

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD MUTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE**  
**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**



**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:**

“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN REACTOR ENERGÉTICO DE  
PLASMA IÓNICO PARA TRATAMIENTO DE DESECHOS SÓLIDOS”

**PARA OPTAR AL GRADO DE:**  
LICENCIADO EN CIENCIAS QUÍMICAS

**PRESENTADO POR:**  
VILMA ARELY MURGA GALEANO  
NELSON ERNESTO CHACON SOLA

**DOCENTE DIRECTOR:**  
MSc. ERICK EDGARDO MÉNDEZ

**NOVIEMBRE DE 2017**

**SANTA ANA EL SALVADOR CENTROAMÉRICA**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**AUTORIDADES CENTRALES**



**RECTOR**

MTRO. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

**VICE-RECTOR ACADEMICO**

DR. MANUEL DE JESÚS JOYA

**VICE-RECTOR ADMINISTRATIVO**

ING. NELSON BERNABÉ GRANADOS

**SECRETARIO GENERAL**

LICENCIADO CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

**DEFENSORIA DE LOS DERECHOS UNIVERSITARIOS**

MSc. CLAUDIA MARIA MELGAR DE ZAMBRANA

**FISCAL GENERAL**

LICENCIADO RAFAEL HUMBERTO PEÑA MARÍN

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA DE OCCIDENTE**



**DECANO**

**DR. RAÚL ERNESTO AZCÚNAGA LÓPEZ**

**VICE-DECANO**

**ING. ROBERTO CARLOS SIGUENZA**

**SECRETARIO DE LA FACULTAD**

**LICENCIADO DAVID ALFONSO MATA ALDANA**

**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

**LICDO Y MED. MIGUEL ANGEL CRUZ**

**NOVIEMBRE DE 2017**

**SANTA ANA EL SALVADOR CENTROAMÉRICA**

**Esta tesis es dedicada como agradecimiento, a la memoria de nuestro querido licenciado y asesor Salvador Antonio López (QDDG).**

En esta pasajera vida que Dios nos permite experimentar, gozamos de gratas experiencias e inolvidables momentos con seres muy especiales que conocemos en el transcurso de ésta, lastimosamente también existe lapsos cortos de tristezas. La irreparable pérdida de nuestro maestro, amigo y docente asesor nos deja un vacío muy grande en nuestros corazones, es por ello que este trabajo de grado que concluimos con mucho empeño y esfuerzo, es en memoria a su nombre como producto de una iniciativa que nació de su mente brillante.

Agradecemos profundamente cada momento de su tiempo que ocupaba para guiarnos y corregirnos, cada palabra y cada gesto que con empeño y dedicación demostró siempre por el crecimiento e innovación de la investigación química.

Sabiendo con certeza que esto que ahora terminamos sería una enorme alegría, orgullo y emoción para aquel que en vida fue nuestro asesor Salvador.

**Vilma Arely Murga y Nelson Ernesto Chacón.**

## AGRADECIMIENTOS

**A Dios todopoderoso:** por ayudarme a seguir adelante y darme fe y sabiduría para seguir. Porque ha sido fuente de constante alivio y de sabiduría aun en los momentos más difíciles

**A mis Padres:** Vilma del C. Galeano y Salvador Murga por su apoyo incondicional, entregando todo su esfuerzo para sacarme adelante, deseando siempre lo mejor para mí.

**A mis Hermanos/as:** por su comprensión en este largo camino de estudio, sus palabras de aliento para seguir adelante, y en especial a mi hermana mayor **María Murga** por apoyarme tanto emocionalmente como económicamente. Por aguantarme tantos años en su casa en el tiempo de estudio. A mi chiquita hermosa **Olinda Murga** por alegrar mis días y abrazarme en los momentos difíciles.

**A Claudia Flores:** por ser de mucha bendición para mi familia y apoyarme siempre a salir adelante.

**A mi amada Universidad,** todos mis docentes en general y amigos de la facultad por su valiosa contribución a mi desarrollo profesional, y en particular a los miembros del departamento de química y a todos los docentes que tuve en el trascurso de la carrera, gracias por transmitirme ese conocimiento y enseñarme las herramientas que me ayudaron a entender el maravilloso mundo de la química.

**Al docente director:** MSc. Erick Edgardo Méndez por su apoyo en esta investigación, dedicarme su tiempo, paciencia en todo momento y por su orientación con la asesoría adecuada, basada en sus experiencias, para desarrollar la investigación de una manera profesional. Gracias por confiar en todo momento en mí y guiarme hasta el final y aportar su visión científica en la rama de la química.

**Al docente José Antonio Francia** por apoyarme en este tema de investigación y estar siempre animándome a terminar este trabajo de la mejor manera.

**A mis amigos,** que han sabido disculpar mis ausencias y siempre han tenido una palabra de ánimo. Estoy absolutamente convencida de que si de algo puedo presumir en esta vida es de los grandes amigos que tengo, lo que me hace sentir una persona muy afortunada. Gracias

Benjamín (QDDG), Rachel, Celina, Arely, Alex, Natalia, Emilia, Isaac, Peter, y a Rocío por apoyarme en momentos difíciles de mi carrera. Gracias por toda la paciencia y cariño, gracias por estar a mi lado todo este tiempo y a tantos otros que aun sin nombrar, no puedo olvidar, amigos y compañeros.

**A mi compañero de tesis Nelson Chacón**, mil gracias por haberme hecho la vida mucho más fácil durante la fase final de este proyecto (mi estudio). También a todos los demás compañeros que han colaborado amablemente. De manera muy especial a todas las demás personas de otros ámbitos que han participado como tal de manera desinteresada, como el Lic. Olmos entre otros.

**Vilma Arely Murga Galeano**

## AGRADECIMIENTOS

**Al Único e Invisible Dios:** Por ser tan justo y bueno que en su gran misericordia me doto de fuerzas y entendimiento en la hora del trabajo. Porque ha sido fuente inagotable de Bendiciones y en los momentos más difíciles he visto su mano extendida, me ha hecho descansar.

**A mi Amada Esposa:** La que me soporta mi ayuda idónea y perfecta la que está conmigo en la hora de la felicidad y la tristeza, ha sido la persona que está a mi cuidado, a la que le debo mucho en esta vida, y puedo decir que Dios fue muy Bueno al dármele de Esposa, a ella que me aconseja y me regaña a la que amo con todo mi corazón.

**A mis Padres:** Luis Alonso Chacón y Vilma del C. Sola que a pesar de las dificultades económicas que presenta la vida ellos con el sudor de su frente y el trabajo de sus manos me dieron en esta vida lo necesario para salir de mis estudios, lo reconozco y estaré siempre en deuda con ellos.

**A mis Hermanos:** que fueron muy excelentes y siempre aportando de su ayuda económica y emocional, cada consejo y palabra las llevo grabadas en el corazón, por ser yo el hermano menor me trataron de manera especial, todos los cuidados y la atención es para el pequeño.

A mi Universidad, todos los docentes que me regalaron un poco de su conocimiento y sabiduría, con su paciencia y dedicación, a mis amigos de la facultad por su contribución a mi desarrollo profesional, y en particular a los miembros del departamento de química, gracias por transmitirme ese conocimiento y enseñarme las herramientas que me ayudaron a entender la química.

**Al docente director:** MSc. Erick Edgardo Méndez por poner su confianza en mí, por dedicar su tiempo para mí, tiempo que en lo particular valoro y agradezco mucho porque conozco las ocupaciones que la universidad y la docencia requieren. La paciencia el apoyo y la dedicación a la hora de la enseñanza son de sumo peso. Gracias por confiar y guiarme en todo momento y en toda hora, por terminar conmigo este capítulo de mi vida que le llamamos Carrera Profesional.

**Al docente José Antonio Franci** por estar siempre pendiente del trabajo de investigación por exigir lo mejor de mí, por apoyarme en todo momento y por su deseo el cual es siempre que el estudiante aprenda.

**A mi compañera de tesis Vilma Galeano**, gracias Vilmita por siempre ser la compañera de mil batallas, por estar siempre al cuidado de este trabajo hasta en los errores más mínimos, por tu dedicación y comprensión que ha sido mucha. Mi mejor y única amiga Vilma te debo mucho. De manera muy especial el agradecimiento al Lic. Olmos del Departamento de Física por su fina ayuda, por aportar sus conocimientos

**Nelson Ernesto Chacón.**

## INDICE DE CONTENIDO

### Contenido Pág.

|  |    |
|--|----|
| I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                              | 1  |
| II. MARCO TEORICO .....  | 3  |
| 2.1 Residuos: definición, clasificación e impacto ambiental..... | 3  |
| 2.2 Residuos sólidos municipales (RSM).....                      | 3  |
| 2.3 Residuos de manejo especial (RME).....                       | 4  |
| 2.4 Residuos peligrosos (RP) .....                               | 5  |
| 2.5 Composición de los residuos sólidos domésticos.....          | 5  |
| 2.6 Impacto ambiental.....                                       | 6  |
| 2.7 Tecnologías para el tratamiento de residuos.....             | 10 |
| 2.7.1 Rellenos sanitarios.....                                   | 10 |
| 2.7.1.1 Relleno sanitario mecanizado.....                        | 10 |
| 2.7.1.2 Relleno sanitario semi-mecanizado .....                  | 10 |
| 2.7.1.3 Relleno sanitario manual .....                           | 11 |
| 2.7.1.4 Subproductos de la descomposición.....                   | 11 |
| 2.7.2 Compostaje.....  | 12 |
| 2.7.3 Pirólisis.....   | 12 |
| 2.7.3.1 Descripción del Proceso .....                            | 13 |
| 2.7.4 Gasificación .....   | 13 |
| 2.7.5 Incineración.....  | 14 |
| 2.7.5.1 Reacciones de oxidación .....                            | 14 |
| 2.8 Tecnología de plasma.....                                    | 15 |
| 2.8.1 Definición básica de plasma iónico. ....                   | 16 |
| 2.8.2 ¿Cómo se obtiene el plasma iónico?.....                    | 17 |
| 2.8.3 Arco de plasma.....  | 18 |
| 2.8.4 Marco lógico de la física del plasma.....                  | 23 |
| 2.8.5 Perspectiva cuantitativa del plasma .....                  | 24 |

|  |    |
|--|----|
| 2.8.6 Valoración energética y de confiabilidad.....  | 27 |
| III. OBJETIVOS.....  | 28 |
| IV. HIPOTESIS.....   | 28 |
| V. DISEÑO METODOLOGICO.....  | 28 |
| 5.1 Universo.....  | 28 |
| 5.2 Muestra.....   | 28 |
| 5.3 Método de investigación.....   | 29 |
| 5.4 Clase de investigación.....  | 29 |
| 5.5 Tipo de investigación.....   | 29 |
| 5.6 Plan de análisis.....  | 29 |
| 5.6.1 Diseño y construcción de reactor energético de plasma.....                                     | 29 |
| 5.6.2 Diseño experimental (Análisis de gases).....   | 29 |
| 5.6.2.1 Curva de calibración del gas propano C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> .....                     | 29 |
| 5.6.2.2 Curva de calibración del dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).....                          | 30 |
| 5.6.2.3 Descripción del proceso de obtención de gases en el reactor de plasma.....                   | 30 |
| 5.6.2.4 Toma de muestras y análisis, de gases del reactor energético de plasma.....                  | 31 |
| 5.6.2.5 Procesamiento y análisis de resultados.....  | 31 |
| VI. RESULTADOS Y DISCUSION.....  | 32 |
| 6.1 Diseño y construcción del reactor energético de plasma.....                                      | 32 |
| 6.1.1 Electrodos.....  | 32 |
| 6.1.2 Cámara de ionización del reactor.....  | 32 |
| 6.1.3 Cámara de alimentación de residuos.....  | 33 |
| 6.1.4 Depósito de cenizas e inyección de gas plasmógeno.....   | 35 |
| 6.1.5 Sistema de alimentación eléctrica.....   | 35 |
| 6.2 Análisis de gases.....   | 36 |
| 6.2.1 Curva de calibración del gas propano C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> .....                       | 37 |
| 6.2.2 Espectro IR del gas propano, análisis para curva de calibración.....                           | 38 |
| 6.2.3 Curva de calibración del dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).....                            | 38 |
| 6.2.4 Espectro IR del dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), análisis para curva de calibración..... | 39 |
| 6.2.5 Espectro IR del tratamiento de desechos sólidos con plasma.....                                | 40 |
| 6.2.6 Resultados de gases, del tratamiento de residuos sólidos con plasma.....                       | 41 |

|   |    |
|---|----|
| 6.2.7 Comparación de gas propano y gases resultados de tratamiento de residuos sólidos con plasma. .... | 42 |
| 6.2.8 Comparación de gas dióxido de carbono gases de tratamiento de residuos sólidos con plasma. ....   | 43 |
| 6.2.9 Valoración energética y de confiabilidad.....   | 44 |
| 6.2.9.1 Determinación del porcentaje de conversión (u).....   | 44 |
| 6.2.9.2 Determinación del porcentaje de rendimiento (R) .....   | 45 |
| 6.2.9.3 Determinación de Selectividad.....  | 45 |
| VII. CONCLUSIONES .....   | 46 |
| VIII. RECOMENDACIONES .....   | 46 |
| IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....  | 47 |
| X. ANEXOS .....   | 48 |

## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La gestión de los residuos se ha ido convirtiendo en uno de los principales retos a los que debe enfrentarse la sociedad actual debido a su impacto ambiental, social y económico. La producción de residuos ha existido siempre de manera natural en toda actividad humana, pero en los últimos años ha creado una preocupación constante debido a factores diversos. En primer lugar, el volumen de residuos producidos aumenta cada año debido a la capacidad de consumo de cualquier sociedad moderna. Además, la naturaleza de estos residuos ha cambiado sustancialmente en los últimos años, pasando de ser mayoritariamente orgánicos a inorgánicos, presentando cantidades masivas de plásticos, vidrios y metales. Esto implica que un depósito incorrecto de los mismos en condiciones no adecuadas puede provocar deterioros medioambientales irreversibles. Por último, se debe hablar de la concentración de la producción de estos residuos, debido a la migración masiva desde el medio rural a las ciudades.

A la problemática de la gestión de los residuos, se le une la dependencia de fuentes energéticas externas que obliga a cualquier alternativa de tratamiento de residuos que se plantee a contemplar seriamente el balance energético global.

En la actualidad nos hemos encontrado con una gran cantidad de nuevas tecnologías en cuanto a la obtención de la energía como lo es la incineración, la pirolisis y la que este proyecto lleva a cabo, la gasificación por plasma.

Cuando se utiliza la tecnología de incineración, se pueden identificar múltiples problemas asociados al medio ambiente. En primer lugar, al tratarse de la combustión incompleta de materiales sólidos, se están generando emisiones de contaminantes como óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), cloruro de hidrógeno (HCl), dioxinas y furanos.<sup>1</sup>

El otro gran problema relacionado con el manejo de los desechos es la disposición final ya que los remanentes de los diferentes tratamientos son llevados a fin de cuentas a un relleno sanitario en donde se acumulan grandes cantidades de basura. Un relleno sanitario además de contaminar los suelos y recursos hídricos subterráneos debido a la filtración de lixiviados, actúa como un digestor a gran escala generando gas metano el cual está relacionado con el efecto invernadero.<sup>2, 3</sup>

Pues cada tecnología tiene sus ventajas y desventajas, es por ello que se debe tomar en cuenta el uso de tecnologías amigables con el medio ambiente; pero como se han mencionado anteriormente han sido más desventajas las que se han obtenido. Siendo la más prometedora en todos los sentidos en cuanto a la obtención de energía mediante desechos sólidos, es la gasificación por plasma, que a pesar que es una tecnología aun nueva, es la que impulsa al éxito total. Las ventajas de esta tecnología se tratarán al detalle más adelante, pero se puede decir que es capaz de acabar con prácticamente todo tipo de residuos y convertirlos en energía. Los dispositivos de plasma térmico se conocen como un medio de densidad muy alta de energía. En realidad, un reformador de plasma es una alternativa atractiva para la producción de hidrógeno y gas de síntesis. Debido a la temperatura del plasma los efectos de especies podrían acelerar las reacciones químicas. Los reactores de plasma representan un incisivo enfoque por su simplicidad, de alta eficiencia de conversión y rápido tiempo de respuesta.

Los residuos y su gestión son un aspecto medioambiental significativo.

El tratamiento térmico de residuos puede, por tanto, verse como una respuesta a las amenazas medioambientales planteadas por corrientes de residuos mal gestionadas o sin gestionar.

La gasificación por plasma virtualmente puede procesar cualquier residuo sin tratamiento previo, y el reactor se diseña en base a las características físicas de la alimentación.

Un gasificador por plasma es un recipiente privado de oxígeno (anóxico) que se hace funcionar a las muy altas temperaturas que se logran con plasma. Debido a que el entorno en el interior del recipiente se ve privado de oxígeno, la materia prima que se procesa en el gasificador no se quema. Más bien, el calor rompe la materia prima en elementos como el hidrógeno y compuestos simples como el monóxido de carbono y agua. El gas que se crea se llama gas de síntesis o "syngas".

La tecnología se basa en utilizar los desechos sólidos (basura) haciéndolos tratar mediante plasma a través de un convertidor energético para la obtención de energía limpia y pura.

## **II. MARCO TEORICO**

### **2.1 Residuos: definición, clasificación e impacto ambiental.**

Residuo es definido como todo material resultante de un proceso de fabricación, transformación, utilización, consumo o limpieza, cuando su poseedor o productor lo destina al abandono. También se define como el producto de desecho sólido, líquido y gaseoso generado en actividades de producción y consumo, que ya no posee valor económico por la falta de tecnología adecuada que permita su aprovechamiento o por la inexistencia de un mercado para los posibles productos a recuperar.

Es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido, resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final.<sup>4</sup>

La clasificación de residuos se puede realizar de acuerdo con varios criterios.

En función de su estado físico se dividen en sólidos, líquidos y gases, aunque la ley vigente no realiza ninguna distinción entre los mismos. La única excepción son los vertidos de aguas residuales y las emisiones a la atmósfera que se encuentran reguladas de forma específica.

El origen de los residuos constituye un parámetro interesante para su clasificación, ya que muchas de sus características y propiedades están determinadas por el lugar y forma en la que se originan. Los residuos se clasifican en: residuos sólidos municipales (RSM); residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP).

### **2.2 Residuos sólidos municipales (RSM)**

Son los generados en las casas de habitación, los que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos comerciales o en la vía pública que genere residuos con características similares a los de las casas de habitación, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos.

Los residuos sólidos municipales se clasificaran en orgánicos (fracción orgánica de rápida degradación), reciclables y no reciclables con objeto de facilitar su separación, manejo y aprovechamiento.<sup>5</sup>

### **2.3 Residuos de manejo especial (RME)**

Son aquellos generados en los procesos productivos, que no son peligrosos y que tienen características de gran volumen, difícil manejo, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos municipales.

Los residuos de manejo especial se clasifican como se indica a continuación:

- a. Los provenientes de servicios de salud, asimilables a los residuos sólidos municipales generados por los establecimientos que realicen actividades médico-asistenciales a las poblaciones humanas o animales, centros de investigación, con excepción de los biológico-infecciosos.
- b. Los generados por las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, industriales incluyendo los residuos de los insumos utilizados en esas actividades.
- c. Los provenientes de los servicios de transporte, así como los generados a consecuencia de las actividades que se realizan en puertos, aeropuertos, terminales ferroviarias y portuarias y en las aduanas; siempre que no sean peligrosos.
- d. Lodos, material de filtrado, arena y residuos similares a los residuos sólidos municipales provenientes del tratamiento de aguas residuales; e. Los generados por tiendas departamentales o centros comerciales en grandes volúmenes.
- f. Producidos en la construcción, remodelación y/o mantenimiento, demolición en general y escombros, comúnmente llamado ripio.
- g. Los tecnológicos provenientes de la industria informática, fabricantes de productos electrónicos o de vehículos automotores y otros que al transcurrir su vida útil, por sus características, requieren de un manejo específico en plantas autorizadas.
- h. Los neumáticos usados.
- i. Chatarra
- j. Talas y podas de árboles.
- k. Derivados de la cría o beneficio de animales, conocido como rastro.
- l. De la importación, fabricación, distribución, venta o reparación de bienes.
- m. Residuos generados de eventos masivos (propaganda, espectáculos pancartas, carteles, volantes, etc.).

n. Residuos generados en las elecciones políticas (boletas, formularios, volantes, carteles, desplegados, etc.).<sup>6</sup>

## 2.4 Residuos peligrosos (RP)

Los residuos peligrosos son aquellos en estado sólido, líquido o gaseoso que poseen alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o que contienen agentes biológico-infecciosos que les confieran peligrosidad, así como materiales, envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan estado en contacto con un residuo o material peligroso.

Los residuos de la industria minera-metalúrgica provenientes del minado y tratamiento de minerales tales como residuos de las lagunas de lixiviados o áreas de trabajo abandonadas, así como los metalúrgicos provenientes de los procesos de fundición, refinación y transformación de metales, están catalogados como residuos peligrosos.<sup>7</sup>

## 2.5 Composición de los residuos sólidos domésticos

Tomando como base el municipio de San Salvador, la composición de la basura generada es 58% materia orgánica y 42% materia inorgánica.

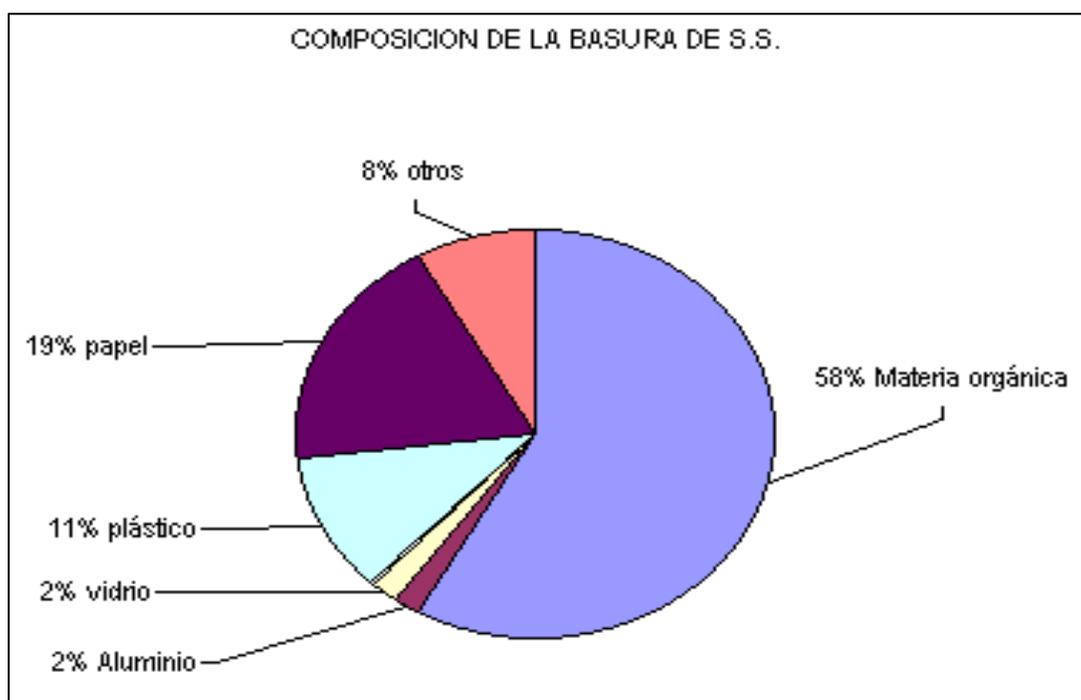


Fig. 1: Composición de los residuos sólidos domésticos.<sup>7</sup>

La composición de la fracción inorgánica es; 2% aluminio, 2% vidrio, 11% plástico, 19% papel y 8% otros.

## **2.6 Impacto ambiental**

La generación de residuos en los últimos años resulta preocupante debido al volumen de los mismos, que o bien aumenta o se mantiene constante, sin llegar a disminuir en casi ningún caso. La gestión de los residuos se ha ido convirtiendo en uno de los principales retos a los que debe enfrentarse la sociedad actual debido a su impacto ambiental, social y económico. La producción de residuos ha existido siempre de manera natural en toda actividad humana, pero en los últimos años ha creado una preocupación constante debido a factores diversos. En primer lugar, el volumen de residuos producidos aumenta cada año debido a la capacidad de consumo de cualquier sociedad moderna. Además, la naturaleza de estos residuos ha cambiado sustancialmente en los últimos años, pasando de ser mayoritariamente orgánicos a inorgánicos, presentando cantidades masivas de plásticos, vidrios y metales. Esto implica que un depósito incorrecto de los mismos en condiciones no adecuadas puede provocar deterioros medioambientales irreversibles.

Vivimos en una sociedad de consumo en la que los residuos que generamos se han convertido en un grave problema para el medio ambiente, debido a que estamos inmersos en la cultura de usar y tirar.

La concentración de la población humana en relativamente pequeños espacios, y la creciente producción de artículos desechables, ha creado el gran problema de las basuras.

Empaques metálicos de aerosoles, plásticos no biodegradables, estructuras metálicas que se acumulan y no se reciclan, contaminan y degradan el ambiente.

La mayoría de los sitios de deposición final o rellenos sanitarios son en realidad un gran foco de contaminación ambiental e insalubridad. Contaminan las fuentes de aguas superficiales (ríos, lagos, mar), las aguas subterráneas, el suelo, y la atmósfera. Los lixiviados que escurre la basura y el humo proveniente de las quemaduras, son los causantes principales de tantos daños a la salud pública y al medio ambiente.

En El Salvador, se estima que en total la cantidad de desechos sólidos producida en el área urbana de los municipios, asciende a la cantidad de 3,186.97 toneladas diarias (Tabla 1).

El departamento de San Salvador es el principal generador de desechos sólidos en la república, con un total de 1,768.83 toneladas diarias, correspondientes a un 55.50 % de la

producción total. El segundo departamento con mayor generación es La Libertad, con un 11.55 % del total equivalentes a 368.19 toneladas, seguido por Santa Ana con 270.56 ton/día y San Miguel con una producción de 231.01 ton/día.

El departamento con menor generación de desechos sólidos es Morazán, con una producción de 21.83 toneladas diarias.

| <b>Departamento</b> | <b>Producción estimada<br/>(ton/día)</b> | <b>%</b>   |
|---------------------|--|------------|
| San Salvador        | 1,768.78                                 | 55.50      |
| La Libertad         | 368.19                                   | 11.55      |
| Santa Ana           | 270.56                                   | 8.49       |
| San Miguel          | 231.01                                   | 7.25       |
| Sonsonate           | 109.82                                   | 3.45       |
| Usulután            | 82.11                                    | 2.58       |
| Cuscatlán           | 72.46                                    | 2.27       |
| La Paz              | 55.46                                    | 1.74       |
| La Unión            | 51.79                                    | 1.63       |
| Ahuachapán          | 50.29                                    | 1.58       |
| Cabañas             | 42.58                                    | 1.34       |
| San Vicente         | 32.60                                    | 1.02       |
| Chalatenango        | 30.09                                    | 0.94       |
| Morazán             | 21.23                                    | 0.67       |
| <b>Total</b>        | <b>3,186.97</b>                          | <b>100</b> |

*Tabla N° 1. Producción estimada de desechos sólidos generados en el área urbana por departamento.<sup>8</sup>*

De la recogida, una gran mayoría va a parar al suelo sin ningún tratamiento, otra porción va a parar a las aguas y solo una parte va a rellenos sanitarios.

En las pequeñas ciudades, cuando la basura no se recoge a tiempo, se lanza a los ríos o lugares más cercanos, dando lugar a focos de infecciones.

Es tanta la producción de residuos, que en nuestro país no se alcanza a recolectar toda la basura que se produce. Comparando la cantidad de desechos sólidos generados del país de

3,186.97 ton/día, sólo se recolecta un 77 % equivalente a 2,451.59 ton/día, es decir que diariamente se dejan de recolectar 735.38 toneladas las cuales en su mayoría son depositadas en botaderos clandestinos (Ver Tabla 2).<sup>9</sup>

| <b>Departamento</b> | <b>Producción recolectada<br/>(ton./día)</b> | <b>%</b>   |
|---------------------|--|------------|
| San Salvador        | 1,244.23                                     | 50.75      |
| La Libertad         | 323.28                                       | 13.19      |
| Santa Ana           | 242.60                                       | 9.90       |
| San Miguel          | 166.36                                       | 6.79       |
| Sonsonate           | 104.90                                       | 4.28       |
| Usulután            | 73.94  | 3.02       |
| La Paz              | 49.73  | 2.03       |
| Cuscatlán           | 43.45  | 1.77       |
| La Unión            | 41.05  | 1.67       |
| Ahuachapán          | 41.01  | 1.67       |
| Cabañas             | 37.86  | 1.54       |
| Chalatenango        | 32.54  | 1.33       |
| San Vicente         | 32.16  | 1.31       |
| Morazán             | 18.48  | 0.75       |
| <b>Total</b>        | <b>2,451.59</b>                              | <b>100</b> |

*Tabla 2. Producción recolectada de desechos sólidos generados en el área urbana por departamento.*<sup>9</sup>

Se han incorporado materiales nuevos como los plásticos, de origen sintético, han aumentado su proporción otros como los metales, los derivados de la celulosa o el vidrio, que antes se reutilizaban abundantemente y que ahora se desechan con gran profusión.

A esto hay que añadir la aparición en la basura de otros de gran potencial contaminante, como pilas, aceites minerales, lámparas fluorescentes, medicinas caducadas, etc. Ha surgido así una nueva problemática medioambiental derivada de su vertido incontrolado que es causa de graves afecciones ambientales:

Contaminación de suelos.

Contaminación de acuíferos por lixiviados.

Contaminación de las aguas superficiales.

Emisión de gases de efecto invernadero fruto de la combustión incontrolada de los materiales vertidos.

Ocupación incontrolada del territorio generando la destrucción del paisaje y de los espacios naturales.

Creación de focos infecciosos.

Proliferación de plagas de roedores e insectos.

Producción de malos olores.

A estas consideraciones tenemos que añadir que la actividad económica humana se basa en la explotación de los recursos naturales, definiéndose éstos como aquellos bienes de la naturaleza potencialmente útiles para el hombre.

Se clasifican en: Recursos renovables. Como la energía solar, el viento, etc.

Recursos potencialmente renovables. Exigen no sobrepasar el rendimiento de los mismos, ya que de otro modo se produce la degradación medioambiental en ocasiones irreversible.

Entre ellos se encuentra el aire, el agua, el suelo, las especies animales, vegetales, etc.

Pues bien, en nuestros días el modelo de explotación insostenible de los recursos naturales que caracterizó a las primeras etapas del desarrollo industrial ha empezado a entrar en crisis. Problemas como el agujero en la capa de ozono, el calentamiento global, la destrucción de los bosques primarios, la desaparición de la biodiversidad o el agotamiento de los caladeros por la sobrepesca evidencian una crisis de dimensiones planetarias.

Hoy en día existen diferentes tecnologías que se pueden aplicar para la valorización energética de los residuos, consistiendo la mayoría de ellas en procesos de tratamiento térmico como son la incineración, la pirolisis y la gasificación convencional o por plasma. Cada uno de ellas se encuentra en un estado de desarrollo de distinto nivel. Como una posibilidad adicional de aprovechamiento energético de los residuos también se puede hablar de la digestión anaerobia con valorización del biogás obtenido.

A la hora de seleccionar una tecnología específica se tendrán en cuenta aspectos fundamentales como:

- El tipo de residuo o mezcla de residuos a valorizar.

- La flexibilidad de la tecnología, es decir, su capacidad de respuesta ante las variaciones en las características de los residuos.

## **2.7 Tecnologías para el tratamiento de residuos.**

Los procesos de eliminación de residuos son numerosos, cada uno de ellos con ciertas características y utilidades, además de un cierto nivel de aceptación a nivel social y de adaptación a la sociedad contemporánea. Los métodos actuales de tratamiento de residuos incluyen los rellenos sanitarios, el compostaje, la incineración, la pirólisis y la gasificación. Estos tres últimos son métodos que permiten la recuperación del poder calorífico.

### **2.7.1 Rellenos sanitarios**

Es el sitio que es proyectado, construido y operado para disponer los residuos, mediante la aplicación de técnicas de ingeniería sanitaria y ambiental, que permiten evitar la contaminación ambiental y daño a la salud generado por los residuos.

Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más estrecha posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen. Además, prevé los problemas que puedan causar los líquidos y gases producidos por efecto de la descomposición de la materia orgánica.

#### **2.7.1.1 Relleno sanitario mecanizado**

El relleno sanitario mecanizado es aquel diseñado para las grandes ciudades y poblaciones que generan más de 40 toneladas diarias. Por sus exigencias es un proyecto de ingeniería bastante complejo, que va más allá de operar con equipo pesado. Esto último está relacionado con la cantidad y el tipo de residuos, la planificación, la selección del sitio, la extensión del terreno, el diseño y la ejecución del relleno, y la infraestructura requerida, tanto para recibir los residuos como para el control de las operaciones, el monto y manejo de las inversiones y los gastos de operación y mantenimiento.

#### **2.7.1.2 Relleno sanitario semi-mecanizado**

Cuando la población genere o tenga que disponer entre 16 y 40 toneladas diarias de RSM en el relleno sanitario, es conveniente usar maquinaria pesada como apoyo al trabajo

manual, a fin de hacer una buena compactación de la basura, estabilizar los terraplenes y dar mayor vida útil al relleno. En estos casos, el tractor agrícola adaptado con una hoja topadora o cuchilla y con un cucharón o rodillo para la compactación puede ser un equipo apropiado para operar este relleno al que podríamos llamar semi-mecanizado.

### **2.7.1.3 Relleno sanitario manual**

Es una adaptación del concepto de relleno sanitario para las pequeñas poblaciones que por la cantidad y el tipo de residuos que producen -menos de 15 t/día-, además de sus condiciones económicas, no están en capacidad de adquirir el equipo pesado debido a sus altos costos de operación y mantenimiento.

El término manual se refiere a que la operación de compactación y confinamiento de los residuos puede ser ejecutado con el apoyo de una cuadrilla de hombres.

### **2.7.1.4 Subproductos de la descomposición**

Casi todos los residuos sólidos sufren cierto grado de descomposición, pero es la fracción orgánica la que presenta los mayores cambios. Los subproductos de la descomposición están integrados por líquidos, gases y sólidos.

- Líquido lixiviado o percolado.

La descomposición o putrefacción natural de la basura produce un líquido maloliente de color negro, conocido como lixiviado o percolado, parecido a las aguas residuales domésticas, pero mucho más concentrado.

Las aguas de lluvia que atraviesan las capas de basura aumentan su volumen en una proporción mucho mayor que la que produce la misma humedad de los RSM, de ahí que sea importante interceptarlas y desviarlas para evitar el incremento de lixiviado; de lo contrario, podría haber problemas en la operación del relleno y contaminación en las corrientes y nacimientos de agua y pozos vecinos.

- Gases.

Un relleno sanitario se comporta como un digestor anaerobio. Debido a la descomposición o putrefacción natural de los RSM, no solo se producen líquidos sino también gases y otros compuestos. La descomposición de la materia orgánica por acción de los microorganismos presentes en el medio tiene dos etapas: aerobia y anaerobia.

La aerobia es aquella fase en la cual el oxígeno que está presente en el aire contenido en los intersticios de la masa de residuos enterrados, es consumido rápidamente.

La anaerobia, en cambio, es la que predomina en el relleno sanitario porque no pasa el aire y no existe circulación de oxígeno, de ahí que se produzcan cantidades apreciables de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), así como trazas de gases de olor punzante, como el ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y mercaptanos.

El gas metano reviste el mayor interés porque, a pesar de ser inodoro e incoloro, es inflamable y explosivo si se concentra en el aire en una proporción de 5 a 15% en volumen; los gases tienden a acumularse en los espacios vacíos dentro del relleno y aprovechan cualquier fisura del terreno o permeabilidad de la cubierta para salir. Cuando el gas metano se acumula en el interior del relleno y migra a las áreas vecinas, puede generar riesgos de explosión. Por lo tanto, se recomienda una adecuada ventilación de este gas, aunque en los pequeños rellenos este no es un problema muy significativo.<sup>10</sup>

### **2.7.2 Compostaje**

Proceso de tratamiento de residuos sólidos orgánicos por medio del cual son biológicamente descompuestos bajo condiciones controladas, hasta el punto en que el producto final puede ser manejado, embodegado y aplicado como mejorador de suelo.

### **2.7.3 Pirólisis**

Una de las tecnologías alternativas para el manejo de los residuos sólidos urbanos y que ofrece prometedoras ventajas aunque aún se encuentra en proceso de desarrollo tecnológico es la pirólisis.

Este es un proceso fisicoquímico complejo que desde hace algunos años se ha investigado en los países desarrollados, particularmente en los Estados Unidos de América como una alternativa para reciclar indirectamente los residuos sólidos urbanos.

La pirólisis se define como un proceso fisicoquímico mediante el cual el material orgánico de los residuos sólidos se descompone por la acción del calor, en una atmósfera deficiente de oxígeno y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles, residuos secos de carbón y agua.

La pirólisis tiene como objetivo el orden sanitario y ecológico de los residuos sólidos urbanos, disminuyendo su volumen al ser transformados en materiales sólidos, líquidos y gaseosos con potencial de uso como energético o materias primas para diversos procesos industriales.

### **2.7.3.1 Descripción del Proceso**

La pirólisis se diferencia de la incineración porque el proceso de descomposición térmica de la materia orgánica se desarrolla en un ambiente con deficiencia o ausencia de aire, mientras que la incineración requiere del oxígeno del aire para provocar la combustión de los componentes. Durante este proceso, la materia orgánica de poco valor se transforma en productos de alto contenido energético como el carbón, alquitrán, los gases de hidrógeno, nitrógeno, metano, etano, propano, butano, pentano, amoníaco, oxígeno, monóxido y bióxido de carbono que pueden ser utilizados como combustibles, además de aceites ligeros (mezclas de benceno, tolueno, xileno y otros), sales y metales reducidas que se pueden usar como materia prima en otros procesos.

Existen diversos diseños de plantas pirolíticas (escala piloto) para el tratamiento de los desechos sólidos urbanos.

El componente principal de todos es el reactor pirolítico que consta de una retorta (cámara) calentada con gas, hermética y revestida con una chaqueta aislante. Esta retorta gira lentamente y tiene una pequeña inclinación en el sentido de alimentación hacia la descarga. Los residuos son alimentados a través de un sello que abre intermitentemente y son sometidos a temperaturas de 650 a 982°C en una atmósfera deficiente o libre de oxígeno.<sup>11</sup>

### **2.7.4 Gasificación**

La gasificación se refiere a la conversión termoquímica de un material sólido a través de la oxidación parcial. Utilizando aire, oxígeno o calentamiento indirecto se producen gases combustibles (gas de síntesis, el productor de gas), principalmente CO, H<sub>2</sub>, metano, hidrocarburos ligeros y en asociación con CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> en función de proceso utilizado. La conversión termoquímica cambia la estructura química de la biomasa por medio de temperatura alta.<sup>12</sup>

### 2.7.5 Incineración

Es un proceso térmico que conduce a la reducción en peso y volumen de los residuos sólidos mediante la combustión controlada en presencia de oxígeno.

La eficacia de la incineración depende de muchos factores, entre ellos el diseño, el control del proceso, la capacidad y eficacia de los dispositivos de control de la contaminación atmosférica.

Un uso inapropiado de los incineradores puede dar lugar a la formación de subproductos transportados por el aire y sólidos peligrosos que representan una grave amenaza para el medio ambiente y la salud pública.

#### 2.7.5.1 Reacciones de oxidación

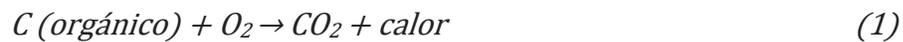
Los elementos principales que se encuentran en los residuos son carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre; también están presentes en pequeñas cantidades otros elementos como metales, halógenos, etc. Los productos que se obtienen de la incineración en función de cada componente son:

| <b>Componentes en el residuo</b> | <b>Productos</b>   |
|----------------------------------|--|
| Carbono                          | CO, Cenizas(s) y Dióxido de carbono(g)                   |
| Oxígeno                          | Dióxido de Carbono (g)                                   |
| Hidrógeno                        | Vapor de agua  |
| Halógenos                        | Ácidos halogenados, Br <sub>2</sub> , I <sub>2</sub> (g) |
| Azufre                           | Óxidos de Azufre (g)                                     |
| Nitrógeno                        | Óxidos de nitrógeno (g)                                  |
| <u>Fósforo</u>                   | <u>Pentóxidos de difósforo (g)</u>                       |
| <u>Metales</u>                   | <u>Óxidos metálicos (s)</u>                              |
| <u>Metales Alcalinos</u>         | <u>Hidróxidos (s)</u>                                    |

Tabla N° 3. Productos generados en un proceso térmico de incineración.<sup>13</sup>

Bajo condiciones ideales, usando solo la cantidad estequiométrica de O<sub>2</sub> y que éste reaccione solo en su estado elemental, los productos gaseosos derivados de la incineración de residuos estarían constituidos por CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> en menor cantidad.

Las reacciones de combustión (oxidación) que se producirán entre el carbono, el hidrógeno y el azufre contenidos en los residuos y el oxígeno del aire, serían básicamente las siguientes:



Pero en la práctica una cantidad estequiométrica de O<sub>2</sub> no es suficiente para el proceso de incineración, además el O<sub>2</sub> participa en todos sus estados de oxidación (O<sub>2</sub>·-, RO·, ROO·, O·, HO·). Esto sumado a que algunos productos de las reacciones de oxidación pueden reaccionar entre sí, nos aleja de las condiciones ideales y crea muchos problemas, en forma de contaminantes, en las plantas incineradoras.<sup>13</sup>

Tanto la incineración, con o sin recuperación de energía, como las tecnologías alternativas de gasificación y pirólisis son modelos de gestión de residuos urbanos con impactos ambientales que afectan la salud de las personas, al igual que los rellenos sanitarios o basurales a cielo abierto.

La aplicación de tecnologías para gasificación, como el plasma, pueden evitar estos problemas.

## **2.8 Tecnología de plasma.**

Cuando se habla de la eliminación de residuos tóxicos y peligrosos, se debe disponer de una tecnología segura, confiable y probada, ya que estas sustancias dañinas suponen un riesgo importante para la salud humana y para el medio ambiente.

La gasificación por plasma ofrece una solución eficiente para mitigar el riesgo de las toxinas peligrosas: y eliminarlas. Convirtiendo residuos peligrosos en energía limpia y segura, la gasificación es una solución ganadora para la reducción y destrucción de un problema que continúa siendo muy grande para las sociedades actuales. Las antorchas de

plasma consiguen los que otros métodos no han llegado a alcanzar: vaporizar los constituyentes peligrosos de los residuos, eliminando las toxinas de forma eficiente y convirtiendo los mismos en energía renovable.

### **2.8.1 Definición básica de plasma iónico.**

El plasma es el cuarto estado de la materia, un estado fluido similar al gaseoso, con la diferencia de que determinada proporción de sus partículas están ionizadas, es decir, cargadas eléctricamente. Estas partículas no poseen equilibrio electromagnético, por lo que el plasma resulta un buen conductor eléctrico. Se le considera un estado particular de la materia porque presenta características propias que no se dan en los estados sólido, líquido o gas; en particular, la capacidad de movimiento de los átomos. El plasma es, además, la forma más abundante de materia en el universo. De forma natural se encuentra en los rayos y en las auroras boreales. Se forma cuando la materia común se calienta a más de 5000°C, produciendo fluidos o gases cargados eléctricamente. Estos fluidos o gases están influenciados por las interacciones eléctricas de iones y electrones en presencia de campos magnéticos.

La ionización de la materia para la formación de este cuarto estado se da a través de un proceso llamado "proceso de cascada". En un proceso de este tipo un electrón choca con un átomo neutral para producir un segundo electrón y un ión. Así existen, por lo tanto, dos electrones y un ión. Una vez que estos dos electrones han chocado con otro átomo neutral, se producen cuatro electrones y tres iones. Este proceso continúa y, tras una sucesión de numerosas colisiones se han formados millones de electrones e iones a gran velocidad.<sup>13</sup>

La formación del plasma se puede entender desde el punto de vista de la energía interna de la materia. Así, la energía interna de una sustancia en estado líquido es mayor que en estado sólido, y en estado gaseoso mayor que en líquido. Sin embargo, si se aumentara paulatinamente su energía interna, las moléculas del gas se disocian en átomos y estos a su vez en electrones e iones positivos, es decir, se ionizan.

A pesar de considerarse un nuevo estado de la materia, no existe una transición de fase. En general, a energías internas equivalentes a temperaturas mayores de 10.000°C, todas las sustancias conocidas se encuentran en este estado. Dependiendo de su energía, distinguimos entre plasma caliente y plasma frío. El primero está fuertemente ionizado y

solo está formado por electrones e iones positivos. El segundo, débilmente ionizado, además de electrones e iones, también contiene átomos y moléculas en su estado fundamental de energía o estados excitados.

Sea fuerte o débilmente ionizado, el plasma presenta nuevos fenómenos y características imposibles de observar en los otros estados de la materia; por ejemplo, estos son gases de alta conductividad eléctrica y térmica, forman regiones laminares ricas en iones, tienen alta difusión de partículas, transmite ondas electromagnéticas y mecánicas, emite radiación y partículas. Todas estas propiedades son aprovechadas en la industria.

Los fenómenos que se producen en el plasma son escalables. Esto quiere decir que sus propiedades eléctricas y físicas son siempre las mismas independientemente del tamaño del plasma. Por supuesto los fenómenos dinámicos toman mucho menos tiempo en ocurrir en un pequeño laboratorio que en un plasma del tamaño de por ejemplo una galaxia. Pero los fenómenos son idénticos en que siempre obedecen las mismas leyes físicas.<sup>14</sup>

### **2.8.2 ¿Cómo se obtiene el plasma iónico?**

Para que la materia alcance el estado de plasma, se pueden utilizar diversas técnicas que le transfieran energía, las cuales utilizan diferentes procesos físicos. Es posible generar plasma, por ejemplo, estableciendo intensos campos eléctricos o por interacción con ondas electromagnéticas de radiofrecuencia (RF), por absorción de microondas, por interacción con ondas de choque y láseres, por colisiones con haces de partículas de alta energía, con vapores a altas temperaturas, por arcos eléctricos, etcétera, y a su vez, cada técnica presenta diversas variantes.

Los eventos más dramáticos asociados con los plasmas eléctricos son las descargas eléctricas y, en ocasiones, la repentina y explosiva liberación de energía eléctrica o magnética almacenada. Se trata de fenómenos locales que involucran procesos tales como el calentamiento, ionización, aceleración de partículas y generación de cantidades extraordinarias de radiación electromagnética.

En cualquier momento dado, la densidad de corriente (Amperios por metro cuadrado) existente en el plasma determina el modo particular en el que opera el plasma. La estructura atómica del gas que se ioniza para formar el plasma también es un factor importante a tener en cuenta en el proceso.

Está claro que la clave del control del proceso está en las antorchas de plasma, que son el centro del sistema. Gracias a ellas se podrá añadir más o menos calor, en función de la temperatura que se desee para el gas de síntesis.

El resto de los elementos del sistema son necesarios para el correcto manejo de las antorchas. La utilización práctica del plasma a nivel tecnológico se basa en la creación del "arco de plasma".<sup>15</sup>

### 2.8.3 Arco de plasma

Hoy en día, es la tecnología de antorchas de plasma la que consigue llegar a este estado, pero el inicio tecnológico se le debe a los tubos de descargas eléctricas, que son una forma útil de explicar la forma de conseguir el arco necesario, y de situarlo en los niveles necesarios de corriente y voltaje.

El esquema básico tiene el siguiente aspecto:

Las descargas eléctricas que se producen en estos tubos permiten diferenciar tres regiones básicas en una curva característica voltaje-corriente. Estas tres zonas son la descarga oscura, la descarga brillante y la descarga de arco.

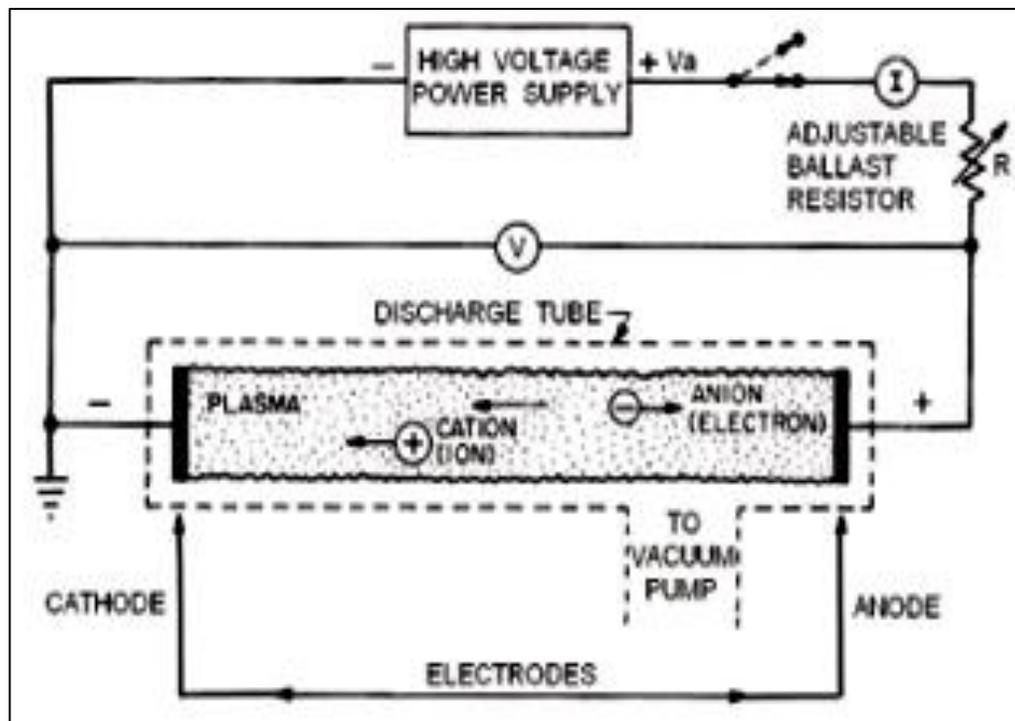


Fig. 2: Representación de una descarga eléctrica.<sup>16</sup>

Un tubo de descargas eléctricas clásico consiste sencillamente en una cabina aislada que contiene un gas a baja presión, que se ve atravesado por una corriente eléctrica cuando se le aplica un voltaje suficiente a sus electrodos.

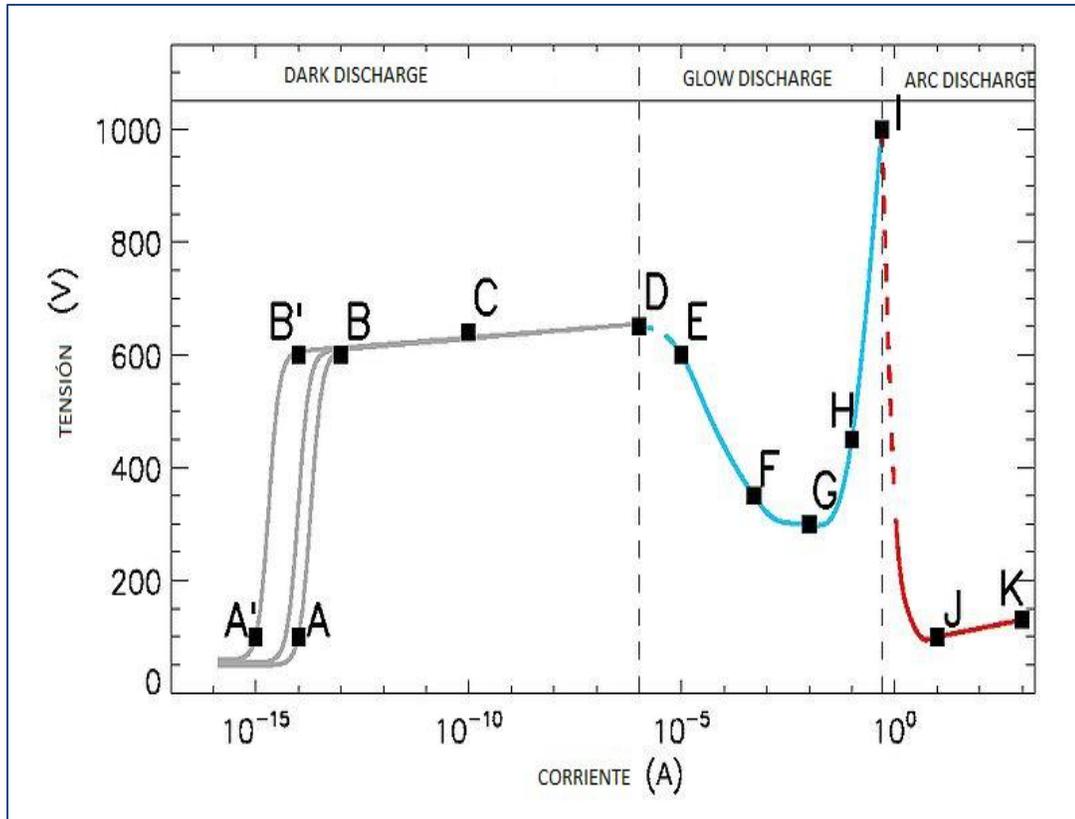


Fig. 3: Esquema básico de tubo de descargas eléctricas.<sup>16</sup>

Los puntos que se distinguen en la figura anterior son los siguientes:

- A: pulsaciones aleatorias debidas a la radiación.
- B: corriente saturada.
- C: descarga oscura en avalancha.
- D: descarga oscura sostenida.
- E: región inestable: descarga corona.
- F: descarga brillante mínima.
- G: descarga brillante normal.
- H: descarga brillante anormal.
- I: región inestable: transición brillo-arco.
- J/K: arco eléctrico.

La región A-D se conoce como descarga oscura, y en ella existe un mínimo de ionización, pero la corriente es menor de 10 mA y por lo tanto la radiación producida no es significativa. La región F-H representa la descarga brillante, donde el plasma emite un ligero brillo que ocupa casi todo el volumen del tubo. Esta luz es emitida por átomos neutrales excitados. La región I-K es la descarga de arco, donde el plasma se concentra en un canal estrecho en el centro del tubo, produciendo una gran cantidad de radiación.

La descarga oscura, o descarga de Townsend, comienza a voltajes muy pequeños donde la generación de carga se produce por pulsaciones aleatorias debidas a rayos cósmicos. A medida que se aumenta el voltaje, comienza el proceso de cascada definido anteriormente, hasta llegar al final de la zona, donde el brillo del plasma comienza a ser visible.

Las aplicaciones prácticas de esta zona de descarga son pequeñas, pero se suelen explotar para detectar y medir la energía de una radiación ionizada.

La zona de descarga brillante ocurre cuando hay un descenso en el voltaje de los electrodos y una entrada al rango de los miliamperios en la corriente. Los voltajes van aumentando, haciendo a la descarga pasar desde un estado mínimo a un estado anormal, donde el brillo cubre cada vez más los electrodos. En esta región operan aparatos como las lámparas de neón y las televisiones con pantalla de plasma. En el ámbito de la química analítica, se utilizan las propiedades de esta región para el análisis elemental y molecular de sólidos, líquidos y gases.

Por último, se llega a la zona de arco eléctrico, que no es más que una ruptura eléctrica de un gas que produce una descarga de plasma continua capaz de hacer pasar corriente a través de medios no conductivos como el aire. Este arco es la base para la tecnología de antorchas de plasma utilizadas en el proceso de eliminación de residuos por plasma.

Utilizando este principio, las antorchas de plasma representan una versión avanzada de los tubos de descarga eléctrica, siendo equipos industriales que permiten producir gases ionizados a altísimas temperaturas mediante la generación controlada de un arco eléctrico.<sup>17</sup>

Proceso de la gasificación por plasma en la eliminación de residuos.

La gasificación es un proceso termodinámico ampliamente conocido mediante el cual toda sustancia sólida o líquida a la que, en una atmósfera reductora, se le aporta una cantidad de energía suficiente como para romper los enlaces moleculares, se transforma o bien en un gas de síntesis orgánico de bajo poder calorífico o bien en una lava fundida que al enfriarse

se transforma en un producto vítreo inerte. Si bien es un proceso en el que se dan algunas reacciones de oxidación, no es un proceso de combustión propiamente dicho.

La tecnología de plasma se basa en la ionización de gas inerte por medio de descargas eléctricas o fotoionización, resultando en la formación de un arco eléctrico con temperaturas tan altas como 6,000°C. El plasma se produce a través de una antorcha, este aparato convierte electricidad en calor vía la resistencia del plasma. La aplicación de la tecnología de plasma a RSU causa la gasificación y disociación molecular de la materia orgánica a 2,000°C. Al agregar vapor se dan las reacciones de gasificación sin reacciones intermediarias.

Las altas temperaturas permiten una disociación definitiva e irreversible de las estructuras moleculares en sus compuestos básicos.

Existe una disociación de las moléculas orgánicas y su transformación en un gas de síntesis.

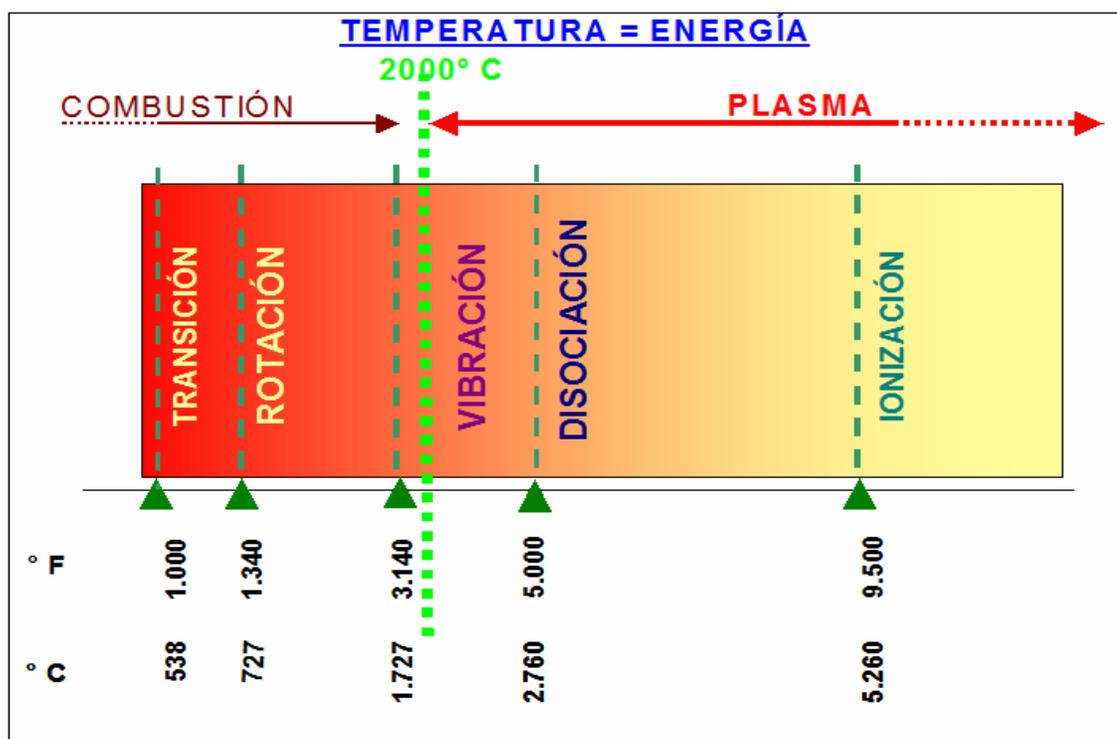


Fig. 4: Rango de temperaturas del proceso de gasificación por plasma.<sup>18</sup>

Las altas temperaturas del plasma provocan que en un reactor funcionando en condiciones reductoras se produzcan las siguientes reacciones:

Cracking Térmico: las moléculas complejas son disociadas en moléculas más ligeras formando gases de hidrocarburos e hidrógeno.

Oxidación parcial: favorecen la formación del monóxido de carbono y accesoriamente de pequeñas cantidades de dióxido de carbono y de agua. Estos dos últimos compuestos resultantes de reacciones de oxidación completa tienen lógicamente un efecto negativo sobre el valor calorífico del gas de síntesis. Es indispensable, por tanto, controlar la entrada de oxígeno en el reactor.

Reformación: ensamblan los elementos primarios en nuevas moléculas. Por ejemplo: La reacción entre carbono y agua dando lugar a monóxido de carbono e hidrógeno o la del dióxido de carbono y el carbono para dar lugar a monóxido de carbono. Estas reacciones favorecen la formación de un gas energético y la presencia en el mismo de elementos oxidados que disminuyen el poder calorífico del gas de síntesis.

Por otro lado, existe una destrucción de compuestos tóxicos, incluso los semi-volátiles, evitando la formación de dioxinas, furanos u otros.

Gracias a las altas temperaturas, también se habla de un proceso de fusión de moléculas inorgánicas y transformación en lava de tipo volcánico que al enfriarse forma un vidrio basáltico inerte (dejando atrapadas en la red cristalina los compuestos potencialmente peligrosos, como por ejemplo los metales pesados). Los ensayos oficiales realizados sobre este material han demostrado su total inocuidad, no toxicidad y no lixiviabilidad. Los más recientes estudios han concluido que además de no ser peligrosos se pueden considerar como materia valorizable y hay un estudio en curso para definir las múltiples aplicaciones.

La gasificación por plasma virtualmente puede procesar cualquier residuo sin tratamiento previo, y el reactor se diseña en base a las características físicas de la alimentación. La antorcha está usualmente montada en la pared de un contenedor circular y está alineada para que los residuos caigan en la zona del arco de plasma. El cátodo y el ánodo de la antorcha son enfriados con flujo forzado de agua y aire.<sup>19</sup>

La gasificación es una tecnología simple y probada comercialmente. En una primera aproximación, el proceso se utiliza para la conversión de materiales en un gas de síntesis limpio (syngas) a través de la reacción de oxígeno con vapor. Este syngas puro obtenido se deja enfriar y se purifica, siendo luego utilizado para una serie de propósitos: syngas para químicos, combustibles gaseosos, combustibles líquidos para calderas comerciales para

producir vapor, procesos de transferencia de calor y combustión interna en motores para producir energía eléctrica. El mercado tradicional del syngas está centrado en la producción de gas como un paso intermedio en la producción de otros productos químicos como el amonio. Sin embargo, la aplicación de la gasificación en otros procesos está incrementando debido a los cambios del mercado asociados a la mejora de turbinas de gas y la desregularización de la generación de potencia eléctrica.<sup>20</sup>

El gas de síntesis tiene innumerables usos en la industria química y en la producción de energía eléctrica. El lavado de gases depende de los contaminantes presentes en el gas y en los requerimientos de calidad de los generadores de energía eléctrica.<sup>21</sup>

#### **2.8.4 Marco lógico de la física del plasma**

Como se sabe, un plasma es un gas total o parcialmente ionizado con cierta actividad, compuesto por moléculas, átomos, iones positivos y electrones. Las tres primeras especies son consideradas partículas pesadas cuya temperatura  $T_g$  es igual para cada una de ellas. Por su parte los electrones, debido a su masa y tamaño son considerados partículas ligeras, con temperatura  $T_e$ .

El plasma puede situarse en diferentes regímenes respecto a sus características voltaje-corriente. De la misma manera, la temperatura de las especies pesadas  $T_g$  es menor a la temperatura de los electrones  $T_e$ , en esta situación el plasma se considera fuera de equilibrio térmico o plasma frío; en tanto que si la temperatura de todas las especies es igual o aproximada ( $T_e=T_g$ ) por el intercambio de energía, entonces el plasma se considera en equilibrio térmico con temperatura  $T$ .

La física del plasma no es generalmente una ciencia exacta. Es más bien una red de puntos de vista superpuestos, cada uno modelando un rango limitado de comportamiento. La comprensión de los plasmas se desarrolla estudiando estos diversos puntos de vista, teniendo en cuenta los vínculos entre los puntos de vista.

En principio, la evolución temporal de un plasma se puede calcular como sigue:

1. Dada la trayectoria  $\mathbf{x}_j(\mathbf{t})$  y la velocidad  $\mathbf{v}_j(\mathbf{t})$  de cada partícula  $\mathbf{j}$ ,

El campo  $\mathbf{E}(\mathbf{x}, \mathbf{t})$  y el campo magnético  $\mathbf{B}(\mathbf{x}, \mathbf{t})$  se pueden evaluar usando las ecuaciones de Maxwell, y simultáneamente,

2. Dados los campos eléctricos y magnéticos instantáneos  $\mathbf{E}(\mathbf{x}, t)$  y  $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ , las fuerzas sobre cada partícula  $\mathbf{j}$  se puede evaluar usando la ecuación de Lorentz y luego se usa para actualizar la trayectoria  $\mathbf{x}_j(t)$  y la velocidad  $\mathbf{v}_j(t)$  de cada partícula.

Aunque este enfoque es conceptualmente fácil de entender, normalmente no es debido al número extremadamente grande de partículas y en menor medida, debido a la complejidad del campo electromagnético. Para obtener una comprensión práctica, por lo tanto, no intentamos evaluar todo el comportamiento complejo de una vez, sino que estudiamos los plasmas considerando fenómenos específicos.

Para cada fenómeno bajo consideración inmediata, se hacen aproximaciones simplificadoras apropiadas, lo que conduce a un problema más manejable y esperamos que revele la esencia de lo que está pasando. Una situación en la que un conjunto de aproximaciones es válido y proporciona una descripción de auto-coherente se llama un régimen.

Existen varias categorías generales de aproximaciones simplificadoras, conocidas:

1. Aproximaciones que implican el campo electromagnético:

(A) Asumiendo que el campo magnético es cero (plasma no magnetizado)

(B) Suponiendo que no hay campos eléctricos inductivos (aproximación electrostática)

(C) Descuidar la corriente de desplazamiento en la ley de Ampere (apta para fenómenos con velocidades características mucho más lentas que la velocidad de la luz)

(D) Asumiendo que todos los campos magnéticos son producidos por conductores externos al plasma

(E) Diversas suposiciones con respecto a la simetría geométrica (por ejemplo, espacialmente uniformes, uniformes en una dirección particular, simétrica acimutalmente alrededor de un eje).<sup>22</sup>

### 2.8.5 Perspectiva cuantitativa del plasma

Las constantes físicas relevantes son:

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Coulombs}$$

$$m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_p/m_e = 1836$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ Faradios/meter.}$$

La temperatura se mide en unidades de electrones voltios, de modo que

$$k = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joules/volt};$$

Es decir,  $k = e$ . Así, la longitud de Debye es

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T}{n e^2}} \quad (4)$$

$$= \sqrt{\frac{\epsilon_0}{e}} \sqrt{\frac{T_e V}{n}} \quad (5)$$

$$= 7.4 \times 10^3 \sqrt{\frac{T_e V}{n}} \text{ Metros.} \quad (6)$$

Donde

$\lambda_D$  es la longitud de Debye,

$\epsilon_0$  es la permisividad eléctrica del vacío,

$k$  es la constante de Boltzmann,

$e$  es la carga del electrón

$n$  es la densidad de electrones

Supondremos que la velocidad típica está relacionada con la temperatura

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k T \quad (7)$$

Para la dispersión de electrones  $\mu = m e / 2$  de manera que la sección transversal de dispersión de ángulo pequeño.

$$\sigma^* = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{e^2}{\epsilon_0 m v^2 / 2} \right)^2 \ln \left( \frac{\lambda_D}{b \frac{\pi}{2}} \right) \quad (8)$$

$$\sigma^* = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{e^2}{3 \epsilon_0 k T} \right)^2 \ln \Lambda \quad (9)$$

Donde

$$\Lambda = \frac{\lambda_D}{b \frac{\pi}{2}} \quad (10)$$

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T}{n e^2}} \frac{4 \pi \epsilon_0 m v^2 / 2}{e^2} \quad (11)$$

$$\sigma^* = 6\pi n\lambda_D^3 \quad (12)$$

Es típicamente un número muy grande que corresponde a que existe un número macroscópicamente grande de partículas en una esfera que tiene un radio igual a una longitud de Debye; diferentes autores, tendrán coeficientes numéricos ligeramente diferentes, dependiendo de cómo identifiquen la velocidad con la temperatura. Esta diferencia no tiene importancia porque uno está tomando el logaritmo.

La frecuencia de colisión es  $\nu = \sigma^* n v$  así

$$\nu_{ee} = \frac{n}{2\pi} \left( \frac{e^2}{3\epsilon_0 kT} \right)^2 \sqrt{\frac{3kT}{m_e}} \ln\Lambda \quad (13)$$

$$\nu_{ee} = \frac{e^{\frac{5}{2}}}{2 \times 3^{\frac{3}{2}} \pi \epsilon_0^2 m_e^{\frac{1}{2}} T_{eV}^{\frac{3}{2}}} \quad (14)$$

$$\nu_{ee} = 4 \times 10^{-12} \frac{n \ln\Lambda}{T_{eV}^{\frac{3}{2}}} \quad (15)$$

|                               | $n$       | $T$    | $\lambda_D$ | $n\lambda_D^3$ | $\ln\Lambda$ | $\nu_{ee}$ | $l_{mfp}$ | $L$       |
|-------------------------------|-----------|--------|-------------|----------------|--------------|------------|-----------|-----------|
| units                         | $m^{-3}$  | eV     | m           |                |              | $s^{-1}$   | m         | m         |
| Solar corona<br>(loops)       | $10^{15}$ | 100    | $10^{-3}$   | $10^7$         | 19           | $10^2$     | $10^5$    | $10^8$    |
| Solar wind<br>(near earth)    | $10^7$    | 10     | 10          | $10^9$         | 25           | $10^{-5}$  | $10^{11}$ | $10^{11}$ |
| Magnetosphere<br>(tail lobe)  | $10^4$    | 10     | $10^2$      | $10^{11}$      | 28           | $10^{-8}$  | $10^{14}$ | $10^8$    |
| Ionosphere                    | $10^{11}$ | 0.1    | $10^{-2}$   | $10^4$         | 14           | $10^2$     | $10^3$    | $10^5$    |
| Mag. fusion<br>(tokamak)      | $10^{20}$ | $10^4$ | $10^{-4}$   | $10^7$         | 20           | $10^4$     | $10^4$    | 10        |
| Inertial fusion<br>(imploded) | $10^{31}$ | $10^4$ | $10^{-10}$  | $10^2$         | 8            | $10^{14}$  | $10^{-7}$ | $10^{-5}$ |
| Lab plasma<br>(dense)         | $10^{20}$ | 5      | $10^{-6}$   | $10^3$         | 9            | $10^8$     | $10^{-2}$ | $10^{-1}$ |
| Lab plasma<br>(diffuse)       | $10^{16}$ | 5      | $10^{-4}$   | $10^5$         | 14           | $10^4$     | $10^1$    | $10^{-1}$ |

Tabla 4. Comparación de parámetros para una amplia variedad de plasmas.<sup>23</sup>

Normalmente,  $\ln\Lambda$  se encuentra en el rango de 8-25 para la mayoría de los plasmas. La Tabla 3. Enumera parámetros nominales para varios plasmas de interés y muestra que estos plasmas tienen una enorme gama de densidades, temperaturas, longitudes de escala, vías libres medias y frecuencias de colisión. La cuestión crucial es la relación entre la trayectoria libre media y la longitud de la escala característica.

Los plasmas de arco y los propulsores dinámicos de matriz magnética se encuentran en la categoría de plasmas densos de laboratorio; Estos plasmas son muy colisionales (el trayecto libre medio es mucho más pequeño que la longitud de escala característica). Los plasmas utilizados en el procesamiento de semiconductores y muchos plasmas de investigación están en la categoría de plasma de laboratorio difuso; Estos plasmas son sin colisión. Es posible fabricar tanto plasmas de laboratorio colisionales como sin colisión, y de hecho si hay grandes gradientes de temperatura o densidad es posible tener un comportamiento tanto de colisión como sin colisión en el mismo dispositivo.<sup>24</sup>

### 2.8.6 Valoración energética y de confiabilidad.

**Conversión:** Se define como la relación entre la cantidad de reactivo consumido y la cantidad de reactivo alimentado.

$$u = \frac{n_{\text{producto consumido en el reactor}}}{n_{\text{producto alimentado al reactor}}} \times 100 \quad (16)$$

**Rendimiento:** Es la relación entre la cantidad de producto obtenido y la cantidad de reactante fresco alimentado al proceso.

$$R = \frac{n_{\text{producto obtenido}}}{n_{\text{producto alimentado}}} \times 100 \quad (17)$$

**Selectividad:** Es la relación entre la cantidad de producto obtenido y la cantidad de reactivo consumido en el reactor.

$$S = \frac{n_{\text{producto obtenido}}}{n_{\text{producto consumido}}} \quad (18)$$

### **III. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general**

Diseño, construcción, operación y caracterización de un reactor de plasma para la producción de gases combustibles (hidrocarburos totales), a través, de tratamientos de desechos sólidos.

#### **3.2 Objetivos específicos**

3.2.1 Diseñar un prototipo de reactor energético de plasma.

3.2.2 Construir un reactor energético de plasma iónico.

3.2.3 Demostrar la operatividad del reactor energético de plasma

3.2.4 Caracterizar el funcionamiento del reactor energético de plasma.

3.2.5 Analizar la producción de hidrocarburos totales en el gas generado por el tratamiento de desechos sólidos con plasma.

### **IV. HIPOTESIS**

- El reactor energético de plasma iónico, es capaz de convertir los desechos sólidos en gases combustibles sintéticos (hidrocarburos totales).

### **V. DISEÑO METODOLOGICO**

#### **5.1 Universo.**

Nuestro universo lo constituyen los compuestos orgánicos que se obtienen a partir del tratamiento de residuos (basura), en un reactor energético de plasma.

#### **5.2 Muestra**

Residuos ordinarios domiciliarios, para ser tratados con plasma.

### **5.3 Método de investigación.**

Método hipotético- deductivo

### **5.4 Clase de investigación**

Investigación aplicada y exploratoria.

### **5.5 Tipo de investigación**

Investigación cuantitativa

### **5.6 Plan de análisis**

Este consta de dos partes, el diseño y construcción del reactor y el análisis de gases tratados en el reactor.

#### **5.6.1 Diseño y construcción de reactor energético de plasma.**

Para el diseño de los planos del reactor se utilizó el programa AutoCad, posteriormente los planos se utilizaron para la construcción del reactor.

#### **5.6.2 Diseño experimental (Análisis de gases)**

Se realizaron curvas de calibración del gas propano ( $C_3H_8$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ), estas calibraciones se realizaron para comparar las concentraciones emitidas de syngas o gases combustibles en el reactor energético de plasma iónico.

##### **5.6.2.1 Curva de calibración del gas propano $C_3H_8$ .**

Los análisis de propano, son comparados con los gases obtenidos (tomados como hidrocarburos totales) del reactor energético.

1. Se tomaron muestras en la línea de gas propano del laboratorio con la válvula abierta a flujo constante, en volúmenes de 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 y 6ml de gas.
2. Se determinó la concentración del gas a través de la siguiente fórmula:

$$Cx = \frac{m}{PM} \cdot V$$

Dónde: m = masa, PM= Peso Molecular del compuesto y V= volumen de muestra.

El volumen de cada muestra se pesa en balanza analítica de manera de conseguir la constante masa (m).

3. Luego se analizaron las muestras en espectrofotómetro *IRTF-HART* de tal suerte, obtener la absorbancia medida para cada muestra en volumen específico. Haciendo repeticiones de cada análisis (5 muestras, tres repeticiones).
4. La señal de referencia para tomar la absorbancia es; señal hidrocarburos (H-C cerca de  $3,000\text{ cm}^{-1}$ ).
5. Se graficaron los puntos obtenidos; absorbancia vs concentración.

#### **5.6.2.2 Curva de calibración del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).**

El dióxido de carbono se produce a partir de mezclar NaHCO<sub>3</sub>(s) y HCl 12M.

1. Se tomaron muestras en volúmenes de 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 y 6 ml de gas.
2. Se determinó la concentración del gas a través de la fórmula:

$$Cx = \frac{m}{PM} \cdot V$$

3. Luego se analizaron las muestras en espectrofotómetro *IRTF-HART* de tal suerte, obtener la absorbancia medida para cada muestra en volumen específico. Haciendo repeticiones de cada análisis.
4. La señal de referencia para tomar la absorbancia fue; señal C=O cerca de  $2,500\text{ cm}^{-1}$ .
5. Se graficaron los puntos obtenidos; absorbancia vs concentración.

#### **5.6.2.3 Descripción del proceso de obtención de gases en el reactor de plasma.**

Para la gasificación de RSU con plasma, es necesario además del generador de plasma o reactor de plasma, un proceso bien estructurado orientado a la optimización de generar productos de valor energético.

Los residuos sólidos (biomasa o basura) se incorporan al reactor de plasma, donde es reducida por completo en elementos más ligeros como carbono e hidrogeno, dando lugar a un gas de síntesis; este gas es enfriado para posteriormente ser analizado. Raras veces se obtiene un condensado después del enfriamiento de gas.

Es necesario además un recolector de cenizas, si estas se produjeran; o por el caso de alguna cantidad de residuos que no paso directamente por el flujo de plasma, son depositados en el recolector de cenizas.

Luego el gas de síntesis es analizado en espectrofotómetro *IRTF-HART*.

#### **5.6.2.4 Toma de muestras y análisis de gases del reactor energético de plasma.**

El reactor energético trabaja, con dos juegos de electrodos con la capacidad de formar un flujo de plasma necesario para ionizar todo residuo sólido que ingrese al mismo, produciendo un gas de síntesis.

1. El gas de síntesis se recolecta para luego ser analizado.
2. En volúmenes de 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 y 6.0 ml se tomaron muestras de este gas de síntesis, las cuales fueron analizadas en el espectrofotómetro IR obteniendo la absorbancia medida de cada muestra.
3. Se determinó la concentración de hidrocarburos totales en el gas de síntesis.

#### **5.6.2.5 Procesamiento y análisis de datos.**

Se realizaron las curvas de calibración de propano y dióxido de carbono para una determinada longitud de onda; preparando muestras de concentraciones conocidas que a continuación se graficaron utilizando los datos de absorbancia versus concentración y se obtuvo la ecuación del gráfico (nos dio la pendiente y el intercepto) y la línea de tendencia, para luego encontrar el coeficiente de absortividad molar  $\epsilon = \frac{m}{l}$ ; el  $\epsilon = 338.3 \text{ mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$ .

Las concentraciones de hidrocarburos totales se calcularon utilizando la Ley de Lambert-Beer ( $C = \frac{A}{\epsilon l}$ ). Se graficó la absorbancia versus concentración, obteniéndose la ecuación del gráfico, la línea de tendencia o regresión y el coeficiente de determinación  $R^2$ .

Una vez analizados los resultados se determinó la conversión de residuos a gases, el rendimiento del proceso, tomando en cuenta la relación entre la cantidad de producto obtenido y la cantidad de reactante fresco alimentado. También como análisis de confiabilidad se determinó la selectividad, la relación entre la cantidad de producto obtenido y la cantidad de reactivo consumido en el reactor.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSION.

### 6.1 Diseño y construcción del reactor energético de plasma

Para el diseño y la construcción del reactor fueron procurados los siguientes elementos.

#### 6.1.1 Electrodo

En la figura N° 5 Se presentan los electrodos utilizados en el reactor energético de plasma. El reactor cuenta con dos juegos de electrodos de (3:1) de  $\frac{1}{4}$  de pulg, separados entre sí por 1mm de distancia, material utilizado acero inoxidable, aislados con brocas de cerámica. Estos electrodos cumplen el funcionamiento en el reactor de crear un arco eléctrico, es por eso que la distancia necesaria entre ellos es de 1mm, al hacer pasar un alto voltaje que ronda los 10,000 Voltios, se forma el arco eléctrico.

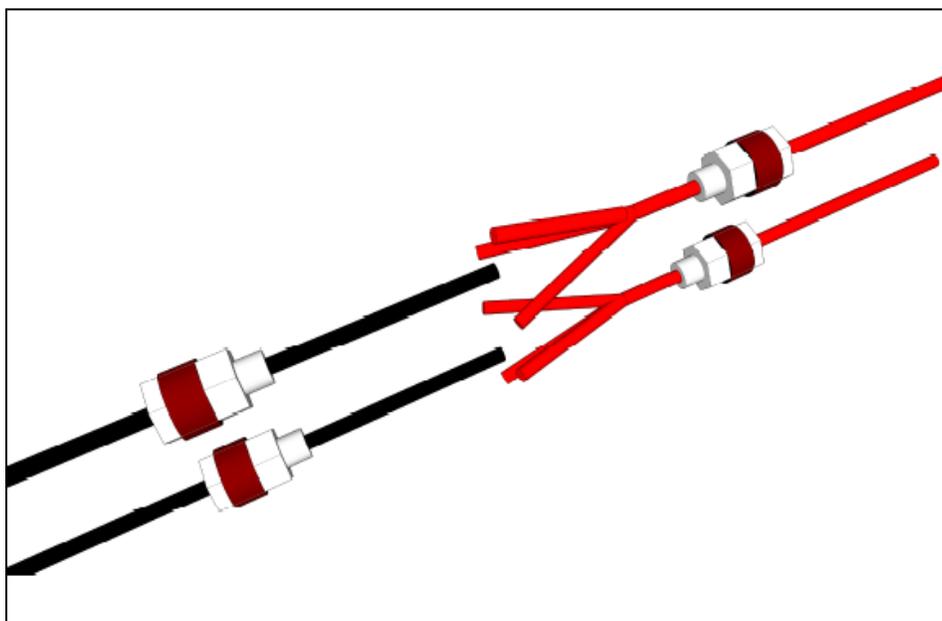


Figura 5. Electrodo utilizado en la creación del arco eléctrico, para la formación de plasma.

#### 6.1.2 Cámara de ionización del reactor

En la figura N° 6 se muestra la cámara de ionización del reactor energético de plasma. Para la construcción de esta cámara, se utilizó un material cilíndrico de hierro de alto impacto con una capa interna de asbesto; con un grosor de  $\frac{1}{2}$  pulgada, con el fin de lograr un aislamiento térmico interno y favorecer el enfriamiento de la cámara.

A demás esta cámara cuenta con un diseño de ensamble, tanto en la parte superior como inferior, con el objetivo de separarlo a la hora de una limpieza o problemas eléctricos. En la parte inferior interna de la cámara está localizada una malla metálica con capacidad de resistir elevadas temperaturas y como primordial propósito retener los desechos sólidos que son introducidos al reactor.

Es ésta cámara la parte de mayor importancia de todo el reactor, dado que en ella se mantiene el flujo de plasma iónico y se produce la conversión energética de desechos sólidos.

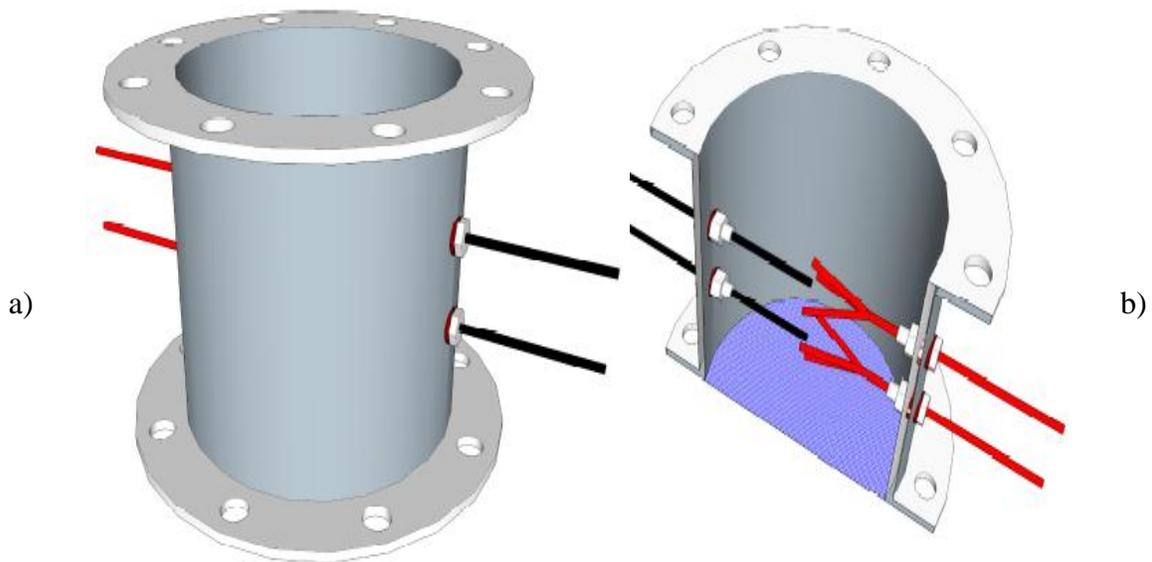


Figura 6. Cámara de ionización, a) Vista externa completa de cámara, b) vista interna de cámara de ionización.

### 6.1.3 Cámara de alimentación de residuos.

En la figura N° 7 se muestra la cámara de alimentación de residuos del reactor energético de plasma.

Esta cámara tiene una longitud y diámetro de 4 pulg respectivamente, hecha de hierro de alto impacto. A un costado se encuentra ubicada una válvula de bronce para la salida del gas producto de la incineración de residuos con plasma. En la parte superior está ubicada una válvula de esfera con diámetro de una pulgada que sirve como entrada de los desechos sólidos, los cuales van direccionados a la cámara inferior media (cámara de ionización).

Además cuenta con una capa interna de asbesto grafitado para lograr un aislamiento térmico.

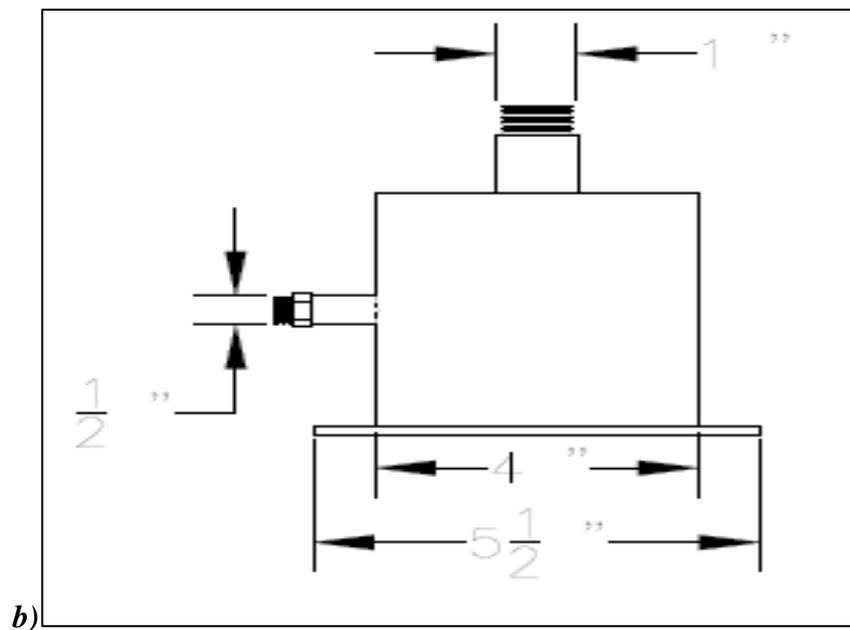
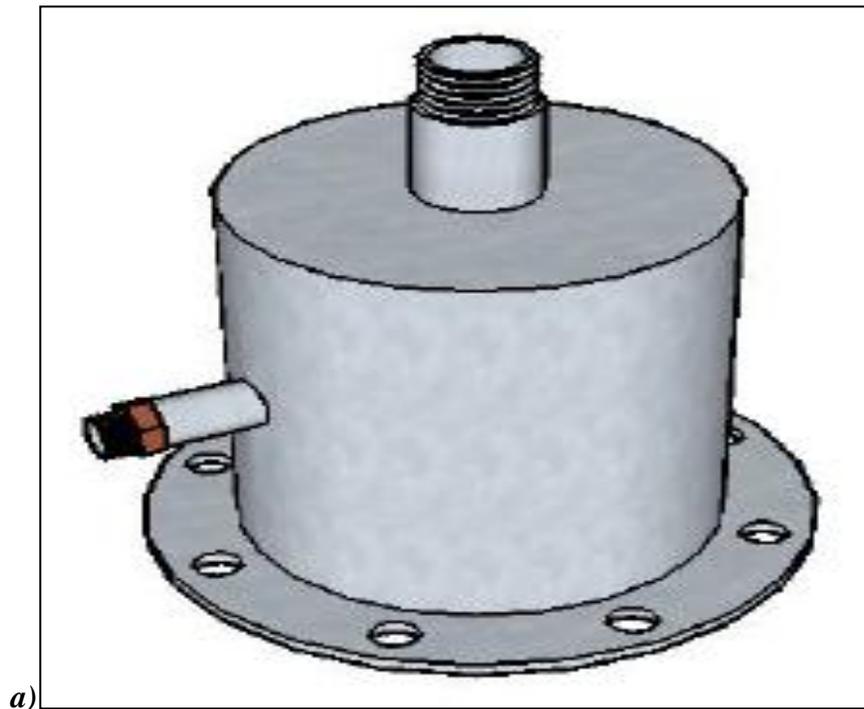


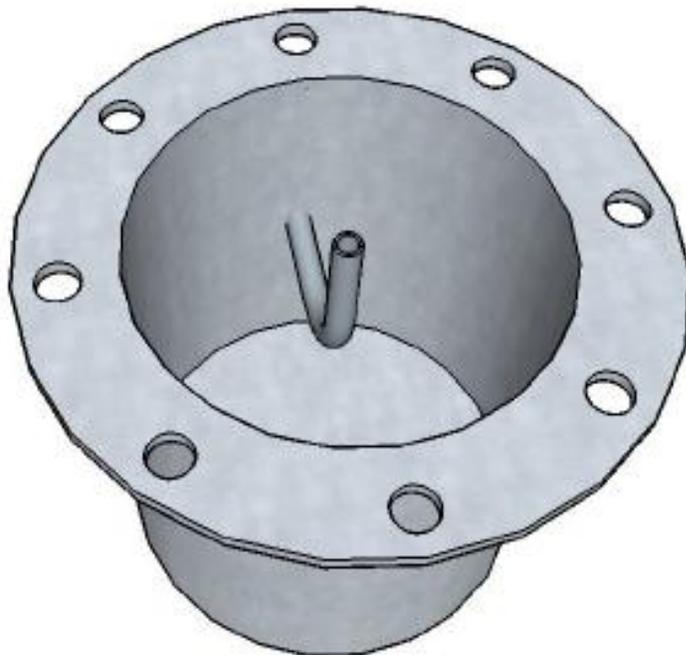
Figura 7. Cámara de alimentación de residuos del reactor energético de plasmiónico.a) Vista externa completa de cámara b) Diseño a escala, medidas de cámara de ionización.

#### **6.1.4 Depósito de cenizas e inyección de gas plasmógeno.**

En la figura N° 8 se muestra el depósito de cenizas del reactor energético de plasma. Depósito de hierro de alto impacto con longitud y diámetro de 2 y 4 pulg. Respectivamente. Cuenta además con una entrada de gas con diámetro de 1cm.

Las utilidades que desempeña este dispositivo como parte del reactor son las siguientes:

- Reservar las cenizas que son producto de los desechos sólidos tratados.
- Inyectar al reactor gas plasmógeno (propano).



*Figura 8. Depósito para almacenamiento de las cenizas que resultan de la incineración plasmática de los desechos sólidos.*

#### **6.1.5 Sistema de alimentación eléctrica**

Se muestra en la figura N° 9 el sistema de alimentación eléctrica del reactor energético de plasma.

Constando de dos bobinas de encendido que son alimentadas en serie por corriente alterna, es un circuito equipado con dos capacitores de 1.5  $\mu\text{F}$ , dos dimmers de ventilador para regulación del fluido eléctrico y cables de cobre para el transporte de la corriente.

La corriente eléctrica de alta tensión utilizada para plasma es producida a partir de una bobina automotriz la cual recibe 110 Voltios, que es la que se utiliza en las conexiones

eléctricas de las casas, este voltaje es transformado por la bobina a 10,000 Voltios (plasma), a través del dimmer de ventilador se reguló la cantidad de corriente a pasar.



Figura N° 9. Imagen ilustrativa de bobina automotriz.

## 6.2 Análisis de gases

En la figura N° 10 se muestra el diagrama del proceso de gasificación del reactor energético de plasma. Desde la entrada de residuos (biomasa) al reactor hasta la obtención final de gases. Este proceso está descrito en la sección V (Diseño metodológico, Descripción del proceso de obtención de gases en el reactor de plasma).

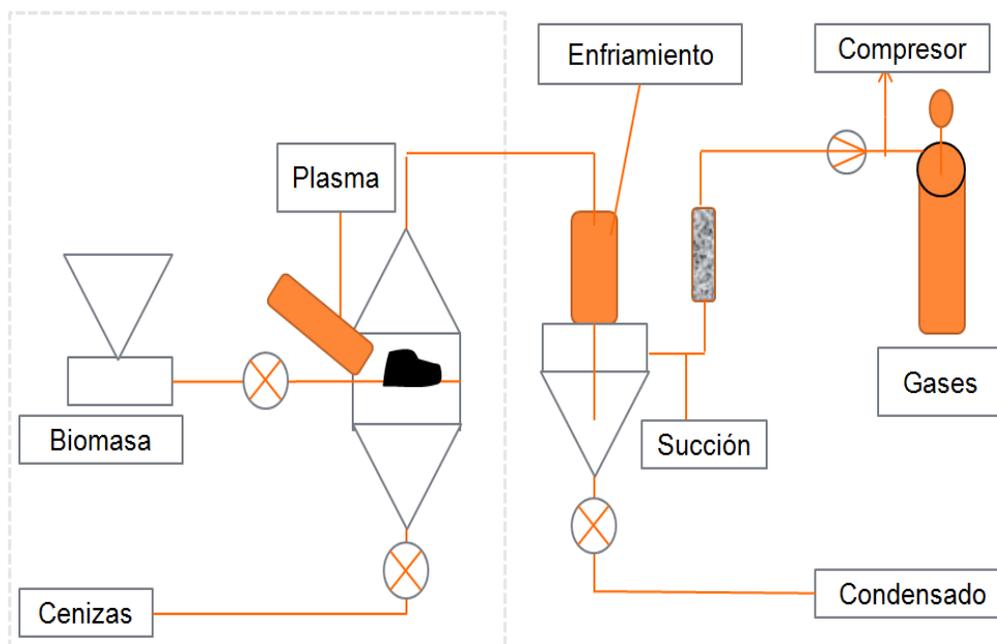


Figura 10. Diagrama del proceso de gasificación de residuos sólidos urbanos (RSU).

NOTA: Los análisis fueron realizados en celdas de vidrio borosilicatado con un índice de refracción de 1.57, dando una lectura del espectro infrarrojo a partir de una longitud de onda de  $2,300\text{ cm}^{-1}$  absorbiendo la lectura de las bandas en un rango de  $1,500 - 2,300\text{ cm}^{-1}$ .

### 6.2.1 Curva de calibración del gas propano $\text{C}_3\text{H}_8$ .

En la figura N° 11 se observa la curva de calibración del gas propano.

Se tomaron muestras en la línea de gas propano del laboratorio, con la válvula abierta a flujo constante en volúmenes de 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 y 6.0ml del gas. Se determinó la concentración del gas (proceso que se describe en la sección V, diseño experimental - curva de calibración del gas propano- numeral 2).

Luego se tomaron los espectros en *IRTF-HART*, obteniendo la absorbancia medida para cada concentración, procediendo a elaborar la respectiva curva de calibración.

Se graficó la absorbancia versus concentración, y se obtuvo una línea recta, la ecuación del gráfico y línea de tendencia. Se encontró  $\epsilon$  con el valor de la pendiente  $\epsilon = \frac{338.33}{1} = 338.3\text{ mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$  que luego se utilizó para conocer el valor de las concentraciones de gases obtenidas en el reactor energético.

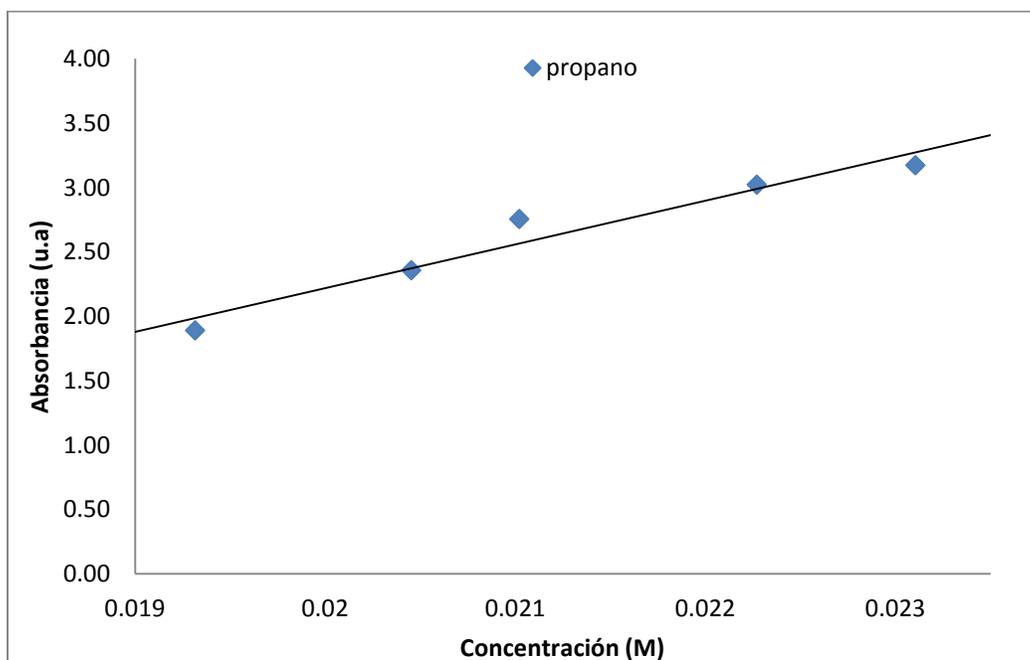


Figura N° 11 Curva de calibración del gas propano, la ecuación de la recta  $y = 338.3x + 4.544$  con una correlación  $R^2 = 0.947$ .

### 6.2.2 Espectro IR del gas propano, análisis para curva de calibración

En la Figura N<sup>o</sup> 12 se observa el espectro *IRTF-HART* en función de la concentración del gas propano. Se graficó la longitud de onda en el eje “x” vs la absorbancia en el eje “y”. Presentando un pico característico de C-H en un rango de 2950 - 3000  $\text{cm}^{-1}$ , con vibraciones de tensión. Este resultado demuestra la presencia del alcano en el análisis (Los alcanos presentan vibraciones de tensión ligeramente por debajo de 3000  $\text{cm}^{-1}$ ). Indicando la existencia de los grupos  $\text{CH}_2$  y  $\text{CH}_3$ .

Se observa un aumento en la absorbancia al aumentar la concentración.

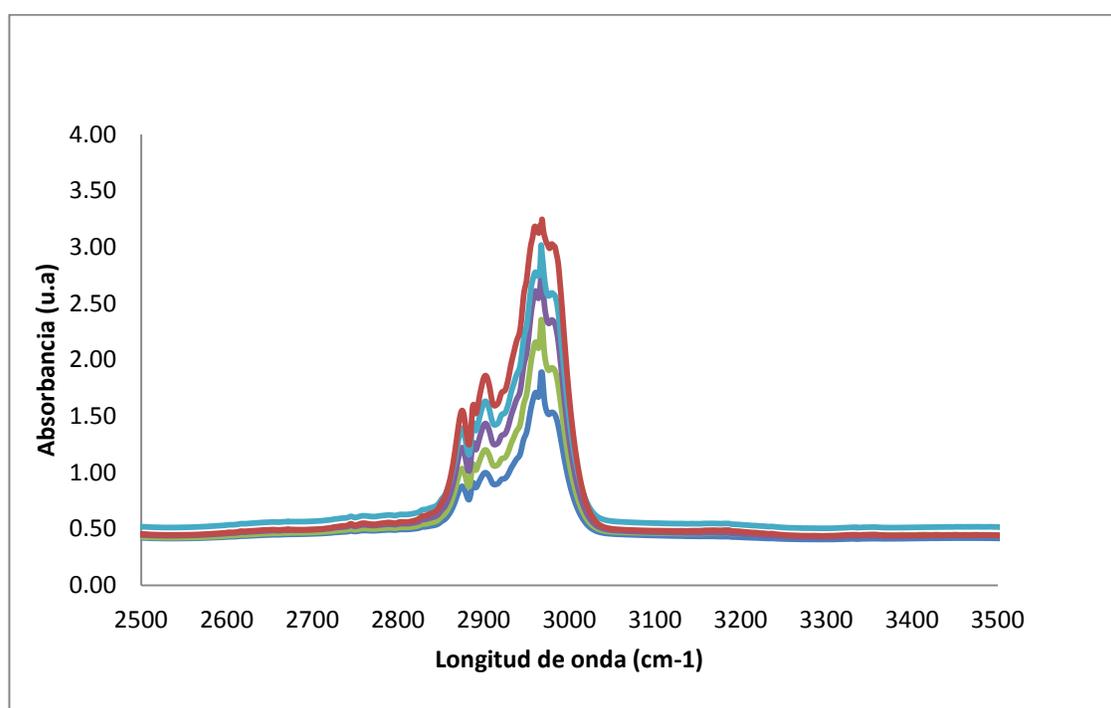


Figura N<sup>o</sup> 12 Espectros de absorción *IRTF-HART* del gas propano, en diferentes concentraciones, —0.019318M, —0.020454M, —0.021022M, —0.022272M, —0.023106M.

### 6.2.3 Curva de calibración del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

En la figura N<sup>o</sup> 13 se observa la curva de calibración del gas dióxido de carbono.

Se tomaron muestras de gas, para volúmenes de 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 y 6.0 ml. Se determinó la concentración del gas (proceso que se describe en la sección V, diseño experimental, curva de calibración del dióxido de carbono numeral 2), luego se analizaron las muestras en espectrofotómetro *IRTF-HART* de tal suerte, obtener la absorbancia medida para cada

muestra.

Se graficó la absorbancia versus concentración, y se obtuvo una línea recta, la ecuación del gráfico y línea de tendencia.

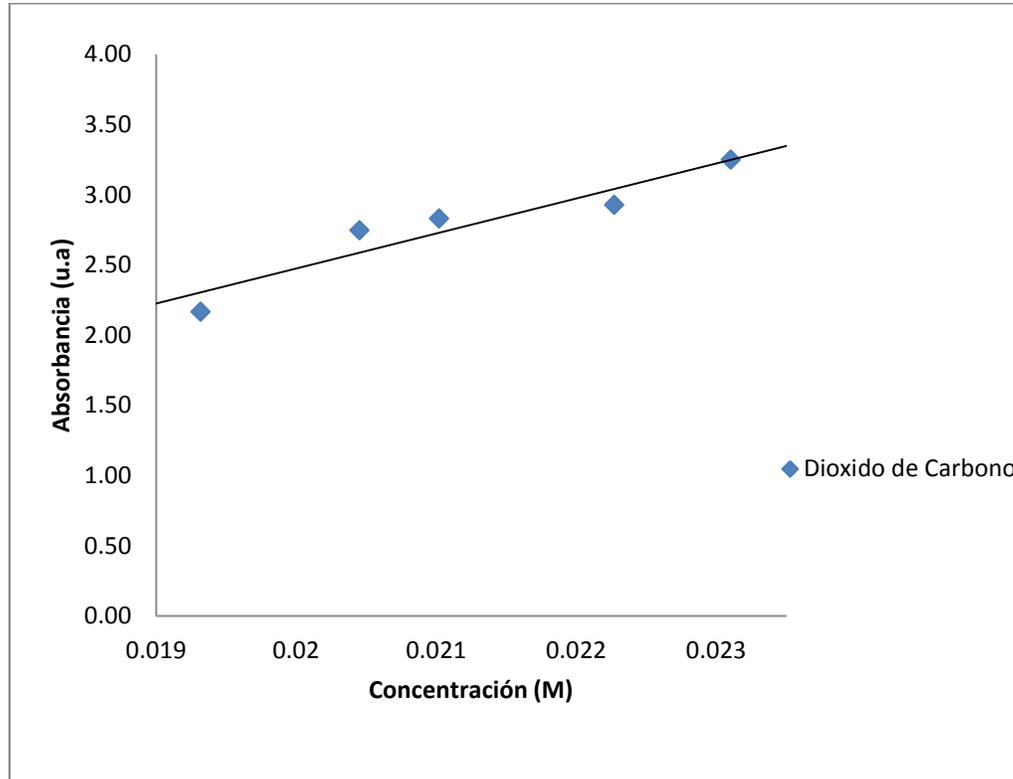


Figura N<sup>o</sup> 13 Curva de calibración del dióxido de carbono, se graficó la concentración en el eje “x” versus la absorbancia en el eje “y”, se obtuvo  $y = 251.96x - 2.5642$ ,  $R^2 = 0.8742$ .

#### 6.2.4 Espectro IR del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), análisis para curva de calibración.

En la Figura N<sup>o</sup> 14 se observa el espectro *IRTF-HART* en función de la concentración del gas dióxido de carbono.

Se graficó la longitud de onda en el eje “x” vs la absorbancia en el eje “y”, presentando un pico característico de C=O en un rango de 2,300 – 2,400 cm<sup>-1</sup>.

Se tomaron muestras en volúmenes de 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 y 6ml de gas.

Se determinó la concentración del gas, luego se analizaron las muestras en espectrofotómetro *IRTF-HART* de tal suerte, obtener la absorbancia medida para cada muestra en volumen específico. Se graficaron los puntos obtenidos; absorbancia vs concentración.

Se observa un aumento en la absorbancia al aumentar la concentración.

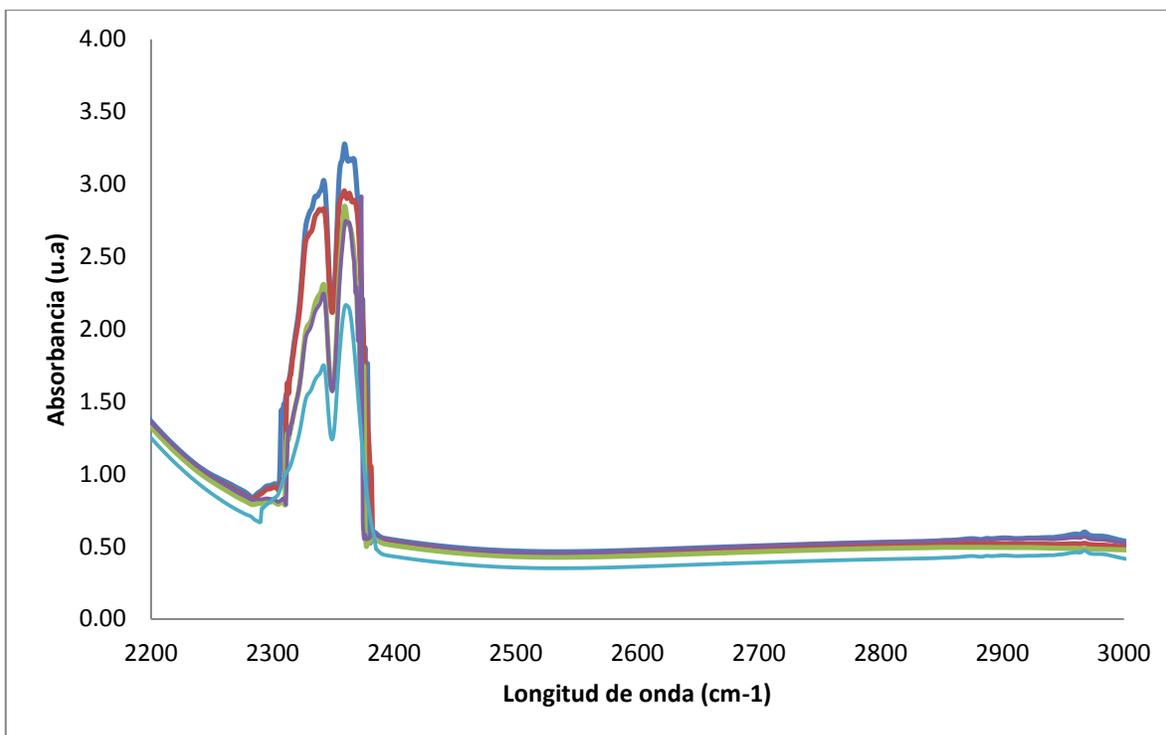


Figura No. 14 Espectros de absorción IRTF-HART del gas dióxido de carbono, a diferentes concentraciones, desde 0.019318M, 0.020454M, 0.021022M, 0.022272M, hasta 0.023106 M. Longitud de onda medida 2360 cm<sup>-1</sup>

### 6.2.5 Espectro IR del tratamiento de desechos sólidos con plasma.

En la Figura No. 15 se observa el espectro IRTF-HART en función del gas obtenido por el tratamiento de residuos sólidos con plasma en reactor energético de plasma.

Se graficó la longitud de onda en el eje “x” vs la absorbancia en el eje “y”.

Presentando un pico característico de C-H en un rango de 2950 - 3000 cm<sup>-1</sup>, con vibraciones de tensión. Este resultado demuestra la presencia de hidrocarburos (Los hidrocarburos saturados presentan vibraciones de tensión ligeramente por debajo de 3000 cm<sup>-1</sup>). Indicando la existencia de los grupos CH<sub>2</sub> y CH<sub>3</sub>.

El reactor energético trabaja, como se describió anteriormente, con dos juegos de electrodos con la capacidad de formar un flujo de plasma, gas plasmógeno utilizado gas propano (se inyectan 4 ml de gas para sostener el plasma); necesario para ionizar todo residuo sólido que ingrese al mismo, produciendo un gas de síntesis.

El gas se recolecta y es analizado en volúmenes de 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 y 6.0ml, las cuales fueron analizadas en el espectrofotómetro *IRTF-HART* obteniendo la absorbancia medida de cada muestra en la banda característica de C-H para hidrocarburos saturados.

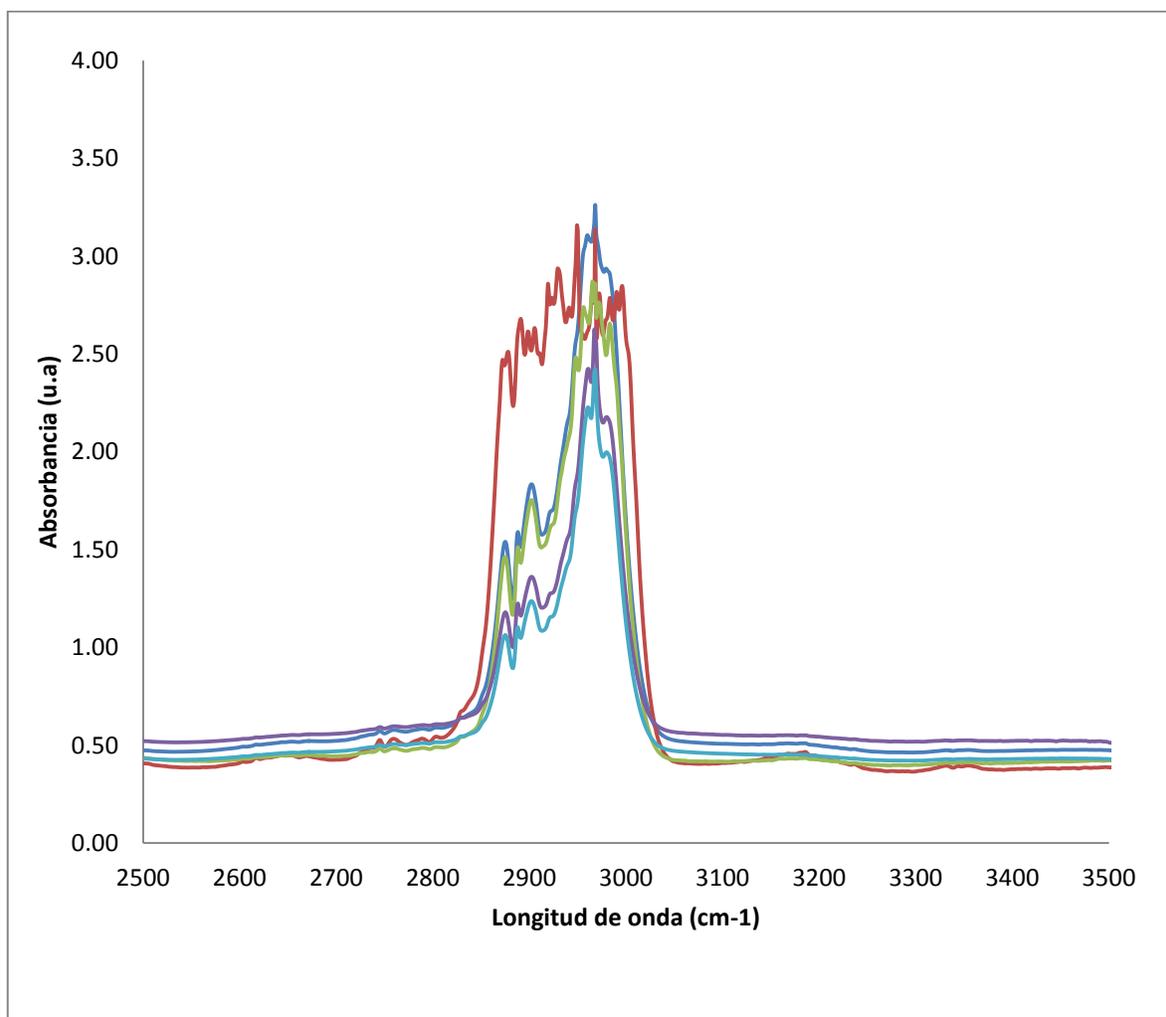


Figura N<sup>o</sup> 15 Espectros *IRTF-HART* de absorción del gas obtenido, por el tratamiento de residuos con plasma, a diferentes concentraciones, desde 2 ml, 3 ml, 4 ml, 5 ml, hasta 6ml. Longitud de onda medida 2967  $cm^{-1}$ .

### 6.2.6 Resultados de gases del tratamiento de residuos sólidos con plasma.

En la Figura N<sup>o</sup> 16 se observa la linealidad de los resultados de concentración de hidrocarburos totales en función de la absorbancia obtenida del gas por el tratamiento de residuos sólidos con plasma en reactor energético.

Se graficó la concentración en el eje “x” versus la absorbancia en el eje “y”.

Se determinó la concentración de hidrocarburos totales en el gas producto del tratamiento de residuos con plasma, interpolando la gráfica de calibración de gas propano, utilizando la ecuación de la gráfica, donde la absorptividad molar  $\epsilon = \frac{m}{l}$ ; fue  $\epsilon = 338.3 \text{ mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$ .

Las concentraciones de hidrocarburos totales se calcularon utilizando la Ley de Lambert-Beer ( $C = \frac{A}{\epsilon l}$ ). Se graficó la absorbancia versus concentración.

Se obtuvo la ecuación del gráfico, la línea de tendencia o regresión. Con una correlación de  $R^2 = 1$ , presentando una linealidad aceptable, que demuestra que el método es aplicable.

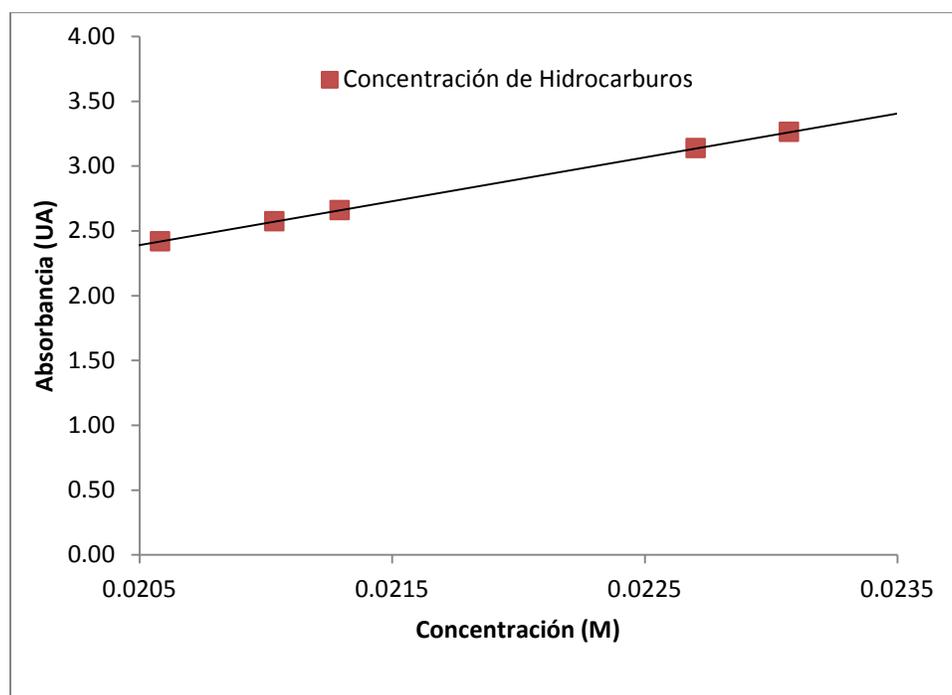


Figura N<sup>o</sup> 16 Concentraciones de hidrocarburos totales presente en el gas de obtenido por el tratamiento de residuos con plasma. Se obtuvo  $y = 338.33x - 4.5444$ ,  $R^2 = 1$ .

### 6.2.7 Comparación de gas propano y gases resultados de tratamiento de residuos sólidos con plasma.

En la Figura N<sup>o</sup> 17 se observa la gráfica de comparación de los resultados obtenidos de concentración de hidrocarburos totales en comparación con la gráfica de curva de calibración de gas propano.

Para los dos diferentes gases se tomaron muestras de 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 ml, se puede observar que la concentración de gases hidrocarburos totales es mayor para muestras de igual volumen.

Es notable que al aumentar la concentración, hay también un aumento de la absorbancia.

Por cada 2ml de gas analizado hay un aumento cerca del 20% en la concentración del gas.

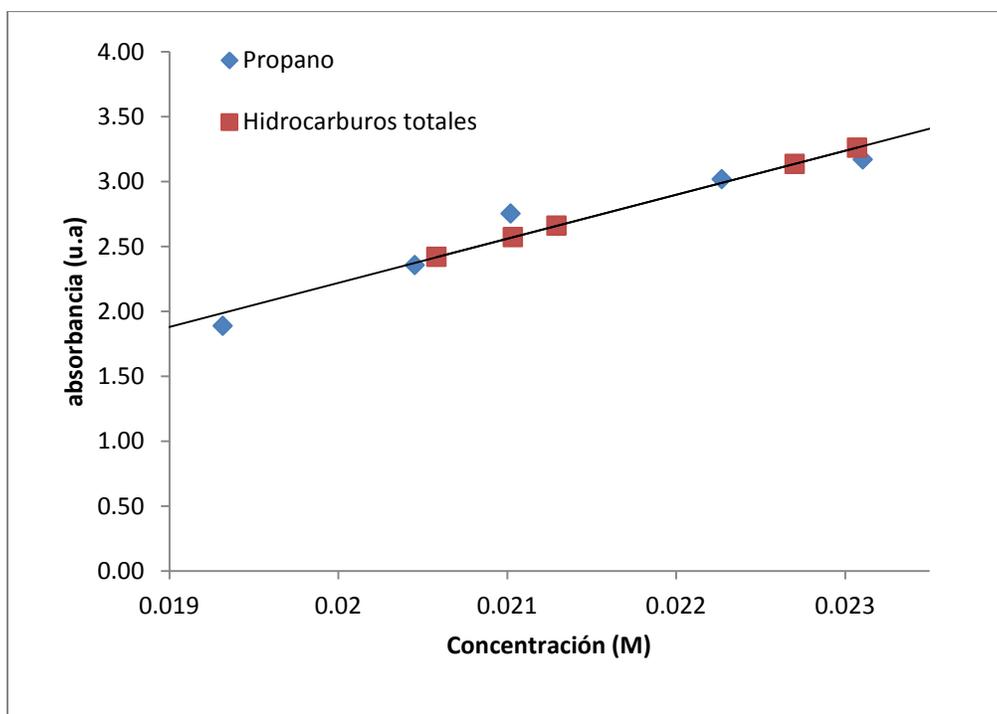


Figura N° 17 Comparación de concentraciones de gas propano y gas de tratamiento de residuos con plasma (hidrocarburos totales).

### 6.2.8 Comparación de gas dióxido de carbono y gases de residuos sólidos por plasma.

En la figura N° 18 se puede ver las concentraciones de  $\text{CO}_2$  que se generan en volúmenes de 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 y 6.0 ml generadas por la incineración de  $\text{NaHCO}_3(\text{s})$  y  $\text{HCl}$  12M; simulación de una incineración a cielo abierto.

Al tratar residuos con un proceso de incineración con plasma no se produce emisiones de dióxido de carbono en el proceso.

Los incineradores a cielo abierto si generan emisiones grandes de  $\text{CO}_2$ , provocando contaminación al medio ambiente. Sin embargo esto se podría evitar con el tratamiento de residuos con incineración por plasma iónico.

Estos datos solo se comparan para hacer énfasis en la diferencia de un proceso de incineración de residuos a cielo abierto y un proceso de incineración por plasma.

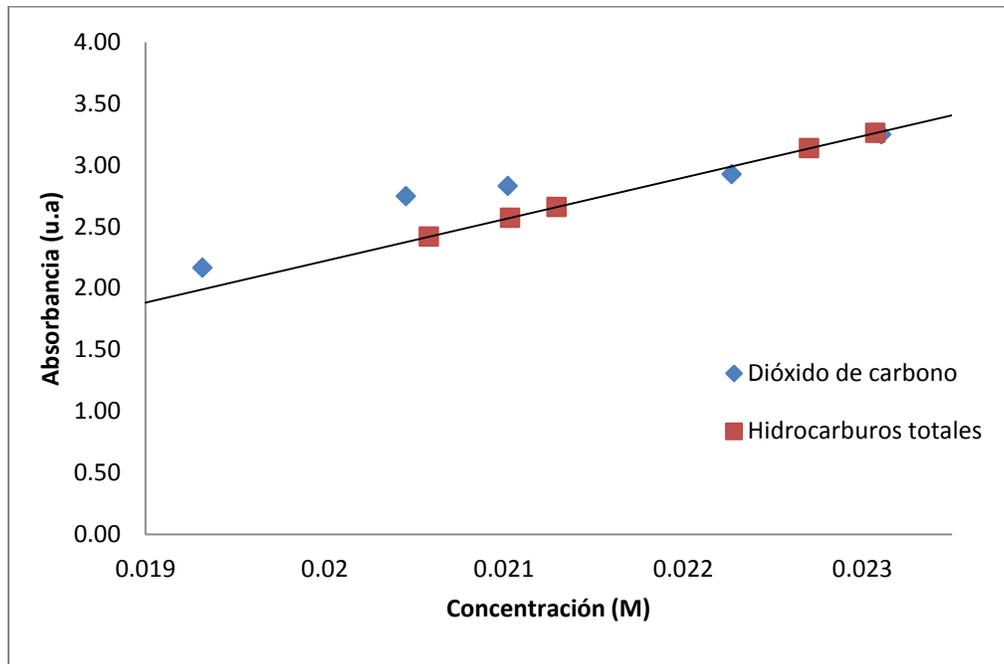


Figura N° 18 Comparación de concentraciones de gas dióxido de carbono y gas combustible sintético (hidrocarburos totales), para los dos diferentes gases se tomaron muestras de 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 ml.

## 6.2.9 Valoración energética y de confiabilidad.

### 6.2.9.1 Determinación del porcentaje de conversión (u):

Utilizando la ecuación N° 16 se determinó la conversión, utilizando las concentraciones encontradas, donde  $C_{\text{propano}}$  es la concentración que se introduce al reactor como gas plasmógeno, y  $C_{\text{gas producido}}$  es la concentración de gas producido de los residuos en hidrocarburos totales.

$$u = \frac{\text{nproducto consumido en el reactor}}{\text{nproducto alimentado al reactor}} \times 100$$

$$u = \frac{C_{\text{propano}} - C_{\text{gas producido}}}{C_{\text{gas producido}}} \times 100$$

$$u = \frac{0.021022 - 0.1087}{0.1087} \times 100$$

$$u = 80.7 \%$$

### 6.2.9.2 Determinación del porcentaje de rendimiento (R):

Utilizando la ecuación N° 17 se determinó el rendimiento, utilizando las concentraciones encontradas, donde  $C_{xpropano}$  es la concentración que se introduce al reactor como gas plasmógeno, y  $C_{residuos}$  es la concentración de gas total producido de los residuos en hidrocarburos totales.

$$R = \frac{\text{nproducto obtenido}}{\text{nproducto alimentado}} \times 100$$

$$R = \frac{C_{xpropano} - C_{residuos}}{C_{residuos}} \times 100$$

$$R = \frac{0.021022 - 0.1347}{0.1347} \times 100$$

$$R = 84.4 \%$$

### 6.2.9.3 Determinación de selectividad:

Utilizando la ecuación N° 18 se determinó la selectividad, teniendo en cuenta el análisis en concentraciones, donde  $R$  es el rendimiento del proceso,  $u$  es la conversión de residuos en hidrocarburos totales.

$$S = \frac{\text{nproducto obtenido}}{\text{nproducto consumido}}$$

$$S = \frac{R}{u}$$

$$S = \frac{84.4}{80.7}$$

$$S = 1.0$$

## **VII. CONCLUSIONES**

1. La curva de calibración de gas propano permitió determinar las concentraciones en molaridad de hidrocarburos totales presentes en el gas de síntesis para los diferentes experimentos.
2. El límite de detección (La concentración mínima de gas de síntesis que puede ser leída por el espectrofotómetro infrarrojo *IRTF-HART*) es de 0.0134318 M.
3. La conversión de los desechos a gas de síntesis fue de un porcentaje del 80.7%.
4. El rendimiento del proceso fue de un porcentaje de 84.4 %
5. La selectividad del análisis es de 1.0 %
6. Con los datos obtenidos experimentalmente y la teoría que respalda esta investigación fue posible optar por esta tecnología, como un proceso amigable con el medio ambiente.
7. Se logró establecer que los fenómenos que se producen en el plasma son escalables. Esto quiere decir que sus propiedades eléctricas y físicas son siempre las mismas independientemente del tamaño del plasma.

## **VIII. RECOMENDACIONES**

1. Se deben desarrollar trabajos futuros tendientes a la determinación de la influencia de la variación de parámetros tales como tipo de biomasa, y agente de reacción.
2. Se debe implementar un modelo de equilibrio termodinámico, que considere el estudio de cinéticas de reacción y de esta forma establecer el desarrollo del proceso al interior del equipo; logrando así una predicción de los tiempos de procesamiento y mayor exactitud en los resultados a obtener.
3. Para próximos proyectos de investigación, se recomienda la adquisición de mejores equipos para la recolección de muestras gaseosas, que minimicen fugas y permitan su traslado seguro.
4. Cambiar la capacidad del reactor con la adquisición o fabricación de uno nuevo, que permita realizar los ensayos en una mayor cantidad de volumen.
5. Se recomienda el uso de sensores que permitan análisis de la muestra in situ, que puedan soportar altos niveles de voltaje y temperatura.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Yazawa, S. Nakazawa, and N. Menad, "Thermodynamic evaluations on the formation of dioxins and furans in combustion gas," *Chemosphere*, vol. 39(14), pp. 2419-2432, Dec. 2000.
2. L. Lombardi, E. Carnevale, and A. Corti, "Greenhouse effect reduction and energy recovery from waste landfill," *Energy* 31(15), pp. 3208-3219, Dec. 2006.
3. F. Meunier, "The greenhouse effect: A new source of energy," *Appl. Thermal Eng.*, vol. 27(2-3), pp. 658-664, Feb. 2007.
4. Proyecto de Ley General de Gestión Integral de Residuos Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales República de EL Salvador. Art. 9. Definiciones -12-oct-2016.
- 5, 6, 7, 8, 9. Proyecto de Ley General de Gestión Integral de Residuos Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales República de EL Salvador. CAPITULO I. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS-12-oct-2016.
10. ECOTRANS S. A. de C. V. (2006). "Segundo censo nacional de desechos sólidos municipales". Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. San Salvador, El Salvador. Consultado 10 abril de 2015. <[http://www.marn.gob.sv/phocadownload/segundo\\_censo\\_nac\\_des\\_solidos.pdf](http://www.marn.gob.sv/phocadownload/segundo_censo_nac_des_solidos.pdf)>.
11. Diseño, Construcción y operación de rellenos sanitarios manuales Unidad 3: El relleno sanitario. Tomado de [http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_rsm/e/unidades.html](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_rsm/e/unidades.html)
12. SEDESOL capítulo 6 Pirólisis, tomado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd61/tecnadmvo/cap6.pdf>
13. Concepto de incineración. Tomado de: [wikipedia.org/wiki/Incineración](http://wikipedia.org/wiki/Incineración).

14. Aguilar Virgen, Q. Armijo de Vega, C. Taboada González, P. La tecnología de plasma y residuos sólidos. Ingeniería Revista Académica, Vol.13. Mayo/Agosto 2009.
- 15, 16,..19. Análisis de viabilidad de una planta de tratamiento de residuos tipo III por plasma. Tomado de: <https://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/4fc5e7a807b17.pdf>
- 20, 21. Adriana Rocío Velasco Cancino, Dr. Alfonso Durán Moreno. Propuesta conceptual de un sistema de gasificación de residuos sólidos urbanos integrado a un sistema de generación de energía, Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Química. 01-02-2011
- 22, 23, 24. Paul M. Bellan, 2008. Fundamentals of Plasma Physics. California Institute of Technology. Kindle Edition ISBN9780521528009 Reviews.

**X. ANEXOS**

*Figura N° 1 Diseño completo de reactor energético de plasma iónico.*



Figura N° 2 Planos de cámara de alimentación de residuos y medidas en pulgadas, reactor energético de plasma.

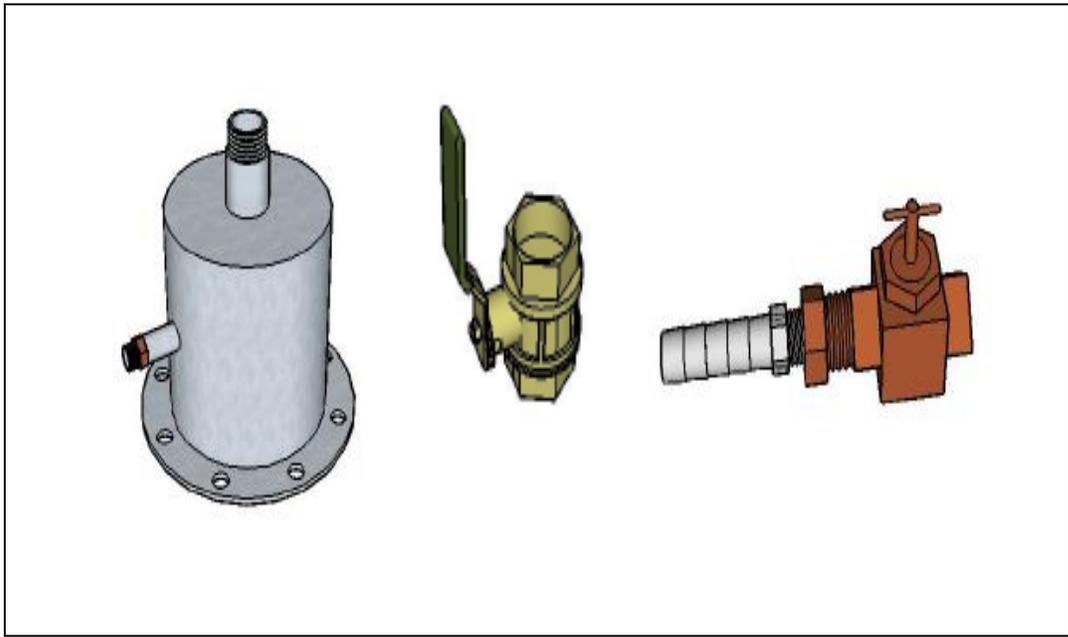
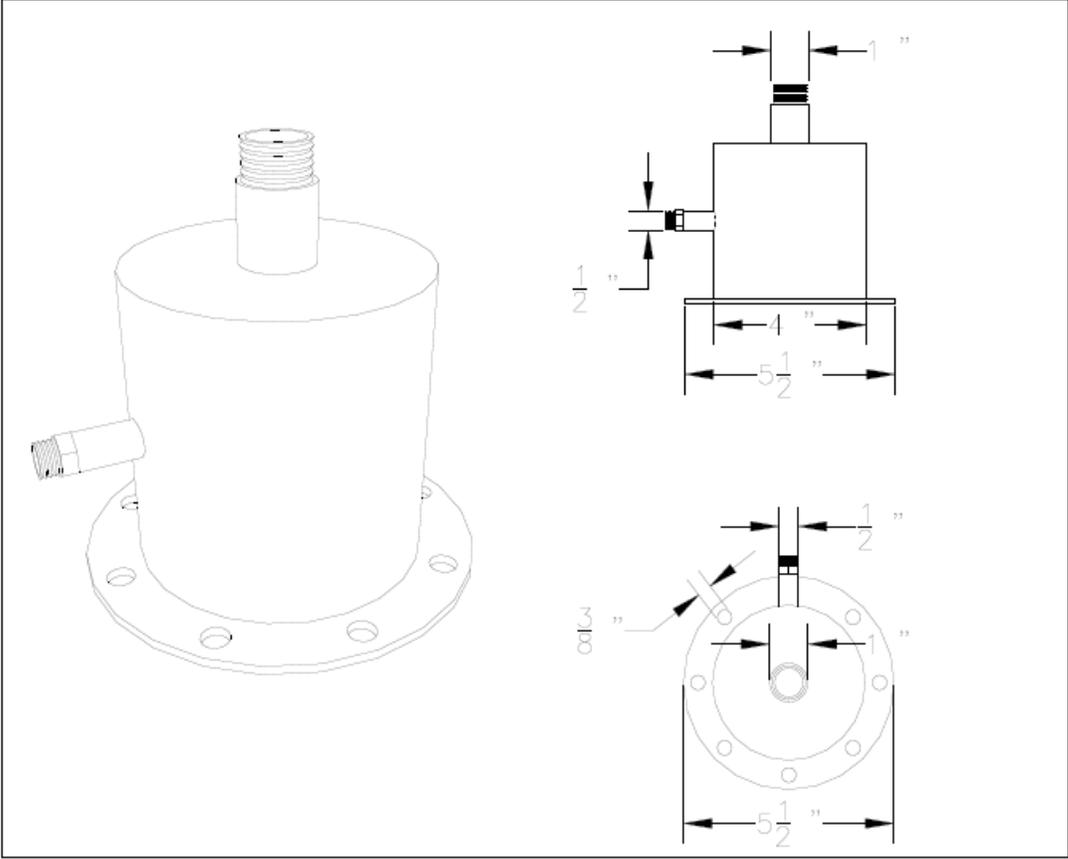


Figura N° 3 Planos de cámara de ionización, medidas en pulgadas.

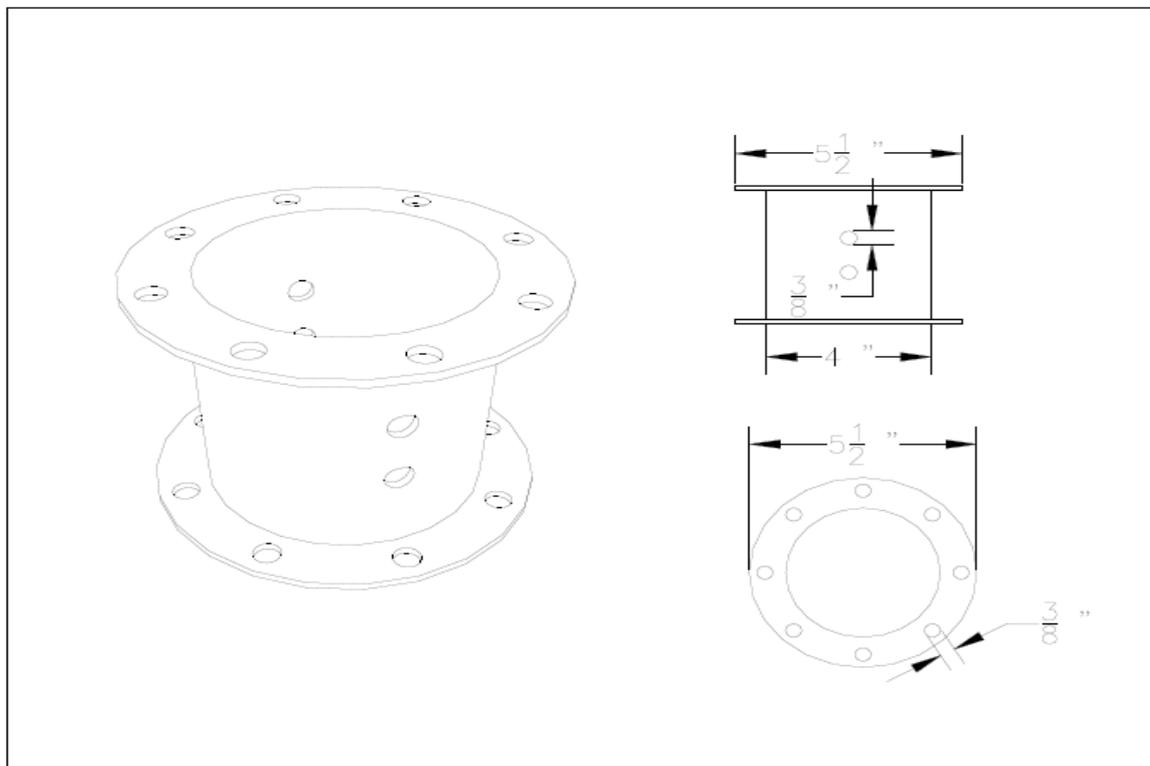
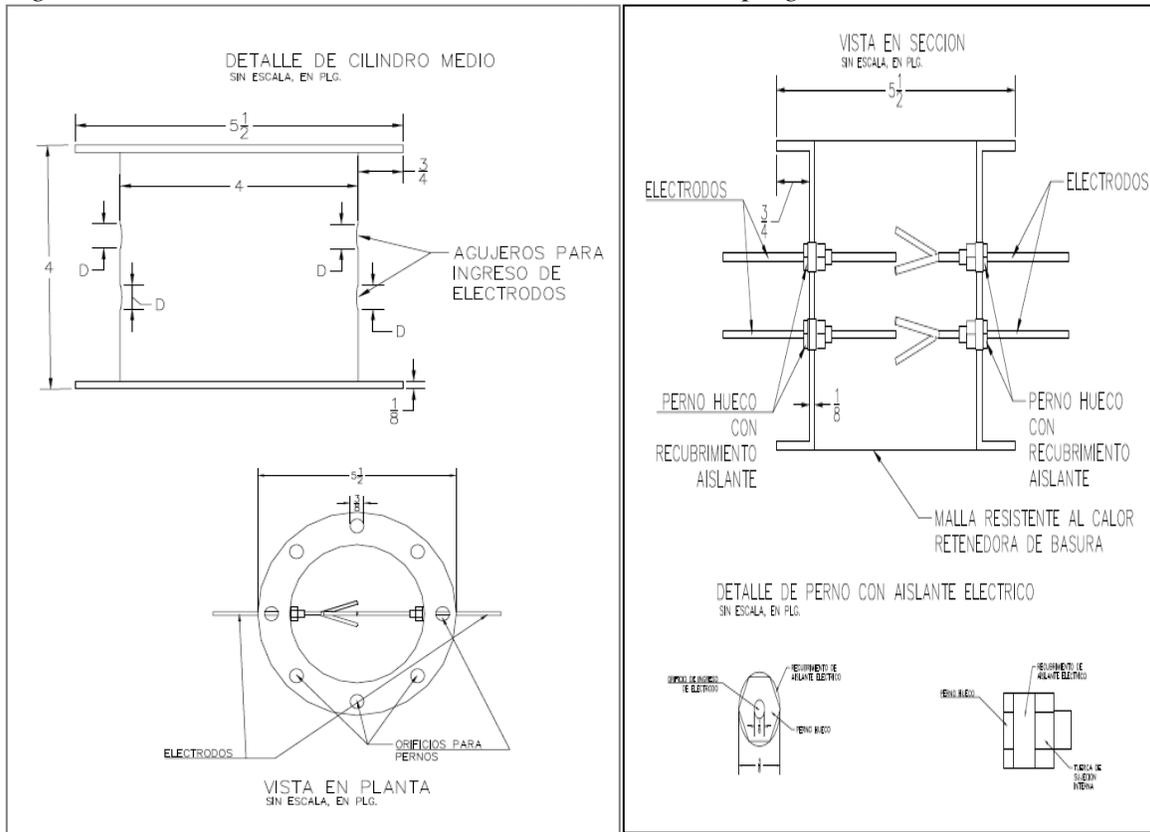


Figura N°4 Planos de depósito de cenizas, medidas en pulgadas.

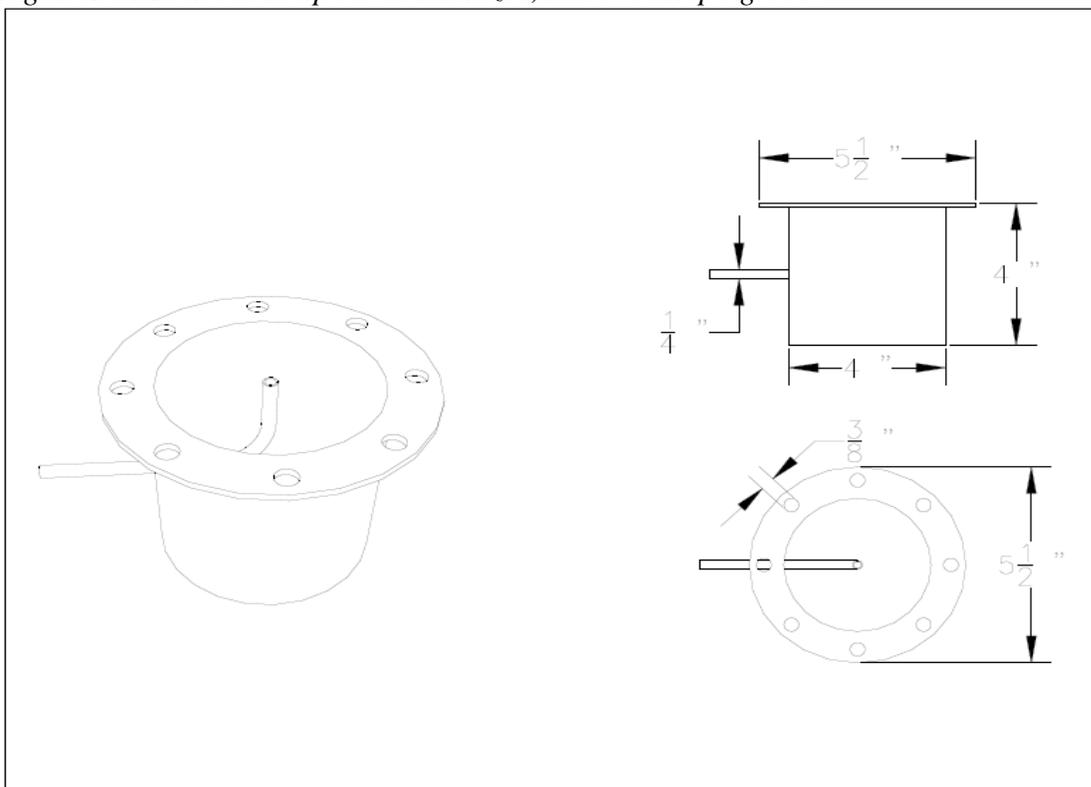


Figura N°5 Montaje completo de reactor.

