

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
ESCUELA DE FÍSICA



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

Informe final

Investigador coordinador:
Dr. Víctor Iván Vargas Blanco

2012

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
ESCUELA DE FÍSICA

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

Investigador coordinador:

Dr. Víctor Iván Vargas Blanco
Instituto Tecnológico de Costa Rica
e-mail: ivanvargasblanco@gmail.com

Investigador colaborador:

Dr. Sebastian Tallents
Instituto Tecnológico de Costa Rica
e-mail: sebastian.tallents@gmail.com

Índice general

1. Introducción

- 1.1 Tratamiento de desechos con plasma térmico
- 1.2 Objetivos de este informe

2. Metodología

- 2.1 Estudio sobre desechos en Costa Rica
- 2.2 Revisión bibliográfica de los procesos de tratamiento de desechos con gasificación por plasma
- 2.3 Estudio de tecnologías disponibles y su desempeño

3. Resultados: Tratamiento de desechos en Costa Rica

- 3.1 Desechos sólidos municipales
- 3.2 Desechos sólidos hospitalarios
- 3.3 Químicos tóxicos

4. Resultados: Procesos de gasificación por plasma

- 4.1 Incineración, pirólisis, gasificación y tratamiento de desechos con plasma
- 4.2 Métodos para crear, mantener y enfriar plasmas térmicos
 - 4.2.1 Arcos transferidos y no transferidos y plasmas por radiofrecuencia
 - 4.2.2 Densidad de potencia y temperaturas
 - 4.2.3 Consideraciones del gas de trabajo
 - 4.2.4 Enfriamiento y control de residuos
- 4.3 Procesos y tipos de desechos
 - 4.3.1 Pirólisis para desechar químicos peligrosos
 - 4.3.2 Desechos sólidos hospitalarios
 - 4.3.3 Separación, compactación y vitrificación de desechos sólidos

5. Resultados: Tecnologías existentes de gasificación por plasma térmico y su desempeño

- 5.1 AlterNRG
- 5.2 Advanced Plasma Power
- 5.3 Plasco

6. Discusión y conclusiones: Aplicación del tratamiento de desechos con plasma en Costa Rica

- 6.1 Consideraciones económicas para la implementación de tratamientos por plasma térmico

- 6.1.1 Desechos sólidos municipales
- 6.1.2 Desechos hospitalarios
- 6.1.3 Desechos tóxicos
- 6.2 Desarrollo de tecnologías de tratamiento por plasmas térmicos
 - 6.2.1 Elección de flujo de desechos
 - 6.2.2 Consideraciones técnicas

7. Recomendaciones

Referencias

Resumen

Este informe se enfoca en la implementación de tratamientos con plasmas térmicos como una alternativa o complemento para métodos existentes para el manejo de desechos en Costa Rica. Se tomó en cuenta varios desechos posibles y se evaluó la factibilidad de comprar sistemas existentes o crear versiones locales de estas tecnologías.

Palabras clave: Plasma, gasificación, tratamientos de desechos, desechos sólidos, desechos tóxicos, desechos médicos, energía

Capítulo 1

Introducción

El rápido desarrollo económico se traduce en una producción de desechos en Costa Rica que aumentará dramáticamente en el 2022. Actualmente los desechos sólidos se botan generalmente en rellenos sanitarios y vertederos de basura y los desechos químicos se esterilizan o se tratan químicamente para poder enviarlos a rellenos sanitarios o se incineran a altas temperaturas en hornos de cemento. Sin embargo, la cantidad de nuevos sitios que tienen el potencial para manejar económicamente la producción de desechos son pocos y los sitios existentes se encuentran cerca de sobrepasar su capacidad. Además, los desechos en rellenos sanitarios se descomponen y producen metano (un poderoso gas de efecto invernadero, cuatro veces más potente que el dióxido de carbono) el cual se puede filtrar fuera del sitio hacia la atmósfera y socaba el compromiso de Costa Rica de reducir sus emisiones de gases efecto invernadero.

Este enfoque del tratamiento de desechos no es sostenible a largo plazo: el aumento del volumen de desechos, la escasez de vertederos y el impacto ambiental han inspirado la promulgación de la Ley para la Gestión Integral de Residuos [1] como parte de una estrategia nacional [2] para minimizar los desechos y tratar algunos de los impactos sociales y económicos de los métodos actuales de tratamientos de desechos.

Además de los problemas de desechos sólidos, los materiales peligrosos se producen en la industria y en hospitales y se deben desechar de manera segura. En algunos países se utiliza la incineración para destruir los desechos y usan el calor producido para generar electricidad o para el calentamiento industrial. Al reducir la cantidad de residuos sólidos y asegurar que todo el material orgánico se libera como dióxido de carbono en vez de metano, las emisiones que aumentan el calentamiento global se pueden reducir realmente comparado con un vertedero. No obstante, la incineración genera cenizas y emisiones tóxicas como furanos y dioxinas.

El tratamiento con plasmas térmicos describe una serie de procesos en los cuales un plasma a alta temperatura se usa para descomponer los materiales de desecho en sus componentes. Estos procesos son distintos a (y ofrecen otras ventajas significativas) la incineración y métodos térmicos convencionales para el tratamiento de desechos.

1.1 Tratamiento de desechos con plasmas térmicos

En los procesos de tratamiento con plasmas, los desechos se exponen a un plasma generado eléctricamente. Comúnmente conocido como el cuarto estado de la materia, el plasma constituye un gas parcialmente ionizado a una temperatura excepcionalmente alta que supera los 10.000 K. El plasma corresponde a un gas compuesto de partículas energéticamente cargadas (tipos de átomos ionizados y electrones libres) que responden a campos magnéticos y eléctricos. El término de plasmas térmicos se usa para describir un plasma particularmente caliente en el cual los iones y electrones se encuentran en un equilibrio térmico, en contraposición con plasmas no equilibrados (plasmas no térmicos) como las descargas luminiscentes, en las cuales la energía se transmite en general por especies de electrones calientes con iones fríos. Aunque hay investigaciones de la implementación de plasmas fríos para el tratamiento de desechos, la tecnología que se comercializa en la actualidad se basa en los técnicamente más sencillos plasmas térmicos.

El uso de electricidad para generar plasmas separa la fuente de calor requerida para el proceso de la descomposición de los desechos, lo que permite un mayor control de las temperaturas y de las tasas de flujo por encima de los métodos de tratamiento térmico convencionales. Esto permite tratar un rango más amplio de desechos, asegurar que las emisiones y los residuos peligrosos se reduzcan y, con regularidad, se traduce en un mayor porcentaje de aprovechamiento del calentamiento de los desechos.

Durante el tratamiento del plasma, los materiales sólidos inorgánicos (por ejemplo, el contenido de bajo carbono) se someten a una fase de cambio y producen una mezcla de metal fundido y escoria, el cual se reduce significativamente en volumen en comparación con el material original. Este estado puede facilitar la recuperación de metales y la escoria se puede modificar todavía más para atrapar con seguridad cualquier residuo tóxico en un material cerámico y vidrioso con un proceso llamado vitrificación. Los materiales orgánicos, entre estos el plástico, liberan gases que con regularidad contienen agua, ácidos halógenos y síntesis de gases: una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y metano el cual se puede refinar aún más para producir combustibles líquidos o incinerarse de manera limpia y más eficiente para generar calor o electricidad y potenciar el proceso. Estos procesos se analizan con más detalle en el capítulo 4.

Cabe destacar que el simple uso del plasma por sí solo no hace el proceso más limpio ni deja de producir desechos, como se piensa algunas veces: típicamente se requiere un proceso de enfriamiento (Véase la sección 4.2.4), en el cual el agua se mezcla con los gases residuales para enfriarlos y controlar los procesos químicos activados. Podría ser necesario un tratamiento adicional dependiendo de la composición de los desechos y de los estándares de descarga del agua y del gas establecido en las regulaciones. Empero, en muchos casos un enfriamiento sencillo de los gases producto de los procesos de gasificación conducen a niveles que satisfacen los estándares de los países en desarrollo y en los cuales no hay un tratamiento complementario de los gases residuales y los residuos normalmente son más sencillos y baratos que en los

procesos convencionales de tratamiento de desechos. Por lo tanto, los tratamientos con plasmas térmicos con frecuencia ofrecen un volumen extremadamente reducido de residuos y emisiones, significativamente más bajos que los límites establecidos por las regulaciones.

También es importante destacar que mientras el proceso de gasificación por plasmas no se altera en general por la composición de los desechos, los requisitos económicos y de potencia del reactor sí. Muchas afirmaciones se han hecho sobre la reducción de la red de alimentación eléctrica pero esto depende mucho del flujo de desechos a tratar. Aunque una gran parte de la viabilidad económica de los procesos de un productor comercial de electricidad se originan de la disminución del valor negativo de los desechos (por ejemplo, reducción del volumen al disminuir los costos de inflexión del relleno sanitario) y la recuperación de materiales como los metales, este no es necesariamente el caso. Como resultado, la gasificación por plasma sería viable económicamente como un medio para generar electricidad a partir de materias primas que no son residuos y que no tienen un valor negativo o a partir de un material específicamente producido para la combustión como los biocombustibles. Sin embargo, algunos proveedores de la tecnología aseguran que esto es posible.

Lo que es más, la gasificación por plasma cuenta con potenciales aplicaciones valiosas en Costa Rica. Este informe muestra tres formas posibles de flujos de desechos: desechos municipales, desechos hospitalarios y la eliminación de químicos tóxicos como residuos orgánicos y suelo contaminado. El valor negativo de estos desechos se puede reducir al disminuir los costos de eliminar de manera segura los gases residuales y los residuos y al reducir el tamaño necesario del vertedero para descomponer los residuos sólidos finales, así mismo, al recuperar el valor de los desechos con materiales que se pueden vender, como metales, y el contenido energético de la basura como el calor o la electricidad.

1.2 Objetivos de este informe

La implementación de tratamientos con plasmas térmicos constituye una solución de los retos del tratamiento de desechos en Costa Rica y meritorios de una investigación. El objetivo de este informe es investigar la factibilidad de la implementación de una tecnología de tratamientos de desechos con plasma en Costa Rica. Esto depende del estado actual del tratamiento de desechos (los tipos de desecho, su cantidad y el costo de su tratamiento), los beneficios económicos de las tecnologías existentes del plasma y el potencial para crear procesos con plasma en el país.

El enfoque metodológico escogido fue una revisión de la literatura disponible para obtener información sobre los tipos de desechos en Costa Rica, la base científica del proceso y tratar de obtener información de compañías privadas sobre el desempeño y costos de su equipo en varios flujos de desechos. Esto se analiza con más detalle en el capítulo 2.

Un aspecto clave de este proceso es estimar el valor del proceso. Se considera que los materiales de desecho tienen un valor económico negativo, el cual representa el costo de su eliminación. El objetivo de cualquier tratamiento de desechos es agregarle valor al reducir el valor negativo asociado con su eliminación o buscar recuperar algo del valor de los desechos como metales, co-productos generados gracias al proceso de tratamiento o más comúnmente al aprovechar el calor generado al incinerar los desechos.

La primera etapa de investigación de la implementación de tratamientos de desechos con plasmas térmicos en Costa Rica requiere, por lo tanto, establecer el valor negativo existente de los desechos. Con este fin, se debe determinar los diferentes tipos de desecho, sus cantidades, su composición y los métodos existentes de desecho. El camino para encontrar estos datos fue estudiar las leyes y regulaciones que gobiernan la eliminación de tipos de desechos y acercarse a varias instituciones gubernamentales y no gubernamentales para obtener información y publicaciones sobre el problema de tratamientos de desechos y a compañías privadas que trabajan con el tratamiento de desechos. Los resultados se describen en el capítulo 3.

La segunda parte del proyecto de investigación consistió en las formas en las que estas tecnologías podrían implementarse para el tratamiento de los desechos identificados en el capítulo 3. Estas corresponden a dos opciones potenciales. La primera constituye el desarrollar una versión de esta tecnología localmente. Esto presenta las ventajas potenciales de crear trabajos y actividad económica en Costa Rica y asegura la optimización del proceso para los tipos de desechos de nuestro país. El segundo enfoque es comprar productos y servicios existentes de un proveedor establecido.

Para determinar los tipos de tratamiento de desechos con plasma más convenientes para los diferentes tipos de desechos en Costa Rica y los problemas técnicos relacionados con su creación, se realizó una reseña bibliográfica de los datos revisados y publicados por colegas sobre los principios científicos y de diseño de los procesos. Los resultados de esta se presentan en el capítulo 4.

Para determinar las opciones disponibles para comprar la tecnología existente, se realizó un estudio en varias compañías y con varios productos, con el objetivo de obtener información sobre el desempeño económico y físico. Los resultados se incluyen en el capítulo 5.

Finalmente, la información sobre los desechos en Costa Rica, los fundamentos del tratamiento de desechos con plasmas térmicos y las tecnologías existentes se analizan en el capítulo 6 y una recomendación para continuar esta investigación se hace en el capítulo 7.

Capítulo 2

Metodología

La intención inicial de este proyecto fue producir un análisis cuantitativo para establecer los límites del valor económico de esta tecnología. El propósito era obtener información sobre los tipos y cantidad de los desechos producidos en Costa Rica y el costo de la eliminación existente de desechos así como los costos de las tecnologías de plasma y el valor potencial que se podría recuperar gracias al tratamiento con plasma.

No obstante, en el transcurso de esta investigación se hizo evidente que la información cuantitativa específica sobre los costos de la eliminación de desechos no se podría obtener debido a razones de sensibilidad comercial. Los generadores de desechos, como las municipalidades, hospitales etc. contratan empresas privadas para este servicio. No es parte del interés de ninguna de las partes, los generadores de desechos ni de las compañías, revelar información sobre el precio de los servicios o los costos de ofrecerlos pues erosionarían la competencia de futuros contratos. De la misma forma, los productores de tecnologías para el tratamiento de desechos con plasmas térmicos consideran la mayoría de la información y el desempeño económico y técnico como confidencial por las mismas razones. Esta información podría obtenerse con contratos de confidencialidad y otros contratos institucionales entre el ITCR y los dueños de la información deseada. Empero, la publicación de este informe debería restringirse para cumplir estos contratos.

Al usar informes de terceras partes e información de varias instituciones preparadas para publicación, se pudo reunir y analizar información suficiente para crear la base de una síntesis para mostrar una visualización general de los desechos en Costa Rica y las posibles implementaciones de tratamientos de plasma para llegar a una recomendación sobre cómo proceder con futuros trabajos.

2.1 Estudio sobre desechos en Costa Rica

El estudio sobre desechos se realizó al examinar la legislación sobre la producción de desechos y acercarse a los ministerios gubernamentales para obtener información. Particularmente, se buscó al Ministerio de Salud para obtener información sobre los tipos de desechos y los diferentes métodos de tratamiento y usar su base de datos para encontrar publicaciones sobre el tema. También se investigó otras organizaciones que han trabajado con el problema de los desechos para encontrar publicaciones y artículos que podrían ser relevantes; específicamente, los documentos e informes producidos por el Plan de Acción de Residuos sólidos.

Con esta información, se contactó a varias instituciones privadas relacionadas con los desechos para reunir más datos sobre costos, precios específicos e información técnica sobre desechos. Finalmente, se habló con los investigadores individuales asociados con el tema. Los resultados de estos acercamientos se presentan en el capítulo 3.

2.2 Revisión bibliográfica de los procesos de tratamientos de desechos con gasificación por plasma

El objetivo en esta parte del informe es obtener un conocimiento de los principios científicos detrás de la tecnología de gasificación en los tratamientos de desechos con plasmas térmicos. El propósito de esto es brindar parte del contexto para entender los beneficios y desventajas de esta tecnología y, sobre todo, obtener un claro entendimiento de las capacidades y recursos que se necesitarían para desarrollar este tipo de tecnología en Costa Rica.

Para obtener la información necesaria para esta parte del informe, se usaron tres fuentes de información principales: la información de dominio público en informes de terceras partes similares a este; información brindada por compañías de fabricantes o que usan esta tecnología, y artículos de investigaciones publicadas en revistas revisadas por pares.

Los informes de terceras partes de dominio público tienden a enfocarse en principios muy amplios de esta tecnología y carecen la especificidad de los detalles necesarios para tomar decisiones informadas sobre el desarrollo de la tecnología. De la misma forma, la información de los fabricantes tampoco se preocupa por los detalles, pues podría permitir la creación de productos competidores, y se requiere la firma de contratos de confidencialidad, lo que es inapropiado para este tipo de informe. La información más útil y detallada se encontró en artículos revisados por pares de ciencia y tecnología. De la misma forma, una parte considerable de este trabajo se completó con una revisión bibliográfica detallada al usar revistas brindadas en colaboración con el CIEMAT de España. Los resultados de la revisión bibliográfica se encuentran en el capítulo 4.

2.3 Estudio de las tecnologías disponibles y su desempeño

El objetivo de esta parte del proyecto era obtener información clara sobre el desempeño económico y técnico directamente de los fabricantes u operadores de este tipo de tecnología. Empero esta información se considera confidencial y fue difícil obtener información directamente de las compañías. La única excepción fue *PEAT Internacional*, la cual brindó algunos datos técnicos pero se reusó a divulgar más información sin firmar un contrato de confidencialidad.

Por consiguiente, la información se obtuvo de tres fuentes alternativas. La primera fue de artículos publicados en revistas revisadas por pares. Estos se consiguieron con una suscripción al CIEMAT. La información reunida fue útil pues es confiable pero podría

estar desactualizada y carece un poco de contexto. La segunda fuente consistió en informes de terceras partes como de la Universidad de California o *Jupiter Consultants*. Estos incluían información de fuentes (aún si no se podía acceder la fuente directamente, se podía verificar la información) y conclusiones generales, aún si la información específica no estaba disponible. Finalmente, se encuentra aquella información que las compañías están dispuestas a publicar en sus sitios web, la cual corresponde a un tipo de publicidad y se debe considerar optimista.

Capítulo 3

Resultados: Tratamiento de desechos en Costa Rica

El objetivo de esta sección de la investigación es resumir los diferentes tipos de desechos en Costa Rica los cuáles se podrían tratar con tecnologías de plasmas térmicos. La información principal que se buscaba correspondía a los tipos de desechos, la composición de estos y los métodos y costos de eliminarlos. Para lograr esto, se hizo una revisión bibliográfica de la literatura disponible y se contacto a varias instituciones y compañías vía correo electrónico para tratar de reunir los datos necesarios. Esto se detalla en el capítulo 2.

Desafortunadamente, solo se pudo obtener información limitada de los costos de los métodos actuales de eliminación pues las instituciones privadas la consideran confidencial y las organizaciones públicas no estaban preparadas para revelar los precios actuales pagados a los contratistas. Por lo tanto, el propósito principal de reunir datos cuantitativos de los costos de la eliminación de desechos no se pudo lograr. No obstante, se llegó a un entendimiento cualitativo del tratamiento de desechos y los resultados se presentan a continuación.

Se identificó tres tipos de desechos: desechos sólidos municipales, desechos tóxicos y peligrosos y desechos hospitalarios.

3.1 Desechos sólidos municipales

Los desechos municipales constituyen un problema en aumento en Costa Rica. Según los informes comisionados por el programa Competitividad y Medio Ambiente (CYMA) para el Plan de Residuos Sólidos (PRESOL)[3,2], en 2066 el país produjo 3780 toneladas de desechos municipales por día, equivalente a 860 gramos por persona y predijo que aumentaría a 5600 toneladas por día en 2022. La mayoría de estos desechos se producen en el Gran Área Metropolitana (GAM). El informe también predice unas 2500 del total de 4200 toneladas por día para el 2011 y un aumento progresivo de 3100 de 5800 toneladas por día en 2022. La Ref.[2] también afirma que la generación de desechos por persona en las áreas rurales es solo un poco superior que en las áreas urbanas, con una mayor proporción de biomasa.

Del material que no corresponde a biomasa, hay un potencial de reciclaje de unas 200 toneladas por día. Cinco rellenos sanitarios cumplían con la legislación en el momento del informe, cuatro en el GAM y uno fuera de esta, los cuales son responsables del

tratamiento de cerca del 55% de los desechos sólidos ordinarios con más de 39 vertederos de basura ilegales en funcionamiento. El estudio destacó que estos sitios están por expirar su vida útil y hay dificultades para encontrar nuevos sitios que cumplan las economías de escala. Ver, ref. [2].

La composición de los desechos encontrados en la ref. [3] se muestra en el cuadro 3.1. Cabe destacar que el estudio en la ref. [3] era con respecto al reciclaje y usa definiciones diferentes a las de este informe: el término orgánico en el tratamiento de desechos se usa con regularidad para hacer referencia a restos de comida, desechos de la agricultura, etc. Desde el punto de vista del plasma, el término orgánico denota el sentido químico pues implica que un material tiene un alto contenido de carbono y se pueden convertir en una síntesis de gases que incluyen biomasa, plásticos y caucho. En este informe, usaremos el término biomasa para describir desechos que en la industria de desechos se conocen como orgánicos y retener la palabra orgánico para describir todos los materiales de desecho con carbono.

Cuadro 3.1. Composición de desechos según ref. [3]

Tipo	%
Biomasa	58
Papel y cartón	21
Plástico	11
Metales	2
Vidrio	1
Otro	7

Nos enfocaremos en los cuatro rellenos sanitarios del GAM para caracterizar el problema de desechos sólidos municipales en Costa Rica. La industria está dominada por dos compañías, *WPP Continental* y *EBI*. *WPP Continental* funciona en dos rellenos sanitarios activos en el GAM: Los Mangos, Los Pinos que reciben aproximadamente 400 y 300 toneladas por día, con una vida útil estimada de 2 y 4 años respectivamente. *EBI* trabaja en dos rellenos sanitarios del GAM (Parques de Tecnología Ambiental), La Carpio (PTA Uruka) y Aserrí (PTA Aserrí). Estos dos rellenos reciben un total de 1900 toneladas de desechos por día. La vida útil esperada de estas instalaciones corresponde a veinte años pero parece que funcionan sobre la capacidad diaria planeada y, por consiguiente, podrían cerrar antes. Como resultado, el GAM envía al menos 2600 toneladas de desechos sólidos municipales por día únicamente a los rellenos sanitarios aprobados, consistentes con la proyección en la ref. [2] y respalda la evaluación que establece que los métodos de eliminación de los desechos sólidos municipales no es sostenible. Si asumimos que el cierre de Los Mangos y Los Pinos en cinco años, Aserrí y Uruka serán responsables de tratar el total de las predichas 2800 toneladas de desechos por día producidas en el GAM, casi más del 50% estimado y acortaría su vida útil. Se han identificado tres potenciales sitios para nuevos rellenos pero se encuentra bastante más largo de San José que los sitios existentes, lo que aumenta los costos del transporte [4].

Las técnicas modernas para rellenos sanitarios conllevan el uso de estudios geológicos para identificar áreas apropiadas de tierra (como en la ref. [4] en el cual la tierra y aguas subterráneas son tales que los desechos y agua contaminada tienen menos probabilidades de filtrarse del relleno y contaminar las aguas subterráneas o los ríos. La tierra se divide en celdas individuales alrededor de cuatro hectáreas en tamaño. La celda se nivela con líneas de arcilla y plástico para disminuir la permeabilidad del suelo y asegurar que la lixiviación (agua contaminada) se canalice y recolecte para ser procesada y prevenir que se filtre en el suelo. Una capa de llantas usadas también se usa para proteger las líneas de plástico contra deterioro.

Las tuberías se colocan para recolectar la lixiviación, la cual se trata para eliminar los contaminantes y después se puede usar para varios propósitos, como control del polvo. Las tuberías también se instalan para recolectar el gas natural producido por la descomposición anaeróbica de los componentes biológicos de los desechos, el cual se puede quemar en el sitio para generar electricidad. Si este gas no se recolecta, se convierte en un poderoso gas de efecto invernadero, equivalente a cuatro veces la misma cantidad de CO₂.

Los desechos se recolectan en municipalidades, con materiales reciclables separados antes de la recolección. Los restantes desechos generales se recogen y se llevan al relleno sanitario en donde se tritura y se compacta algunas veces con microorganismos inoculados para facilitar la descomposición de desechos orgánicos en gas natural (cuando la recolección de gas natural se implementa) y después se depositan en una celda, la cual se cubre con plástico impermeable y tierra cuando está llena.

Mientras que los rellenos sanitarios modernos usan este método para evitar la contaminación con la lixiviación de las aguas subterráneas y la producción de gas natural, estas tecnologías históricamente no se habían usado en Costa Rica. WPP trabaja Río Azul en nombre del Ministerio de Salud. Río Azul no recibe más desechos y las operaciones ahí en general se enfocan en el tratamiento y mejora del sitio para evitar la lixiviación y la recolección del gas metano.

WPP brindó detalles sobre la descomposición de los desechos, mostrados en el cuadro 3.1, los cuales son consistentes con las figuras encontradas en el estudio de 2006 (ref. [3]) mencionados en el cuadro 3.1, EBI afirmó que hasta el 65 % o 70 % de los desechos recibidos fueron de biomasa.

Ninguna de las dos compañías mencionó los precios, ni en términos de tarifas cobradas a las municipalidades y clientes privados ni el costo de su eliminación.

Cuadro 3.2. Porcentaje de presencia para cada tipo de desecho

Tipo	%
Aluminio	1
Vidrio	1
Botellas plásticas	6
Metales	1
Papel	11
Chatarra	1
Tela	5
Cartón	11
Madera	2
Biomasa	50
Caucho	3

3.2 Desechos sólidos hospitalarios

Los desechos hospitalarios se clasifican en el momento de generación en tres categorías: ordinarios “bolsa negra”, desechos que se eliminan como desechos sólidos municipales; “bolsa roja”, desechos que contienen materiales patológicos o infecciosos; y materiales filosos (hojas de escalpelos, agujas, etc.) que se meten en cajas duras. Los materiales anatómicos humanos, amputaciones, material de las placentas, etc. Se congelan y se llevan a cementerios.

Los materiales infecciosos se esterilizan en autoclaves, una cámara en la cual el material se expone a un vapor de alta presión con 120°C durante 15 a 20 minutos. Este proceso es efectivo para eliminar la mayoría de patógenos, aunque los priones (como aquellos que causan la enfermedad de *Creutzfeldt-Jakob*) podrían sobrevivir. Este proceso se da en los hospitales o las compañías que transportan materiales biológicos peligrosos que los recogen y los tratan en unas instalaciones centrales. Los desechos esterilizados se llevan a una planta de reciclaje con el resto enviado al relleno sanitario.

La información sobre la cantidad y tipos de desechos y los costos no se pudo conseguir sin un contrato formal entre el ITCR y varios hospitales pues el servicio de tratamiento de desechos se contrata a compañías privadas y esta información por lo tanto se considera confidencial entre el contratista y los hospitales.

3.3 Químicos tóxicos

Contactamos el Ministerio de Salud para solicitar información sobre los tipos y cantidades de desechos tóxicos y peligrosos que actualmente produce Costa Rica.

El ministerio no pudo brindar información sobre la cantidad real de los tipos de desechos producidos pues esta no se recopila.

Los tres materiales potenciales tomados en cuenta son los siguientes: aceite con sedimentos de las refinerías, plásticos contaminados con agroquímicos y llantas. Este último se considera aquí ya que tiene un contenido de sulfuro y metales en el caucho vulcanizado que produce emisiones tóxicas las cuales son problemáticas en altas concentraciones.

En general, los químicos tóxicos y peligrosos y materiales contaminados con estos químicos se incineran en hornos de cemento. Estos materiales con regularidad tienen un contenido calorífico razonable y sirven como una forma de combustible. Sin embargo, los operarios de los hornos de cemento reciben pagos para eliminar los desechos, así como ahorrar al evitar comprar combustible. Este proceso de incineración se describe en la sección 4. Además, en conversaciones previas con RECOPE, se hizo claro que ellos no estaban interesados en esta tecnología.

Capítulo 4

Resultados: Procesos de gasificación por plasma

El propósito de este capítulo es brindar un contexto para el proceso y sus beneficios potenciales y lograr una comprensión de los recursos y competencias necesarias para desarrollar tecnologías de tratamiento de desechos con plasmas térmicos.

Por lo tanto, este capítulo brindará un resumen técnico de los principios fundamentales del tratamiento de desechos con plasmas térmicos. Los procesos clave asociados con el tratamiento con plasmas térmicos constituyen la interacción entre el arco de plasma, el gas utilizado y los desechos que llevan a la gasificación de los desechos; y la química heterogénea entre los átomos conforme fluyen fuera del plasma y se recombinan.

Debido al aumento de la comercialización del tratamiento de desechos con plasma, la publicación de este tipo de información ha disminuido conforme la investigación pasa a estar a cargo de compañías privadas que clasifican esta información como comercialmente sensible y no la divulgan. Entonces, se debe subrayar que la información presentada en este trabajo se basa en la que está disponible y de dominio público, en particular los artículos de revisión en el campo como en las referencias [5, 6]. Los detalles de las implementaciones específicas de la tecnología vendida por las firmas podrían diferenciarse de las presentadas aquí, en particular debido a la integración de procesos adicionales que podrían ser necesarios (como manejar los co-productos y un tratamiento complementario de los gases producidos después del enfriamiento), los cuales se consideran más allá del alcance de este informe. La información específica de productos, procesos y equipo brindada por varias compañías se encuentra en el capítulo 5.

4.1 Incineración, pirólisis, gasificación y tratamiento de desechos con plasma

Los procesos de tratamiento de desechos con calentamiento requieren energía, la cual se conoce como el *calor del proceso*. Este contenido energético se conoce como el *valor de calentamiento* del desecho. Típicamente, el calor del proceso se puede lograr con la combustión de los desechos para recuperar su valor de calentamiento para usarse en otras partes de las instalaciones o para algún propósito comercial, como el calentamiento municipal, el calentamiento industrial o la generación de electricidad.

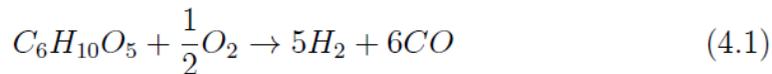
Un método típico para el tratamiento de desechos es la combustión: los desechos se queman para que las cenizas resultantes ocupen un volumen menor en el relleno sanitario. Es posible recuperar el valor de calentamiento como se describe anteriormente y venderlo a otras compañías.

Sin embargo, la combustión tiene sus limitaciones: lleva a un alto flujo de gas liberados de los desechos (*gases residuales*). La composición final de los gases residuales liberados por la descomposición de los desechos depende de las reacciones químicas que se dan entre los diferentes tipos de químicos liberados durante la combustión (reacciones químicas heterogéneas). La mezcla final constituye el equilibrio químico-térmico de estos químicos y la energía disponible y es, por lo tanto, dependiente de la temperatura: si la temperatura es lo suficientemente alta solo se formarán moléculas simples pues las grandes se descompondrán tan rápido como se forman. Si la temperatura es más baja se pueden formar químicos más complejos en los gases residuales, normalmente contaminantes orgánicos persistentes como dioxinas y furanos. Si la temperatura es muy baja podría no haber suficiente energía para activar las reacciones químicas que llevan a la formación de estos químicos; sin embargo, este umbral está por debajo de lo necesario para descomponer los desechos para empezar.

Volúmenes significativos de partículas se pueden mezclar con estos flujos de gases residuales (*cenizas suspendidas en el aire*) y las cenizas residuales se mantienen en el horno (*cenizas que quedan en el fondo*). Las cenizas en el aire y en el fondo son irritantes, pero podrían también contener toxinas (particularmente metales pesados) en un mayor nivel de concentración que el desecho original debido a la volatilidad de estos contaminantes y la reducción del volumen total del desecho inicial. Por consiguiente, aunque el volumen total de los residuos sólidos que se debe desechar en el relleno sanitario se reduce, podría ser necesario un tratamiento químico adicional y también con regularidad se requiere filtrar y limpiar los gases residuales para asegurar que las emisiones liberadas en la atmósfera (*gas de combustión*) cumplan con los estándares medioambientales requeridos por ley.

Para reducir el nivel de contaminación de los productos se usa la incineración. En la incineración, la combustión de los desechos ocurre con un proceso adicional de calentamiento con el uso de un combustible extra en forma de material de coquización (carbón o carbón vegetal) o quemadores de gas. El tanque del incinerador se alinea material refractario como el óxido de aluminio para proteger el tanque del reactor y para almacenar el calor liberado del combustible quemado y permitir controlar la temperatura para alcanzar temperaturas de hasta 700 a 1500°C. Al crear un entorno uniforme de alta temperatura, el equilibrio químico-térmico se cambia para asegurar que se formen menos moléculas complejas de contaminantes orgánicos persistentes y que los desechos se quemen completamente y, así, minimicen la producción de partículas. Aunque el uso de un combustible adicional aumenta los costos del proceso, se producen menos volúmenes de cenizas y se evitan las emisiones tóxicas aunque los desechos podrían requerir más tratamiento. El calor se puede recuperar y se puede usar para otros propósitos como se mencionó anteriormente.

La pirólisis y la gasificación constituyen dos procesos alternativos que se implementan para desechos con muchos materiales orgánicos. Los materiales de los desechos orgánicos se calientan (algunas veces solo con el valor de calentamiento del material de desecho con una combustión parcial si el material es inflamable) en un entorno con bajo o ningún oxígeno para transformar los desechos en moléculas más pequeñas y simples. El proceso químico de la pirólisis de un monómero de celulosa se muestra a continuación:



El material orgánico con regularidad se transforma en una síntesis de gases: una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y metano con propiedades similares al gas natural para propósitos de combustión, con cualquier exceso de carbón que quede como un residuo sólido carbonizado si no hay suficiente oxígeno presente, junto con cualquier material inorgánico en el desecho. La pirólisis normalmente se enfoca en la producción de líquidos de hidrocarburos y carbonizados (es el mismo proceso usado para la manufactura del carbón); en cambio, en el caso de la gasificación el objetivo es minimizar los residuos sólidos y el producción de un gas de síntesis.

Este proceso se puede usar para descomponer muchos tipos de desechos orgánicos tóxicos aunque existe el potencial de la formación de otros subproductos como dioxinas y furanos si hay halógenos en los desechos. Por lo tanto, la necesidad de tratar los gases residuales y los residuos sólidos no se elimina totalmente. La síntesis de gases entonces se puede refinar aún más en combustible líquido (como diesel, por ejemplo, con el proceso Fischer-Tropsch) o usarse como una alternativa para el gas natural para producir electricidad. Para reducir aún más el volumen de los residuos sólidos, se puede agregar más oxígeno, hidrógeno o vapor para asegurar que todo el material orgánico se convierta en una síntesis de gases, un proceso conocido como gasificación.

Un concepto clave para entender en la recuperación del calor es la temperatura en la cual se obtiene el calor: la eficiencia de la extracción de energía útil de una fuente de potencia térmica es mayor si la temperatura es mayor. Una cierta cantidad de potencia se obtiene en forma de agua caliente de un incinerador y podría usarse para calentar muchas casas: esta podría clasificarse como un calor de bajo nivel. La misma potencia se puede obtener en forma de vapor de alta temperatura (un calor de alto nivel) y podría generar electricidad, que es más valiosa. La pirólisis y la gasificación pueden, por consiguiente, permitir recuperar una mayor proporción del valor de calentamiento de los desechos de dos formas: primero, una menor porción del contenido calorífico de los desechos se convierte en calor de bajo nivel en el reactor/horno en comparación con la incineración, y, segundo, los combustibles producidos se pueden quemar con temperaturas más altas lo que permite una mayor eficiencia para convertir el calor en otras formas de energía, particularmente en la producción de electricidad.

El tratamiento de desechos con plasmas térmicos corresponde a un método de pirólisis/gasificación en el cual la característica principal de una combustión parcial de los desechos se reemplaza por un arco de plasma creado con electricidad como la fuente del proceso de calentamiento. Aunque la electricidad es significativamente más cara que la misma cantidad de energía obtenida gracias a la quema de combustibles o desechos, el proceso ofrece varias ventajas en comparación con los métodos convencionales. Como el calor del proceso ya no depende del contenido calorífico del flujo de desechos, se puede procesar un rango mucho más amplio de flujos de desechos, los cuales incluyen flujos de desechos con altos valores de calentamiento pero que son muy húmedos para su combustión, como sedimentos de aguas residuales. Además, la temperatura de los plasmas térmicos cuenta con una magnitud más amplia que aquella que se espera lograr con la combustión. 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 (a pesar de que algunas compañías asegura que es posible), 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.

Además de la conversión de componentes orgánicos del flujo de desechos en una síntesis de gases, las temperaturas altas permiten un tratamiento mejorado de residuos inorgánicos que quedan. Los materiales inorgánicos se licúan 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. Por último, el agregar ciertos fundentes como silicatos y calcitas al flujo de desechos durante el proceso puede asegurar que los residuos sólidos restantes, incluye los ácidos y metales tóxicos, se atrapan en una matriz de cerámica vidriosa en un proceso llamado *vitrificación*. Estos 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.

Las ventajas de esto en el proceso de gasificación y pirólisis con el tratamiento de plasmas térmicos en comparación con un método convencional se pueden resumir así [7, 8, 5]:

- Densidades de energía y temperaturas mucho más altas que permiten:
 - ◆ Encendido y calentamiento más rápido
 - ◆ Alta transferencia de calor y niveles de mezcla reactantes.
 - ◆ Instalaciones compactas.

- ◆ Enfriamiento rápido para un mejor control de la composición de las salidas.
- El uso de electricidad como fuente de calor que permite:
 - ◆ El desacoplamiento del calor del proceso del oxígeno y la tasa de flujo del oxidante.
 - ◆ El desacoplamiento del calor del proceso de la composición de los desechos.
 - ◆ Un mayor control de las condiciones de reacción.
 - ◆ Un mayor control de la química del proceso
 - ◆ Tasas de flujo inferiores de los gases residuales y costos reducidos de la limpieza de gas.
 - ◆ Un mayor potencial para producir coproductos que se pueden vender.

Entonces, los cuatro principios de las implementaciones de esta tecnología constituyen los siguientes: pirólisis de material orgánico para la producción de combustible, eliminación segura de materiales peligrosos, compactación de desechos sólidos y recuperación de materiales valiosos.

4.2 Métodos para generar, mantener y enfriar los plasmas calientes

Una planta entera de tratamiento con plasmas debe contener muchos subsistemas diferentes dependiendo del flujo de desechos. Un diagrama de bloques se muestra en la Figura 1, la cual muestra todos los subsistemas. Esta sección se enfocará en las partes principales del sistema: la generación de un plasma térmico de un arco de plasma con un gas de trabajo, la exposición de los desechos a esta carga térmica y la subsecuente recolección y enfriamiento de los gases residuales, escoria y metales.

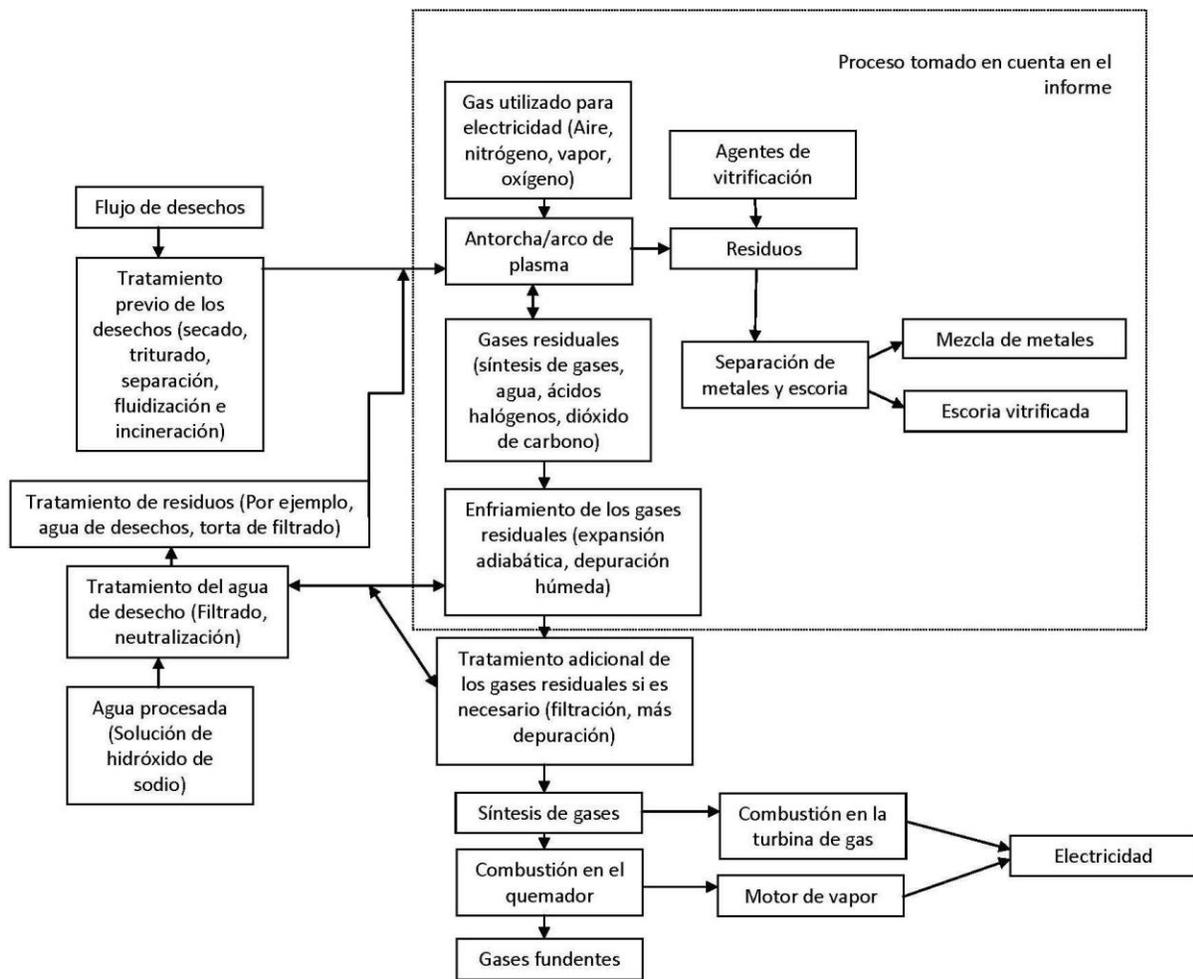


Figura 1. Diagrama de bloques de una planta entera de tratamiento con plasmas, la cual muestra todos los subsistemas

Los plasmas térmicos se generan a partir de un gas de trabajo (como aire, argón o vapor) por una descarga de arco de corriente directa (CD) o de corriente alterna (CA) [9] con el plasma en forma de columna de un gas conductor de electricidad entre dos electrodos; o de forma alternativa con una inducción de radio frecuencias (RF) [10]. Aunque es posible generar descargas térmicas de microondas, estas son normalmente un método ineficiente y poco económico cuando se implementa para el tratamiento de desechos, con excepción para una eliminación consistentemente a muy pequeña escala de algún líquido altamente peligroso o flujos de desechos de gas en los cuales el valor principal agregado es la destrucción del desechos en vez de la generación de coproductos que se pueden vender.

4.2.1 Arcos transferidos y no transferidos y plasmas de fuentes por radiofrecuencia

En el caso de las descargas de arcos, existen dos configuraciones principales: arcos transferidos y no transferidos. En el plasma de arco transferido, el arco se mantiene entre uno o más electrodos capacitivos y el material de desecho a ser tratado. Se podría usar varios electrodos capacitivos pues esto permite varios arcos entre los desechos y los electrodos; o un funcionamiento del arco con suministros de CA o trifásico. Si los desechos no son conductores, se podría insertar metal, una serie de arcos entre los electrodos capacitivos, o un pequeño arco no transferido para calentar los desechos hasta que se vuelvan lo suficientemente conductores para convertirse en el electrodo principal.

En el caso de un arco no transferido, el arco se genera con un antorcha de plasma, la cual a su vez emite un chorro de plasma. El material se puede introducir hacia arriba del arco si se puede hacer fluir, o hacia abajo con el chorro que sale de la antorcha. Los desechos se pueden exponer directamente al plasma, lo que da como resultado la atomización de los desechos, o el plasma se usa para calentar un material refractario y lograr una alta temperatura más eficientemente que con los métodos convencionales.

A diferencia de los electrodos capacitivos, la antorcha de plasma con regularidad consiste en un conjunto cerrado de electrodos cilíndricos con el chorro de plasma empujado por una boquilla gracias a las fuerzas magnetohidrodinámicas que actúan sobre el cuerpo del arco (véase la ref. [9]). Las antorchas de alta potencia tienen fundentes de calor a los electrodos y con regularidad necesitan un enfriamiento activo. El arco dentro de la antorcha se puede mantener con una alimentación de CD o de AC, o en algunas ocasiones con la inducción de RF (véase la sección 4 de la ref. [10]) para generar un chorro de plasma.

No se requiere el flujo de un gas para la operación de un arco transferido; sin embargo, el flujo de gas se puede imponer si así se desea para el proceso de eliminación de desechos, mientras que el chorro de plasma de un arco no transferido genera un flujo de plasma que podría ser útil para el proceso.

Un problema principal de la implementación de descargas de arcos es el desgaste y corrosión de los electrodos debido a los fundentes de mucho calor que experimentan y a los químicos presentes en los gases calientes alrededor del arco. Entonces, los electrodos con regularidad requieren un enfriamiento activo y/o un reemplazo regular, aunque se podrían lograr vidas útiles que sobrepasan las 1000 horas cuando el aire funciona como gas de trabajo con el uso de materiales diseñados especialmente.

Un método alternativo es el uso de la inducción de RF para mantener el plasma. Esto es distinto al uso de la inducción de RF para generar un chorro de plasma descrito en el párrafo anterior: Una corriente con frecuencia de 2-30 MHz que fluye en una bobina alrededor de la cámara del reactor induce un campo eléctrico dentro de la cámara con un voltaje de lazo suficiente para causar una descomposición de la electricidad que lleva a la formación de un anillo de plasma dentro del tanque. Entonces, el plasma se puede mantener sin entrar en contacto con elementos clave del sistema de suministro eléctrico. La potencia de RF tiende a ser menos eficiente para convertir el suministro eléctrico a potencia térmica y en general es más cara que el watt por watt de CA o CD. No obstante, podría ser económicamente viable en algunas circunstancias. Una mayor desventaja constituye la sensibilidad de las condiciones del plasma para un acoplamiento eficiente del suministro eléctrico con el plasma como se explica en la ref. [10], la cual es una desventaja del tratamiento de desechos a menos que el flujo de estos sea consistente y bien caracterizado. Aunque este enfoque se ha utilizado para la destrucción de líquidos y gases peligrosos, el flujo de desechos en el plasma debe estar optimizado con cuidado con un buen control del flujo del gas de trabajo y los flujos de desechos, lo que en general hace a este proceso menos flexible.

4.2.2 Densidad de potencia y temperaturas

Las configuraciones de arco transferido exponen los desechos a temperaturas pico más altas (12000-2000 K) [5] comparadas con una antorcha de plasma de arco no transferido (1000-14000 K en la salida de la antorcha y decae rápidamente una vez que sale), en los dos casos dependiendo del gas utilizado para generar el plasma, la ubicación de los desechos en el arco y las tasas de enfriamiento. En los dos casos, los niveles de potencia se pueden mantener desde unos pocos cientos de watts hasta megawatts dependiendo del diseño del reactor, pero, debido a que los arcos no transferidos no exponen directamente los desechos al plasma en la forma que lo hace un arco transferido, entre el 10% y el 30% de la alimentación eléctrica usada para mantener el chorro de plasma se pierde en enfriar los electrodos. La cantidad de mérito para los plasmas no transferidos es el flujo de entalpía, que corresponde a la potencia que se puede usar para procesar los desechos. Los detalles de un modelo de balance simple de energías para los arcos transferidos y no transferidos se muestran en la sección 2 de la ref. [5].

4.2.3 Consideraciones del gas de trabajo

La principal consideración al escoger el gas de trabajo corresponde a los efectos químicos en los desechos y los electrodos. El gas de trabajo constituye el gas que se

usa para generar el plasma y forma las especies principales de iones en el arco de plasma y los radicales en los gases calientes alrededor del arco. La transferencia de energía en la generación de otras especies atómicas se da típicamente gracias a los iones en el plasma a los gases neutrales que lo rodean, y es en estas especies atómicas calientes y los iones del gas de trabajo que constituyen los más químicamente activos. El gas de trabajo puede entonces tener un efecto fuerte en el desgaste de los electrodos.

El Argón con regularidad se usa como gas de trabajo en experimentos debido a su naturaleza químicamente inerte y su bajo calor específico que ayuda a prolongar la vida útil del electrodo. Sin embargo, estas son desventajas normales para los procesos industriales pues tienden a resultar en una menor transferencia energética a los desechos y a limitar la generación de oxígeno atómico (con regularidad una parte clave de los procesos electro-químicos asociados con la descomposición de desechos), como esto solo se puede generar con una relativamente más baja transferencia energética de argón a oxígeno presente en los gases residuales o materiales de desecho. Además, el argón es caro y normalmente poco rentable pues no se puede recuperar con facilidad de los gases residuales.

El aire más comúnmente usado como gas de trabajo por razones económicas y para brindar un oxígeno limitado para reacciones con materiales ricos en carbono, pero, el uso del aire tiende a traducirse en un alto contenido de nitrógeno en los resultantes gases residuales, lo que reduce la densidad energética (energía por metro cúbico) lo que puede tener implicaciones si se pretende quemarlos para generar energía térmica o eléctrica. Igualmente se podría usar oxígeno puro, tanto por esta razón como para reducir el flujo total de gas si así se desea. No obstante, las altas concentraciones de oxígeno pueden llevar a la corrosión de los electrodos y el revestimiento de los tanques del reactor.

El nitrógeno y el dióxido de carbono también se pueden usar debido a un mayor voltaje de arco de estos gases, lo cual aumenta la densidad de potencia del chorro. Finalmente los plasmas de vapor también se pueden usar, debido igualmente al alto voltaje de arco, pero sobre todo por la mezcla de hidrógeno, oxígeno y radicales de hidroxilo producidos pueden permitir reacciones químicas que tienen un impacto beneficioso en la implementación de procesamiento de desechos [11, 12], empero estas especies son particularmente corrosivas para los electrodos.

4.2.4 Enfriamiento y control de residuos

La clave para entender el beneficio de los procesos con plasmas térmicos al destruir los materiales tóxicos con respecto a procesos térmicos convencionales para tratar los desechos constituye el proceso de enfriamiento. Como se mencionó en la sección 4.1, la producción de moléculas complejas a través de reacciones químicas heterogéneas en los gases residuales durante la incineración y combustión se da por el equilibrio térmico-químico de la mezcla de moléculas producidas por los desechos y la temperatura de los gases. Si halógenos como el cloro, el bromo y el flúor están

presentes en los desechos en concentraciones suficientemente altas, como es regularmente el caso con la eliminación de químicos orgánicos, plásticos, etc., entonces estos pueden formar contaminantes orgánicos persistentes como dioxinas y furanos. Estas emisiones pueden normalmente limitarse a la separación de materiales halogenados como plásticos del flujo de desechos, por el caro tratamiento de gases o al asegurar que la temperatura sea lo suficientemente alta para que estos químicos se descompongan tan rápido como se forman. Al liberarlos en la atmósfera, la temperatura baja conforme los gases se diluyen e inhiben su formación.

Sin embargo, asegurar altas temperaturas uniformes requiere mucha energía para gastar en el calentamiento del material refractario, separar los flujos de desechos, puede ser costoso y consumir mucho tiempo y los gases residuales se producen con una muy alta tasa de flujo lo que hace que su procesamiento sea un problema complicado. Además, estas altas tasas de flujo permiten que partículas de material parcialmente quemado en cenizas suspendidas en el aire se expandan por la combustión. Estas partículas tienden a ser altas concentraciones de metales pesados y otras toxinas relativamente volátiles. Por consiguiente, la incineración de desechos municipales normalmente requiere el filtrado y tratamiento de los flujos de gases residuales.

No obstante, en los casos de tratamientos con plasmas térmicos, la región de alta potencia del arco se encuentra localizada lo suficiente para que los desechos pasan a través del plasma pasen un relativamente corto periodo en el arco y se enfríen con rapidez. En primer lugar, esto permite un flujo más controlado de los gases residuales que son menos que los de la incineración y, más importante, el flujo de gas tiene un gradiente de temperatura muy robusto. Aparte de reducir la cantidad de calor refractario, este enfoque permite un rápido enfriamiento de temperaturas de miles de grados a casi cerca de temperatura ambiente en cuestión de segundos. El proceso, entonces, ofrece un gran control sobre la mezcla de productos en los gases residuales al limitar el tiempo para que estos alcancen un equilibrio térmico-químico y previenen una reacción cruzada de su ocurrencia. Es esta propiedad que permite reducir las emisiones peligrosas al inhibir la formación de furanos y dioxinas de la combustión parcial de los materiales orgánicos halogenados.

El enfriamiento se puede lograr con un arco no transferido en el cual el gas se inyecta hacia arriba de la antorcha de plasma al permitir una expansión adiabática rápida del flujo del gas residual o al pasar los gases residuales por un refrigerante como el agua. Eventualmente, este proceso se podría combinar con un proceso de lavado húmedo para ayudar a eliminar cualquier partícula sólida mientras que químicos adicionales como el hidróxido de sodio o agua de cal se pueden agregar para neutralizar los ácidos halógenos que se dormán a partir de los átomos de halógeno e hidrógeno. Sin embargo, se puede producir desechos adicionales del proceso de enfriamiento en forma de agua contaminada de desecho con torta de filtro de filtrar esta agua. Aunque estos probablemente sean menos que aquellos de los tratamientos convencionales de desechos y podrían ser lo suficientemente limpios para permitir una emisión sin necesidad de más tratamientos, en los casos en los cuales los desechos simplemente

no se pueden desechar, podría reintroducirse al flujo de desechos para un procesamiento adicional de vitrificación.

Este aspecto del procesamiento es crítico para obtener muchos de los beneficios de los procesos con plasmas en comparación con los procesos térmicos convencionales y es probable que sea el problema clave científico para desarrollar esta tecnología.

4.3 Procesos y tipos de desechos

Los desechos se pueden clasificar en términos de su forma, composición y el peligro que ponen. Algunos tipos de desecho son [5]:

- ❖ Los líquidos y gases peligrosos, particularmente los componentes y solventes halógenos orgánicos. Estos típicamente tienen altos valores de calor, su contenido halógeno lleva a la formación de furanos y dioxinas en el momento de la combustión que deben eliminarse o destruirse.
- ❖ Los desechos sólidos municipales, desechos de las casas, comercios y la industria pequeña consisten en papel, cartón, metales, materiales orgánicos y plásticos. Los desechos típicamente tienen algún valor de calentamiento y normalmente se incineran o se envían al relleno sanitario.
- ❖ Los desechos sólidos hospitalarios: este en general constituye un material mucho más contaminado y supone un peligro biológico y químico. Un alto material orgánico con un alto valor de calentamiento que con regularidad favorece la incineración.
- ❖ Residuos del incinerador, incluye las cenizas suspendidas en el aire y las del fondo del horno, las cuales frecuentemente contienen contaminación por metales pesados y requieren un tratamiento adicional antes de poder enviarlas al relleno sanitario.
- ❖ Tierra contaminada con toxinas orgánicas o metales pesados.
- ❖ Los desechos de sedimentos de aguas residuales y otros sedimentos con un rango de contaminantes orgánicos y un alto contenido húmedo.
- ❖ Desechos de manufactura e industriales con el potencial para recuperar materiales como polvos industriales, escoria de aluminio, desechos de convertidores catalíticos, carros destrozados y desechos de cables eléctricos.

Los procesos de tratamiento con plasmas se pueden clasificar en tres categorías principales aunque estos se podrían combinar en un solo proceso:

- Pirólisis y gasificación para descomponer los desechos orgánicos y producir gas de síntesis.
- Compactación de desechos inorgánicos para eliminar vacíos en el material y la vitrificación para inmovilizar los químicos peligrosos.
- Separación de los materiales recuperables de los residuos de los desechos.

En Costa Rica existen tres áreas principales que probablemente se beneficiarían más de la implementación de tratamientos con plasmas: la eliminación de químicos peligrosos y residuos de la industria química, eliminación de desechos hospitalarios y la reducción del volumen y generación de energía a partir de los desechos sólidos municipales.

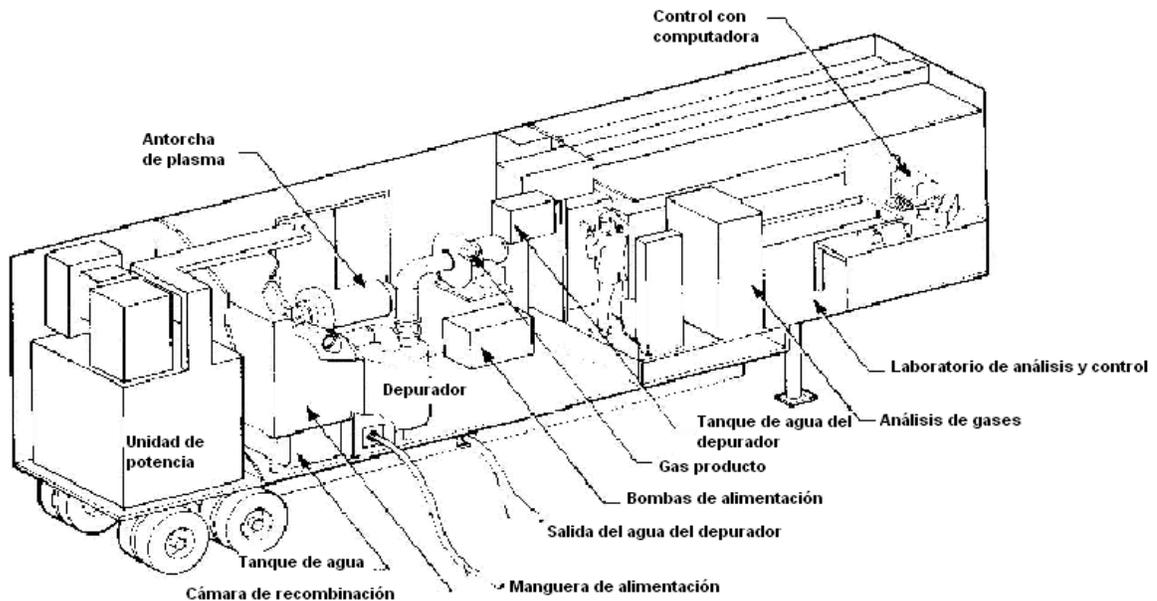
4.3.1 Pirólisis para una eliminación segura de químicos peligrosos

Los tratamientos con plasmas calientes se usan para destruir materiales peligrosos bifenilo policlorado, clorofluorocarbonos y otras sustancias que destruyen la capa de ozono, halones, componentes de benceno, insecticidas y hidrofluorocarbonos. La presencia de halógenos (cloro, flúor, bromo, etc.) en la mayoría de desechos tóxicos significa que hay un riesgo considerable de producir subproductos tóxicos como las dioxinas o furanos con la incineración convencional a menos que las temperaturas sean muy altas.

Los líquidos peligrosos y gases son relativamente fáciles de eliminar por la pirólisis de plasma. En estos sistemas, el flujo de desechos normalmente se introduce flujo arriba del plasma y se pasa por un arco no transferido pues el fundente del calor no necesita ser tan alto como cuando el desecho sólido se usa. El arco de plasma asegura una robusta mezcla de los desechos y temperaturas uniformes, para que el flujo de desechos se atomice. Dejar el arco, las especies atómicas se recombinan en moléculas simples de las especies atómicas presentes en los desechos, como el monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno, agua, metano y ácidos halógenos (HCl, etc.). Los gases residuales se enfrían con rapidez en un sistema de depuración/enfriamiento. Este depurador puede ser una cámara secundaria con una fuente con una solución alcalina como el hidróxido de sodio que enfría con rapidez los gases a unos 80 grados centígrados, elimina las partículas y neutraliza los ácidos halógenos y a su vez las especies de halógenos del flujo de gases residuales. Los gases residuales consisten principalmente de CO₂ y gases de síntesis que pueden quemarse para liberar los gases en la atmósfera o en una turbina o quemador para generar energía, sin el temor de crear contaminantes orgánicos persistentes debido a la presencia de halógenos. Los filtros de gas podrían ser necesarios para eliminar cualquier otra contaminación restante si está sobre los límites de las regulaciones (dependiendo del flujo de desechos, como óxidos sulfúricos o de nitrógeno), y el agua de desechos y filtros del depurador podrían necesitar tratamientos adicionales.

La principal ventaja de usar plasma en vez de la pirólisis convencional es la posibilidad de desconectar el proceso de calentamiento y temperatura de los desechos (los gases no inflamables y líquidos se pueden tratar con facilidad), mientras la relativamente baja tasa de flujo de los gases residuales comparados con la incineración facilitan el rápido enfriamiento de estos y permiten el control de la composición de los gases residuales según lo incluido en la sección 4.2.4. En particular, esto asegura más del inventario de halógenos de los desechos de terminar en la forma de ácidos de halógeno los cuales se eliminan con facilidad de los gases residuales al pasarlo por una solución alcalina y convertirlos en sales. La posibilidad de eliminar los halógenos antes de la combustión del gas facilita una fácil recuperación del valor de calentamiento del material. Finalmente, el plasma se puede usar para obtener reactantes adicionales como los radicales de hidroxilo y oxígeno atómico con el uso de gases de trabajo apropiados, lo que también ayuda a minimizar la formación de otros coproductos tóxicos en los gases residuales.

Otra característica de los procesos de plasma en comparación con métodos convencionales de pirólisis o incineración es que la región calentada por el arco de plasma es pequeña y localizada. La densidad relativa comparada con aquella necesaria para la incineración significa que el proceso se puede implementar en instalaciones muy pequeñas que se pueden integrar en procesos industriales o transportarse a varias ciudades para manejar volúmenes limitados de desechos acumulados en locaciones específicas [13]. Esto puede reducir significativamente el riesgo asociado con transportar desechos tóxicos para su eliminación. Un ejemplo de uno de los primeros tipos de sistemas es el proceso de *Pyroplasma Westinhouse*, ahora discontinuado, [13, 14, 15], el cual se muestra en la figura 2. El prototipo podía destruir bifenilo policlorado con una eficiencia de destrucción (calculado con base en el peso total de la entrada de desechos en el proceso, menos la suma de los desechos en todos los productos, subproductos y liberaciones medioambientales, divididas entre la entrada de desechos) de 99,999999% con una potencia de antorcha de 850 kW con una tasa de flujo por minuto de 121 litros. El sistema consiste de un reactor de pirólisis cilíndrico en el cual los desechos se atomizan dentro de la antorcha de plasma. Los gases, luego, pasan a una parte secundaria de la cámara y se recombinan para formar moléculas simples como el monóxido de carbono, hidrógeno y ácido clorhídrico, y luego se pasan a un depurador en el cual las partículas y el ácido se eliminan antes de quemar los gases. El sistema completo se coloca en un contenedor de 45 pies (13,7m).



Fuente: Westinghouse Environmental Services, "Thermal Destruction Pyroplasma", julio de 1988.

Figura 2. Ejemplo de uno de los primeros tipos de sistemas para tratamiento por plasmas, llamado proceso de *Pyroplasma Westinhouse*, ahora discontinuado.

4.3.2 Desechos sólidos hospitalarios

Los desechos sólidos hospitalarios corresponden a una importante área para la tecnología a pequeña escala de pirólisis. Los hospitales típicamente producen cerca de un kilogramo de desechos por cama por cada turno de ocho horas en los países desarrollados [16]. Estos desechos incluyen sangre, fluidos corporales, desechos humanos anatómicos como tejidos y órganos, desechos microbiológicos, desechos animales, desechos infecciosos, medicinas descartadas, y consumibles como tubos plásticos, contenedores, guantes, dispositivos de vidrio y agujas. Los dispositivos médicos con regularidad se dividen y clasifican en desechos generales y desechos peligrosos (que contienen químicos peligrosos, material infeccioso y desechos con bajos niveles radioactivos) en el momento de eliminación para asegurar un flujo de desechos bien definido y consistente.

Los materiales infecciosos deben esterilizarse antes de eliminarse. Esto se puede hacer con autoclaves con medios químicos o con incineradores a altas temperaturas para asegurar la descomposición total de los plásticos, drogas y organismos infecciosos. Sin importar el proceso, los residuos (materiales esterilizados o cenizas del incinerador) se desechan en un relleno sanitario.

Para la incineración, las temperaturas necesarias para una eliminación efectiva normalmente son bastante altas pero estas no siempre se alcanzan. El flujo de aire requerido para mejorar el proceso de combustión es normalmente alta y esto puede limitar las temperaturas picos que se pueden alcanzar, lo que puede llevar a la formación de furanos y dioxinas a partir del material orgánico halogenado presente en los desechos (plásticos, caucho y medicinas) y otros contaminantes tóxicos pueden permanecer en las cenizas en las cenizas suspendidas en el aire y en el fondo del horno, y el material infeccioso puede sobrevivir si los desechos no se calientan lo suficiente para alcanzar altas temperaturas por periodos prolongados. Además, el material sólido inorgánico como agujas, cristalería y otros objetos filosos ponen un peligro y puede haber contaminación por los radio-isótopos médicos y metales pesados concentrados al reducir el volumen por incineración.

El tratamiento de plasmas se realiza al exponer los desechos triturados a un arco no transferido en un entorno sellado. Los gases residuales se recolectan y se enfrían, como se menciona anteriormente, y los residuos sólidos se eliminan como una escoria y se solidifican para formar bolitas vitrificadas. El tratamiento con plasma ofrece ventajas claves en comparación con los métodos convencionales de esterilización pues es altamente eficiente y permite una mayor recuperación del valor de calentamiento que los autoclaves y podría por lo tanto ser más energéticamente eficiente. El entorno del plasma es muy hostil para los microorganismos y los expone a un bombardeo de partículas ionizadas, fundentes de alto calentamiento y radiación ultravioleta de la

recombinación de iones y electrones. Las altas temperaturas aseguran que los residuos sólidos se compacten para que no haya paquetes aislados en los cuales los microorganismos pueden sobrevivir. Los gases residuales tienden a ser mucho menos en las partículas, como las de los productos eliminados que con facilidad cumplen los estándares requeridos en muchos países desarrollados (véase las referencias 11-13 en [16]). Los residuos sólidos con contaminación de metales pesados o los radioisótopos médicos pueden ser vitrificados para permitir una eliminación segura en el relleno sanitario.

4.3.3 Separación, compactación y vitrificación de desechos sólidos

Los procesos y tecnologías discutidos en esta sección aplican a un amplio rango de desechos sólidos: desechos de carros triturados, desechos sólidos municipales mezclados y el tratamiento de cenizas del fondo del horno de la incineración convencional o plantas de carbón natural. Estos desechos normalmente se eliminan de la misma forma convencional (relleno sanitario) y los beneficios de usar un tratamiento de plasma tienden a ser similares: gasificación de componentes orgánicos, separación del metal y componentes inorgánicos, vitrificación para inmovilizar cualquier químico peligroso restante en los residuos.

Los productos típicamente están constituidos de gases de síntesis, metales mezclados para un refinamiento adicional y un agregado cerámico. La reducción de los residuos sólidos puede alcanzar entre el 6% y el 15% [17] del volumen original, comparado con la reducción de hasta un 30% de una incineración simple. Las plantas con regularidad son bastante similares y puede manejar varios tipos diferentes de flujos de desechos, de manera que una planta diseñada para la separación del metal de los carros triturados también se puede usar para tratar desechos sólidos municipales sin modificaciones dado que el material fue medido apropiadamente y el gas de los sistemas están preparados para eliminar cualquier químico. Una lista se encuentra en la referencia [17]: carbón natural, sedimentos, cenizas de incineradores, ceniza peligrosa suspendida en el aire, material de relleno de los carros, desechos médicos, productos de la pirolisis de aceite, PCB, desechos patológicos desecho de cromo ferroso, compuestos de la reducción de manganeso ferroso, escoria de la fundición de titanio, productos de recuperación niobio, polvo suministrado al arco eléctrico, vigas y barras de acero de refuerzo, cables y tuberías de cobre, aluminio, concreto y piedra, cemento Portland, ladrillos, desechos de manufactura, papel, catón plásticos, aislamientos de fibra de vidrio y otros productos, asbesto, madera tratada, vidrio, cerámica, caucho, llantas, tejas de asfalto, asfalto usado en carreteras, arenas petrolíferas, sedimentos de las aguas residuales, lodos de puertos, materiales compuestos que contienen resinas, linóleo, tuberías plásticas, solventes, pinturas y otros materiales que contienen carbono que incluyen desechos sólidos mezclados y inclusive tierra contaminada.

Sin embargo, la composición de los desechos afectará la parte financiera del funcionamiento de la planta debido a la alteración en el consumo de alimentación

necesario los productos generados por el proceso. Como resultado, la separación de algunos materiales se prefiere por razones económicas.

Los reactores de plasma se pueden dividir en aquellos con base en arcos no transferidos y arcos transferidos. En general, dos tipos principales de tipos de reactores con arcos no transferidos se usan en hornos con eje y en aquellos en los cuales la antorcha se coloca directamente sobre los desechos. En el caso de los hornos con eje, varias antorchas de plasma calientan el aire en un horno con eje (véase la figura 3a) que contiene una mezcla de desechos y un agente de cal.

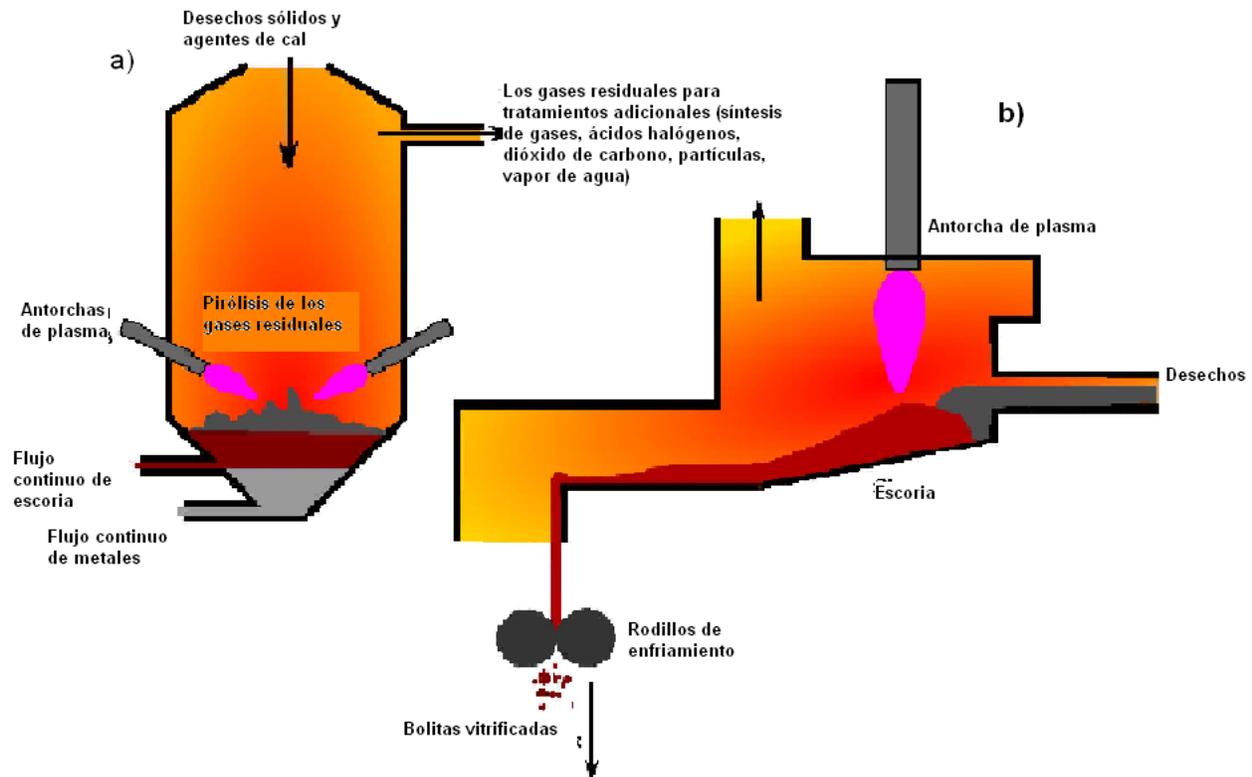


Figura 3a. Hornos con eje, varias antorchas de plasma calientan el aire en el horno.

Algunas veces, esto se conoce como *gasificación asistida por plasma*, aunque la tecnología es similar a aquella mencionada anteriormente, el proceso fundamental se encuentra entre la incineración, la pirólisis convencional y los métodos de plasmas térmicos. La descomposición de los desechos no se logra con una exposición directa al plasma y la atomización; en cambio, el plasma calienta el aire y los agentes de cal a altas temperaturas en una forma parecida a una lanza de oxígeno en un alto horno usado en la producción de hierro. El principal beneficio al usar antorchas de plasma constituye que la energía necesaria para usar el arco es normalmente inferior que la necesaria para producir el oxígeno requerido para usar una lanza de oxígeno y al abstenerse de agregar oxígeno adicional, el contenido orgánico de los desechos se convierte en gases de síntesis que permite recuperar el valor de calentamiento de los desechos.

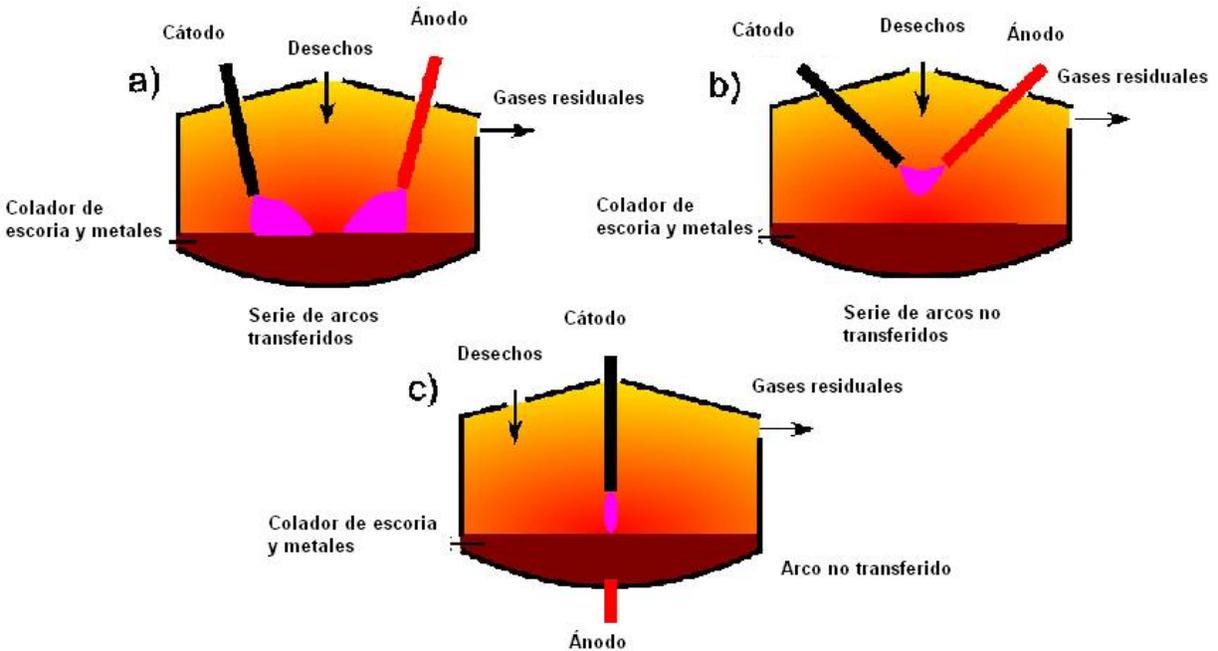


Figura 3b y 3c. Hornos con eje, y varias configuraciones de antorchas de plasma.

Aunque las temperaturas alcanzadas en la cama de cal son, por lo general, menos que las del plasma, estas son significativamente mayores que aquellas alcanzadas con incineradores de desechos y con facilidad son suficientes para derretir metales como el acero. Las temperaturas ambiente aseguran que los desechos se reduzcan totalmente por los agentes de cal, lo que lleva a la liberación de gas de síntesis que se puede quemar en una cámara secundaria y se usa para generar vapor para potenciar una turbina. El material inorgánico forma una escoria de metal, que se acumula en el fondo del reactor en capas distintas. El metal se pueden convertir en lingotes y clasificarse para venderse y refinarse aún más, mientras que los agentes de calcificación se pueden agregar a la escoria, lo que se puede convertir y clasificar en baldosas de cerámica.

No obstante, aunque el uso de antorchas de plasma permiten una mayor eficiencia energética y desacopla el proceso de calentamiento del contenido calorífico del material de desecho y los residuos separados en metales y escoria vitrificada, con respecto a las cenizas suspendidas en el aire y los gases residuales, el proceso es más similar a la incineración, con menos alcance para reducir la necesidad de filtrado y otros tratamientos de los gases residuales que los otros métodos de gasificación con plasma. Empero, este método permite la eliminación volúmenes muy altos de desechos.

En el segundo tipo de reactor de arco no transferido, el chorro de plasma de una antorcha se dirige al material de desecho para formar una mezcla de escoria fundida (véase la figura 3b), también se usa una cámara secundaria con frecuencia para una

combustión total para cumplir las regulaciones de emisiones. Cabe destacar que para reducir la formación de gases tóxicos como dioxinas y furanos en los gases residuales, el enfriamiento y depuración podrían ser necesarios según lo descrito anteriormente. La escoria y los metales se sacan del reactor, después de que la escoria pasó por rodillos enfriados para producir bolitas de material vitrificado.

En general, los reactores con horno con eje han sido los más utilizados para la destrucción de desechos municipales y metales de separación para los carros triturados. Mientras tanto, la implementación principal de otros tipos de reactores de arco no transferido ha sido la vitrificación de las cenizas del fondo de las plantas eléctricas y incineradores convencionales, aunque también se ha usado para el tratamiento de sedimentos de aguas residuales, desechos de hospitales y desechos con bajo nivel nuclear [5,6].

Los reactores de arco transferido existen con muchos diseños diferentes, muchos con base en aquellos usados en los procesos metalúrgicos. El arco normalmente transferido entre un metal enfriado con agua o con un electrodo de grafito como el cátodo para el material de desecho (figura 3c), aunque en algunos casos se usan electrodos gemelos. Esto permite un funcionamiento en modo no transferido (en el cual el arco y la corriente pasan entre dos electrodos (figura 3b), o modo transferido con una corriente que fluye primero por el ánodo (figura 3a), después por los desechos y finalmente por el cátodo. Los electrodos se pueden proteger aún más al hacer fluir argón alrededor de los electrodos para limitar su exposición al gas de trabajo y los gases liberados de los desechos, lo que resulta en vidas útiles típicas de los electrodos de unas 200 a 300 horas.

El gas inyectado por un protector alrededor de los electrodos o a través del orificio a lo largo del eje de los rodamientos de los electrodos. El material de desecho se coloca entonces en el espacio entre los electrodos en los duales y se forma el arco. En los reactores de arco transferido, un calentamiento significativo de los desechos ocurre con un calentamiento en ohmios/julios del flujo de corriente por los desechos fundidos. Para empezar el proceso, un arco no transferido (tanto en forma de chorro de una antorcha de plasma o, si se usan varios electrodos, se podrían mover juntos para formar un arco entre ellos) se usa para calentar los desechos hasta que sean suficientemente conductores. Los electrodos entonces se podrían separar y dejar que la corriente fluya por el material. Existen otros tipos de reactores y estos se explican en detalle en la referencia [5].

Es importante entender que mientras los tratamientos con plasma simplifican los tratamientos de los gases residuales para cumplir los estándares de emisiones, los gases particulares producidos y el tratamiento requerido dependen de la composición del flujo de desechos; un flujo de desechos con un alto contenido de plásticos producirá más ácidos halógenos y podría requerir un tratamiento adicional de los furanos y dioxinas. Los flujos de desechos altos en contenido de caucho podrían producir compuestos del sulfuro. Otros podrían producir óxidos de nitrógeno. Sin embargo, se ha determinado en general que la contaminación de los gases residuales, las aguas de

desechos, los filtros de las aguas de desechos y la lixiviación de escoria se encuentran muy por debajo de los límites regulatorios (véase el capítulo 5) lo que permite la eliminación segura de estos subproductos del proceso. En aquellos casos en los cuales la torta de filtrado y los residuos sólidos recolectados del tratamiento de los gases residuales no son seguros para desecharlos en un relleno sanitario, se podrían reintroducir en el flujo de desechos para su vitrificación.

Capítulo 5

Resultados: Tecnologías existentes de gasificación por plasma térmico y su desempeño

El propósito de esta parte del informe fue identificar proveedores existentes de tecnologías de gasificación con plasmas térmicos y el desempeño de varios productos. Como se explicó en el capítulo 2, no se cuenta con información directa y detallada del desempeño económico y técnico. Los productos que ya se han usado comercialmente tienen un registro de rastreo de éxito comercial (aunque sin la información detallada de precios y costos) pero no se puede garantizar que estos productos serán económicamente viables en Costa Rica debido a las diferencias en las condiciones económicas, demográficas y geográficas. En general, entre más experiencia de mercado la tecnología tiene, menos información técnica está disponible; mientras más información técnica está disponible de compañías que acaban de ingresar en el mercado pues desean promocionar las características de sus productos, por definición estos productos todavía no han demostrado lo que valen.

Con base en la viabilidad comercial, se identificó una corta lista de tres proveedores, la cual se incluye a continuación.

5.1 AlternNRG

AlterNRG constituye una compañía canadiense que entró en el mercado del tratamiento de desechos sólidos municipales al comprar *Westinghouse Plasma*. Este es el claro líder del mercado en la gasificación de desechos sólidos municipales pues actualmente administra tres de las cinco plantas que tratan desechos sólidos municipales que funcionan en el mundo, en particular las plantas de desechos sólidos municipales Utashinai y Mihama-Mikata en Japón.

La compañía cuenta con hornos con eje que usan un método de gasificación asistida con plasma. La compañía ha desarrollado una planta estandarizada que consiste de varios subsistemas. El primero corresponde al manejo de desechos y el tratamiento previo de desechos sólidos municipales que llegan a la planta y se descargan en un búnker. Los desechos se tratan para crear lotes de suministro de combustible consistente. Piedra caliza y cal se almacenan, la segunda para controlar las propiedades de fusión de la escoria para asegurar que se puede atrapar con facilidad. Los materiales se procesan y se agregan al reactor. El segundo es el reactor propiamente, un reactor con eje de unos 10 m de diámetro y 20 m de alto, similar al descrito en la sección 4.3.3. Este diseño maneja unas 700 toneladas de desechos por

día, incluye un 5% de desechos triturados de llantas. Una unidad para separar el aire brinda el oxígeno y nitrógeno necesarios para varias partes del proceso y una unidad de depuración de la síntesis de gases para el procesamiento de los gases residuales. La energía se recupera con la generación de vapor pero la intención última es mover la electricidad vía un ciclo combinado de gasificación integrada (CCGI), en el cual los gases de síntesis se usan en un motor de gas y los gases calientes de escape pasan por un generador de vapor para recuperar el calor para poner a funcionar una turbina secundaria de vapor. Sin embargo, el uso de un sistema de CCGI requiere una mayor producción de gases de síntesis que la de las plantas actuales, por lo que actualmente no ofrecen ventajas económicas. Por consiguiente, los diseños existentes se enfocan en la generación de vapor o los motores de gas. Una instalación para tratar la escoria toma el flujo continuo de escoria fundida existente en el horno, en el cual se enfría y se forman gránulos. El tratamiento del agua de desecho se usa para reciclar el agua de desecho con unos 25 m³ por día de exceso de agua de desechos que requiere ser eliminada.

Las emisiones de las dos instalaciones Utashinai (180 toneladas por día) y Mihama-Mikata (22 toneladas por día) entre 2003 y 2007 se estudiaron en la referencia [18]. Estas mostraron encontrarse bastante por debajo de los límites regulatorios de U.E., EPA de EE. UU. y de Canadá con respecto a las dioxinas pero las plantas de prueba en ocasiones, mostradas en paréntesis exceden los límites de EE. UU. (4), U.E. (6) y Canadá (3) durante el periodo y la escisión principal de óxidos de nitrógeno. Un análisis de costo por AlterNRG citado en [18] estimó que unas instalaciones de 710 toneladas por día tendrían un costo de capital de entre 200 y 300 millones de dólares estadounidenses (con los precios de 2010), para el ciclo de vapor y CCGI respectivamente con un retorno de inversión antes de los impuestos entre el 13% y el 18%, que se traduce entre 18 MW y 56 MW. Los autores de ese informe determinaron que el modelo usado para estimar las finanzas es robusto y no demasiado optimista.

5.2 Advanced Plasma Power

Advanced Plasma Power actualmente administra una planta de tratamiento de desechos sólidos municipales en Swindon, Reino Unido, que ha estado funcionando desde 2007. Esta es una de las instalaciones más grandes en el mundo ya que administra unas 400 toneladas por día. A diferencia de AlterNRG, APP es dueña de los derechos de un proceso pero los subsistemas que componen el proceso cuentan con una licencia y APP es propietaria de los derechos para poner a funcionar la combinación de estos subsistemas.

Después de la separación de material reciclable y el procesamiento de los desechos sólidos municipales en lotes de desechos como se describió antes, APP usa un sistema de pirólisis convencional con un lecho fluidizado el cual genera cenizas en el fondo del horno y un rango de hidrocarburos líquidos. Esto después se suministra al sistema de tratamiento de plasma, el cual vitrifica las cenizas y reduce los

hidrocarburos a una síntesis de gases. Los datos del desempeño no están disponible pero el éxito comercial de Swindon indica que su tecnología es viable.

5.3 Plasco

Plasco administra la quinta planta de gasificación por plasma en Ottawa, California. Esta planta administra 100 toneladas por día, también con un proceso de recuperación de materiales para reciclar y procesar los desechos para crear un flujo uniforme de desechos. Como APP, sus instalaciones funcionan con un proceso de dos etapas en el cual el calentamiento de otras partes se usa para la pirólisis de los desechos y convertirlos en gas crudo. Este normalmente se suministra a una etapa de refinación la cual usa antorchas de plasma para convertir el gas en una síntesis de gases y destruir las dioxinas. La síntesis de gases se trata aún más para eliminar los compuestos de sulfuro y nitrógeno. El calor de los desechos se usa para potenciar la primera etapa de la pirólisis convencional y se recupera con una turbina de vapor para obtener electricidad. Los gases de síntesis depurados se queman en motores de combustión interna para generar energía.

Capítulo 6

Discusión y conclusiones: Aplicación del tratamiento de desechos con plasma en Costa Rica

El estado existente del tratamiento de desechos en Costa Rica se resume en el capítulo 3, los beneficios de la implementación de la tecnología de plasmas calientes se mencionaron en el capítulo 4 y los proveedores potenciales se detallaron en el capítulo 5. En este capítulo se discutirá la implementación potencial de las tecnologías de plasmas térmicos para la situación específica de Costa.

Estas constituyen dos opciones disponibles: comprar el equipo y los productos de un proveedor establecido o desarrollar la tecnología localmente. La primera ofrece la habilidad de escalar rápidamente y requieren una capacidad técnica mínima; en cambio, la segunda ofrece la posibilidad de desarrollar una actividad económica en el país y desarrollar un proceso optimizado para las necesidades de un país en desarrollo. Las dos opciones se toman en cuenta con respecto a los flujos específicos de desechos identificados en el capítulo 3.

6.1 Consideraciones económicas para la implementación de los tratamientos por plasmas térmicos

Se podría pensar que los desechos tienen un valor neto general que incluye varios términos. El valor neto positivo de cualquier material útil que se puede recuperar de los desechos (es decir el valor del material menos los costos asociados con el proceso de recuperarlos) y el valor negativo en bruto que corresponde al costo de eliminar los desechos de manera que satisfaga los requisitos de las regulaciones.

Económicamente, el objetivo de los tratamientos de desechos es agregar valor a los desechos al determinar el valor positivo de los desechos y reducir el valor negativo de los desechos al simplificar la eliminación. Aún si el valor total de los desechos después del tratamiento se mantiene negativo, siempre que se reduzca, el valor agregado a los desechos y la actividad puede ser valiosa en términos económicos. En la sección 4.1, la combustión e incineración se mostraron como ejemplos de los tratamientos tradicionales de desechos. Al incinerar los desechos, el volumen se reduce y el calentamiento se puede recuperar de su uso en otras partes, como el calentamiento municipal que podría tener algún valor. Por lo tanto, los costos totales de la eliminación de los desechos se reducen y la actividad tiene un valor económico real.

La viabilidad económica de la implementación de procesos con plasmas calientes dependen del valor negativo de los desechos, el costo de los procesos con plasmas térmicos (principalmente la electricidad necesaria para gasificar el agua), y el valor de los materiales recuperables. Con respecto a la reducción del valor negativo de los desechos, el proceso de la gasificación por plasma es en general bastante insensible a la composición de los desechos: sin importar la composición de los desechos, el arco de plasma reducirá por mucho el volumen de los desechos y convertirá el material orgánico en gases de síntesis que se pueden quemar. No obstante, los últimos dos dependen mucho de la composición de los desechos; los costos del proceso se relacionan con la potencia que el arco debe lograr para eliminar totalmente los desechos y los materiales recuperables dependen de la proporción de material orgánico en caso de la síntesis de gases y la proporción de metales.

En el capítulo 3 se intentó brindar información suficiente sobre los desechos para obtener una estimación informada del valor negativo de los desechos y la composición de los desechos. La información cuantitativa de los costos de la eliminación existente de desechos no se pudo obtener debido a la confidencialidad de las diferentes instituciones de tratamiento de desechos, la falta de información verificada de la composición química de los diferentes flujos de desechos y el valor potencial de los productos recuperados. Sin embargo, como se muestra en el capítulo 5, estos tratamientos han demostrado ser rentables en tres países.

Se puede realizar un resumen general de los tres tipos potenciales de desechos: desechos sólidos municipales, desechos tóxicos y desechos hospitalarios.

6.1.1 Desechos sólidos municipales

Como se mencionó en la sección previa, los plasmas se usan para la eliminación de los desechos sólidos municipales como una alternativa para la incineración y para tratar los gases de combustión, cenizas suspendidas en el aire y las del fondo del horno para reducir el impacto medioambiental de los incineradores existentes. La factibilidad económica del tratamiento con plasma depende del mercado existente y el balance de reducir el valor negativo de los desechos existentes en un mayor grado que las tecnologías actuales en Costa Rica así como el valor recuperado de los desechos.

Generalmente, la falta de rellenos sanitarios, la demanda creciente de desechos y el alto contenido orgánico de los desechos sólidos municipales en Costa Rica, según lo identificado en el capítulo 3 indican que vale la pena explorar en detalle el potencial para explorar la gasificación por plasma de los desechos sólidos municipales. La complejidad de los sistemas necesarios para homogenizar y medir los desechos para generar combustible así como varios tipos de emisiones significa que la tecnología es difícil de dominar y la escala de inversión de capital requerido es alta. En general, los modelos con base en economías de países en desarrollo tienden a requerir altas tarifas de inflexión para hacer el proceso económico y vender el calor recuperado en forma de vapor. La necesidad de plantas muy grandes para producir suficiente gas para un CCGI

(el método más eficiente para convertir la energía térmica en electricidad) podría limitar la producción de energía. Por el contrario, la economía potencia de la escala debido a la concentración de desechos en el gran área metropolitana podría hacer a Costa Rica ideal para esta tecnología.

Se necesita más investigación sobre la factibilidad económica del tratamiento con plasmas para los desechos sólidos municipales para determinar el beneficio de esta tecnología.

6.1.2 Desechos hospitalarios

No está claro si hay una necesidad tan grande para el tratamiento con plasma de los desechos sólidos hospitalarios: las autoclaves se usan ampliamente con eficiencia. El plasma puede ofrecer beneficios con respecto a la generación de calor en niveles que podrían ser útiles para hospitales en los cuales se coloca las instalaciones pero a diferencia de la urgente necesidad de una alternativa para los rellenos sanitarios para manejar los problemas crecientes de los desechos, es poco probable que se de el mismo nivel de interés esta tecnología para justificar el gasto de capital mientras los autoclaves todavía sean funcionales.

Se han desarrollado sistemas pilotos comerciales son capaces de tratar 25 kg/h en un área de menos de 25 metros cuadrados, los cuales consumen un promedio de 1 kW de potencia [19], lo que demuestra que el proceso se puede vender para usarse en hospitales pequeños. Los análisis económicos en la referencia [19] muestra que un sistema como este podrían superarse al generar suficiente energía gracias a la combustión de la síntesis de gases producidos para reducir mucho el consumo requerido de electricidad. Sin embargo, no importan el gran efecto en las finanzas: un cambio en el contenido húmedo de un 18% a un 8% (representativo de la composición promedio de los desechos médicos en Asia y EE. UU., respectivamente, debido a los diferentes sistemas para clasificarlos cuando se eliminan) puede reducir la energía necesaria hasta un 93%.

Por otro lado, la gasificación de los desechos de hospitales constituye un reto técnico relativamente sencillo si se le compara con las grandes instalaciones industriales necesarias para los desechos sólidos municipales. Los hospitales necesitan agua caliente, lo que simplifica el valor de recuperación al eliminar la necesidad de generar electricidad y transmitirla a la red.

6.1.3 Desechos tóxicos

Aunque ofrece ventajas técnicas, las finanzas de la eliminación con plasma de estos desechos podría no ser favorable a menos que las regulaciones de las emisiones de los incineradores sean estrictas, lo cual puede maximizar el valor negativo inicial de los desechos y limitar las opciones para una eliminación segura. No obstante, en caso de los hidrofluorocarbonos el problema es diferente. Estos corresponden a agentes importantes del calentamiento global (11700 veces más poderosos que la masa

equivalente de CO₂) y los subproductos de la producción de hidrofluorocarbono, un reemplazo de los fluorocarbonos. El CO₂ generado para destruir los hidrofluorocarbonos con el arco de plasma es insignificante comparado con el CO₂ equivalente de los hidrofluorocarbonos destruidos, lo que permite una ganancia significativa de unos \$100 K por tonelada [5] y asume un crédito de carbono de \$10 por tonelada del CO₂ equivalente. Sin embargo, no se sabe si hay una producción significativa de estos químicos en Costa Rica.

Las investigaciones incluidas en el capítulo 3 concluyeron que hay poca documentación con respecto a la producción real de desechos tóxicos en Costa Rica. El no poder obtener información centralizada sobre el volumen de los desechos producidos y los principales productores complicaron la clara identificación de una necesidad social o económica de esta tecnología.

Dos posibles productores a gran escala de desechos considerados en el estudio sirven para ilustrar las dificultades de dirigir un programa de desarrollo de tecnología a este sector de desechos: los plásticos contaminados con químicos orgánicos de la agricultura y los residuos de refinerías de petróleo. Los químicos, empero, actualmente se desechan adecuadamente en hornos de cemento que recuperan totalmente valor de calentamiento del material. Aunque en la actualidad los productores de desechos pagan los hornos de cemento para que acepten estos desechos, también obtienen ganancias de los reducidos costos del combustible y la posibilidad de convertir energía en electricidad, lo cual es generalmente más lucrativo que el calentamiento de procesos industriales y abre la posibilidad de competir para este flujo de desechos. No obstante, debido a que el valor del calentamiento se recupera totalmente de una vez en la incineración en el horno de cemento, el beneficio económico de la tecnología de gasificación implementada a este proceso dependerá totalmente de la producción de electricidad. Aunque la electricidad constituye una forma de energía más valiosa, una planta piloto inicial necesitaría demostrar la habilidad de realmente suficiente electricidad de manera que la diferencia de precios entre la energía eléctrica y el combustible común usados en los hornos de cemento es suficiente para pagar los costos de capital y los costos operativos de la planta de gasificación. Una segunda opción corresponde a la producción de los residuos de las refinerías de petróleo de RECOPE. Aunque este sería un candidato excelente para la gasificación, RECOPE ha afirmado en comunicaciones informales previas que solo está interesado en comprar la tecnología existente.

6.2 Desarrollo de tecnologías de tratamiento por plasmas térmicos

Se debe subrayar que la tecnología de tratamiento con plasmas térmicos ya existe. Sin embargo, podría haber algunos beneficios en desarrollar una tecnología localmente; por ejemplo, podría ser posible construir un producto más barato optimizado para los flujos de desechos de Costa Rica, y podría ser beneficioso para la economía de Costa Rica desarrollar capacidades técnicas en esta área para brindar la capacidad de desarrollo de otras tecnologías relacionadas del plasma. El objetivo de esta sección es

evaluar la factibilidad de desarrollar tecnologías de tratamientos de desechos con plasmas térmicos y las competencias y capacidades necesarias para este programa.

6.2.1 Opción de flujo de desechos

Hay una mezcla de requisitos en competencia para el desarrollo de esta tecnología en Costa Rica. Hay dos motivaciones principales para desarrollar esta tecnología: producir beneficios sociales y medioambientales al permitir lograr estándares más altos de eliminación de desechos y producir beneficios económicos al ofrecer un valor mayor en el tratamiento de desechos que los métodos existentes.

Se debe tomar en cuenta los siguientes tres factores:

- Cualquier producto que surja de un programa de desarrollo debe producir algún beneficio tangible económico o social para justificar su creación.
- En general, el proceso de descomposición de los desechos es menos sensible a la consistencia y composición de los desechos que la producción de gases de síntesis y otros valiosos subproductos.
- Para determinar el valor total de recuperación de la potencia de calentamiento y materiales, se necesitan muchas competencias técnicas adicionales a aquellas para desarrollar una que simplemente elimina desechos.

Las posibilidades de éxito aumentan si es posible obtener un producto útil en el menos tiempo posible con los costos mínimos de los recursos. Entonces, el enfoque de un programa de desarrollo debe ser lograr una tecnología en la cual el valor del proceso se obtiene al reducir el valor negativo de un flujo de desechos consistente, específico y bien caracterizado para el cual se optimiza el proceso; en vez de depender de la generación de coproductos como la síntesis de gases para lograr una fracción mayor del valor del proceso. Las fases posteriores del proceso se pueden enfocar en buscar la producción de gases de síntesis y la recuperación de materiales, así como la adaptación y escala de los procesos para trabajar con otros desechos.

Por lo tanto, se recomienda que el desarrollo de una tecnología costarricense empiece con la identificación de un flujo de desechos apropiado. El flujo ideal de desechos debe:

- Ser relativamente consistente con una composición bien definida para brindar una base clara para el diseño del proceso.
- Tener un alto valor negativo: la viabilidad económica se estima y se logra con más facilidad si depende más en el aspecto menos técnicamente retador de la destrucción de los desechos; en vez de la producción de la energía neta o los materiales recuperados.
- Producirse en un volumen tal que una pequeña planta piloto pueda demostrar el valor real al inversionista.
- Asociarse con una institución grande (pública o privada) que puede brindar el soporte financiero y técnico para el programa de desarrollo.

Al estudiar las consideraciones económicas discutidas en la sección anterior, queda claro que mientras el tratamiento con plasmas térmicos se puede implementar para el problema de los desechos municipales en Costa Rica, pueda tener algún valor económico, se asocie con instituciones privadas y significativamente a gran escala, los desechos sólidos municipales requieren instalaciones a gran escala que están fuera de la capacidad técnica inmediata para desarrollo. Además, actualmente hay productos en el mercado. En el caso de los desechos tóxicos, la carencia general de información y grandes instituciones para asociarse dificulta esta opción. Como resultado, el candidato evidente constituye los desechos hospitalarios, los cuales están bien definidos y son consistentes, tienen un alto valor negativo debido a la necesidad de esterilización, se producen en volúmenes apropiados para una planta piloto y se relacionan con una gran institución la cual puede ayudar en el proceso de desarrollo.

6.2.2 Consideraciones técnicas

La generación de arcos y chorros de plasma está bien entendida, y la implementación directa del plasma al material de desechos producirá con seguridad altas temperaturas, suficiente para destruir los desechos térmicamente. El suministro energético y las antorchas de plasma de arco no transferido constituyen una tecnología madura que se puede fabricar de manera relativamente fácil. No obstante, como probablemente no hay mucha posibilidad de mejora (excepto quizás el uso de materiales novedosos optimizados para aumentar la vida útil en un entorno particular para procesos específicos), podría ser mejor comprar estos ítems. La habilidad para diseñar o construir la fuente de plasma es, por lo tanto, bastante fácil y no debería constituir un reto técnico significativo.

En cambio, el reto clave de la investigación para el desarrollo de un proceso de pirólisis es la química de la fase gaseosa que ocurre en el flujo de los gases residuales. Como se mencionó en el capítulo 4, el enfriamiento es crítico para entender el potencial para reducir los coproductos tóxicos que surgen de las interacciones heterogéneas entre las especies moleculares y atómicas presentes en los gases residuales. El equilibrio químico de los productos de los gases residuales no es necesariamente entendido con facilidad al aplicar el concepto de una “temperatura mezclada”, la cual corresponde a la temperatura obtenida al asumir que el fluido de desechos y el plasma reaccionan totalmente para alcanzar el equilibrio químico. Ciertamente podría ser posible y aún preferible diseñar el sistema para producir mezclas específicas sin equilibrio al enfriar el flujo de gas en algún punto en su gradiente de temperatura. Por consiguiente, es probable que sea importante modelar la termodinámica totalmente, la dinámica de fluidos y la cinética química del chorro de plasma, el flujo de desechos y los gases residuales. El modelado del arco, el chorro y su interacción con los desechos necesitará un modelado de la magnetohidrodinámica, mientras que el modelado la dinámica de fluidos y la termodinámica de los gases residuales puede producir un entorno que se puede usar para el modelado de la cinética química del flujo de desechos. Una amplia explicación de las complejidades relacionada con las referencias se da en la sección 4 de la referencia [5] en relación con la destrucción de clorofluorocarbonos.

Estas son áreas desafiantes que requieren habilidades para la química de la fase gaseosa, la física de plasmas y la física computacional. La dificultad de este lado teórico no debe subestimarse pues este requerirá una investigación de tiempo completo si se realiza un progreso significativamente rápido.

Además de estas habilidades científicas bastante significativas y los recursos informáticos, una planta completa deberá tomar en cuenta los materiales necesarios para la cámara del reactor y los electrodos, los requisitos de diseño para introducir el flujo de desechos en el plasma y extraer los residuos y los gases residuales, monitorear los gases residuales y los residuos durante la fase de desarrollo y el tratamiento de residuos y los gases residuales según sea necesario y los sistemas de controles para integrar los diferentes subsistemas. El potenciar el proceso de la combustión de la síntesis de gases necesita la integración de un generador apropiado y de sistemas de administración de energía. Por lo tanto, las capacidades y competencias adicionales serán necesarias para administrar la energía y sistemas de control del arco, así como conocimientos de la ingeniería química en el manejo del flujo de desechos y el tratamiento de los gases residuales y la química analítica para monitorear el contenido de los gases residuales y residuos. Un esquema de varios subsistemas se muestra en la figura 1 en el capítulo 4.

También es importante que los asuntos legales se tomen en cuenta: si existen tecnologías protegidas con patentes, entonces sería importante para asegurar que la tecnología que se desarrolla en el ITCR no infrinja patentes existentes. Además, la tecnología debe cumplir los estándares legales y los requisitos para la eliminación de desechos establecidos por ley.

Capítulo 7

Recomendaciones

Las dos más grandes potenciales implementaciones de esa tecnología en Costa Rica constituyen el tratamiento de desechos sólidos municipales y hospitalarios. Sin embargo, como se explicó detalladamente, hay información insuficiente para evaluar cuantitativamente la factibilidad de estas tecnologías para Costa Rica. Por lo tanto, se requiere más investigación.

En el caso de desechos sólidos municipales, el desarrollo de la tecnología simplemente no es viable: debe comprarse de proveedores existentes identificados en el capítulo anterior. Hasta la fecha, el enfoque se hace para fomentar el ICE como socio debido a su interés en producir electricidad comercial a partir de los desechos sólidos municipales. Las plantas típicas de desechos sólidos municipales producen cantidades relativamente pequeñas de energía y la economía depende mucho del valor negativo de los desechos así como la energía positiva de la electricidad. Debido a que la inversión de capital requerida es grande, y la generación de electricidad que sea factible solo se ha hecho en unos pocos casos, con una venta del vapor como la principal forma en la que el valor de calentamiento de los desechos se vende, desde la perspectiva del ICE como una inversión podría resultar demasiado riesgosa y cara, aún si los beneficios sociales y económicos son sustanciales cuando se toman en cuenta los beneficios hacia arriba del valor negativo reducido de los desechos.

Los altos costos de capital significan que una fuerte inversión económica se debe hacer para adoptar esta tecnología. La información necesaria para realizar este análisis cuantitativo es la siguiente: los costos y tarifas actuales para la eliminación de desechos en rellenos sanitarios, la composición de los desechos e incorporar estos datos para determinar la posible producción de gas y más detalles de los costos y desempeños de las plantas existentes. Esta información es confidencial y requiere al menos firmar un contrato de confidencialidad.

Se recomienda entonces la realización de un estudio en conjunto con el Ministerio de Salud, gobiernos municipales y/ una o más compañías de desechos y un proveedor de instalaciones para la gasificación por plasma identificadas en la sección 5 con la intención de:

- Obtener información detallada sobre la composición de los desechos para determinar la energía necesaria para la gasificación y los productos probables que se pueden obtener del flujo.
- Obtener información detallada sobre los costos existentes para la eliminación de desechos.

- Obtener información detallada sobre los costos probables y el desempeño de una planta de desechos.

Con base en los resultados de este estudio, se puede tomar una decisión para procurar una planta piloto de prueba del flujo de desechos para verificar las proyecciones económicas con información real del contexto de Costa Rica.

En el caso de los desechos sólidos de los hospitales, se necesita un proceso similar. Sin embargo, existe la opción que después de este estudio inicial, en vez de comprar la tecnología a un proveedor existente, se desarrolle una versión de la tecnología en el ITCR. El programa de investigación se enfocaría alrededor de áreas principales integradas de medición y procesamiento de los desechos, la generación del chorro de plasma, pasar el flujo de desechos por el chorro de plasma y el subsecuente proceso de enfriamiento y la recuperación del calor.

Para desarrollar esta tecnología, las capacidades identificadas en el capítulo anterior deben adquirirse para ese programa de investigación. Algunas de las referencias en la sección 4.3 brindan información sobre el desarrollo de instalaciones a pequeña escala para el tratamiento de desechos hospitalarios lo que brinda alguna reflexión sobre el tipo de tareas de investigación que ha de llevarse a cabo. En particular, será necesario identificar y obtener software y habilidades para modelar los arcos de plasma y la química de la fase gaseosa que ocurre en estos. Estas habilidades no existen actualmente en el ITCR: se debe dedicar personal existente para desarrollarlas con capacitación o colaboración de grupos dentro o fuera del país, o por la reclutación del personal apropiado. Lo segundo es complicado por la carencia de una posición formal de un investigador post doctoral dentro del ITCR: los puestos actuales no son atractivos para aquellos que buscan una carrera en investigación y en ningún caso permiten el beneficio total de estas habilidades para enfocarse en una tarea en la que son necesarios.

Bibliografía

- [1] Ley N_ 8839. Ley para la gestión integral de residuos.
- [2] AMBERO-IP. Plan de Residuos Sólidos Costa Rica (PRESOL) Plan de Acción. Programa Competitividad y medio ambiente (CYMA), 2008.
- [3] Prof. Dr. Marcio Magera. Reciclaje y emprendimiento en la gestión de residuos sólidos en costa rica. el diagnóstico de la basura. Informe técnico, Programa Competitividad y medio ambiente (CYMA), 2006.
- [4] Elena Badilla, Wilfredo Rojas, and Ingrid Vargas. Ubicación de sitios aptos para la disposición de desechos sólidos al osete del valle central, costa rica. Revista Geológica de América Central, 38:7-19, 2008.
- [5] J. Heberlein and A. Murphy. Thermal plasma waste treatment. J. Phys.D: Appl. Phys., 41:053001, 2008.
- [6] E. Gomez et al. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review. Journal of Hazardous Materials, 161:614-626, 2009.
- [7] J. Heberlein. Thermal plasmas for the destruction of hazardous wastes. In G. Bonizzoni and et al., editors, Plasma Technologies for Hazardous Waste Destruction, pages 59-76, 1992.
- [8] J. Heberlein. Thermal plasmas for the destruction of hazardous wastes. Italian Physical Society, Bologna, Italy, 1993.
- [9] J. Reece Roth. Industrial Plasma Engineering: Volume 1, chapter 10. DC Electrical Arc Discharges in Gases. IoP Publishing, 1995.
- [10] J. Reece Roth. Industrial Plasma Engineering: Volume 1, chapter 1. Inductive RF electrical discharges in gasses. IoP Publishing, 1995.
- [11] M. Hrabovsky. Generation of thermal plasmas in liquid-stabilized and hybrid dc-arc torches. Pure Appl. Chem., 74:429-433, 2002.
- [12] T.Watanabe and S. Shimbara. Halogenated hydrocarbon decomposition by steam thermal plasmas. High Temp. Mater. Process., 7:455-474, 2003.
- [13] T. G. Barton. Mobile plasma pyrolysis. Hazardous Waste, 1:237-47,1984.
- [14] T. G. Barton and J. A. Mordy. The destruction of halogenated organic chemicals by plasma pyrolysis. Can. J. Physiol. Pharmacol., 62:976, 1984.

- [15] Westinghouse. Thermal destruction - pyroplasma. In Westinhouse Environmental Services, page 2, July 1988.
- [16] Hyun-Seo Park, Beom-Jae Lee, and SEong-Jung Kim. Medical waste treatment using plasma. J. Ind. Engl. Chem., 11:353-360, 2005.
- [17] Dovetail. Plasma gasi_cation an examination of the health and environmental records of established facilities. Technical report, Dovetail Partners, 2010.
- [18] Juniper. The alter nrg westinghouse plasma gasi_cation process. Technical report, Juniper Consultancy Services Limited, 2008.
- [19] S. H. Nema and K. S. Ganeshprasad. Plasma pyrolysis of medical waste. Current Science, 83:271, 2002.