de la producción actual estimada de RSU.

Basados en esta información planteada se puede establecer que la gasificación por plasma es la tecnología capaz de tratar cualquier tipo de residuo por la alta energía y reactividad del plasma; la principal ventaja respecto a la incineración es la rentabilidad con menores capacidades que esta, sin embargo, para ello habría que utilizar un residuo que de mejor gas de síntesis. Esta serie de características le dan el mayor puntaje. Teniendo como consideración la alta rentabilidad necesaria para la operación a gran escala, y considerando de la gran diversidad del tamaño de los residuos, se asigna una puntuación de 3 a la incineración, a pesar de que, dependiendo de la calidad del residuo, va a requerir de combustible de apoyo para mantener una temperatura adecuada. La gasificación posee varias de las ventajas que tiene la gasificación por plasma, sin embargo, tiene grandes limitaciones en el rango de tamaño de la materia prima que puede procesar, se le asignan 2 puntos. De último se ubica la pirólisis, tecnología muy limitada por la única opción de proceso de materia orgánica esto la saca de competencia con respecto a las otras tecnologías, se le asigna la puntuación mínima.

### E. Costo

Para el análisis de este aspecto se toman los datos de un estudio realizado por [18] en donde los costos estimados de capital para cada una de las tecnologías térmicas asumen una salida de 15 MW. La incineración tiene el menor rango de costos con 7 000 a 10 000 \$/kW, por lo que se le asigna la calificación máxima, seguido por la gasificación con 7 500 a 11 000 \$/kW. La gasificación por plasma y la pirólisis cuentan con un rango similar de entre 8 000 a 11 500 \$/kW, por lo que se les asigna una puntuación de 2 a ambos.

### F. Dimensiones físicas

Como se mencionó anteriormente, las altas densidades de temperatura y energía presentes en el plasma permiten alcanzar velocidades de transferencia de calor y reactivos superiores, esto hace posible reducir el tamaño de la instalación. Además, luego del tratamiento térmico al que son expuestos los residuos, deja como resultado solamente la mezcla de gases, eliminando las cenizas que se producen en

las otras tecnologías, por consiguiente hay una reducción significativa de residuos. Esto determina que la instalación de una planta de gasificación por plasma va a requerir de un menor espacio físico en comparación a las demás tecnologías, por lo tanto, se le asigna el mayor puntaje. Comparándola con la gasificación por plasma, la gasificación convencional si requiere de un tratamiento de los residuos previo a la etapa de la gasificación, y al final no se eliminan todas las cenizas como en la anterior tecnología, por ende, requiere de un mayor espacio y por esta razón se le asignan 3 puntos. La pirólisis cuenta con proceso muy similar al de la gasificación, con la diferencia principal que se trabaja en ausencia del oxígeno. Hay pocas plantas de este tipo en el mundo en comparación con las demás tecnologías, la pirólisis no es tan utilizada para producir energía eléctrica, sino que se utilizará para producir biocombustibles para la industria del transporte. Por ejemplo, en Costa Rica la empresa Balance Energy utiliza el plástico para convertirlo en combustibles como gasolina y diésel. Las plantas que existen de pirólisis no son de gran tamaño, pero analizando que el uso es más enfocado en combustibles es que se le asignan 2 puntos.

El proceso de la incineración, a diferencia de los anteriores, inicia almacenando los residuos adecuadamente, y posterior a eso se realiza el preprocesamiento de estos. Esta etapa comprende tratamiento *in situ* y operaciones de mezcla, donde se separan los residuos más voluminosos, y se lleva a cabo la trituración, tamizado, separación y densificación para luego ser ingresados al horno que se encarga de la incineración, al final del proceso quedan cenizas y estas pueden tener metales pesados, y deben de ser llevadas a un vertedero especial donde se tratan, o tratarlas en la misma planta de incineración. Todo esto aumenta el tamaño de la planta significativamente y por ende se considera que esta tecnología es la que más espacio físico requiere, por lo tanto, se le asigna el puntaje mínimo.

### G. Rentabilidad

Para lograr evaluar la rentabilidad es necesario correlacionar análisis independientes y encontrar elementos comunes que permitan definir valores comparativos financieros de valor actual neto (VAN), tasa Interna de retorno (TIR) y periodo de recuperación de capital (PRC), con el propósito de establecer cuál es la tecnología con mayores y mejores prestaciones financieras. En Chile, [19] evaluó financieramente la construcción de una planta de aprovechamiento de RSU, comparando la gasificación por plasma con la incineración. La gasificación por plasma resultó con un VAN de -\$23 064 243, una tir de 3 % y un PRC de 18 años. Por su parte, el caso con incineración resultó con un VAN de \$90 878 309, una TIR de 33 % y un PRC de 5 años. Similarmente, [14] comparó la gasificación convencional con la gasificación por plasma en tres escenarios (favorable, intermedio y desfavorable) en España, resultando que la gasificación por plasma tiene un rango de VAN entre -€86 879 482 y €82 235 218, y TIR entre -1 % y 13 %, mientras que la gasificación convencional tiene

un rango de VAN de -€87 200 912 y €61 235 218, con TIR entre -5 % y 12 %.

La tecnología de gasificación por plasma es el elemento común entre ambos estudios; sin embargo, sus resultados no permiten establecer una correlación entre las tres tecnologías involucradas. La interconexión entre estas tecnologías se puede establecer a través de la jerarquización por comparación directa e indirecta. Se establece, de acuerdo con los datos recopilados, el siguiente postulado: La incineración es más rentable que la gasificación por plasma, y la gasificación por plasma es más rentable que la gasificación convencional.” Lo anterior permite establecer una jerarquía entre estas tres tecnologías, que coloca a la incineración en la posición superior, a la gasificación convencional en la posición inferior, y a la gasificación por plasma en la posición intermedia. Con respecto a la pirólisis, la información disponible plantea el hecho de que dicha tecnología se utiliza de manera conjunta y complementaria a la gasificación convencional para mejorar la efectividad de dicha tecnología, lo cual la convierte en una tecnología complementaria, que no ha alcanzado los niveles comerciales óptimos, debido a que su tecnología no ha sido desarrollada a gran escala [20]. Paradójicamente, y sin omisión de dicha información, para el caso de la pirólisis, y tomando como referencia una planta con una capacidad de 260 000 – 370 000 ton/año de capacidad, se tiene un costo de capital, de mantenimiento y de operación menor, en comparación con la incineración masiva, debido a la alta eficiencia en la conversión de energía química a eléctrica; y debido también a que el flujo volumétrico de gas es mucho menor al que se obtiene en la incineración convencional, lo cual abarata los costos de tratamiento de los gases resultantes del proceso

### H. Emisiones

Para los criterios de este aspecto en los casos de la gasificación convencional, la pirólisis y la incineración se toma en cuenta lo mencionado en un estudio de prefactibilidad técnica y económica para una instalación de valorización térmica de residuos sólidos municipales con recuperación de energía eléctrica [19], con datos de emisiones detallados en [21]. Con base en dichos estudios, se establece que las emisiones tóxicas promedio por tecnología son 2 800 mg/Nm<sup>3</sup> para la pirólisis, 3 130 mg/Nm<sup>3</sup> para la gasificación y 4 375 mg/Nm<sup>3</sup> para la incineración. A pesar de que la gasificación por plasma no aparece en los estudios anteriores, la documentación y estudios encontrados la colocan por encima a cualquiera de las demás tecnologías existentes, dado que por las altas temperaturas en las que trabaja, posee una mayor eficiencia en la eliminación de emisiones. No obstante, y como una consideración adicional, en ausencia de un valor determinado, y ante la imposibilidad de establecer una referencia y posterior proporcionales, se toma la decisión de ubicar a esta tecnología y la inmediata sucesora, es decir, la pirólisis, en el primer lugar de esta evaluación, otorgándosele a ambas el máximo puntaje.

### I. Reducción de residuos

En el estudio realizado por [12] se determina la reducción esperada de relleno sanitario por tecnología. De este modo, la incineración tiene un rango de reducción entre 75 % y 90 %, la pirólisis de 72 % y 95 %, y la gasificación convencional de 94 % al 100 %. Para el caso de la gasificación por plasma, se esperan valores al menos iguales a la gasificación convencional, por lo que se les asigna a ambas el puntaje máximo.

### J. Reutilización de residuos

La gasificación por plasma, además de generar electricidad puede producir otros productos derivados tales como baldosas arquitectónicas, ladrillos para construcción, lo que la hace económicamente rentable [22]. De las 4 tecnologías es la que se considera de mejor aprovechamiento de los subproductos que se generan, por esta razón se le asigna la puntuación máxima. Los subproductos de la pirólisis son generalmente carbón no convertido y/o carbón vegetal y cenizas, pero por el tipo de proceso se genera en mucha más abundancia combustibles líquidos y gaseosos. En este caso se le asignan 3 puntos a la pirólisis, dado que es la tecnología que más se aprovecha el subproducto, sin embargo al no ser el enfoque de generación eléctrica no se le da el máximo puntaje. La gasificación convencional no opera a muy altas temperaturas, por lo tanto, las cenizas y el carbón restantes (materia de biomasa remanente no procesada completamente) aún deben ser manejados como un residuo peligroso en la disposición final de los desechos. No obstante, al igual que en la pirólisis, se pueden obtener algunos combustibles en el proceso de la gasificación, por lo que se le asigna una puntuación de 2. En la incineración, al final del proceso quedan las cenizas que representan alrededor del 10 % del volumen original de los RSU alimentados y pueden ser destinadas para confinamiento en un relleno sanitario o para su utilización en aplicaciones como material base de carreteras o de construcción [23]. Sin embargo, hay que considerar que estas cenizas pueden contener metales pesados o material contaminado y se deban de tratar adecuadamente, por lo que se le asigna la puntuación mínima.

### K. Huella de carbono

La gasificación por plasma emite menor cantidad de CO<sub>2</sub> como parte del proceso (1.42 lb CO<sub>2</sub>/MWh) en comparación a incineración masiva (2.98 lb CO<sub>2</sub>/ MWh), [20]. Para el caso de la gasificación convencional y la pirólisis, el CO<sub>2</sub> resultante de sus procesos de tratamiento termoquímicos es un componente porcentual del syngas o gas de síntesis, con aplicación directa a sus aplicaciones industriales respectivas. Datos del [24] permiten caracterizar la composición del syngas y el tipo de gasificador para la gasificación convencional, demostrando una baja huella equivalente. La pirólisis tiene un proceso muy similar a la gasificación, con variaciones en temperatura y niveles de oxígeno; por lo que es de esperarse que su

comportamiento en términos de CO<sub>2</sub> sea muy similar para ambas tecnologías. Con base en los datos anteriores se tiene que la tecnología que emite más CO<sub>2</sub> es la incineración; seguida la gasificación por plasma, la cual destina casi el 50 % de su syngas a la sostenibilidad térmica de su proceso [25], quedando la pirólisis y la gasificación como las tecnologías con menor emisión de CO<sub>2</sub>.

Tabla I  
VALORES OBTANIDOS, POR CRITERIO, PARA CADA TECNOLOGÍA WTE CONSIDERADA

Criterio	Tecnología			
	Incineración	Gasificación	Gasificación por plasma	Pirólisis
Legalidad	1	1	1	1
Accesibilidad	4	3	2	1
Generación	2.9	1.3	4	1
Poder calorífico	3	2	4	1
Costo	4	2.8	2	2
Dimensiones físicas	1	3	4	2
Rentabilidad	4	2	3	1
Emisiones	1	3.6	4	4
Reducción de residuos	2	4	4	2.1
Reutilización de residuos	1	2	4	3
Huella de carbono	2	4	3	4
Total	<b>32.9</b>	<b>29.7</b>	<b>43</b>	<b>21.1</b>

### III. DISCUSIÓN

En cuanto al aspecto legal, en Costa Rica existe el decreto ejecutivo vigente N° 39136-S-MINAE Reglamento sobre Condiciones de Operación y Control de Emisiones de Instalaciones para Coincineración de Residuos Sólidos Ordinarios que regula el uso de plantas de coincineración, en donde deja claro que cualquiera de las tecnologías mencionadas en esta investigación entra dentro de dicho decreto. Este establece todas las condiciones que debe de cumplir una planta WTE en Costa Rica para poder funcionar, mismas que son muy rigurosas y que se mencionaron las más importantes en el marco teórico. A pesar de que en Costa Rica existe la aprobación de este tipo de tecnologías y hasta son mencionadas como una alternativa en el Plan Nacional de Expansión 2018-2038, que entre otras cosas busca que Costa Rica se convierta en carbono neutral, existe siempre una negativa de algunos sectores del país que no están de acuerdo. Las mismas instituciones del estado como el caso de la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA), que debe

de dar el aval para el inicio del proyecto de este tipo, tardan mucho realizando los estudios y hasta el momento las empresas privadas que han estado intentando invertir en Costa Rica, no han tenido el aval para realizar los proyectos.

Como se mencionó, la incineración es una tecnología madura que ha demostrado cierto grado de efectividad [26]. No obstante, eso deja poco rango de mejora, que, sumado al espacio físico requerido, sumado a sus emisiones equivalentes y posible uso de residuos como subproductos la ubican en una posición desfavorable, especialmente en zonas urbanas densamente pobladas. En este sentido, la gasificación y gasificación por plasma, como tecnologías en crecimiento, aun pueden mejorar en sus debilidades, pudiéndose ubicar como alternativas más sólidas una vez alcanzada la madurez. Similarmenete, la pirólisis aun se encuentra en una etapa de crecimiento, sin embargo, sus características la hacen menos idónea para tratamientos de desechos a gran escala.

De los aspectos más importantes de analizar es la capacidad de generación eléctrica que poseen las plantas WTE en general, es uno de los puntos en donde entra en algunas discusiones la viabilidad de este tipo de tecnologías. Uno de los detalles es la demanda de energía que requieren este tipo de plantas para subsistir, además que, debido al menor poder calorífico de los residuos en comparación con los combustibles fósiles, se necesita una cantidad superior de los RSU en relación de lo que se necesita de combustibles fósiles para generar electricidad. En las plantas de incineración los niveles de eficiencia han ido aumentando con el tiempo, y se reportan eficiencias eléctricas netas de 22-26 % en este tipo de plantas. Sin embargo, existe una planta de cuarta generación construida en Holanda por Amsterdam's Afval Energie Bedrijf (AEB), que ha reportado eficiencias eléctricas netas superiores al 30 % lo que muestra que la tecnología de incineradores puede alcanzar tanto un alto nivel de energía, así como la recuperación de materiales [27].

En un estudio realizado por [28], se menciona que la eficiencia eléctrica neta de una planta de incineración de RSU generalmente varía de 15 a 25 % dependiendo del tamaño de la planta y las condiciones de vapor. En comparación con las plantas de combustibles fósiles las eficiencias son relativamnete bajas debido al menor valor calorífico del combustible y las limitaciones de las temperaturas del vapor para evitar la corrosión excesiva causada por los gases ácidos y otros compuestos producidos por la combustión de los RSU. Sin embargo, se pueden lograr eficiencias de hasta el 30 % (solo electricidad) utilizando técnicas de recuperación de energía más avanzadas. A pesar del hecho de que la gasificación por plasma tiene un rendimiento del 85 %, afectado por el autoconsumo de sus gases de síntesis para generar la energía eléctrica que mantiene las altas temperaturas del plasma, se obtiene que es la tecnología con mejores prestaciones eléctricas.

La literatura encontrada menciona que se debe de realizar un estudio detallado del poder calorífico de los residuos en donde se pretende instalar una planta WTE, para determinar si

es factible una planta de tecnologías de valorización de desechos. Algunas de las tecnologías en estudio aprovechan mejor los residuos que otras, dependiendo de la composición y porcentaje de humedad de los residuos, su poder calorífico, la cantidad de residuos producidos en sitio y la capacidad de procesamiento de la tecnología WTE. Existen importantes barreras técnicas que inviabilizan económicamente a la incineración, como lo es el caso del valor calorífico y del contenido de humedad de los RSM que influyen directamente sobre los costos operativos. Cuando las plantas de incineración operan con RSM de bajo valor calórico y alto contenido de humedad, consumen combustibles adicionales como lo son diésel, bunker, carbón [29]. También un alto contenido de humedad demandará de tratamientos adicionales para secar los RSM antes de alimentar la cámara de combustión, [20].

Se dice que para aplicar incineración es aconsejable el uso de residuos de mayor poder calorífico como plásticos, papeles, etc., [30]. El valor del poder calorífico inferior debe ser por lo menos 6 MJ/kg de RSM durante todo el año, y el valor calorífico anual promedio nunca debe caer bajo de 7 MJ/kg; un valor inferior de poder calorífico inviabilizaría económicamente a la alternativa de incineración, especialmente para generación de energía eléctrica, [20]. En la gasificación por plasma se pueden majear desechos peligrosos, como los desechos hospitalarios y hasta los desechos radiactivos que por sí solos el tratamiento tarda muchos años en ser eliminados de la tierra, al entrar estos en contacto con la antorcha de plasma no va a quedar ningún organismo vivo. Aunque este tipo de desechos peligrosos no aportan mucha energía útil, la tecnología da la facilidad de tratarlos de manera amigable con el ambiente [25].

La rentabilidad de los proyectos por lo general es un punto clave en la etapa de prefactibilidad. En el caso de que el proyecto sea por inversión privada, o una alianza público-privada, debe existir una ganancia económica para ser atractivo. En algunos casos, el gobierno puede dar beneficios fiscales o subsidios a proyectos de primera necesidad de modo que estos sean más atractivos. En caso de tratarse de un proyecto por inversión pública, la ganancia del proyecto puede ser menor o incluso negativa en términos económicos, si se demuestra que el gasto asociado corresponde a la mejor solución posible a una necesidad dada. En este caso, los resultados demuestran que la incineración sería el proceso ideal, especialmente dada la madurez de la tecnología, ya que invertir en tecnologías en crecimiento como la gasificación y la gasificación por plasma conlleva riesgos asociados al desempeño de la tecnología en el mediano y largo plazo, así como mayores costos iniciales, lo que se traduce en indicadores financieros poco atractivos, como se demostró.

Como contra parte, el impacto medioambiental está tomando mayor peso en la toma de decisiones. En la actualidad, los requerimientos para que entre en funcionamiento una planta WTE son más rigurosos que los que se manejan para el control de emisiones de la industria. Por ejemplo, en la incineración, los métodos de depuración de



gases son tan eficaces que las emisiones contaminantes son despreciables, y están muy por debajo de las de otras plantas industriales. Es por esto que una parte sustancial del coste de una planta incineradora se debe a sus sistemas de tratamiento de efluentes. Según [31], el nivel de emisiones de dioxinas y furanos permitido en plantas de incineración de RSU significa una probabilidad de contraer cáncer de 7 en cada 100 millones de personas que vivan alrededor de las instalaciones, esas probabilidades son casi 250 veces menores de las que tendrían los vecinos alrededor de un relleno sanitario. Es importante mencionar que las plantas de incineración de RSU tienen la obligación de cumplir de manera estricta los valores permisibles para las emisiones gaseosas, por ejemplo la directriz europea 2000/76/EC, y problemas como el aumento de las emisiones de dioxinas han sido superados, debido a la mejoría de los sistemas de limpieza de gases de combustión [35].

En el caso de la pirólisis dado que la composición del combustible sólido recuperado es más uniforme que los RSM simples, la combustión del combustible sólido recuperado es más uniforme disminuyendo así la cantidad de gases tóxicos emitidos con relación a la incineración masiva convencional. Si bien los metales no combustionan, debido a las altas temperaturas existen fracciones de metales pesados en los gases emitidos y en las cenizas volantes, presencia que es menor al combustionar RDF en lugar de RSM simples, [32].

Según [33], la temperatura de los procesos de gasificación por plasma cuenta con una magnitud más amplia que aquella que se espera lograr con la incineración. Estas altas temperaturas son mucho más efectivas para descomponer químicos peligrosos y el proceso tiende más fácilmente a un enfriamiento rápido de los gases residuales, lo que puede limitar la formación de químicos tóxicos como los componentes de las dioxinas y bencinas. Aunque el tratamiento con plasmas térmicos no necesariamente elimina la necesidad de tratar los gases residuales o los residuos, normalmente resulta en una conversión significativamente mayor de material orgánico en gas, y un mayor porcentaje de recuperación de calor y una necesidad mucho menor de tratar los gases residuales. Un estudio realizado por [34] menciona que algunos sistemas diseñados para la realización de pirólisis, los cuales utilizan temperaturas hasta de 800 °C, conllevan a la producción de especies volátiles e incluso material que no puede ser retenido mediante filtrados y esto genera impactos a nivel de la calidad del aire. Por el contrario, la gasificación por plasma reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que las temperaturas alcanzan niveles que permiten la disociación de la mayoría de los elementos por lo que se generan gases con pocos residuos de otros compuestos.

Con respecto a la reducción de residuos, los resultados demuestran una variación considerable entre tecnologías. Según [33], en la gasificación por plasma las temperaturas altas permiten un tratamiento mejorado de residuos inorgánicos que quedan. Los materiales inorgánicos se licuan para separar con facilidad los metales de otros componentes

inorgánicos, lo que aumenta el valor agregado del flujo de desechos al reducir aún más el volumen de desechos y obtener un coproducto que se puede vender. Los residuos no metálicos se mantienen en la escoria fundida que ocupa un volumen menor que los residuos de la incineración o pirólisis convencional debido a la reducción de vacíos y reducir aún más el valor negativo de los desechos. Además, la alta temperatura y rápida transferencia de calor destruye cualquier resto orgánico como tejidos, fluidos, bacterias o virus. [14]. De este modo, los residuos sólidos vitrificados han demostrado niveles muy bajos de lixiviación, comúnmente por debajo de los niveles requeridos por ley, y pueden usarse en un relleno sanitario o como un agregado en construcción [25], mientras que el gas resultante puede usarse como combustible.

La gasificación convencional tiene una capacidad reductora hasta de un 90 % de los residuos que iban a ser destinados a un vertedero o un relleno sanitario. La gasificación produce entre el 8 % y el 12 % de ceniza, mientras que la incineración produce entre 15 % y 20 %. La gasificación de biomasa reduce la cantidad de los RSU que va directamente para un relleno sanitario o vertedero, de esta forma se previene la emisión de metano debido a la descomposición anaeróbica. Además, la mitigación se produce debido a la energía eléctrica generada a partir del syngas que sustituye fuentes de energía fósiles [35]. La ceniza generada como subproducto del proceso deberá ser dispuesta adecuadamente en relleno sanitario, o alternativamente usada en la industria de cemento o materiales de construcción.

En la incineración solo convierte el contenido orgánico de los RSU en energía, quedando por fuera el contenido inerte que se denomina ceniza y está compuesto de material inorgánico mezclado con residuos de metales ferrosos y no ferrosos. La cantidad de ceniza varía según la demografía de las comunidades atendidas por la instalación y la cantidad de reciclaje que se realiza. Sin embargo, las instalaciones típicas de procesamiento térmico producen cenizas en el rango de 20 % a 30 % en peso de la alimentación total de residuos [28]. Las cenizas volátiles se separan en un electro-filtro y se puede utilizar en hormigón asfáltico. El yeso es otro subproducto del tratamiento de gases de combustión, que puede ser utilizado en la producción de materiales de construcción [36].

Los subproductos de la pirólisis son gases no condensables y sólidos carbonosos, un carbón poroso muy fino, con rendimientos de entre 12-20 %. Mientras el contenido de energía del carbón es importante y representa cerca del 25 % de la energía de la materia prima, los gases de pirólisis sólo representan el 5 % y están constituidos fundamentalmente por monóxido y dióxido de carbono, y algo de metano, [37]. La pirólisis tiene la ventaja que todos los productos del proceso pueden utilizarse [38].

#### IV. CONCLUSIONES

El presente trabajo estableció un marco integral que permite comparar tecnologías WTE para un nivel de prefactibilidad. Se comparó cuantitativamente la incineración,

gasificación, gasificación por plasma y pirólisis, utilizando datos disponibles en la literatura, determinando las fortalezas y debilidades de cada tecnología en distintos aspectos. Esta información es especialmente útil para las instituciones de gobierno encargadas de desarrollar proyectos de manejo de residuos. Se considera que la tecnología de gasificación por plasma es la más adecuada para adaptarla a las necesidades del país, esta genera buenas prestaciones eléctricas, aprovecha mejor el poder calorífico de los materiales, puede tratar prácticamente cualquier desecho, inclusive los radioactivos, tiene una capacidad de reducción de los desechos superior a las demás tecnologías, y los subproductos que genera están libres de contaminación y pueden ser utilizados sin problemas como material de construcción, evitando así, tener que tratarlos o llevarlos a un relleno sanitario y por supuesto sacar provecho de económicamente de estos. Como segunda opción se considera la incineración para implementarse en Costa Rica; es muy importante revisar los avances que en materia de purificación del aire esta tecnología ha tenido; estos han sido tan significativos que actualmente el gas de nivel de emisiones tóxicas de estas plantas es inferior al de cualquier industria estándar instalada en el país con dimensiones similares a las que ocuparía una planta incineradora.

Además, se planteó un caso en el que, para que una planta sea rentable en el país debe tener una capacidad de proceso de mínimo 500 toneladas diarias; solo el cantón de San José produce 578 toneladas diarias de residuos sólidos municipales. Teniendo en cuenta los números y proporciones de los proyectos planteados en este documento y extrapolando los mismos, se puede considerar la implementación en el gran área metropolitana o alrededores una planta con una capacidad de 500 toneladas diarias, con un costo de inversión inicial de \$114,8 millones (USD), con una capacidad generadora de 51,3 MWh, siendo un proyecto puro (sin crédito) de inversión pública, tendría un VAN de \$ - 57,7 millones (USD). Un TIR del 3 % y un periodo de recuperación de capital de 18 años. Este sería un proyecto país de interés social. No siendo financieramente viable, sería un proyecto que brindaría un gran beneficio al país en materia de eliminación de residuos, y mejora de las condiciones de salud de la población en general.

Finalmente, es importante mencionar que las tecnologías WTE no compiten de manera directa con la matriz generadora de electricidad actual; pues están incluidas en el 1 % de las “otras” tecnologías cogeneradoras, entre las que está la generación fotovoltaica. Por lo que no representa una competencia plausible para el sector productor actual. Mas bien debe, verse como la solución a problemas muy serios del país como los son la contaminación por desechos sólidos municipales y emisiones de gases de efecto invernadero como los son el metano y dióxido de carbono que se generan en los rellenos sanitarios, y que estas tecnologías reducirían con resultados ya comprobados en países desarrollados hace ya varias décadas. Así mismo, las tecnologías WTE no compiten tampoco con los métodos de reciclaje actuales; estas plantas operan con los residuos no reciclables, los cuales constituyen

el mayor porcentaje de la composición gravimétrica de los residuos sólidos municipales. Sobre este mismo argumento se apoya la aseveración de que estos procesos no son generadores de desempleo.

## REFERENCIAS

- [1] Grupo ICE . (2019). Plan de Expansión de la Generación Eléctrica 2018-2034. San José, Costa Rica.
- [2] Grau, A., & Farré, O. (2011-2020). Situación y potencial de valorización energética directa de residuos.
- [3] Arvizu, J. L. (2010). La basura como recurso energético. Ingeniería civil, edición 496.
- [4] ISWA, Asociación Internacional de Desechos Sólidos. (2012). Waste-to-Energy State-of-the-Art-Report. Statistics 6th Edition. Obtenido de [https://www.iswa.org/index.php?eID=tx\\_iswaknowledgebase\\_download&documentUId=3119](https://www.iswa.org/index.php?eID=tx_iswaknowledgebase_download&documentUId=3119)
- [5] Gray, L. (2 de Abril de 2014). MANE 6960 – Solid and Hazardous Waste Prevention and Control Engineering. Plasma Gasification as a Viable Waste-to-Energy Treatment of Municipal Solid Waste. Hartford, Connecticut, USA.
- [6] IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). (Octubre de 2007). Biomasa Gasificación. Madrid. Recuperado el 2 de Noviembre de 2020 Ijgosse.
- [7] Bejarano, P. (23 de Agosto de 2018). Blogthinkbig.com. Obtenido de <https://blogthinkbig.com/es-primera-planta-africa-convierte-basura-energia>
- [8] Reyes, D. (17 de Agosto de 2015). El tiempo. Obtenido de [eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16247998](http://eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16247998)
- [9] Waqas Ahmad, Muhammad Hassan, Shah Fahad Bin Masud, Muhammad Saad Amjad, Fatin Samara, Zeshan, Mustafa Anwar, Muhammad Zeeshan Rafique, Tahir Nawaz, (2024). Socio-economic benefits and policy implications of generating sustainable energy from municipal solid waste in Pakistan, Energy and Climate Change, Volume 5, 100124, <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2023.100124>.
- [10] Emmanuel Nketiah, Huaming Song, Tao Gu, Mavis Adjei, Gibbson Adu-Gyamfi, Bright Obuobi, (2024). How willing are residents to accept sustainable energy from food waste generated by anaerobic digestion projects?, Energy, Volume 298, 131387, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131387>.
- [11] Mideplan. (2020). Objetivos de Desarrollo Sostenible Costa Rica 2020. Costa Rica. Recuperado el 19 de Agosto de 2020
- [12] Topfer, K. (2012). Converting urban organic waste to energy - a study of the biogas potential in san luis potosí, mexico. Alemania.
- [13] StoppingClimateChange.com. (Marzo de 2015). Plasma Torch Wood Pellet to Syngas Gasifier. Recuperado el 20 de Setiembre de 2020, de <file:///C:/Users/PC/Documents/Licenciatura%20electricidad/Tesis/documentos%20pa-ra%20analisis%20de%20resultados/5%20Plasma%20Gasifier.html>
- [14] Fernández García, M. (2016). Análisis tecno-económico de la gasificación de residuos sólidos urbanos mediante plasma térmico. Sevilla, España. Recuperado el 22 de Octubre de 2020.
- [15] Themelis, J. (2003). Guidebook for the Application of Waste to Energy Technologies in Latin America and the Caribbean.
- [16] García Mainieri, E. (Diciembre de 2015). Estudio de pre-factibilidad técnica para la incorporación de plantas de generación de energía a partir de residuos. Costa Rica.
- [17] UNSAT, G. (2011). Diagnóstico sobre la gestión de los residuos sólidos en el San José.
- [18] Stringfellow, T. (13 de 01 de 2014). Una evaluación de ingeniería independiente de tecnologías de conversión de residuos en energía. Recuperado el 14 de Setiembre de 2020, de <https://www.renewableenergyworld.com/2014/01/13/an-independent-engineering-evaluation-of-waste-to-energy-technologies/#gref>
- [19] Tomás Cid Coffré, A. (2016). Análisis técnico económico de planta térmica de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos municipales para Santiago de Chile. 57. Chile. Recuperado el 27 de Octubre de 2020

- [20]Ministerio del Ambiente. (2013). Evaluación de necesidades tecnológicas para la generación de energía a partir de RSU. Quito , Ecuador.
- [21]Amphos21. (2013). Antecedentes del Aprovechamiento Energético de la Fracción Biodegradable de los Residuos Sólidos Domiciliarios y No Domiciliarios. Recuperado el 20 de Setiembre de 2020, de [http://dataset.cne.cl/Energia\\_Abierta/Estudios/Minerg/11\\_Informe%20Final\\_Antecedentes%20del%20aprovechamiento%20energ%C3%A9tico%20de%20la%20fracci%C3%B3n%20biodegradable%20de.pdf](http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/Estudios/Minerg/11_Informe%20Final_Antecedentes%20del%20aprovechamiento%20energ%C3%A9tico%20de%20la%20fracci%C3%B3n%20biodegradable%20de.pdf)
- [22]Moustakas, K., Xydis, S., Malamis, K.-J., Haralambous, & M, L. (2008). Analysis of results from the operation of a pilot plasma gasification/vitrification unit for optimizing its performance. 151, 473-480.
- [23]Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2012). Guía de generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos. México.
- [24]Instituto para la diversificación y ahorro de la energía,. (2011). Estudio técnico PER 2011 – 2020,» IDAE, Madrid, 2011. Situación y potencial de calorización energética directa de residuos. Madrid.
- [25]Mora Meléndez , J. (Noviembre de 2017). You Tube. Recuperado el 11 de Octubre de 2020, de <https://www.youtube.com/watch?v=Wl6lg-oB0HI>
- [26]Corporación Ruta N. (2016). Informe No. 1 Área de oportunidad Waste-to-Energy–Residuos Sólidos Urbanos. Obtenido de [www.brainbookn.com](http://www.brainbookn.com)
- [27]Van Berlo, M. (2007). Value from waste. Amsterdam’s vision on the 4th generation Waste2-Energy. Amsterdam.
- [28]López Camacho, S. (2018). Planta de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos. Sevilla, España. Recuperado el 24 de Octubre de 2020
- [29]Liu, Z., & Liu, Z. (Agosto de 2006). Status and prospect of the application of municipal solid waste incineration in China.
- [30]Oliveira , B. L. (2004). Potencial de Aproveitamento Energético de Lixo e de Biodiesel de Insumos Residuais no Brasil. Río de Janeiro , Brazil.
- [31]Henriques, R. M. (2004). Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: uma Abordagem Tecnológica. Río de Janeiro , Brazil.
- [32]Cheremisinoff, N. P. (2003). Handbook of Solid Waste Management and Waste Minimization Technologies. 158, 2809-2814. Environmental Pollution.
- [33]Vargas Blanco, V. I. (2012). Determinación del potencial y los requerimientos para aplicar la tecnología de gasificación por plasma en el tratamiento de desechos y la producción de energía eléctrica en el país. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Física . Recuperado el 6 de Octubre de 2020.
- [34]Muñoz Bolaños , G. (2018). Revisión de la Gasificación por Plasma, una Tecnología para Reutilizar y Producir. Colombia. Recuperado el 20 de Setiembre de 2020
- [35]Climatetechwiki. (2006). Combustion of Municipal Solid Waste for District Heat or Electricity. Obtenido de <http://climatetechwiki.org/technology/msw-wte#Climate>
- [36]Escobar , J. C., Rua, D. J., Melo, A. I., Martínez, A. M., Mambeli, R., & Silva, E. E. (2017). Generación de energía a partir de reisuos sólidos urbanos.
- [37]Müller, N., Tessini, C., Segura, C., & Grandón, H. (7 de Noviembre de 2016). Pirólisis Rápida de la Biomasa. Recuperado el 28 de Octubre de 2020
- [38]Valdeavellano Navarro, P. A. (Agosto de 2013). Instalación de una Pllanta de Pirólisis para la Valorización de Neumáticos Fuera de uso para la Empresa Reinvent. Santiago de Chile. Recuperado el 1 de Noviembre de 2020