



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Carbonización Hidrotermal como
forma de aprovechamiento
energético de sargazo y residuos
sólidos urbanos en México**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniera Mecánica

P R E S E N T A

Elena Sánchez Sánchez

ASESOR DE INFORME

Dr. Luis Agustín Álvarez Icaza Longoria



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

A mis papás, María Elena y Salvador

Agradecimientos

Quiero agradecer al Dr. Luis Agustín Álvarez Icaza por todo su apoyo y orientación a lo largo de estos proyectos y con el desarrollo y dirección de este trabajo. Aprecio mucho todas sus observaciones y el aprendizaje que obtuve trabajando con él.

Al Ing. Daniel Camarena Elizondo, fundador y gerente general de G2E, por darme mi primera experiencia laboral en el mundo de la ingeniería, por enseñarme tanto, por todo su apoyo, por impulsarme a ir más lejos y por siempre creer en mí. Gracias por la labor que haces, me parece importantísima y sumamente necesaria en el país; me siento muy orgullosa de haber podido trabajar contigo y sé que tengo en ti un amigo y un gran mentor.

También quiero agradecer a Valeria Arozarena, por ser mi compañera y mi amiga a lo largo del tiempo que estuve en G2E. Contigo el trabajo fue mucho más enriquecedor, más divertido y me enseñaste que a Roma se puede llegar preguntando. Gracias por toda tu iniciativa y tus ganas de hacer las cosas; el tiempo que compartimos en la planta, en los laboratorios del IIM, en el IER y en SENER es una experiencia de la que aprendí mucho y que me llevo con una gran sonrisa.

Un agradecimiento a la Universidad de Cardiff y al Dr. Agustín Valera, quienes abrieron enormemente mi visión de la energía y me hicieron descubrir la interesantísima área del mejoramiento hidrotermal.

Gracias a la Universidad Técnica de Múnich por todas sus enseñanzas y por impulsarme a ahondar y desarrollar mi primer proyecto relacionado con la problemática del sargazo y con el aprovechamiento energético de las algas.

Gracias al ingeniero Alejandro Rojas Tapia por darme el primer acercamiento al mundo de la termodinámica y por hacerme disfrutarla tanto. Agradezco mucho todo el empeño y el entusiasmo que siempre puso en sus clases y en su laboratorio, pues estoy convencida de que usted sembró un gran interés por esta área del conocimiento en mí y en muchos de mis compañeros. Le mando un abrazo hasta donde esté y mi más profundo agradecimiento. Asimismo, al ingeniero Eduardo Lemus Soto y al ingeniero Jorge Aguilar Juárez, cuyas clases y enseñanzas fueron también una base fundamental para que yo eligiera el sector energético como área para desarrollarme profesionalmente.

Agradezco enormemente a la UNAM y a la Facultad de Ingeniería por todas las herramientas y las oportunidades que me brindaron, pues gracias a ello me convertí en la profesionista que soy hoy; a todos los maestros que con tanta dedicación dan sus clases y nos comparten su conocimiento y su experiencia, mi más grande admiración y agradecimiento. A mis compañeros y grandes amigos, que nunca dejaron de inspirarme y motivarme con su brillantez y sus diferentes maneras de ver las cosas, gracias por el camino, el aprendizaje, los desvelos y las risas compartidas a lo largo de estos 5 años. Agradecimiento especial a César y a Miguel.

Finalmente, gracias a mi familia extraordinaria que nunca ha dejado de apoyarme y que me ha impulsado en cada paso. Gracias a mis papás por ser un ejemplo tan grande de vida y de trayectoria profesional y por ser mi pilar más grande en todos los sentidos. A ustedes les dedico todo mi esfuerzo y les agradezco con todo mi corazón. Los amo.

Contenido

1.	Introducción y objetivos.....	1
2.	Descripción de la empresa	2
2.1	Breve historia de la empresa.....	2
2.2	Descripción de la labor que se desempeñó	2
3.	Antecedentes	4
3.1	Biomasa	4
3.1.1	La biomasa como materia prima.....	4
3.1.2	Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía	4
3.1.3	Biomasa de residuos	5
3.2	Tecnologías de conversión de biomasa.....	6
3.2.1	Procesos de pretratamiento.....	7
3.2.2	Procesos de conversión.....	8
4.	Proyecto 1. Arribazón de sargazo en playas del Caribe Mexicano	22
4.1	Antecedentes	22
4.2	Definición del problema o contexto de la participación profesional	24
4.3	Metodología utilizada	25
4.3.1	Caracterización fisicoquímica.....	25
4.3.2	Sistema de evaluación de propuestas.....	25
4.3.3	Formulación de propuesta para el aprovechamiento de sargazo: carbonización hidrotermal	38
4.4	Resultados	38
4.4.1	Caracterización fisicoquímica.....	38
4.4.2	Sistema de evaluación de propuestas para el aprovechamiento del sargazo	40
4.4.3	Propuesta: carbonización hidrotermal.....	44
5.	Proyecto 2. Planta de carbonización hidrotermal de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) de la Ciudad de México.....	48
5.1	Antecedentes	48
5.1.1	Definición de residuos sólidos urbanos.....	48
5.1.2	Generación de residuos.....	48
5.1.3	Gestión de los residuos y sus implicaciones.....	49
5.1.4	Métodos de disposición de residuos.....	49
5.2	Definición del problema o contexto de la participación profesional	51

5.2.1	Generación de residuos en México y en la CDMX	51
5.2.2	Disposición de residuos sólidos urbanos en la CDMX.....	51
5.2.3	Generación de electricidad en México.....	53
5.2.4	Emisiones.....	56
5.2.5	Propuesta: Planta de Carbonización Hidrotermal.....	57
5.3	Metodología utilizada	57
5.3.1	Caracterización fisicoquímica.....	57
5.3.2	Validación de tecnología de HTC.....	58
5.3.3	Estado del arte de la industria de Carbonización Hidrotermal	58
5.3.4	Propuesta de proyecto	58
5.4	Resultados	59
5.4.1	Caracterización fisicoquímica.....	59
5.4.2	Tecnología y proceso de HTC	60
5.4.3	Propuesta de proyecto	67
5.4.4	Empresas de HTC.....	72
5.4.5	Aprobación de proyecto.....	77
6.	Conclusiones.....	78
6.1	Sargazo	78
6.2	FORSU Ciudad de México	78
6.3	Conclusiones generales	79
	Referencias.....	80
7.	Anexos	85
8.1	Anexo 1: Tablas de evaluación de tecnologías para procesar sargazo	85
8.2	Plano de sitio de la planta de composta Bordo Poniente	87

Lista de Figuras

Figura 1. Mar del Sargazo y su perfil de movimiento desde la cuenca del Amazonas hacia el Caribe y las costas africanas a través de la Región Nor-Ecuatoriana de Circulación (Ryan Schuessler, 2018) ..	22
Figura 2. Evolución de la distribución de la marea de Sargazo en el Caribe (Optical Oceanography Laboratory, 2020)	23
Figura 3. Esquema de la estructura jerárquica de AHP para evaluar las diferentes propuestas de aprovechamiento del sargazo (alternativas) con base en sus características (de proceso, económicas, impacto social, del producto, etc.) (Elaboración propia)	37
Figura 4. <i>Sargassum natans</i> y <i>Sargassum fluitans</i> (Baker, 2018)	38
Figura 5. Propuesta de proceso de tratamiento de sargazo mediante HTC. (Elaboración de II y G2E)	45
Figura 6. Composición de los RSU en México, 2012 (Gobierno de México, 2015)	51
Figura 7. Destino de los residuos que ingresan a las estaciones de transferencia (SEMARNAT, 2018)	52
Figura 8. Generación de energía eléctrica en México por tipo de tecnología, 2017 (Secretaría de Energía, 2018)	54
Figura 9. Comercio exterior de energía primaria (PJ) (Gobierno de México, 2019)	55
Figura 10. Importación de energía en México 2008-2018 [PJ] (Gobierno de México, 2019)	55
Figura 11. Emisiones y contribución de gases de efecto invernadero por sector, 2015 (SEMARNAT, 2018)	56
Figura 12. Diagrama de proceso: HTC de FORSU (Elaboración propia)	68

Lista de Tablas

Tabla 1. Puntuación de acuerdo con el poder calorífico del producto (valores en $MJ_{\text{producto}}/t_{\text{sargazo}}$) ..	26
Tabla 2. Niveles de madurez tecnológica.....	27
Tabla 3. puntuación de acuerdo con el nivel de TRL de la tecnología	27
Tabla 4. Puntuación de acuerdo con el número de proveedores de equipo.....	28
Tabla 5. Puntuación de acuerdo con la capacidad de procesamiento del equipo.....	28
Tabla 6. Puntuación de acuerdo con la superficie que ocupa el equipo.....	28
Tabla 7. Puntuación de acuerdo con la inversión inicial	29
Tabla 8. Puntuación de acuerdo con los costos de operación	29
Tabla 9. Puntuación de acuerdo con el valor de comercialización del producto	30
Tabla 10. Puntuación de acuerdo con el volumen potencial de venta	30
Tabla 11. Puntuación de acuerdo con la flexibilidad del sistema	30
Tabla 12. Puntuación de acuerdo con el personal necesario.....	31
Tabla 13. Puntuación de acuerdo con el nivel de capacitación del personal	31
Tabla 14. Puntuación de acuerdo con el poder calorífico del producto	32
Tabla 15. Puntuación de acuerdo con los residuos generados.....	32
Tabla 16. Puntuación de acuerdo con los valores obtenidos para los diferentes tipos de residuos ...	33
Tabla 17. Puntuación de acuerdo con el tipo de mercado potencial	33
Tabla 18. Puntuación de acuerdo con la facilidad de aprovechamiento del producto	33
Tabla 19. Puntuación de acuerdo con el tipo de producto obtenido	34
Tabla 20. Puntuación de acuerdo con el tipo de implementación del sistema	34
Tabla 21. Escala numérica para la evaluación mediante AHP.....	35
Tabla 22. Análisis proximal del sargazo.....	39
Tabla 23. Análisis elemental del sargazo.....	39
Tabla 24. Composición de las cenizas del sargazo	39
Tabla 25. Temperaturas de fusibilidad de las cenizas del sargazo.....	39
Tabla 26. Poder calorífico inferior (PCI) medido en muestras de sargazo con diferente contenido de humedad	40
Tabla 27. Valores de entrada: características del proceso.....	41
Tabla 28. Características del producto y residuos.....	41
Tabla 29. Parámetros económicos y personal de operación	42

Tabla 30. Características a considerar para la evaluación de propuestas de aprovechamiento de sargazo	43
Tabla 31. Características de la propuesta de HTC	45
Tabla 32. Matriz de evaluación del proceso de carbonización hidrotermal para el aprovechamiento del sargazo. Prototipo inicial de 500 KWh	46
Tabla 33. Características de carbón mineral (CFE) (Transparencia Mexicana)	54
Tabla 34. Emisiones de CO ₂ en las centrales carboeléctricas de México, 2005 (CEC, 2011)	57
Tabla 35. Composición elemental de FORSU	59
Tabla 36. Análisis proximal de FORSU	60
Tabla 37. Poder calorífico de muestras de Hidrocarbón producido a partir de FORSU y madera de poda a diferentes porcentajes de humedad	60
Tabla 38. Parámetros de operación	61
Tabla 39. Distribución másica de los productos.....	62
Tabla 40. Concentración de metales pesados en el agua de proceso (Hitzl et al., 2016).....	62
Tabla 41. Composición del gas producto	62
Tabla 42. Balance de energía del proceso.....	63
Tabla 43. Análisis proximal del hidrocarbón	64
Tabla 44. Análisis elemental del hidrocarbón	65
Tabla 45. Composición de las cenizas producto del proceso.....	65
Tabla 45. Emisiones evitadas mediante el uso de hidrocarbón.....	66
Tabla 47. Parámetros económicos de una planta de HTC	67
Tabla 48. Descripción de proceso de HTC de FORSU	69
Tabla 49. Características de las empresas de HTC en el mundo	76

1. Introducción y objetivos

En este reporte presento las actividades que realicé y los resultados obtenidos en los dos proyectos en los que colaboré durante mi estancia como becario en la empresa G2E. Mi estancia se llevó a cabo de mayo a diciembre de 2019 y mis actividades fueron dirigidas por el Ing. Daniel Camarena, director general y dueño de la empresa, y en colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Los dos proyectos en que trabajé están orientados al aprovechamiento energético de biomasa. Ambos proyectos tienen la característica única de que plantean tres tipos de beneficios. Primero, buscan dar solución a problemas de acumulación indeseada de biomasa. Segundo, la solución planteada permite el aprovechamiento directo de la biomasa para la generación de energía eléctrica, brindando así beneficios materiales y económicos directos. Tercero, la solución brinda beneficios adicionales indirectos en la forma de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero e impactos sobre el medio ambiente, lo que contribuiría a transitar a una economía de bajas emisiones de carbono y respetuosa con el medio ambiente.

El primer proyecto abordó el problema de arribazón masiva de sargazo a las playas del Caribe Mexicano, y persiguió dos objetivos. El primero consistió en desarrollar un sistema de evaluación de propuestas tecnológicas para el aprovechamiento energético del alga. Para ello se identificaron las características clave a evaluar de los proyectos, se formuló un esquema para evaluar cada una de las características, así como un esquema para agruparlas en bloques y jerarquizarlas tomando en cuenta el criterio de los integrantes del grupo de trabajo designado para atender la problemática de arribazón masiva de sargazo. Finalmente, se generó una matriz por medio de la cual pueden evaluarse de forma cuantitativa los diferentes procesos, sistemas y tecnologías propuestos para abordar el problema y, de esa manera, identificar la opción que resulta más conveniente en todos los aspectos.

El segundo objetivo de este proyecto consistió en formular una propuesta preliminar para el aprovechamiento del sargazo mediante carbonización hidrotermal. La propuesta plantea la instalación de una planta de carbonización hidrotermal para procesar el sargazo y producir hidrocarbón, el cual podría sustituir el carbón mineral que se utiliza en las plantas carboeléctricas del país. La propuesta fue sometida al sistema de evaluación desarrollado en el primer objetivo.

El segundo proyecto abordó el problema de la generación de residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México y persiguió los siguientes objetivos:

- Validar, con base en información bibliográfica, el estado actual de la tecnología de carbonización hidrotermal,
- Revisar el estado del arte de la industria de carbonización hidrotermal en el mundo, y
- Colaborar en la formulación de una propuesta para la creación y desarrollo de una planta de carbonización hidrotermal para procesar la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que se generan en la Ciudad de México para producir hidrocarbón. De esa manera, la planta proveería, primero, una alternativa al sistema actual de disposición de los residuos. Segundo, el hidrocarbón producido podría sustituir al carbón mineral que actualmente se utiliza en plantas carboeléctricas del país, como la Central Termoeléctrica Petacalco.

2. Descripción de la empresa

2.1 Breve historia de la empresa

G2E es una pequeña empresa que fue fundada por el Ing. Daniel Camarena en 2013 con el propósito de desarrollar proyectos tanto de generación de calor y energía como de biocombustibles y otros productos a partir de biomasa. Desde entonces, G2E ha participado en diversos proyectos de relevancia local y nacional, incluyendo, por ejemplo, algunos proyectos de electrificación rural y de producción de sustratos para el mejoramiento de suelos, entre otros.

Actualmente, G2E es una empresa especializada en el diseño, desarrollo e implementación de proyectos de gasificación para la producción de energías limpias mediante el aprovechamiento de biomasa residual. La tecnología que utiliza G2E puede utilizarse con tipos de biomasa muy diferentes y sus sistemas modulares pueden generar desde 30 kWe hasta 2.2 MWe de electricidad. Además, como subproducto de los procesos de gasificación se obtienen energía térmica y biocarbón; el calor puede aprovecharse como fuente de energía para otros procesos, en tanto que el biocarbón puede utilizarse como fuente de energía o para el mejoramiento de suelos y otras aplicaciones.

Las dos principales líneas de trabajo de G2E actualmente en curso son:

CENTRO DEMOSTRATIVO.- En colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el apoyo de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), G2E construyó el Centro de Transferencia Tecnológica de Gasificación de Biomasa. El centro es el primero del país para el estudio de la viabilidad técnica y económica de tecnologías para la generación de energía térmica/eléctrica a partir de biomasa.

ELECTRIFICACIÓN RURAL.- G2E cuenta con gasificadores desde 30 kW que permiten construir pequeñas plantas autónomas para generar energía térmica y eléctrica para autoconsumo. Este tipo de plantas puede ayudar a dotar de electricidad a las pequeñas localidades del país que no cuentan con acceso a energía eléctrica en virtud de su aislamiento (que representan aproximadamente el 6.5% de las localidades con menos de 2,500 habitantes).

Como resultado de esa experiencia, desde 2014, G2E ha colaborado con el II de la UNAM en la formulación de propuestas y desarrollo de otros proyectos de importancia nacional tales como el de aprovechamiento energético de sargazo y el de la planta de carbonización hidrotermal de residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México.

2.2 Descripción de la labor que se desempeñó

De mayo a diciembre de 2019 realicé una estancia de práctica profesional en G2E. A lo largo de ese período, tuve la oportunidad de participar activamente en dos proyectos diferentes que tienen en común el aprovechamiento energético de biomasa:

Proyecto 1.- Problema de arribazón de sargazo en playas mexicanas.

Proyecto 2.- Planta de carbonización hidrotermal de residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México

Proyecto 1. Arribazón de sargazo en playas mexicanas.

En este proyecto realicé las siguientes actividades:

- 1a. Investigación bibliográfica sobre:
 - características físicas, químicas y biológicas del sargazo,
 - tecnologías disponibles actualmente que podrían adaptarse para el aprovechamiento energético del sargazo.
- 1b. Formulación de propuesta para el aprovechamiento energético del sargazo mediante carbonización hidrotermal:
 - caracterización fisicoquímica de la biomasa del sargazo
 - desarrollo de una propuesta de aprovechamiento del sargazo mediante carbonización hidrotermal
- 1c. Formulación de sistema para la evaluación y priorización de propuestas tecnológicas para el aprovechamiento energético del sargazo

Proyecto 2. Planta de carbonización hidrotermal de FORSU de la Ciudad de México

Las actividades que realicé para este proyecto fueron las siguientes:

- 2a. Investigación bibliográfica sobre:
 - procesos termoquímicos de conversión de biomasa,
 - proceso de carbonización hidrotermal y tecnología existente,
 - estado del arte de la industria de HTC en el mundo.
- 2b. Colaborar en la formulación de un proyecto de valorización energética de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) de la Ciudad de México mediante una planta de carbonización hidrotermal.

Los dos proyectos tienen en común el aprovechamiento energético de biomasa. En las siguientes secciones describo, en primer lugar, las características generales de la biomasa como materia prima y los diferentes tipos de procesos que se utilizan actualmente para su aprovechamiento. Posteriormente describo, en detalle y por separado, las actividades realizadas a este respecto en cada uno de los proyectos, los métodos utilizados, los resultados obtenidos y las conclusiones alcanzadas en cada uno de ellos.

3. Antecedentes

3.1 Biomasa

La biomasa es toda la materia orgánica, de origen tanto animal como vegetal, compuesta de sustancias orgánicas, constituidas principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno. La biomasa contiene energía solar almacenada en sus enlaces químicos, en forma de carbono fijo y materia volátil. Por esta razón, toda la biomasa es, en principio, susceptible de ser utilizada como fuente de energía. (Tekin, Karagöz y Bektaş, 2014).

3.1.1 La biomasa como materia prima

Existen muchos tipos de biomasa, los cuales se caracterizan y diferencian entre sí por sus propiedades físicas y químicas, tales como la densidad a granel, contenido de humedad, contenido de cenizas, poder calorífico, fracción volátil y composición química. Como mencionan Pandey, Bashkar, Stöcker y Sukumaran(2015), entre los diversos tipos de biomasa se encuentran la madera, los cultivos leñosos de rotación corta, especies herbáceas de rotación corta, residuos agrícolas, residuos de madera, residuos industriales, papel de desecho, residuos sólidos urbanos, aserrín, biosólidos, residuos de jardinería, residuos del procesamiento de alimentos, plantas acuáticas y algas, residuos de origen animal y muchos otros materiales.

Como materia prima, la biomasa puede clasificarse en distintas generaciones:

- Materias primas de primera generación. Son comestibles, provenientes del sector agrícola y generalmente se transforman en combustibles como biodiesel, alcoholes y biogás.
- Materias primas de segunda generación. Son no comestibles y comprenden dos grupos principales:
 - residuos orgánicos derivados de biomasa lignocelulósica, o bien residuos de cultivos y de diversos procesos agrícolas y forestales, y
 - cultivos energéticos, es decir, biomasa cultivada a gran escala únicamente con fines de producción de energía.
- Materias primas de tercera generación. A este grupo pertenecen los cultivos de algas, y generalmente tienen un alto contenido de lípidos, carbohidratos y proteínas.

Los cultivos para producción de energía son muy controvertidos debido a la competencia potencial por el uso de la tierra para la producción de alimentos, los efectos negativos sobre la biodiversidad y los gases de efecto invernadero emitidos por los sistemas agrícolas de alto insumo que se utilizan en su cultivo (Erlach, 2014).

3.1.2 Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía

Una de las ventajas de la biomasa es que constituye una fuente de energía limpia. Tekin et al. (2014) menciona que el CO₂ que se libera durante su combustión ha sido previamente sustraído de la atmósfera por las plantas a través de la fotosíntesis, por lo que no hay una liberación de CO₂ adicional (balance neutro). Si además se utilizan tecnologías para capturar el carbono que se emite durante su combustión, el uso de biomasa como fuente de energía tendría un balance negativo de carbono. Otra ventaja de la biomasa es que es renovable. Al ser una forma de almacenamiento de energía solar y a

diferencia de otros tipos de energías renovables, como la solar y la eólica, la biomasa puede utilizarse de forma continua y permite reaccionar a los cambios en la demanda energética de la red.

La biomasa tiene un alto potencial de utilización como alternativa a los combustibles fósiles. De acuerdo con Pandey et al. (2015), la biomasa tiene la capacidad de convertirse en la mayor y más sostenible fuente de energía en el mundo y es una de las fuentes de energía que jugarán un papel importante en la transición a una economía sostenible con bajas emisiones de carbono. Este tipo de sistemas será crucial para lograr los objetivos de estabilización de gases de efecto invernadero necesarios para frenar el cambio climático.

Actualmente, la biomasa cubre entre el 10% y el 14% de la demanda energética mundial. La extracción de energía útil de la biomasa es versátil en cuanto a materia prima, producto y tecnología de conversión. Comúnmente, se utiliza para la obtención de energía eléctrica o térmica, como combustible para sistemas de transporte y como materia prima para la producción de productos químicos como bioetanol y diversos hidrocarburos. Sin embargo, más del 80% se utiliza de forma muy ineficiente en sistemas de combustión directa, como en cocinas y en sistemas de calefacción tradicionales. A pesar de dicha ineficiencia, la contaminación atmosférica generada es insignificante en comparación con otras fuentes de producción de energía (Erlach, 2014; Tekin et al., 2014).

Sin embargo Erlach (2014) reconoce que la biomasa también tiene características que suponen desventajas sobre otros tipos de materias primas. Es propensa a la descomposición biológica, lo que, si bien facilita los procesos de conversión enzimática tales como la digestión anaeróbica y la fermentación, también supone problemas de almacenamiento. El almacenamiento, procesamiento y transporte de la biomasa a largas distancias involucran problemas técnicos y económicos debidos principalmente al gran volumen de la biomasa no procesada, su baja densidad de energía y su susceptibilidad a la degradación biológica. Por ello, la distribución espacial y estacional de los recursos disponibles es crucial para la logística del suministro de materias primas y la ubicación y la escala de las instalaciones de conversión.

Una de las mayores desventajas de la biomasa como combustible es su alto contenido de humedad, dado que la mayor parte de la biomasa contiene más del 50% de agua. Por esta razón, la eficiencia de la combustión de biomasa no pretratada generalmente es baja y su procesamiento por medio de otros métodos implica un alto consumo de energía. El contenido de humedad es una de las características cruciales de la biomasa que deben tomarse en cuenta para evaluar la viabilidad de los diferentes procesos de conversión (Mena, Doyle, Renz y Salimbeni, 2016).

3.1.3 Biomasa de residuos

La biomasa de residuos es una de las materias primas de segunda generación y comprende los residuos forestales, residuos agrícolas tales como paja y estiércol, residuos de la industria de alimentos y de producción de pasta y papel, y residuos municipales (Erlach, 2014).

En su investigación, Pandey et al. (2015) reportan que cada año se desechan alrededor de 12 mil millones de toneladas de biomasa en el mundo, esencialmente como residuos. Esta es una gran cantidad de biomasa potencialmente disponible de manera continua y a bajo costo, que podría utilizarse de diferentes formas: como materia prima para la generación directa de energía o para la producción de biocombustibles; como materia prima alternativa para la producción de productos químicos (por ejemplo, vitaminas, productos farmacéuticos, colorantes, polímeros y surfactantes, etc.); o para su transformación en productos de carbono.

A diferencia de otros tipos de residuos, los residuos urbanos son particularmente prometedores como materia prima para fines energéticos, por varias razones, que expone Erlach (2014) en su estudio:

- existe una infraestructura de recolección;
- todo el año hay disponibles cantidades relativamente grandes de este tipo de biomasa, incluyendo los residuos domésticos, lodos del tratamiento de aguas residuales y residuos de alimentos;
- la biomasa de residuos se considera generalmente como el recurso bioenergético más benigno desde el punto de vista ambiental. Se estima que el potencial mundial es de unos 40 a 170 EJ/a.; y
- la disposición de estos residuos actualmente constituye un problema importante en muchos países. El aprovechamiento de los residuos urbanos como materia prima para la producción de energía no solo contribuiría a la generación de energía limpia sino que, al mismo tiempo, ayudaría a mitigar el problema de la disposición.

3.2 Tecnologías de conversión de biomasa

Debido al gran potencial que tiene la biomasa como materia prima, se han desarrollado procesos y tecnologías de tratamiento y conversión que permiten extraer la energía de manera eficiente, al tiempo que se reducen los residuos derivados de los procesos, como explican Klinghoffer y Castaldi (2013). Sin embargo, la diversidad y heterogeneidad fisicoquímica de la biomasa hace necesarias diferentes tecnologías de conversión para manejar eficientemente la amplia gama de materias primas. El poder calorífico, el contenido de humedad, carbono fijo, materia volátil, cenizas y metales alcalinos, y la relación celulosa/lignina juegan un papel importante en la selección del tipo de biomasa como fuente de energía. Asimismo, la cantidad y el tipo de energía obtenidos varían según las propiedades particulares de la biomasa seleccionada y la tecnología de conversión aplicada (Tekin et al., 2014).

En el texto de Pandey et al. (2015) se discute que, a diferencia de otras materias primas para la producción de combustibles o síntesis de productos químicos, la biomasa resulta particularmente complicada debido a la gran variabilidad que presenta tanto en su composición como en su distribución y forma. Dichas características, así como la presencia de componentes inorgánicos en la biomasa, plantean desafíos tecnológicos para su conversión eficiente. Dependiendo del tipo de biomasa de que se trate, sus características y propiedades suelen cambiar con la estacionalidad, el lugar de origen y las condiciones ambientales, así como con los sistemas de producción, recolección y almacenamiento que se utilicen. Entre las propiedades principales de la biomasa se encuentran la distribución y forma de las partículas, contenido de humedad, densidad específica, compresibilidad y coeficiente de compactación, contaminantes y capacidad de flujo.

La calidad de la materia prima para cualquier proceso de producción es extremadamente importante para obtener un desempeño constante, pues contar con biomasa de calidad uniforme puede

garantizar la buena calidad del combustible o de los productos químicos resultantes. Las cualidades deseables de la biomasa como materia prima incluyen estabilidad, uniformidad y homogeneidad, alta densidad a granel, bajo contenido de humedad, bajo contenido de cenizas, alta productividad y bajo costo. Las características de la biomasa son esenciales para determinar la complejidad de la tecnología de conversión y el sistema de procesamiento a utilizar, así como la eficiencia de los procesos de conversión, la calidad del producto obtenido y la rentabilidad del sistema en cuestión.

Por ello, existen procesos de pretratamiento de la biomasa a través de los cuales se busca entregar la materia prima en una forma utilizable para un uso más eficiente en los procesos de conversión posteriores, con una pérdida mínima de calidad.

3.2.1 Procesos de pretratamiento

Los procesos de pretratamiento involucran tanto la recolección como el procesamiento y almacenamiento de la biomasa. Los diversos métodos de pretratamiento son meramente mecánicos, es decir, no cambian el estado ni la composición de la biomasa, sino que buscan controlar características tales como el tamaño, la forma y el contenido de humedad de la biomasa. Entre los procesos de pretratamiento más comunes se incluyen el secado, la reducción de tamaño, el astillado, el triturado, la molienda, la pulverización y la peletización (densificación) de la materia prima (Pandey et al., 2015).

El secado es uno de los procesos más importantes; con excepción de los procesos hidrotermales, todos los métodos termoquímicos de conversión requieren biomasa seca o con un muy bajo contenido de humedad. El secado ayuda también a prevenir la descomposición de la biomasa, lo que a su vez contribuye a preservar su calidad. Además, el alto contenido de humedad de la biomasa es un factor importante a considerar dentro de la logística y los costos de transporte y almacenamiento, por lo que el secado es un proceso crucial. Sin embargo, el proceso de secado aumenta significativamente el consumo de energía de los sistemas de producción de biocombustibles sólidos, por lo que tiene un gran impacto en la eficiencia de las tecnologías de conversión de biomasa (Erlach, 2014).

Los procesos de corte tienen por objeto cambiar significativamente el tamaño de las partículas y la forma y densidad a granel de la biomasa, a fin de obtener una materia prima más homogénea. Posterior a los procesos de secado y corte, es común la integración de un sistema de peletizado, pues es la manera más directa de homogeneizar aún más la biomasa y de convertirla en un combustible con alta densidad energética.

Como resultado de estos procesos, se obtiene una materia prima que puede ser utilizada de forma más eficiente en los sistemas de conversión subsecuentes. Asimismo, debido a su mayor densidad energética y mayor facilidad de manipulación y almacenamiento, la biomasa pretratada es más adecuada para el transporte a largas distancias que la biomasa no pretratada.

Una vez que se tiene una materia prima adecuada para su uso, es necesario cuidar algunos otros aspectos dependiendo del proceso de conversión a utilizar. Por ejemplo, la presencia de contenido

inorgánico en la biomasa es un factor importante, ya que conlleva dificultades en los procesos de combustión, pirólisis y gasificación de biomasa, tales como la deposición, obstrucción, incrustación, sinterización y aglomeración; también influye considerablemente en la calidad de los productos. Así, junto con la optimización de los diferentes parámetros del proceso del sistema, para que el proceso termoquímico sea eficiente se requieren la minimización del contenido de cenizas y la eliminación simultánea de elementos problemáticos (por ejemplo, K, Na, Cl y S) de las cenizas de la materia prima (Pandey et al., 2015).

3.2.2 Procesos de conversión

Las tecnologías utilizadas para convertir la biomasa, ya sea en biocombustibles o en productos químicos, pueden clasificarse en dos grupos: procesos bioquímicos o procesos termoquímicos. Con las tecnologías de conversión bioquímica, la biomasa se degrada mediante enzimas y microorganismos (principalmente bacterias), mientras que en los procesos termoquímicos la biomasa se degrada mediante calor.

3.2.2.1 Procesos bioquímicos de conversión

Entre estos procesos se incluyen la degradación aeróbica y anaeróbica y la fermentación. Tekin et al. (2014) explican que la degradación aeróbica es la descomposición de la materia orgánica en presencia de oxígeno, obteniendo como productos metano y CO₂, además de un producto sólido; la degradación anaeróbica es similar, pero el proceso ocurre en ausencia de oxígeno. La fermentación, por otro lado, utiliza microorganismos y/o enzimas para convertir los carbohidratos de la biomasa en etanol, ácidos orgánicos y CO₂.

Entre las principales desventajas de los procesos bioquímicos de conversión se encuentran las siguientes: el pretratamiento de la biomasa es indispensable; el tiempo de reacción es largo debido a la conversión biológica, por lo que la productividad es limitada; los procesos son susceptibles a condiciones ambientales (temperatura y humedad, principalmente); y existen flujos importantes de residuos tras la conversión, como los lodos de biomasa.

3.2.2.2 Procesos termoquímicos de conversión

Las tecnologías de conversión termoquímica se basan en la descomposición térmica de la biomasa para generar productos sólidos, líquidos o gaseosos que posteriormente pueden ser mejorados y utilizados como combustibles (biocombustibles sintéticos), o bien como productos químicos de alto valor. El propósito principal de los métodos termoquímicos es aumentar la densidad energética de la materia prima mediante su conversión a hidrocarburos, en lugar de utilizarla directamente como fuente de energía.

Los métodos termoquímicos tienen grandes ventajas sobre los métodos bioquímicos de conversión. El tiempo de procesamiento de la biomasa es considerablemente menor, con lo que los productos pueden obtenerse mucho más rápidamente. Además, hacen posible un aprovechamiento más completo de la biomasa y, dependiendo del proceso que se utilice, puede no ser necesario el

pretratamiento. Uno de los aspectos más sobresalientes de los procesos termoquímicos es que con ellos se pueden tratar de forma efectiva todos los tipos de biomasa (Pandey et al., 2015).

Una desventaja de los procesos convencionales de conversión termoquímica (es decir, combustión directa, pirólisis y gasificación) es que solo funcionan de forma eficiente cuando se utiliza materia prima seca. Por esta razón, recientemente ha cobrado cada vez más relevancia la investigación sobre procesos hidrotermales con objeto de aumentar la eficiencia del uso energético de biomasa húmeda. En las siguientes secciones describo brevemente los principales procesos termoquímicos de conversión.

Combustión directa

La combustión es un proceso exotérmico de oxidación completa en el que el carbono, hidrógeno y nitrógeno contenidos en la biomasa reaccionan con el oxígeno del aire. La energía contenida en los enlaces químicos de la materia orgánica se libera en forma de energía térmica como resultado de la reacción entre el combustible y el oxígeno. La cantidad de calor que se libera y las características de la combustión dependen en gran medida de las propiedades de la materia prima, como el contenido de carbono, cenizas y humedad, y de la tasa de conversión de la biomasa.

La combustión es el método de conversión termoquímica más simple que existe, es también el más antiguo y el que más comúnmente se utiliza para generar calor y energía eléctrica a partir de biomasa. Otra de las razones por las que es tan utilizado este método, a pesar de no ser el más eficiente, es que la combustión es esencialmente no selectiva en cuanto a la materia prima y es capaz de convertir el combustible entero en productos simples como CO₂ y agua, entre otros. El comportamiento de la combustión y los tipos y cantidades de productos que se obtienen dependen principalmente de la composición y estructura de la biomasa. Elementos como Si, K, S, Cl, P, Ca, Mg y Fe resultan particularmente problemáticos al momento de la combustión, pues derivan en una mayor formación de cenizas, incrustaciones y posibles obstrucciones en los equipos (Pandey et al., 2015; Tekin et al., 2014).

Pirólisis

La pirólisis es la degradación de la materia orgánica que ocurre cuando esta se somete a calentamiento en una atmósfera libre de oxígeno o con una cantidad limitada. Este proceso forma la base de casi cualquier método termoquímico de conversión.

Para llevar a cabo la reacción de pirolisis, se puede realizar la combustión de una parte de la biomasa que así produce la energía necesaria para esta reacción endotérmica, o bien utilizar una fuente externa de calor. Mediante esas reacciones, los componentes de la biomasa (es decir, lignina, celulosa, grasas y almidones) se degradan térmicamente y se obtienen como productos las siguientes fases: una fase líquida, conocida como bio-aceite (producto de vapores condensados); una fase sólida, que consiste en productos carbonizados y alquitranes; y una fase gaseosa (gas primario) no condensable, que se compone principalmente de metano, hidrógeno, CO y CO₂.

De acuerdo con Tekin et al. (2014), una de las principales ventajas de la pirólisis es su flexibilidad, en cuestión tanto de materia prima como de los productos obtenidos. Los productos y sus proporciones pueden controlarse mediante los parámetros de proceso, como el tipo de reactor, temperatura de reacción, fuente de calor y tasa de calentamiento.

Gasificación

La gasificación es un método de conversión termoquímica en el que, por medio de un agente gasificante (por ejemplo, vapor de agua, aire, O₂ o CO₂), se produce la oxidación parcial de la biomasa para transformarla en un gas combustible que contiene principalmente H₂, CH₄, CO y CO₂ en diferentes proporciones. En el proceso de gasificación se pueden distinguir cuatro etapas principales: 1) secado de la biomasa, 2) pirólisis de la biomasa seca, 3) oxidación parcial de los gases producto de la pirólisis, y 4) gasificación (también llamada reducción). La cantidad de oxígeno que se requiere en este tratamiento térmico es muy inferior a la que requieren los procesos de combustión (Klinghoffer y Castaldi, 2013).

La gasificación de biomasa puede ocurrir a temperaturas entre 600 y 1300 °C. Dependiendo de la forma en que se genere el calor necesario, los procesos de gasificación pueden clasificarse en dos tipos:

- **gasificación indirecta o alotérmica**, en la que el calor es generado externamente y posteriormente transferido al gasificador, y
- **gasificación directa o autotérmica**, en la que el calor se genera por medio de combustión parcial de una parte de la biomasa dentro del gasificador.

También, dependiendo del tipo de reactor, los gasificadores pueden ser:

- **de lecho movedizo**, que son sistemas altamente flexibles y de alta eficiencia, especialmente para aplicaciones a gran escala. En estos reactores, la biomasa de entrada debe ser previamente triturada a un tamaño fino de partícula, y aire, vapor u oxígeno entran al reactor desde la base. Las reacciones de secado, pirólisis y oxidación tienen lugar prácticamente en la misma zona del reactor, lo que deriva en una distribución más uniforme de temperatura en la zona de gasificación. Estos gasificadores pueden utilizarse con una gran variedad de combustibles; sin embargo, por su complejidad de construcción y operación, sólo son económicamente viables para aplicaciones a gran escala. Entre este tipo de gasificadores se encuentran los **de lecho burbujeante** y los **de lecho fluidizado circulante**. Por lo general, este tipo de gasificadores producen niveles bajos de alquitrán.
- **de lecho fijo**, que tienen una eficiencia térmica alta, mínimos requisitos de pretratamiento de la biomasa y se han utilizado especialmente para la producción de energía a pequeña escala (<10 MW). A su vez, dependiendo de la dirección del flujo de aire, los gasificadores de lecho fijo pueden ser **de contraflujo (o contracorriente)**, **flujo paralelo** o **flujo cruzado**. Los gasificadores de contraflujo y de flujo cruzado son adecuados para aplicaciones térmicas a pequeña escala. Los gasificadores Imbert, por ejemplo, producen una baja concentración de alquitranes, ya que la mayor parte de estos compuestos se queman y/o se transforman en gas en la zona de oxidación (Pandey et al., 2015).

Durante la gasificación, la materia prima pierde oxígeno por medio de reacciones de descarboxilación o deshidratación, con lo que se obtiene un gas producto que contiene una alta proporción H/C. Después de la gasificación, el gas pasa por varios procesos de refinamiento y acondicionamiento, dependiendo de la aplicación para la que se vaya a utilizar. El gas de síntesis puede aprovecharse de diferentes maneras: como fuente de energía en combustión directa para la producción de calor y electricidad; para la producción de H₂ por medio de reacciones de desplazamiento de agua; para la producción de diésel por medio de síntesis de Fischer-Tropsch; y para la síntesis de metanol o combustibles derivados de éste (Klinghoffer y Castaldi, 2013; Pandey et al., 2015).

La eficiencia química de la gasificación es superior al 70%, por lo que la producción de gas sintético a partir de biomasa es considerada como una ruta conveniente para producir sustancias químicas, hidrógeno, biocombustibles y electricidad. El uso de este tipo de sistemas para la producción de energía a partir de biomasa residual en comunidades rurales es especialmente atractivo. Asimismo, en algunos casos la gasificación se prefiere sobre el uso de combustibles sólidos, ya que el gas es más adecuado para llevar a cabo una combustión eficiente en turbinas y/o motores.

Dependiendo del tipo de biomasa y de las características que se deseen en el gas producto, pueden utilizarse varias combinaciones de tipos de reactores, fuentes de energía y agentes de gasificación. La flexibilidad de las actuales tecnologías de gasificación, en combinación con los diferentes usos del gas sintético, permite integrar la gasificación de biomasa a varios procesos industriales y a los sistemas de generación de energía ya existentes.

Uno de los problemas más importantes de la gasificación es la producción de alquitranes que ocurre en el proceso. Los compuestos de alquitrán y otras impurezas presentes en el gas producto pueden ocasionar erosión, corrosión, deposición y obstrucción de los equipos, lo que puede implicar importantes problemas de operación. En su texto, Klinghoffer y Castaldi (2013) hacen énfasis en que la formación de estos compuestos constituye la principal barrera para la comercialización a gran escala de las tecnologías de gasificación.

Procesos hidrotermales

El procesamiento hidrotermal (HTU, por sus siglas en inglés) es una tecnología de conversión termoquímica en la que la degradación térmica de la biomasa tiene lugar en agua líquida a temperatura moderada (200-700 °C) y alta presión (5-40 MPa), con lo que se obtienen biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos de gran valor (Tekin et al., 2014).

La transformación de la biomasa en los procesos hidrotermales se lleva a cabo gracias a las propiedades fisicoquímicas que adquiere el agua a dichas condiciones de presión y temperatura. Las propiedades del agua por encima de 200 °C son muy diferentes a las del agua en condiciones ambientales, lo que hace que esta pueda actuar como solvente, catalizador, reactivo y como medio para el transporte de materiales y energía. En esas condiciones, el agua posee menos y más débiles enlaces de hidrógeno, una mayor compresibilidad isotérmica y una constante de disociación significativamente más alta que la del agua a temperatura ambiente. Estas características hacen que el agua se convierta en un solvente con propiedades cercanas a las de los solventes orgánicos a temperatura ambiente (Erlach, 2014).

Asimismo, Tekin et al. (2014) menciona que la viscosidad del agua disminuye con el aumento de temperatura, lo que aumenta el coeficiente de difusión; aunado a una menor constante dieléctrica, esto permite una mayor velocidad de reacción sin necesidad de usar catalizadores. El agua a altas temperaturas también puede comportarse como reactivo en el medio de reacción hidrotermal: el agua actúa como fuente de hidrógeno para las reacciones de hidrólisis que juegan un papel importante en la descomposición de la biomasa.

Como se describe en el texto de Pandey et al. (2015), los productos que se obtienen de estos procesos dependen de los parámetros de operación, principalmente la presión y temperatura, aunque existe también cierta influencia del tiempo de reacción y la relación biomasa/agua en el reactor. Así, es posible transformar la biomasa en el producto objetivo variando dichos parámetros:

- En condiciones de baja temperatura (≤ 250 °C) y presión se obtiene principalmente un biocombustible sólido llamado biocarbón. Este proceso se conoce como carbonización hidrotermal (HTC)
- En condiciones intermedias (temperatura entre 250 y 350 °C) se obtiene mayormente un producto líquido denominado bio-aceite y el proceso se conoce como licuefacción hidrotermal (HTL)
- En condiciones de alta presión y temperatura (>350 °C) ocurre gasificación hidrotermal (HTG) y se obtiene biogás

El objetivo principal en cualquiera de los tres casos es generar un producto con alta densidad energética por medio de la remoción de oxígeno. Sin embargo, la distribución y las características de los productos también dependerán en gran medida del tipo de biomasa utilizada (Elliott, Biller, Ross, Schmidt y Jones, 2015).

Una de las principales ventajas de los procesos hidrotermales es que, dado que la conversión ocurre en agua, se pueden procesar materias primas con cualquier contenido de humedad sin necesidad de aplicar un paso de secado previo. Esta característica distingue al procesamiento hidrotermal de los otros sistemas de conversión y lo vuelve especialmente adecuado para el aprovechamiento de biomasa, pues es una materia prima que suele tener un contenido muy alto de humedad y que, por ello, es difícil y costosa de procesar en sistemas convencionales (Klinghoffer y Castaldi, 2013). Además, el procesamiento hidrotermal admite una gran variedad de materias primas, ya que son procesos muy robustos.

Más aún, dado que los procesos hidrotermales utilizan agua como medio de reacción y por lo general no requieren catalizadores, estos procesos son más compatibles con el medio ambiente que otros métodos de conversión de biomasa, ya que no se requieren sustancias químicas y, por tanto, tampoco es necesario el reciclaje químico (Binod, Pandey, Negi y Larroche, 2015).

Como describen Tekin et al. (2014) y Erlach (2014), el procesamiento hidrotermal de la biomasa también tiene algunas desventajas:

- utiliza reactores más complejos y caros que los que se usan para los procesos bioquímicos, de pirólisis o gasificación;
- los sistemas requieren grandes capacidades de manejo de agua;
- el manejo de los procesos de separación y extracción a escala industrial es complicado; y
- para mantener el agua en estado líquido a las temperaturas de reacción relativamente altas del proceso, son necesarias también presiones altas, ya que la presión debe ser al menos igual

a la presión de saturación a la temperatura dada. Esto implica que la biomasa debe alimentarse al reactor a altas presiones, lo que representa un desafío de ingeniería cuando se trata de procesos continuos.

A pesar de sus desventajas, los procesos hidrotermales son sumamente atractivos para el aprovechamiento de la biomasa. Algunos de los mercados con mayor potencial de utilización del procesamiento hidrotermal son la industria agrícola, la industria alimentaria y el aprovechamiento de algas. También ha cobrado un interés creciente su uso para el tratamiento de residuos, tales como los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales o la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (Klinghoffer y Castaldi, 2013).

- **Licuefacción Hidrotermal (HTL)**

El objetivo principal de la licuefacción hidrotermal es transformar la biomasa en un biocombustible líquido que pueda utilizarse como alternativa a los combustibles fósiles como el diésel y el petróleo crudo. Este proceso se lleva a cabo a temperaturas entre 200 y 350 °C y presiones de entre 4 y 22 MPa, y comprende tres fases principales: despolimerización, descomposición y recombinación. Al mantener las condiciones de alta presión y temperatura por un tiempo suficiente, se inician procesos pirolíticos que rompen la estructura sólida de los biopolímeros y forman principalmente productos líquidos con un alto contenido energético, denominados bio-aceites. Estos aceites pueden ser refinados aún más para obtener toda la gama de productos combustibles derivados del petróleo. Además del producto principal líquido se obtienen varios subproductos, incluyendo una fase sólida que puede ser utilizada como fertilizante, o el agua de proceso, que puede ser tratada para la recuperación de nutrientes (Elliott et al., 2015; Gollakota, Kishore y Gu, 2018).

Aunque la licuefacción hidrotermal ocurre a través de procesos pirolíticos, el bio-aceite que se obtiene posee propiedades más ventajosas, ya que alcanza una mayor desoxigenación, con lo que el producto es más hidrofóbico. Asimismo, en comparación con la pirólisis, la temperatura de operación es considerablemente más baja, el proceso es altamente eficiente en términos de energía y la producción de alquitranes es relativamente baja, por lo que este proceso se ha vuelto un tema importante de investigación para la producción de biocombustibles líquidos.

Gollakota et al. (2018) mencionan que una de las mayores ventajas de la HTL es su bajo consumo energético, que representa alrededor del 10-15% de la energía presente en la materia prima de entrada, con lo que el proceso tiene una eficiencia energética global del 85-90%. Asimismo, a través de este proceso es posible recuperar más del 70% del carbono contenido en la materia prima, el cual puede utilizarse para procesos de captura de carbono. Además, las tasas de conversión de biomasa por medio de este proceso son muy altas y los productos son relativamente puros, por lo que no se requiere mucho refinamiento posterior para su uso comercial.

Uno de los mayores inconvenientes de la licuefacción hidrotermal es la alta presión necesaria para el proceso, lo que implica el uso de equipos muy costosos, por lo que su rentabilidad es cuestionable y depende de muchos factores.

- **Gasificación Hidrotermal (HTG)**

La gasificación hidrotermal es un proceso en que la biomasa se degrada termoquímicamente en sus componentes líquidos y gaseosos en presencia de agua líquida en condiciones supercríticas (es decir, por encima de 374 °C y 22.1 MPa, que definen el punto crítico del agua). La HTG se utiliza principalmente para la producción de metano e hidrógeno (Tekin et al., 2014).

Durante la HTG, la biomasa se descompone en compuestos de bajo peso molecular por medio de reacciones de hidrólisis, aunque ocurren también muchas otras reacciones, como la descomposición térmica, la reacción de desplazamiento por agua y la metanación. El proceso se lleva a cabo a temperaturas de entre 350 y 700 °C; a estas temperaturas se rompen los enlaces de los componentes de la biomasa, lo que permite la formación de gases tales como H₂, CH₄, CO₂ y CO (Pandey et al., 2015).

Los productos resultantes del proceso tienen numerosas aplicaciones, desde su uso para generación de energía, la fabricación de celdas de combustible y la síntesis química, entre otros. Aunque también se producen algunos subproductos en menor proporción, como la fase líquida proveniente del agua de proceso, las condiciones supercríticas impiden la formación de biocarbón debido a la disolución de las especies reactivas. Esto asegura un alto rendimiento de gas; la tasa de conversión de biomasa a gas suele ser superior al 80%.

Además, gracias a la alta temperatura de reacción, el proceso de gasificación hidrotermal requiere un tiempo de residencia mucho menor que los otros tratamientos hidrotermales, además de que se logra una descomposición completa. Asimismo, la alta solubilidad que se presenta en la reacción inhibe en gran medida la formación de coque y alquitrán (Kruse, 2009); así, el gas producto tiene un alto poder calorífico y es relativamente puro, pues dichos compuestos permanecen en la fase líquida. El agua de proceso tampoco requiere un post-tratamiento complejo para su disposición, pues tiene una baja concentración de compuestos orgánicos.

Dada la gran variedad de aplicaciones del biogás producto, la gasificación hidrotermal es un proceso prometedor para la conversión de biomasa. Para materias primas con un contenido de humedad de al menos el 30%, este proceso requiere menos energía que la que se utiliza en el secado previo necesario para los sistemas de conversión convencionales. Sin embargo, como discuten Tekin et al. (2014) y Kruse (2009), la selección de la biomasa es determinante de la idoneidad y viabilidad del proceso, ya que para materias primas con un contenido de humedad mayor al 80% es posible que la energía necesaria para llevar el agua a la temperatura de proceso sea mayor a la que contiene la biomasa, por lo que el uso de HTG sería incluso contraproducente.

- **Carbonización Hidrotermal (HTC)**

La carbonización hidrotermal es un método termoquímico de conversión de biomasa que, de forma similar a los otros métodos hidrotermales, se lleva a cabo en agua líquida presurizada, aproximadamente a 200 °C, durante varias horas. El producto principal de la HTC es un biocombustible sólido, denominado hidrocabón (o biocarbón), que posee características similares al lignito. Este producto es más adecuado para la combustión o gasificación que la biomasa y tiene también propiedades más favorables para su transporte y almacenamiento. La carbonización hidrotermal se considera una alternativa atractiva de producción sostenible de biocarbón a partir de biomasa y otras materias primas húmedas, de bajo costo y neutro en CO₂ para aplicaciones descentralizadas (Erlach, 2014).

Proceso

De manera general, el proceso consiste en las siguientes etapas:

- mezclado de biomasa con agua para formar una pulpa,
- precalentamiento y presurización de la pulpa,
- proceso de HTC en el reactor,
- enfriamiento, despresurización y deshidratación, y
- peletizado.

Mezclado de biomasa con agua.- Dependiendo de las características de la biomasa que se utilice, esta debe mezclarse con agua para obtener una pulpa bombeable con un contenido de materia seca de ~15%; para mayor eficiencia, suele utilizarse agua recirculada de proceso (Mena et al., 2016).

Precalentamiento y presurización.- Posteriormente y antes de entrar al reactor, la pulpa se precalienta y se presuriza en varias etapas, con intercambiadores de calor para las temperaturas menores a 100 °C, y mezclándola con vapor para las temperaturas más altas hasta alcanzar la temperatura de reacción. Como se describe en el texto de Erlach (2014), el vapor que se utiliza comúnmente es el recuperado del proceso de enfriamiento y despresurización del biocarbón (ver más adelante), y la energía térmica adicional necesaria para alcanzar la temperatura de reacción se produce por medio de una fuente externa de energía, la cual puede ser una caldera alimentada con parte del biocarbón obtenido.

La recuperación eficiente del calor en los procesos de HTC juega un papel crucial en términos tanto de eficiencia energética como de factibilidad económica. Si no se recupera el calor, se requiere aproximadamente del 15% al 30% de la energía del biocarbón para precalentar la pulpa. En contraste, si se recupera totalmente el calor de la reacción y del enfriamiento de los productos, es posible precalentar la biomasa y secar el hidrocabón sin tener que añadir otra fuente de energía.

Proceso de HTC.- Una vez en el reactor, la reacción de HTC ocurre a temperaturas de 180 a 250 °C y presiones entre 10 y 50 bar, con un tiempo de residencia de hasta 10 horas. El proceso es similar a la carbonización que ocurre en la naturaleza. Primero ocurren reacciones de hidrólisis en que las macromoléculas de la biomasa se separan en los monómeros que las constituyen. Posteriormente, éstos se deshidratan: los aniones hidróxido y los cationes hidrógeno se separan de las moléculas orgánicas y se combinan para producir agua —cabe señalar que la deshidratación libera energía, lo que vuelve al HTC un proceso exotérmico—. También ocurren reacciones de descarboxilación en las que se produce CO₂. A su vez, las moléculas orgánicas deshidratadas sufren reacciones de polimerización, dando como resultado compuestos tipo hidrocarburos, es decir, la formación del hidrocabón (AVA-CO₂, 2013; Mena et al., 2016).

Dada la naturaleza de las reacciones que ocurren, el proceso de carbonización hidrotermal tendrá mayor eficiencia y mejores tasas de conversión, y producirá un hidrocabón de mejor calidad cuando se utiliza materia prima rica en aniones hidróxido, como la biomasa rica en azúcares, almidones, celulosa o hemicelulosa. Del mismo modo, el proceso no dará tan buenos resultados si la materia prima tiene un contenido bajo de dichos aniones, como la biomasa rica en lignina.

En la HTC, la densificación energética se logra al aumentar el contenido de carbono; esto ocurre al eliminar oxígeno de la materia prima mediante la generación de CO₂, agua y otros compuestos disueltos. Como se menciona en el texto de Erlach (2014), el grado de carbonización que

se alcanza depende principalmente de la temperatura de reacción, el tiempo de residencia y la relación biomasa/agua en el reactor. Mientras más alto sea el grado de carbonización, mayor será el poder calorífico del hidrocarbón. Sin embargo, se da una disyuntiva entre el poder calorífico obtenido y el rendimiento energético (la cantidad de producto obtenido), por lo que típicamente se opta por condiciones intermedias en las que se logra un aumento en el poder calorífico de 2-10 MJ/kg en comparación con la biomasa de entrada.

Enfriamiento, despresurización y deshidratación.- El proceso de carbonización hidrotermal produce una pulpa de hidrocarbón que primero es filtrada y luego deshidratada mecánicamente por medio de una prensa secante para alcanzar un contenido de humedad de ~40%.

Parte del agua resultante de este proceso puede recircularse para la preparación de la biomasa de entrada, mientras que el agua restante puede utilizarse como fertilizante líquido, ya que es rica en nutrientes. Posteriormente, el hidrocarbón se seca térmicamente para alcanzar un contenido final de humedad de ~10% (Erlach, 2014; Mena et al., 2016).

Peletización.- Como último paso del proceso, el hidrocarbón seco puede ser peletizado o comprimido para formar briquetas, de manera que pueda utilizarse eficientemente en la generación de energía o como materia prima para procesos de conversión (SoMax BioEnergy, 2017).

Control del proceso

En el texto de Erlach (2014) se explica que los parámetros determinantes del proceso son la temperatura de reacción y el tiempo de residencia, aunque la relación biomasa-agua también tiene un efecto importante en los rendimientos de las fases sólida y líquida. La presión mínima a la que debe operar el reactor está determinada por la presión de saturación a la temperatura de reacción. Sin embargo, se ha observado que mientras el sistema opere al menos a dicha presión mínima, las variaciones de presión no afectan sensiblemente a los resultados. Además, se ha encontrado que el tamaño de partícula de la materia prima no afecta a la calidad del hidrocarbón obtenido.

Productos del proceso

De acuerdo con Mena et al. (2016), del proceso de HTC se obtienen los siguientes productos:

- una fase sólida compuesta por el hidrocarbón, una fracción remanente de compuestos inorgánicos y algunos otros sólidos no carbonizados. Esta fase constituye típicamente entre el 50 y el 80% (en peso) de los productos;
- una fase líquida que consta del agua de proceso rica en nutrientes, azúcares y ácidos orgánicos, en un 5 a 40% (en peso); y
- una fase gaseosa compuesta por gases no condensables, principalmente CO₂, que comprende aproximadamente del 5 al 10% restante.

La distribución y rendimiento de estos productos estarán dados, en gran medida, por la temperatura de reacción. A continuación se describen las características de cada uno de los productos, subproductos y residuos que se obtienen del proceso, así como sus posibles aplicaciones o métodos de disposición.

- Hidrocarbón

El principal producto de la carbonización hidrotermal es el hidrocarbón. Como describe AVA-CO2 (2013), se trata de un producto estable, hidrofóbico y con excelentes características de combustión que incluyen un elevado punto de fusión de cenizas, bajas emisiones de NOx y contenido muy bajo de sustancias tóxicas y metales pesados. La combustión uniforme de este material permite que sea aprovechado en equipos sencillos y baratos, a diferencia de los equipos que se requieren para procesar biomasa cruda. El hidrocarbón es el biocombustible más parecido al carbón y tiene características muy similares a las del lignito, aunque su composición química es diferente, ya que tiene un mayor contenido de oxígeno y compuestos volátiles. Como reportan Mena et al. (2016), el poder calorífico del hidrocarbón alcanza valores promedio mayores a 23 MJ/kg gracias a que el tratamiento mediante HTC aumenta significativamente la densidad de carbono —en comparación con la biomasa inicial— alcanzando un contenido superior al 60%.

Por lo general se obtiene hidrocarbón con propiedades relativamente predecibles, independientemente de la biomasa de entrada. Erlach (2014) menciona que el contenido de cenizas es la característica más variable del producto, pues, a diferencia de las otras propiedades, no depende tanto de los parámetros de operación del proceso, sino más bien de la materia prima que se utilice y de la contaminación de esta antes de o durante su recolección.

Algunas de las características más atractivas del hidrocarbón desde el punto de vista económico son su alta densidad energética y bajo contenido de humedad, las cuales permiten que los costos de transporte y almacenamiento (por MJ de energía) sean bajos. Estos factores son críticos en proyectos que involucran traslados a grandes distancias o largos periodos de almacenamiento (AVA-CO2, 2013; Ingelia, 2019).

El hidrocarbón tiene una gran variedad de aplicaciones:

- **Uso energético.**- El hidrocarbón tiene grandes similitudes con el carbón mineral, por lo que su aplicación más lógica sería la sustitución de dicho combustible en centrales de generación de energía. La tecnología de HTC actualmente se encuentra disponible comercialmente en varios países, principalmente con el fin de utilizar el hidrocarbón en aplicaciones energéticas descentralizadas. Un ejemplo de esta aplicación son los sistemas de cogeneración para la producción combinada de calor y electricidad, que pueden ser una gran opción para el suministro a comunidades rurales u otros sistemas de generación a pequeña escala.

Sin embargo, la aplicación de más bajo costo y más atractiva en el corto plazo es la co-combustión del hidrocarbón con carbón mineral en plantas carboeléctricas ya existentes. Esta opción resulta muy conveniente, pues no requiere inversiones en nueva infraestructura, además de que dota a las plantas de flexibilidad para reaccionar ante el aumento de los precios del carbón mineral. Esta alternativa será viable siempre y cuando se elijan cuidadosamente los parámetros de producción del hidrocarbón, además de que el biocombustible esté peletizado para facilitar su transporte y almacenamiento y que pueda utilizarse junto con el carbón mineral en el equipo existente (Erlach, 2014).

Al igual que la mayoría de los combustibles producidos a partir de biomasa, el hidrocarbón tiene un balance neutro o incluso negativo de CO₂, dependiendo del sistema de aprovechamiento que se utilice. En países como los Estados Unidos, donde las plantas carboeléctricas generan un alto porcentaje de la electricidad del país, el carbón de HTC es una opción ambientalmente atractiva, pues significaría una reducción considerable en las emisiones de CO₂ y en la dependencia de combustibles fósiles. Además, utilizar hidrocarbón con fines energéticos da acceso a certificados de reducción de emisiones de CO₂, lo que ayuda a que pueda competir con los combustibles fósiles.

- Uso en el mejoramiento de suelos.- El hidrocarbón tiene un enorme campo de aplicación como mejorador de suelos, pues funge como fuente de carbono y otros nutrientes como fósforo, calcio, nitrógeno y potasio que contribuyen al crecimiento de los cultivos. Además, facilita la actividad microbiana, con lo que se reduce la necesidad de aplicar fertilizantes sintéticos. Este sustrato aumenta la porosidad del suelo, lo que se traduce en un aumento en su capacidad de retención de agua; a su vez, esto reduce significativamente la demanda de agua en las actividades agrícolas, haciéndolas más sostenibles. Más aún, por sus características físicas, el hidrocarbón contribuye a disminuir la erosión y la escorrentía (SoMax BioEnergy, 2017).

Además de que contribuye a mejorar el suelo, se ha discutido ampliamente la posible contribución del uso de hidrocarbón a la mitigación de gases de efecto invernadero: al aplicarlo al suelo, sirve no solo como fuente de carbono para las plantas, sino también como una forma estable de almacenamiento de carbono a largo plazo. Asimismo, como menciona Erlach (2014), el uso del hidrocarbón conlleva mayores rendimientos de biomasa, menor requerimiento de fertilizantes, se evita la lixiviación de nutrientes y, en general, se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero del suelo.

- Carbón activado.- SoMax BioEnergy (2017) ha encontrado que si el hidrocarbón pasa por procesos adicionales de mejoramiento, puede convertirse en carbón activado. En general, el carbón activado tiene diversas aplicaciones en muchas industrias; puede utilizarse en aplicaciones de filtrado de agua o aire, en sistemas de captura de carbono o incluso en la industria farmacéutica o alimentaria.

- Subproductos: residuos sólidos, agua de proceso y fracción gaseosa

El proceso de HTC produce tres flujos principales de residuos: el agua de proceso, una fracción sólida que incluye tanto cenizas como sólidos no carbonizados, y una pequeña fracción de gases producto de la reacción de HTC.

Como se describe en el estudio de Mena et al. (2016), la fracción gaseosa consiste, en más de un 90%, en CO₂ que se produce en las reacciones de descarboxilación de la biomasa. El 10% restante se compone de vapor de agua, SO₂ y compuestos orgánicos volátiles. Por lo general, los gases de escape son redirigidos a una caldera para su combustión y el calor que se genera se aprovecha para precalentar el agua de alimentación del reactor. En la combustión de estos gases se consumen los compuestos orgánicos combustibles, como el furano, con lo que se evita su liberación a la atmósfera.

El agua de proceso es el principal residuo de la HTC y es el que representa el mayor reto para el proceso debido a su composición; se compone tanto del agua que se forma durante la reacción como del agua que se utiliza como medio de reacción. Esta agua residual contiene una alta concentración de compuestos orgánicos y minerales, como menciona Antaco (2020). La cantidad de carbono de la materia prima que termina en la fase líquida depende de la relación agua/biomasa que se utilice, así como de si se utiliza agua nueva o se recircula parte del agua de proceso. También, mientras que algunos de los compuestos inorgánicos permanecen en el hidrocarbón, el resto se disuelve en esta agua de proceso; algunos elementos como cloro y potasio se disuelven en la fase líquida (Ingelia, 2019).

Existen varias alternativas para la disposición del agua de proceso. Idealmente se busca que en la HTC se obtenga agua con la menor cantidad de sustancias orgánicas disueltas, por lo que la opción más sencilla es recircular el agua hacia el reactor. Esto permite que los productos intermedios aumenten su tiempo de residencia, con lo que se logra una mayor tasa de conversión y se disminuye la cantidad de compuestos orgánicos en el agua. Los estudios presentados en el trabajo de Pandey et al. (2015) han encontrado que la cantidad de agua que puede recircularse está limitada tanto por el contenido de agua de la materia prima de entrada como por la relación agua/biomasa que se utilice en el proceso.

Otra alternativa es dar tratamiento al agua de proceso para poder reciclarla y utilizarla para la producción de vapor para el proceso de HTC. También es factible tratar el agua por medio de digestores (tanto aeróbicos como anaeróbicos) para obtener biogás, compuesto principalmente de metano, el cual luego puede quemarse en la caldera —junto con la fracción gaseosa producida durante la HTC y con parte del hidrocarbón— para producir el vapor necesario para el proceso.

Por último, si se le da el tratamiento adecuado para garantizar que no contenga metales pesados u otras sustancias nocivas, el agua de proceso puede ser utilizada y comercializada como fertilizante líquido, pues contiene una gran cantidad de nutrientes y es especialmente rica en potasio. También pueden recuperarse directamente el fósforo, nitrógeno y potasio presentes en el agua para utilizarlos como nutrientes en actividades agrícolas, como ocurre en los procesos descritos por SoMax BioEnergy (2017) y Mena et al. (2016). Cabe mencionar que la fase líquida contiene más del 85% del fósforo total presente en la materia prima inicial, y es fácilmente recuperable, de acuerdo con HTCycle (2020).

Ventajas de la HTC sobre otros métodos de conversión

El proceso de HTC ofrece muchas ventajas, tanto intrínsecas como en comparación con otros métodos de conversión de biomasa. Erlach (2014) y Mena et al. (2016) sostienen que quizá la característica más sobresaliente de este proceso es su capacidad de tratar de forma eficiente materias primas con alto contenido de humedad sin necesidad de un proceso de secado previo, lo que no es posible con los otros métodos de conversión. La biomasa cruda es un material higroscópico, es decir, la humedad que contiene se encuentra atrapada dentro de las paredes celulares, por lo que solo es posible eliminarla mediante evaporación. Cuando la biomasa se trata mediante los procesos hidrotermales, dicha agua se libera al romper la estructura celular, lo cual permite una extracción mecánica más eficiente. El hecho de que aproximadamente el 50% del agua pueda ser extraída mecánicamente (y por lo tanto, en forma líquida) resulta muy conveniente, ya que requiere considerablemente menos energía que el secado térmico. Asimismo, esto permite obtener más energía útil de la combustión del

biocarbón, por ejemplo, puesto que se ahorra energía que se utilizaría para evaporar la humedad si se quemara directamente la biomasa sin procesar.

En comparación con el proceso convencional de carbonización por medio de pirólisis, la carbonización hidrotermal requiere un menor gasto energético y produce un mayor rendimiento en menos tiempo, de acuerdo con lo reportado en el trabajo realizado por Tekin et al. (2014). Si bien es cierto que el uso de hidrocarbón como combustible puede requerir un paso de secado para eliminar la humedad remanente, ese secado sería mucho menos costoso, en términos energéticos, que el secado de la biomasa inicial.

A diferencia de la biomasa, el hidrocarbón constituye un almacén de carbono químicamente estable, por lo que es una alternativa atractiva en el largo plazo. La HTC no solo aumenta la capacidad de extracción de humedad del hidrocarbón, sino que también incrementa su hidrofobicidad, es decir, reduce significativamente la propensión a que reabsorba humedad, lo cual disminuye el riesgo de descomposición biológica, a diferencia de la biomasa no tratada. Esta cualidad resulta benéfica para el transporte y almacenamiento del biocombustible, ya que mantendrá su calidad y sus propiedades en una mayor medida (Klinghoffer y Castaldi, 2013).

Si se utiliza como fuente de energía en procesos de combustión, el hidrocarbón ofrece varias ventajas en comparación con la biomasa: la eficiencia es mucho más alta, pues además de que su contenido de humedad es mucho menor, tiene un mejor comportamiento de combustión; además, tiene una alta temperatura de fusión de cenizas, por lo que representa menos dificultades para los equipos.

En resumen, y conforme al proceso descrito por AVA-CO₂ (2013), la HTC tiene las siguientes características favorables:

- Tiene el mejor balance energético de todas las tecnologías de conversión de biomasa disponibles actualmente
- Puede procesar materias primas con alto contenido de humedad, por lo que es un proceso idóneo para el tratamiento de biomasa y residuos orgánicos húmedos de distintas industrias.
- Es un sistema muy flexible, capaz de procesar una amplia gama de tipos de biomasa. El rendimiento y la calidad del producto son relativamente independientes de la composición de la materia prima, por lo que no se requiere un proceso riguroso de selección o acondicionamiento previo de la misma
- Las plantas de HTC son flexibles en cuanto a capacidad de procesamiento, ya que son fácilmente escalables de forma modular
- Los proyectos de carbonización hidrotermal son económicamente atractivos, ya que son rentables y tienen excelentes tasas de retorno
- El hidrocarbón que se produce tiene una alta densidad energética y es hidrofóbico y estéril, por lo que es fácil de transportar y almacenar, además de que puede utilizarse en plantas carboeléctricas ya existentes. Este biocombustible constituye una alternativa para sustituir el carbón mineral que se usa para producción de energía y así evitar las emisiones de CO₂ asociadas.
- Dado que el proceso es apto para el tratamiento de biomasa residual y otros tipos de residuos, la materia prima de alimentación para la HTC no compite con recursos agrícolas para la producción de alimentos, a diferencia de los cultivos energéticos

- Como método de disposición de residuos, este proceso no afecta el uso del suelo, a diferencia de otros métodos como el compostaje o los rellenos sanitarios

Desventajas y dificultades de la HTC

Consideraciones prácticas.- Dado que esta tecnología aún no se ha utilizado de forma industrial a gran escala, los equipos necesarios son difíciles de conseguir y, por lo tanto, más costosos que otras alternativas para la conversión de biomasa. Dicha falta de disponibilidad en el mercado también puede dificultar el mantenimiento y la reparación de los equipos.

Operación.- Un punto central en el diseño de una planta de carbonización hidrotermal es la decisión de tener un proceso continuo o por lotes. Una desventaja importante de la operación continua es que la biomasa debe ser suministrada al reactor a altas presiones, por lo que se requieren sistemas especiales de alimentación, como los alimentadores de tornillo. También existen bombas de pistón especializadas para este tipo de aplicaciones. Sin embargo, para poder utilizar esas bombas la biomasa debe diluirse con agua para obtener una pulpa que pueda ser bombeada; esto reduce la eficiencia energética del proceso, ya que es necesario precalentar el agua adicional a la temperatura de reacción (Erlach, 2014).

Impactos sobre el ambiente.- Un inconveniente de la HTC en comparación con el compostaje es que los minerales que permanecen en el hidrocarbón probablemente no podrán ser recuperados y reciclados nuevamente a la naturaleza, por lo que puede ser necesario reemplazar estos nutrientes por fertilizantes minerales. Por otra parte, es indispensable que las plantas de HTC tengan sistemas adecuados de tratamiento, aprovechamiento o disposición de los residuos, especialmente del agua de proceso; de no ser así, pueden causar impactos ambientales negativos debido a las sustancias y compuestos que contiene en solución.

4. Proyecto 1. Arribazón de sargazo en playas del Caribe Mexicano

4.1 Antecedentes

El sargazo es una macroalga marina que generalmente flota en una región del Atlántico norte conocida como el Mar del Sargazo —la mayor conglomeración de algas marinas en el mundo—. Estas algas inician su ciclo de vida entre marzo y junio en el Golfo de México, se acumulan en el Mar del Sargazo durante el verano y mueren en el invierno para volver a surgir el año siguiente (Baker, 2018). Los cúmulos de sargazo son un hábitat esencial para la vida marina, ya que proveen alimento y sirven como sitios de reproducción para muchas especies; asimismo, juegan un papel de gran importancia en la captura de carbono, ya que las algas presentes en el Mar del Sargazo representan alrededor del 7% del sumidero global de CO₂ (Milledge y Harvey, 2016).

Sin embargo, desde 2011 se han observado patrones anómalos de circulación durante la primavera; esto ocasionó que sargazo proveniente de las costas brasileñas circulara hacia el norte a través de un área en el Océano Atlántico conocida como la Región Nor-Ecuatoriana de Circulación (NERR, por sus siglas en inglés), evitando que las algas llegaran al Mar del Sargazo. Este fenómeno causó que grandes cantidades de algas llegaran al Caribe y a la costa Oeste de África, generando acumulaciones masivas en las playas. Las algas se descomponen paulatinamente y producen un olor fétido, lo que ha tenido un gran impacto en el turismo, la industria pesquera y la ecología local, según afirma Baker (2018). Las regiones afectadas incluyen a los países del Caribe, la península de Yucatán en México, el norte de Brasil, el sureste de Estados Unidos y la costa occidental de África, desde Marruecos hasta el Golfo de Guinea (Figura 1).



Figura 1. Mar del Sargazo y su perfil de movimiento desde la cuenca del Amazonas hacia el Caribe y las costas africanas a través de la Región Nor-Ecuatoriana de Circulación (Ryan Schuessler, 2018)

Las arribazones masivas de sargazo han seguido ocurriendo desde 2011, con particular intensidad en 2014, 2015, 2017 y 2018. La Figura 2 muestra la evolución del problema desde 2011. En 2015 se reportó que cada día llegaban alrededor de 10,000 toneladas (peso húmedo) de sargazo a las playas del Caribe. La problemática ha sido catalogada como una crisis internacional y parece seguir empeorando cada año. La cantidad de Sargazo removido en 2018 fue mayor que en cualquiera de los años anteriores (Fogarty, 2018); en ese año, incluso, el gobierno de Barbados declaró estado de emergencia nacional debido a las grandes cantidades de sargazo acumulado en sus playas (Riviera Maya News, 2018). Los gobiernos de los distintos países afectados por el sargazo han reconocido que podría tratarse de un problema a largo plazo.

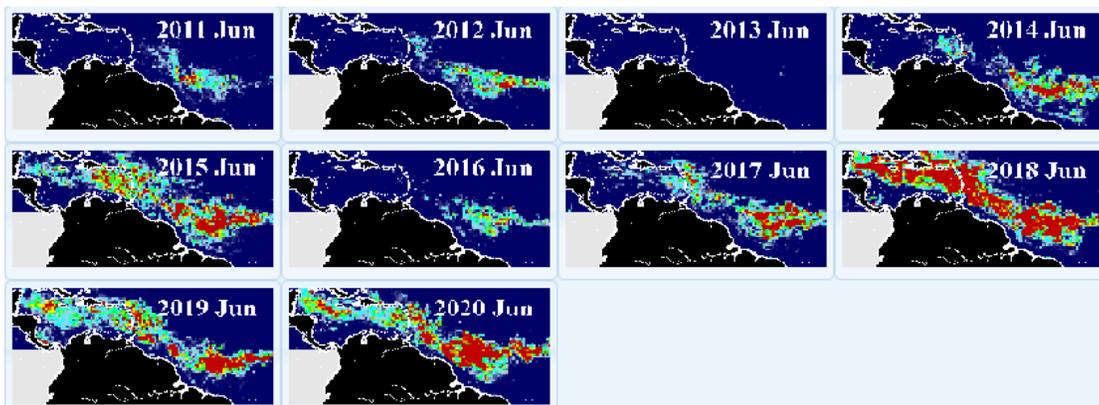


Figura 2. Evolución de la distribución de la marea de Sargazo en el Caribe (Optical Oceanography Laboratory, 2020)

Aún no está clara la causa de la llegada repentina de esta alga; observaciones sistemáticas sugieren que el problema puede haber sido causado por cambios en las condiciones climatológicas y meteorológicas como el incremento en la temperatura del agua, la eutroficación del mar costero y la variación en los patrones de circulación de los vientos y corrientes, condiciones que podrían ser causadas por el cambio climático global (Vázquez y Mora, 2019). Debido a que el origen de este fenómeno no está claro, es difícil predecir su incidencia y duración futuras. Numerosas instituciones oceanográficas están desarrollando modelos predictivos y sistemas de monitoreo basados en imágenes satelitales para prever y conocer con más precisión el desarrollo del problema a lo largo del año.

La remoción de las algas en descomposición de las costas es costosa, requiere mucho tiempo y puede incluso ser dañina para las playas. Fogarty (2018) explica que también implica un arduo trabajo, ya que la cantidad de algas es demasiado grande para ser colectadas manualmente; además, los cúmulos de algas bloquean los pastos marinos y los arrecifes de coral, obstaculizando la remoción con botes. Desde 2011 se han mejorado las técnicas de remoción, así como los lineamientos para el manejo de las algas. No obstante, dado que la cantidad de algas que llegan a las costas parece estar aumentando, las medidas que se han tomado hasta ahora resultan insuficientes para afrontar el problema. Además, la solución que se está dando actualmente consiste únicamente en trasladar el problema de un lugar a otro: las algas son recogidas de las playas y zonas turísticas, luego son trasladadas a lugares poco concurridos y frecuentemente son quemadas o simplemente enterradas.

Un punto clave para enfrentar este grave problema es la investigación sobre los usos potenciales del sargazo. Existen muchas alternativas para utilizar las algas, y entre las más atractivas se encuentran

las tecnologías de conversión hidrotermal. De acuerdo con lo descrito en el texto de Tekin et al. (2014), algunos estudios sobre el análisis del ciclo de vida del procesamiento hidrotermal de biomasa algal han demostrado que el proceso es una opción viable y económicamente accesible, siempre y cuando la fase acuosa y los subproductos se aprovechen de manera efectiva, tanto para la producción de electricidad y calor de proceso como en la recuperación de nutrientes (Frank, Elgowainy, Han y Wang, 2013), (Orfield et al., 2014). Sin embargo, los procesos hidrotermales son tecnologías relativamente nuevas, por lo que toma tiempo desarrollar e implementar las propuestas y, mientras tanto, las algas continúan llegando a las playas.

4.2 Definición del problema o contexto de la participación profesional

En México, las arribazones de sargazo han afectado las costas de Yucatán y Quintana Roo, incluyendo las playas de Holbox, Cancún, Isla Mujeres, Playa del Carmen, Cozumel, Akumal, Tulum y Mahahual, todas ellas importantes destinos turísticos que reciben visitantes de todo el mundo. Debido a las grandes cantidades de algas en esa región, el turismo en el verano de 2018 en las playas del Caribe mexicano disminuyó en un 50% en comparación con el mismo periodo en 2017 (El diario MX, 2019).

En 2019, el gobierno mexicano conformó un grupo de trabajo interinstitucional que habría de proponer e implementar medidas para afrontar el problema en el corto y largo plazo. El grupo de trabajo está conformado por representantes de la Comisión Federal de Electricidad, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, la Secretaría de Energía, la Universidad Nacional Autónoma de México, el Instituto Politécnico Nacional y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, bajo la coordinación de la SEMARNAT. El grupo de trabajo busca identificar diferentes tipos de alternativas para la resolución del problema, incluyendo la remoción, destrucción y aprovechamiento del material. Aunque el objetivo principal de estos esfuerzos y acciones es la eliminación del problema del sargazo, su aprovechamiento conllevaría beneficios económicos significativos, ya que la remoción y el uso efectivo de las algas ayudarían a restablecer el turismo y las actividades pesqueras, al mismo tiempo que se obtendría un producto útil del proceso.

La UNAM participa en el equipo de aprovechamiento energético del grupo de trabajo a través del Instituto de Ingeniería y en asociación con G2E. La propuesta que ha presentado el II-G2E está enfocada en el aprovechamiento energético del sargazo mediante carbonización hidrotermal.

El trabajo que yo realicé en G2E, en colaboración con el Instituto de Ingeniería, constó de dos partes complementarias:

- desarrollo de un sistema de evaluación para ponderar de forma cuantitativa los diferentes procesos, sistemas y tecnologías que se propongan en el seno del grupo de trabajo interinstitucional para el aprovechamiento energético del sargazo en México, y
- desarrollo de una propuesta específica para el aprovechamiento del sargazo mediante carbonización hidrotermal.

4.3 Metodología utilizada

4.3.1 Caracterización fisicoquímica

Se realizó una investigación bibliográfica sobre las propiedades fisicoquímicas del sargazo. También se obtuvieron datos experimentales de humedad y de poder calorífico inferior de sargazo recolectado en playas de Quintana Roo por medio de pruebas en una balanza termogravimétrica y una bomba calorimétrica, respectivamente.

4.3.2 Sistema de evaluación de propuestas

Las entidades gubernamentales y académicas comisionadas para abordar la problemática del sargazo han recibido por parte de la comunidad científica un gran número de propuestas tecnológicas para disponer de las algas. Las propuestas recibidas son muy distintas entre sí: implican el uso de diferentes tipos de tecnologías, tienen objetivos y alcances distintos, y los sistemas han sido planteados para escalas de procesamiento diferentes. Por lo tanto, resulta complicado hacer una evaluación comparativa objetiva de las alternativas disponibles, por lo que G2E y el Instituto de Ingeniería propusieron desarrollar un sistema para evaluar cuantitativamente las diferentes propuestas considerando los aspectos más importantes.

En primer término, se identificaron las principales características a evaluar de los diferentes proyectos. En segundo lugar, con base en información bibliográfica, se definió un sistema de puntuación para calificar esas características en cada uno de los proyectos. En tercer lugar, se formuló un esquema para agrupar y ponderar las características de los proyectos, tomando en cuenta el criterio de los integrantes del grupo de trabajo designado para atender la problemática de arribazón masiva de sargazo; para esto se utilizó el proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés). Como resultado, se obtuvo una matriz con la cual pueden evaluarse de forma cuantitativa e independiente los diferentes procesos, sistemas y tecnologías propuestos para abordar el problema, comparar objetivamente las características de todas las propuestas e identificar la opción que resulte más conveniente en todos los aspectos.

4.3.2.1 Desarrollo del sistema de evaluación

Para desarrollar el sistema de evaluación, primero se identificaron las características clave a evaluar de los diferentes proyectos propuestos en relación al problema por atender. Luego, las características identificadas se agruparon en distintos bloques funcionales:

- características del proceso,
- características del producto obtenido,
- posibilidades de aprovechamiento del producto,
- recursos humanos necesarios,
- aspectos económicos, y
- tiempo necesario para implementar la propuesta.

Como punto de partida, cada propuesta o proyecto se evalúa calificando cada una de sus características en una escala ordinal (de 1 a 3) en función de qué tan conveniente o no sea ésta. Los intervalos de variación de cada característica y los niveles correspondientes en la escala de calificación (1 a 3) se definieron con base en una revisión exhaustiva de la bibliografía relevante. Se consultaron principalmente reportes de estudios sobre biocombustibles basados en algas y proyectos de

producción de energía a partir de biomasa, ya que actualmente no existe información específica para sargazo. A continuación, se describen las características que se identificaron como clave para la evaluación de los proyectos, la forma de calcularlas y los niveles considerados para calificar cada una de ellas. En todos los casos se considera sargazo húmedo como materia prima inicial, por lo que las características y parámetros cuyas unidades se expresan por tonelada de sargazo hacen referencia a una tonelada de sargazo con 50% de humedad.

4.3.2.1.1 Características del proceso

□ Rendimiento energético

Se refiere a la cantidad de energía obtenida en el producto final por tonelada de sargazo procesada. Esta variable se utiliza en vez de la eficiencia energética de los procesos, ya que el objetivo de las propuestas es gestionar el problema del sargazo más que obtener un proceso altamente eficiente en términos energéticos. Sin embargo, el rendimiento energético permite comparar las diferentes alternativas en términos de la cantidad de energía que es posible obtener con la misma cantidad de materia prima de entrada. El rendimiento energético se calcula como:

$$Y \left[\frac{MJ_{producto}}{t_{sargazo}} \right] = PCI_{producto} * \frac{m_{producto}}{t_{sargazo}}$$

donde Y es el rendimiento energético, es decir, la cantidad de energía que se obtiene en el producto por unidad de masa de sargazo procesado, en MJ por tonelada de sargazo; PCI es el poder calorífico inferior del producto obtenido, en MJ por tonelada de producto; y $m_{producto}/t_{sargazo}$ se refiere al rendimiento másico del proceso, es decir, la cantidad de producto que se obtiene a partir de una tonelada de sargazo, expresado en kg por tonelada.

Se definieron los siguientes niveles de rendimiento energético, dependiendo del estado físico del producto obtenido:

Tabla 1. Puntuación de acuerdo con el poder calorífico del producto (valores en $MJ_{producto}/t_{sargazo}$)

Sólido	Líquido	Gaseoso	Valor
<5,000	<7,000	<4,000	1
5,000-8,000	7,000-10,000	4,000-7,000	2
>8,000	>10,000	>7,000	3

□ Madurez de la tecnología

Se refiere al nivel actual de desarrollo de la tecnología propuesta (TRL, por sus siglas en inglés, *Technology Readiness Level*). La escala de TRL que se presenta en la Tabla 2 fue presentada por Brian Dunbar (2012), y considera nueve niveles de madurez tecnológica:

Tabla 2. Niveles de madurez tecnológica

Nivel de TRL	Definición	Descripción del concepto
1	Observación y reporte de principios básicos	Corresponde al nivel más bajo de maduración tecnológica. Se realiza investigación científica básica y comienza la transición a investigación aplicada.
2	Formulación del concepto de la tecnología y de su aplicación	Se plantean aplicaciones especulativas; no hay pruebas o análisis detallados que confirmen aún su factibilidad.
3	Prueba de concepto característica y definición crítica de la función analítica y experimental	Actividades de investigación y desarrollo mediante estudios y análisis a escala de laboratorio para validar las predicciones de los diferentes elementos de la tecnología. Etapa de modelado y simulación.
4	Validación de componentes y sistemas en condiciones de laboratorio	Componentes básicos integrados para evaluar la factibilidad de su funcionamiento en conjunto. Transición de investigación científica a ingeniería.
5	Validación de componentes y sistemas integrados en un ambiente relevante	Componentes integrados en una configuración similar a su aplicación final. Pruebas a escala de laboratorio y en un sistema operativo condicionado.
6	Demostración del prototipo en un ambiente en condiciones relevantes (similares a las condiciones de operación reales)	Prototipo piloto sometido a pruebas en condiciones de escalamiento.
7	Prototipo completo demostrado en condiciones reales	Prototipo final con sistema operativo funcional.
8	Sistema final completo y evaluado a través de pruebas y demostraciones	La tecnología ha sido probada en su forma final y bajo condiciones reales. Final del desarrollo del sistema.
9	Operación de sistemas	La tecnología está completamente desarrollada y disponible para su operación a escala industrial.

Esta característica es crucial para identificar aquellas alternativas que son tecnológicamente viables desde los puntos de vista comercial e industrial con factibilidad inmediata de implementación a gran escala y con la capacidad de procesar la totalidad de las algas. Por esta razón, esta característica se consideró como no negociable. Es decir, una tecnología propuesta que no tenga una madurez TRL de al menos 7, se vuelve automáticamente inelegible o inviable, independientemente de los resultados que obtenga en los otros criterios de evaluación. Esta restricción se introdujo en la escala de puntuación de la siguiente manera:

Tabla 3. puntuación de acuerdo con el nivel de TRL de la tecnología

Nivel de TRL	Valor
7	1
8	2
9	3

□ **Disponibilidad en el mercado**

Se refiere al número de proveedores disponibles a nivel nacional o internacional para la adquisición del equipo, partes y materiales necesarios para la construcción e implementación del sistema. Esta característica dicta qué tantas posibilidades existen de comparar alternativas en cuanto a capacidades, precios, condiciones de operación, facilidad de mantenimiento preventivo y correctivo del equipo, etc. Se consideraron los siguientes niveles:

Tabla 4. Puntuación de acuerdo con el número de proveedores de equipo

Número de proveedores	Valor
1-5	1
6-10	2
>10	3

□ **Capacidad de procesamiento**

Cantidad de sargazo que una unidad/equipo puede procesar por hora. Esta característica permite estimar cuántas unidades se requerirían para procesar el volumen total de algas disponible, así como evaluar la factibilidad de escalamiento.

Tabla 5. Puntuación de acuerdo con la capacidad de procesamiento del equipo

Capacidad [t_{sargazo}/h]	Valor
<0.1	1
0.1-0.5	2
>0.5	3

□ **Superficie**

Es el área que requeriría la instalación por cada tonelada de sargazo procesada por hora. Esta característica permite evaluar qué superficie será necesaria para instalar un sistema con capacidad para procesar el volumen total de sargazo disponible. Se calcula como:

$$\text{Superficie} \left[\frac{m^2}{t_{\text{sargazo}}/h} \right] = \frac{\text{superficie que ocupa una unidad}}{\text{capacidad de procesamiento de una unidad}}$$

Se propuso la siguiente escala:

Tabla 6. Puntuación de acuerdo con la superficie que ocupa el equipo

Superficie [$m^2/t_{\text{sargazo}}/h$]	Valor
>5000	1
1000-5000	2
<1000	3

Aspectos económicos

□ Inversión inicial (Capex)

Se refiere al monto (en millones de dólares) de la inversión inicial para la instalación y puesta en marcha del proceso por cada tonelada de sargazo procesado por hora. Dependiendo de la tecnología en cuestión (complejidad, nivel de desarrollo, comercialización, etc.), esta característica es clave para saber si se trata de una opción económicamente factible, tomando en cuenta el presupuesto disponible destinado al aprovechamiento del sargazo. Se calcula como:

$$Capex \left[\frac{MUSD}{t_{sargazo/h}} \right] = \frac{\text{costo de una unidad}}{\text{capacidad de procesamiento de una unidad}}$$

La escala considerada es la siguiente:

Tabla 7. Puntuación de acuerdo con la inversión inicial

Capex inicial [MUSD/ t _{sargazo/h}]	Valor
>7	1
2-7	2
<2	3

□ Costos de operación y mantenimiento (Opex)

Son los costos fijos asociados a la operación y mantenimiento del equipo a lo largo de su vida útil. Dentro de estos costos se incluyen los de consumibles, recursos humanos, utilidades, costo de disposición de residuos y cenizas, entre otros.

Tabla 8. Puntuación de acuerdo con los costos de operación

Opex [% anual del Capex]	Valor
>5	1
2.5-5	2
<2.5	3

□ Valor de comercialización del producto

Se refiere al precio al que se vendería cada unidad de energía del producto. Esta es una característica crucial, ya que, en términos generales, el precio de comercialización del biocombustible debe ser mayor que el de su producción para que el sistema sea económicamente viable. Al mismo tiempo, el precio de venta debe ser razonable para competir en el mercado con los combustibles convencionales. De esta manera, los intervalos de puntuación (Tabla 9) se seleccionaron tomando en cuenta el precio de algunos combustibles comunes como gasolina (0.027 USD/MJ), gas natural (0.0027 USD/MJ), diésel (0.0254 USD/MJ) y carbón mineral (0.00263 USD/MJ).

Tabla 9. Puntuación de acuerdo con el valor de comercialización del producto

Precio [USD/MJ]	Valor
<0.002	1
0.002-0.01	2
>0.01	3

□ **Volumen potencial de mercado**

Cantidad de producto (medido en unidades energéticas) que se podría vender tomando en cuenta el mercado potencial. Esta característica es clave, ya que, independientemente de que el producto tenga un alto valor de comercialización, la implementación del sistema solo será rentable y conveniente si existe un mercado suficientemente grande para absorber la producción total.

Dado que aún no se tiene información sobre el posible volumen de producción —que dependerá de la cantidad de sargazo disponible, así como de la capacidad de procesamiento y del rendimiento energético de la tecnología en cuestión—, los umbrales para este indicador (Tabla 10) se seleccionaron arbitrariamente y de forma tentativa tomando en cuenta estos aspectos.

Tabla 10. Puntuación de acuerdo con el volumen potencial de venta

Volumen potencial de venta [GJ/año]	Valor
<160,000	1
160,000-16 M	2
>16 M	3

□ **Flexibilidad**

Esta característica se refiere a la capacidad del proceso en cuestión para operar con materias primas diferentes del sargazo. Es un aspecto importante a considerar dada la estacionalidad de las arribazones, lo que implica un suministro continuo de sargazo únicamente durante cuatro a cinco meses del año. Un sistema que sea inoperable durante más de la mitad del año puede resultar inviable, por lo que es deseable que admita cierta variabilidad en la materia prima, ya sea para que el sistema funcione con ambas materias primas o para que funcione con algún otro tipo de biomasa durante el tiempo en que no hay arribazones de sargazo. Dado el carácter cualitativo de esta característica, se tomó en cuenta la siguiente escala para evaluarla:

Tabla 11. Puntuación de acuerdo con la flexibilidad del sistema

Capacidad del sistema de admitir otras materias primas	Valor
No	1
Sí, con acondicionamiento necesario	2
Sí, sin acondicionamiento necesario	3

Recursos humanos (impacto social)

□ Personal necesario

Es el número de personas necesarias para operar el sistema por cada tonelada de sargazo que se procesa por hora. Se calcula como:

$$\text{Personal necesario} \left[\frac{\text{No. personas}}{t_{\text{sargazo/h}}} \right] = \frac{\text{No. de personal necesario por unidad}}{\text{capacidad de procesamiento de una unidad}}$$

La escala considerada es la siguiente:

Tabla 12. Puntuación de acuerdo con el personal necesario

Personal [No. personas/ $t_{\text{sargazo/h}}$]	Valor
>5	1
3-5	2
1-2	3

□ Especialización del personal

Es el nivel de capacitación/formación profesional promedio que requiere tener el personal para poder operar el sistema. Esta característica, junto con la cantidad de personal necesario, permite evaluar la generación potencial de empleos. Actualmente el problema del sargazo genera una gran cantidad de empleos temporales para personal no calificado para la recolección y remoción manual de las algas de las playas. La implementación de un sistema de aprovechamiento implica la recolección del sargazo en alta mar por medio de maquinaria, por lo que cesarían las actividades de remoción en las costas. Además, la operación de equipos de transformación de biomasa requeriría de personal técnico calificado. Por esta razón es necesario evaluar el impacto social de las propuestas tecnológicas.

Dado que difícilmente será necesario que todo el personal requerido para la operación de un sistema tenga el mismo nivel de capacitación, un punto de referencia adecuado parece ser considerar el nivel promedio (¿mínimo?) de especialización necesario. De esta manera, se propuso evaluar esta característica dando una mayor puntuación a aquellos sistemas que requieren menor nivel de especialización, ya que esto supondría una recuperación de los empleos generados actualmente, orientados al mismo sector de la población:

Tabla 13. Puntuación de acuerdo con el nivel de capacitación del personal

Nivel de capacitación	Valor
Profesionista	1
Técnico	2
Personal no especializado	3

Características del producto

□ Poder calorífico inferior

Esta característica evalúa directamente la densidad energética del producto obtenido. Se utiliza el poder calorífico inferior, ya que es el valor de interés para los procesos de producción de energía en

los que el agua producto de la combustión consume parte de la energía disponible y se evapora. Se propuso la siguiente escala, tomando en cuenta el valor reportado en la literatura para el poder calorífico inferior de diferentes tipos de biocombustibles:

Tabla 14. Puntuación de acuerdo con el poder calorífico del producto

PCI [MJ/ton _{producto}]	Valor
<10,000	1
10,000 –20,000	2
>20,000	3

□ Residuos

Esta característica se refiere al porcentaje de masa de los subproductos obtenidos (considerando que el producto principal es el biocombustible), así como su dificultad de disposición. Es una característica clave para evaluar el impacto ambiental del proceso, ya que es deseable que la alternativa de aprovechamiento del sargazo resuelva dicho problema sin generar otro tipo de residuos con impacto similar o incluso mayor. Sin embargo, no todos los subproductos son necesariamente residuos, ya que algunos de ellos pueden servir como materia prima para procesos posteriores. Por ejemplo, el agua de proceso de algunos sistemas puede tratarse y utilizarse como fertilizante, gasificarse para obtener biogás combustible, utilizarse para la recuperación y síntesis de sustancias químicas útiles, etc. Para evaluar los residuos se propuso una escala que considera de forma combinada el porcentaje de masa de residuos generados por cada tonelada de sargazo procesada (ya sean sólidos, líquidos o gaseosos), así como su facilidad de disposición o manejo:

Tabla 15. Puntuación de acuerdo con los residuos generados

% masa ($t_{residuos}/t_{sargazo}$)	Fácil ¹	Medio ²	Difícil ³
Sólidos			
<10%	3	2	2
10-15%	3	2	1
>15%	3	1	1
Líquidos			
<40%	3	2	2
40-60%	3	2	1
>60%	3	1	1
Gaseosos			
<4%	3	2	2
4-8%	3	2	1
>8%	3	1	1

1. Residuos no nocivos o fácilmente utilizables en procesos posteriores
2. Residuos con algunos compuestos nocivos; posible utilización tras tratamiento de cierta complejidad
3. Residuos nocivos/altamente contaminantes; aprovechamiento posterior difícil/costoso

Una vez que se indica el porcentaje de masa de cada tipo de residuo, así como su respectiva facilidad de disposición para el proceso en cuestión, se suman los valores obtenidos y se utiliza la siguiente escala para obtener un valor único final:

Tabla 16. Puntuación de acuerdo con los valores obtenidos para los diferentes tipos de residuos

Suma de valores	Valor
<5	1
5-7	2
>7	3

Aprovechamiento del producto

□ Tipo de mercado potencial

Esta característica se refiere a si el producto tendrá un posible mercado predominantemente de nivel local (en las inmediaciones del lugar de producción), nacional o internacional, aunque es probable que en muchos casos se tenga un mercado mixto. Con la escala considerada, se da más valor a los procesos cuyo posible mercado sea local o nacional, ya que requeriría un menor esfuerzo (y costo) de transporte y comercialización, y su aprovechamiento aportaría un beneficio para el país:

Tabla 17. Puntuación de acuerdo con el tipo de mercado potencial

Mercado	Valor
Internacional	1
Nacional	2
Local	3

□ Facilidad de aprovechamiento

Esta característica evalúa la inversión y adaptaciones que serían necesarias para que los sistemas existentes puedan utilizar el producto. Esto dependerá del tipo de producto obtenido, así como de su calidad y sus características fisicoquímicas relevantes para la combustión (densidad, temperatura de fusión de cenizas y emisiones, entre otros). Serán preferibles los productos que puedan utilizarse más fácilmente en sistemas existentes por medio de co-combustión, adaptaciones menores, etc.

Tabla 18. Puntuación de acuerdo con la facilidad de aprovechamiento del producto

Facilidad de aprovechamiento	Valor
Es necesario hacer muchas adaptaciones para su uso, o bien es necesario construir un sistema completamente nuevo	1
Haciendo algunas adaptaciones, puede utilizarse en sistemas existentes	2
Puede utilizarse con facilidad en sistemas existentes	3

□ Facilidad de almacenamiento

Hace referencia al espacio y condiciones necesarias para almacenar y transportar el producto. Es una característica de gran importancia para la comercialización del producto obtenido, ya que este puede no resultar viable si requiere condiciones críticas para su almacenamiento o su traslado al punto de consumo. Dado que hay muchos factores y características de los productos que pueden utilizarse para evaluar este aspecto, por facilidad se tomará en cuenta solamente el tipo de producto que se obtiene (sólido, líquido o gas). Por lo general, un producto sólido es más sencillo de almacenar y transportar,

mientras que uno líquido o gaseoso requerirá condiciones más complejas (tanques de almacenamiento, mayor espacio, ciertos niveles de presión y temperatura, etc.).

Tabla 19. Puntuación de acuerdo con el tipo de producto obtenido

Tipo de producto	Valor
Gas	1
Líquido	2
Sólido	3

Tiempo de implementación

La única característica de este bloque es el tiempo necesario para poner en marcha una planta piloto de 500 kW, tomando en cuenta el tiempo de diseño e implementación del sistema. Esta característica tiene un gran impacto en la elección de la alternativa a implementar, ya que no se busca desarrollar una solución perfecta en todos los sentidos (eficiencia energética, costo, impacto ambiental, etc.), sino una opción adecuada que pueda resolver de la forma más inmediata posible el problema del sargazo. Una implementación rápida es importante, dado que las arribazones tienen periodicidad anual y que cada año parecen empeorar, aunado a su impacto tanto económico como ambiental y sus repercusiones a gran escala.

Tabla 20. Puntuación de acuerdo con el tipo de implementación del sistema

Tiempo para puesta en marcha [meses]	Valor
>12	1
8-12	2
<8	3

Ponderación de características y bloques funcionales

El objetivo de desarrollar el sistema de evaluación fue contar con una herramienta para seleccionar objetivamente la mejor alternativa considerando sus principales características. Aunque todas las características seleccionadas para la evaluación son importantes, algunas son verdaderamente críticas, en tanto que otras son importantes pero no determinantes, por lo que deben ponderarse de manera diferenciada. Además, como se describe en la sección anterior, algunas características están claramente relacionadas entre sí y reflejan diferentes partes de un mismo componente, por lo que deben agruparse apropiadamente. Del mismo modo, algunos grupos de características (bloques funcionales) pueden ser más cruciales que otros, por lo que también deben ponderarse de manera diferenciada. Por esta razón, la ponderación de las características debe tomar en cuenta las relaciones y la estructura jerárquica de las características.

Para ponderar las diferentes características reconociendo su estructura jerárquica se propone utilizar el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés *Analytic Hierarchic Process*). Este es un método en el que las entidades participantes en la evaluación de propuestas asignan un peso (factor de ponderación) a cada una de las características y a cada grupo o bloque de características incluidas en el esquema de evaluación de propuestas. Dado que las diferentes entidades asignan los factores

de ponderación con base en su criterio y que este se ve influido por sus percepciones, antecedentes y otras características particulares, es necesario un mecanismo que permita racionalizar el proceso, reducir las discrepancias naturales entre los participantes y obtener factores de ponderación consensuados.

El AHP es una herramienta efectiva para la gestión de decisiones complejas que implican establecer prioridades entre muchas variables. Esto se logra al reducir dichas decisiones complejas a una serie de comparaciones pareadas —el evaluador solamente compara dos características entre sí a la vez— para luego sintetizar los resultados. Este método permite tomar decisiones teniendo en cuenta aspectos cualitativos que pueden ser difíciles de valorar.

El AHP considera una serie de criterios de evaluación (en este caso, características de las propuestas) y asigna un peso a cada uno de ellos de acuerdo con las comparaciones pareadas que realiza el evaluador: mientras más alto el peso, el criterio en cuestión tendrá más relevancia en la evaluación. Así, el AHP logra traducir las evaluaciones (tanto cuantitativas como cualitativas) a una jerarquización de criterios múltiples.

El proceso se lleva a cabo de la siguiente forma: se crea una matriz de comparación pareada de $m \times m$, donde m es el número de criterios de evaluación (características) considerados. Cada elemento de la matriz representa la importancia relativa del criterio A con respecto al criterio B . La importancia relativa se expresa mediante una escala numérica del 1 al 9, a la que se asigna una descripción verbal para facilitar su asignación, como se muestra en la Tabla 21:

Tabla 21. Escala numérica para la evaluación mediante AHP

Intensidad numérica	Definición
1	A y B tienen igual importancia
3	A es moderadamente más importante que B
5	A es significativamente más importante que B
7	A es mucho más importante que B
9	A es absolutamente más importante que B

Para ilustrar esquemáticamente el AHP, consideremos un ejemplo hipotético simple en el que se consideran tres características (c_1 , c_2 y c_3). Al hacer las comparaciones pareadas de las características, los evaluadores consideran que:

- c_1 es moderadamente más importante que c_2 ,
- c_2 es moderadamente más importante que c_3 y
- c_1 es absolutamente más importante que c_3 .

Estas comparaciones se resumen en la matriz de dimensiones 3×3 :

	c1	c2	c3
c1		3	9
c2			3
c3			

La matriz muestra que la característica c3 es la menos importante de todas y, por tanto, se le puede asignar un peso inicial $x_3 = 1$. Luego, la característica c2 es tres veces más importante que c3, así que podría asignársele un peso inicial $x_2 = 3$. Finalmente, la característica c1 es tres veces más importante que c2 y nueve veces más importante que c3, así que su peso inicial podría ser $x_1 = 9$. Como los pesos de las tres características deben sumar 1 (o 100%), se deben normalizar los pesos iniciales simplemente expresando cada uno de ellos como una fracción del total:

$$w_i = \frac{x_i}{\sum x_i}$$

donde w_i es el peso normalizado de la característica i , y x_i es el peso inicial de la característica i .

Tras hallar estos valores se obtiene el vector de factores de ponderación:

$$W = [0.692, 0.231, 0.077]$$

Para el caso general, la solución se obtiene construyendo una matriz cuadrada con 1's en la diagonal principal y los recíprocos de las comparaciones en la triangular inferior:

	c1	c2	c3
c1	1	3	9
c2	1/3	1	3
c3	1/9	1/3	1

El primer eigenvector de esta matriz proporciona, una vez normalizado, los factores de ponderación de las características.

La Figura 3 muestra la estructura jerárquica establecida para evaluar las diferentes propuestas de aprovechamiento del sargazo (alternativas) con base en los seis bloques de características (de proceso, económicas, impacto social, del producto, etc.) descritos en las secciones anteriores.

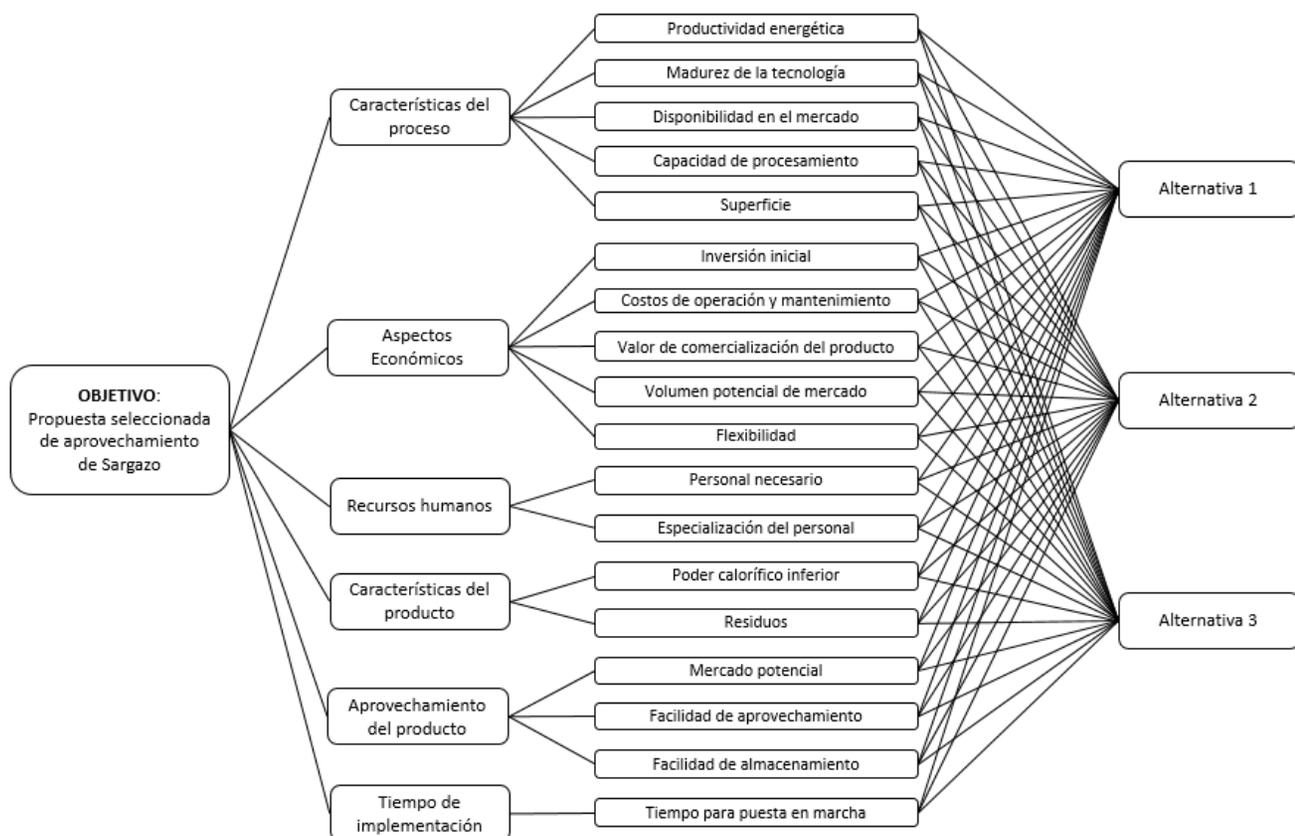


Figura 3. Esquema de la estructura del Proceso Analítico Jerárquico, AHP, utilizado para evaluar las diferentes propuestas de aprovechamiento del sargazo (Elaboración propia)

En el Anexo 1 (sección 8.1) se pueden encontrar las tablas que se proporcionaron a los evaluadores para obtener los factores de ponderación de las diferentes características. Con los valores de dichas tablas se construyeron las matrices de comparaciones pareadas correspondientes para obtener la jerarquización final.

Una vez que cada evaluador ha realizado todas las comparaciones requeridas, es común que se presenten inconsistencias; esto puede ocurrir con mayor frecuencia conforme mayor sea el número de criterios a comparar entre sí. Sin embargo, el AHP incorpora una técnica efectiva para verificar la consistencia de las evaluaciones realizadas por la persona que las realiza; esta consiste en el cálculo de un índice de consistencia, de forma que se reduzca el sesgo en el proceso de toma de decisiones. Cabe resaltar que una evaluación perfectamente consistente siempre tendrá un índice de consistencia $IC = 0$, pero se permiten valores pequeños de inconsistencia dentro de este análisis. Tras analizar la consistencia de la evaluación de cada persona, se sintetizan las jerarquías de todos los evaluadores para obtener una ponderación final con la que se evaluarán todas las propuestas.

Las entidades que participaron en la ponderación de los parámetros de evaluación fueron CONACyT, SENER, CFE, SEMARNAT, IPN, UNAM y G2E, quienes colaboran de una u otra forma en el proyecto de mitigación del problema del sargazo en México. Dado que el enfoque de este trabajo fue la creación de una herramienta de evaluación de sistemas de procesamiento de sargazo, el desarrollo matemático del Proceso Analítico Jerárquico no se describe en este reporte y puede consultarse en el trabajo de Saaty (1987).

4.3.3 Formulación de propuesta para el aprovechamiento de sargazo: carbonización hidrotermal

Como parte de la contribución del Instituto de Ingeniería de la UNAM, en conjunto con G2E, se formuló y presentó una propuesta preliminar para el aprovechamiento del sargazo por medio de carbonización hidrotermal. Dicha propuesta se planteó tomando en cuenta el desarrollo tecnológico e industrial existente para usos similares. La propuesta se evaluaría posteriormente junto con las propuestas que fuesen presentadas por las otras entidades participantes en el grupo de trabajo y, en caso de resultar seleccionada, se desarrollaría de forma más detallada.

4.4 Resultados

4.4.1 Caracterización fisicoquímica

Como base para la formulación tanto del sistema de evaluación de propuestas como de la propuesta de aprovechamiento del sargazo, se realizó una exhaustiva investigación bibliográfica sobre la naturaleza y propiedades fisicoquímicas del sargazo. Además, de manera complementaria se obtuvieron datos experimentales de humedad y poder calorífico inferior del alga por medio de pruebas en una balanza termogravimétrica y una bomba calorimétrica, respectivamente. En esta sección se presenta un resumen de los resultados de dicha caracterización.

- Sargazo

El sargazo es un género que comprende alrededor de 150 especies de macroalgas caféas que se encuentran en los océanos de todo el mundo. Por lo general se encuentran en aguas poco profundas, donde crecen adheridas a rocas o a arrecifes de coral, o bien crecen como variedades pelágicas, flotando libremente en mar abierto. Las especies involucradas en las arribazones masivas en el Caribe son *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* (Figura 4).



Figura 4. *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* (Baker, 2018)

De acuerdo con Oyesiku y Egunyomi (2014), ambas especies tienen una composición muy similar y, por lo tanto, características de combustión similares. Las características fisicoquímicas (valores publicados) de muestras de *Sargassum natans* obtenidas por medio de análisis proximal, elemental y de cenizas reportadas en su trabajo se muestra en las tablas Tabla 22, Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25.

Tabla 22. Análisis proximal del sargazo

Componente	Valor (secado al aire) [%]
<i>Humedad</i>	10.46
<i>compuestos volátiles</i>	48.85
<i>carbono fijo</i>	11.60
<i>cenizas</i>	29.09

Tabla 23. Análisis elemental del sargazo

Elemento	Valor (secado al aire) [%]
<i>C</i>	25.9
<i>H</i>	5.57
<i>N</i>	3.58
<i>S</i>	1.22
<i>O</i>	24.18
<i>LHV (MJ kg⁻¹)</i>	8.68

Tabla 24. Composición de las cenizas del sargazo

Elemento	Valor (secado al aire) [%]
<i>K₂O</i>	17.2
<i>Na₂O</i>	11.78
<i>Al₂O₃</i>	0.83
<i>Fe₂O₃</i>	3.17
<i>CaO</i>	10.84
<i>MgO</i>	4.45
<i>TiO</i>	0.53
<i>P₂O₅</i>	0.71
<i>SiO₂</i>	47.96

Tabla 25. Temperaturas de fusibilidad de las cenizas del sargazo

Temperatura	Valor [°C]
<i>Deformación</i>	721
<i>Reblandecimiento</i>	786
<i>Hemisferio</i>	1379
<i>Fluidez</i>	1402

La Tabla 26 muestra los datos experimentales obtenidos de poder calorífico inferior (PCI) de sargazo con diferente contenido de humedad (Tabla 26). Las muestras se recolectaron en Quintana Roo, en una de las zonas afectadas por las arribazones masivas. Posteriormente se secaron en una balanza termogravimétrica hasta alcanzar los contenidos de humedad seleccionados. A continuación se determinó el poder calorífico de cada muestra a cada contenido de humedad con el uso de una bomba calorimétrica.

Tabla 26. Poder calorífico inferior (PCI) medido en muestras de sargazo con diferente contenido de humedad

<i>Prueba</i>	<i>Muestra</i>	<i>Humedad [%]</i>	<i>Tamaño de la muestra [g]</i>	<i>PCI [MJ/ton]</i>
1	Sargazo	0.00%	0.7574	9,401.8
2	Sargazo	0.00%	0.7575	9,322.3
3	Sargazo	4.83%	0.601	9,135.0
4	Sargazo	4.83%	0.751	9,335.6

Como se puede observar, aún la materia prima completamente seca tiene un poder calorífico muy bajo, por lo que su aprovechamiento por medio de combustión directa u otros procesos convencionales de conversión de biomasa no es conveniente. Asimismo, los datos obtenidos de la literatura muestran que tiene un alto contenido de cenizas y estas tienen una alta temperatura de fusibilidad, lo que puede resultar problemático para algunos métodos de conversión.

4.4.2 Sistema de evaluación de propuestas para el aprovechamiento del sargazo

Dado que el objetivo del desarrollo del sistema de evaluación era facilitar el análisis y la elección de propuestas de aprovechamiento, se decidió que cada entidad que presentara una propuesta tecnológica ante el CONACyT debía llenar un cuestionario con la información correspondiente a su propuesta. El cuestionario solicita parámetros más simples que los considerados en el sistema de evaluación, pero a partir de ellos se calculan de forma automática todos los demás. Esto evita que las entidades participantes tengan que proporcionar información demasiado detallada al presentar su propuesta y solo deben incluir la información mínima necesaria para que sea posible conocer y evaluar sus alcances y características indispensables.

A continuación se muestra el cuestionario proporcionado a los participantes para recabar la información relevante de sus propuestas (Tablas 27 a 29) Cabe mencionar que no se propone una capacidad base, ya que ésta dependerá del sistema que los diferentes participantes hayan desarrollado para sus respectivas propuestas.

Tabla 27. Valores de entrada: características del proceso

Características del proceso	
<i>Tipo de proceso</i>	<input type="checkbox"/> Densificación <input type="checkbox"/> Digestión anaerobia <input type="checkbox"/> Combustión directa <input type="checkbox"/> Carbonización/pirólisis <input type="checkbox"/> Gasificación <input type="checkbox"/> Carbonización hidrotermal <input type="checkbox"/> Gasificación hidrotermal <input type="checkbox"/> Licuefacción <input type="checkbox"/> Fermentación alcohólica <input type="checkbox"/> Otro (especificar)
<i>Capacidad de procesamiento</i>	_____ [t _{sargazo} /h]
<i>Poder calorífico del producto</i>	_____ [MJ/kg]
<i>Valor de comercialización</i>	_____ [\$USD/MJ]
<i>Madurez de la tecnología (nivel de TRL)</i>	_____ (1-9)
<i>Superficie de la instalación</i>	_____ [m ² /ton/h]
<i>Facilidad de aprovechamiento del producto</i>	<input type="checkbox"/> Puede utilizarse con facilidad en sistemas existentes <input type="checkbox"/> Puede utilizarse en sistemas existentes haciendo algunas adaptaciones <input type="checkbox"/> Es necesario hacer muchas adaptaciones para su uso o es necesario construir un sistema completamente nuevo

Tabla 28. Características del producto y residuos

Características del producto	
<i>Producto principal</i>	<input type="checkbox"/> Sólido <input type="checkbox"/> Líquido <input type="checkbox"/> Gas
<i>Cantidad</i>	_____ [t _{producto} /t _{sargazo}]
Residuos	
<i>Sólido</i>	_____ [t _{producto} /t _{sargazo}] <input type="checkbox"/> Residuos no nocivos o fácilmente utilizables en procesos posteriores <input type="checkbox"/> Residuos con algunos compuestos nocivos; posible utilización tras tratamiento de cierta complejidad <input type="checkbox"/> Residuos nocivos/altamente contaminantes; difícil/costoso aprovechamiento posterior
<i>Líquido</i>	_____ [t _{producto} /t _{sargazo}] <input type="checkbox"/> Residuos no nocivos o fácilmente utilizables en procesos posteriores <input type="checkbox"/> Residuos con algunos compuestos nocivos; posible utilización tras tratamiento de cierta complejidad <input type="checkbox"/> Residuos nocivos/altamente contaminantes; difícil/costoso aprovechamiento posterior
<i>Gas</i>	_____ [t _{producto} /t _{sargazo}] <input type="checkbox"/> Residuos no nocivos o fácilmente utilizables en procesos posteriores <input type="checkbox"/> Residuos con algunos compuestos nocivos; posible utilización tras tratamiento de cierta complejidad <input type="checkbox"/> Residuos nocivos/altamente contaminantes; difícil/costoso aprovechamiento posterior

Tabla 29. Parámetros económicos y personal de operación

Parámetros económicos	
<i>Costo del equipo</i>	_____ [\$MDD]
<i>Costos de operación</i>	_____ [% anual]
<i>Mercado potencial</i>	<input type="checkbox"/> Local <input type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional
<i>Volumen potencial de venta</i>	_____ [meses]
<i>Equipo: No. de proveedores disponibles</i>	_____
<i>Flexibilidad (¿El sistema admite otra materia prima además del Sargazo?)</i>	<input type="checkbox"/> Sí, sin acondicionamiento <input type="checkbox"/> Sí, con acondicionamiento <input type="checkbox"/> No
Personal necesario para operar 24/7	
<i>Total</i>	_____ [personas]
<i>Personal no especializado</i>	_____ [personas]
<i>Técnicos</i>	_____ [personas]
<i>Profesionistas</i>	_____ [personas]

A partir de las evaluaciones obtenidas se calcularon los factores de ponderación de las características y bloques funcionales de características en la forma descrita arriba (p.36), pero con ayuda de la plantilla para Excel desarrollada por Goepel y Klaus (2013). La Tabla 30 muestra los factores de ponderación obtenidos tanto para cada característica como cada bloque funcional de características. Aunque con esta matriz teóricamente podría obtenerse un valor máximo de 100, las propuestas no se evaluarán sobre una base en 100 puntos, ya que no existe un sistema que sea óptimo en todas sus características (es decir, que alcance una puntuación de 100). Inclusive, el hecho de calificar cada característica en una escala simple de 1 a 3 con base en datos de referencia se debe a que actualmente aún no existen sistemas que operen específicamente con sargazo. Más bien, este esquema de puntuación servirá para comparar entre sí las diferentes propuestas de manera objetiva. Una vez que se hayan evaluado todas las propuestas individualmente, la comparación puede hacerse reescalando los valores de cada una de las características ajustándolos a los valores máximo y mínimo observados en las propuestas. De esta forma se obtendrán puntuaciones basadas en los intervalos reales de sistemas diseñados específicamente para procesar sargazo, en vez de sustentarse en valores tomados de la literatura para tecnologías de biocombustibles basados en algas y de proyectos de producción de energía con biomasa.

Tabla 30. Características a considerar para la evaluación de propuestas de aprovechamiento de sargazo

	Ponderación por bloque funcional	Bloque funcional	Ponderación por característica	Característica	Unidad
1	17.5%	Características del Proceso	20.1%	Rendimiento energético	MJ producto/ton sargazo
			39.6%	Madurez de la tecnología	TRL
			21.6%	Disponibilidad en el mercado	número de proveedores disponibles
			13.9%	Capacidad de procesamiento	Ton sargazo/h
			4.8%	Superficie	m ² /t sargazo/h
			100.0%		
2	25.8%	Aspectos económicos	10.2%	CapEx inicial	MUSD/t sargazo
			12.1%	OpEx	% anual de CapEx
			34.6%	Valor de comercialización del producto	USD/MJ
			18.5%	Volumen potencial de mercado	GJ/año
			24.6%	Flexibilidad	-
100.0%					
3	3.7%	Personal / mano de obra	34.3%	Personal necesario	personas/t sargazo/h
			65.7%	Especialización del personal	Bajo/medio/alto
			100.0%		
4	6.9%	Características del producto	78.5%	PCI (densidad energética)	MJ/kg producto
			21.5%	Residuos	%masa
			100.0%		
5	28.1%	Aprovechamiento del producto	46.0%	Mercado potencial	Local / Nacional / Internacional
			41.1%	Facilidad de aprovechamiento	-
			12.9%	Facilidad de almacenamiento	Sólido/líquido/gas
			100.0%		
6	18.0%	Tiempo de implementación	100%	Tiempo para puesta en marcha*	Meses
	100%				

Nota: Las diferentes características están agrupadas en bloques funcionales. También se muestra el nivel de importancia (factor de ponderación) de cada característica dentro de cada bloque, así como de cada uno de los bloques funcionales.

Puede observarse que, de acuerdo con el criterio de los evaluadores involucrados, las características que definen el aprovechamiento del producto son las que tienen mayor importancia (28.1%) al evaluar un sistema, seguidas de los aspectos económicos (25.8%). Estos resultados tienen sentido si se toma en cuenta que para que una propuesta sea viable, el producto obtenido de la misma debe tener un mercado definido y ser fácilmente aprovechable; asimismo, la implementación del sistema debe ser económicamente factible considerando el presupuesto disponible para ello, la capacidad de operar el proceso de forma continua a lo largo del año y el valor al que será posible comercializar el producto.

En contraste, las características que tienen un menor peso en la elección de un sistema son las relativas a recursos humanos (3.7%) y las propiedades del producto (6.9%). Dado que el objetivo principal es lidiar de forma efectiva con el problema del sargazo, la cantidad de personal necesaria para operar el sistema, así como su nivel de especialización, son factores secundarios al elegir un sistema. Asimismo, mientras se trate de una alternativa suficientemente buena en el resto de los parámetros, las características del producto no son un factor clave a considerar; el sistema de aprovechamiento no solamente contribuiría a terminar con el problema, sino que permitiría obtener un producto útil del cual se obtendría un beneficio.

Dentro del bloque de características del proceso, las más importantes son la madurez de la tecnología (39.6%) y la disponibilidad en el mercado (21.6%); ambas características tienen que ver con el equipo a implementar y la facilidad para adquirirlo. Dentro de los aspectos económicos, los que tienen mayor peso fueron el valor de comercialización del producto (34.6%) y la flexibilidad (24.6%). El valor de comercialización debe ser mayor al que se podría tener si se comercializa el sargazo como materia prima, suficientemente alto para que se recupere hasta cierto punto la inversión y sea un proyecto rentable, y suficientemente bajo para que pueda competir con el costo del carbón mineral que actualmente se adquiere (tomando en cuenta que se importa desde el extranjero). Dentro del bloque de recursos humanos, tuvo más peso la especialización del personal (65.7%) que la cantidad de personal necesario (34.3%). De la misma manera, la característica del producto de mayor importancia fue la densidad energética del producto (78.5%), en comparación con los residuos (21.5%). Por último, en cuanto al aprovechamiento del producto, el mercado potencial fue la característica con más peso (46.0%), seguida de la facilidad de aprovechamiento (41.1%).

Tras realizar la evaluación con esta matriz, será importante valorar también la capacidad de escalamiento de las tecnologías que resulten seleccionadas, parámetro que se puede analizar de forma cuantitativa a partir de otros parámetros ya conocidos (señalados en color rosa en la matriz): madurez de la tecnología, disponibilidad de los equipos en el mercado, personal necesario para la operación y su nivel de especialización, mercado potencial, tiempo de implementación y estimación de costos a escala industrial.

Esta matriz de evaluación tiene como objetivo funcionar únicamente como un primer filtro para la selección de tecnologías. Las propuestas que resulten mejor calificadas deberán someterse a evaluaciones más detalladas tomando en cuenta criterios más específicos. Entre éstos se encuentran, por ejemplo, los valores de amortización (tasa interna de retorno), la transportabilidad del producto (costo de transporte de cada unidad de energía del producto, o bien la cantidad de energía necesaria para transportar cada unidad de energía del producto), así como un análisis de las emisiones derivadas del proceso en cuestión y del producto obtenido.

4.4.3 Propuesta: carbonización hidrotermal

Como parte de la contribución del Instituto de Ingeniería de la UNAM en conjunto con G2E, se formuló y presentó una propuesta preliminar para el aprovechamiento del sargazo por medio de carbonización hidrotermal. En esta sección describo los principales elementos de la propuesta.

Se asume que, como materia prima de entrada, se recibe sargazo previamente cosechado en alta mar, con un contenido de humedad del 90%. Este se tritura y pasa por un proceso de secado mecánico por medio de una prensa de rodillos, con lo que se obtiene sargazo con 50% de humedad y un poder calorífico menor a 1,980 MJ/ton. Posteriormente entra al reactor de carbonización hidrotermal, donde ocurre la transformación termoquímica a 200 °C y 18 bar, con un tiempo de residencia de 8 horas. Con ello se obtiene un lodo de hidrocarbón que posteriormente pasa por un proceso de secado térmico y, finalmente, por una etapa de densificación para obtener pellets de hidrocarbón.

Por cada tonelada de sargazo a 50% de humedad que se procesa en el reactor se obtendrían alrededor de 0.33 ton de hidrocarbón con un poder calorífico inferior de 23,000 MJ/ton, 0.450 ton de agua de proceso y 0.220 ton de subproductos gaseosos (vapores y gases inertes). Se asumen unidades

modulares capaces de procesar una tonelada de sargazo por hora. En la siguiente figura se muestra el proceso de forma esquemática (Figura 5):

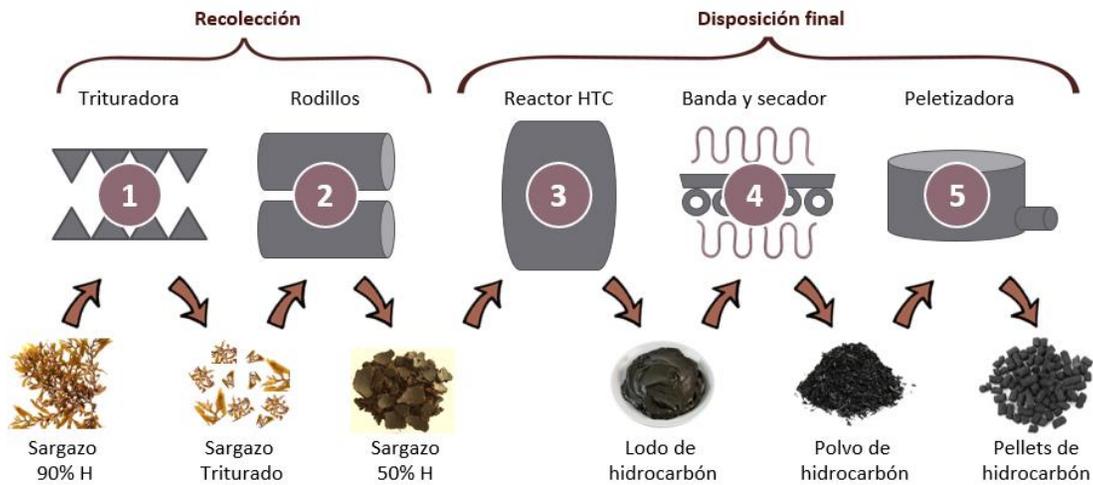


Figura 5. Propuesta de proceso de tratamiento de sargazo mediante HTC. (Elaboración de II y GZE)

Teniendo en cuenta la estacionalidad del sargazo, la propuesta plantea que la materia prima de entrada sea una combinación de sargazo y materia orgánica proveniente de los residuos sólidos urbanos locales (FORSU), o bien que funcione únicamente con sargazo durante la temporada de arribazones y con FORSU el resto del año. Dado que el producto obtenido es hidrocarbón, se prevé que este se utilice para sustituir parte del carbón mineral que actualmente se utiliza en las plantas carboeléctricas del país.

Un de las dificultades de utilizar biomasa como materia prima para la producción de energía es su almacenamiento y su transporte a largas distancias, debido en gran parte a los altos costos que ello implica. Por ello, el sistema de aprovechamiento propuesto plantea implementar la planta de tratamiento *in situ*, es decir, en un punto cercano a la zona de cosecha de las algas.

A partir de los parámetros de proceso conocidos se llenó la matriz de evaluación para esta propuesta. A continuación se muestran los valores de entrada (Tabla 31)

Tabla 31. Características de la propuesta de HTC

Parámetros de proceso	
Tipo de proceso	Carbonización hidrotermal
Capacidad de procesamiento	1 [t sargazo/h]
Poder calorífico del producto	23,000 [MJ/t sargazo]
Valor de comercialización	0.00435 [USD/MJ]
Madurez de la tecnología (nivel TRL)	9 Tecnología comercial
Superficie que ocupa la instalación*	1000 [m ² /t sargazo/h]
Facilidad de aprovechamiento	Puede utilizarse con facilidad en sistemas existentes

Parámetros económicos		
Costo del equipo	4.217	millones USD
Costos de operación	4 %	anual
Mercado potencial	Nacional	
Volumen potencial de venta	416,000,000	[GJ/año]
Tiempo de implementación	12	meses
Equipo: No. de proveedores disponibles	5	
Flexibilidad*	Sí, sin acondicionamiento	
Personal necesario (para operar 24/7)		
Total	7 personas	
Personal no especializado	3 personas	
Técnicos	3 personas	
Profesionistas	1 personas	

Características del producto		
Producto principal	Sólido	
Cantidad	0.33 ton/ton sargazo	
Residuos:	ton/ton sargazo	Facilidad de disposición
Sólido	0.1	Residuos con algunos compuestos nocivos --> Disposición con ciertas dificultades
Líquido	0.45	Residuos con algunos compuestos nocivos --> Disposición con ciertas dificultades
Gas	0.12	Residuos con algunos compuestos nocivos --> Disposición con ciertas dificultades

Con dichos valores se realizó el ejercicio de evaluación utilizando la matriz descrita en la sección anterior. La Tabla 32 a continuación muestra los valores obtenidos para cada característica. Como puede observarse, la propuesta de HTC obtuvo una puntuación total de 72.67/100 puntos.

Tabla 32. Matriz de evaluación del proceso de carbonización hidrotermal para el aprovechamiento del sargazo. Prototipo inicial de 500 KWh

Ponderación por bloque	Bloque	Ponderación por parámetro	Parámetro	Unidad	Valor	Puntaje (1-3)	Puntaje ponderado sobre 100
17.5%	Características del Proceso	20.1%	Rendimiento energético	MJ producto/ton sargazo	7,590	2	2.35
		39.6%	Madurez de la tecnología	TRL	9	3	6.93
		21.6%	Disponibilidad en el mercado	número de proveedores disponibles	5	1	1.26
		13.9%	Capacidad de procesamiento	Ton sargazo/h	1	3	2.43
		4.8%	Superficie	m²/2t sargazo/h	1000	2	0.56
		100.0%					
25.8%	Aspectos económicos	10.2%	CapEx inicial	MUSD/t sargazo	4.217185029	2	1.75
		12.1%	OpEx	% anual de CapEx	4	2	2.08
		34.6%	Valor de comercialización del producto	USD/MJ	0.004347826	2	5.95
		18.5%	Volumen potencial de mercado	GJ/año	416000000	3	4.77
		24.6%	Flexibilidad	-	Sí, sin acondicionamiento	3	6.35
		100.0%					
3.7%	Personal / mano de obra	34.3%	Personal necesario	personas/t sargazo/h	7	1	0.42
		65.7%	Especialización del personal	Bajo/medio/alto	-	2	1.62
		100.0%					
6.9%	Características del producto	78.5%	PCI (densidad energética)	MJ/kg producto	23	3	5.42
		21.5%	Residuos	%masa	-	2	0.99
		100.0%					
28.1%	Aprovechamiento del producto	46.0%	Mercado potencial	Local / Nacional / Internacional	Nacional	2	8.62
		41.1%	Facilidad de aprovechamiento	-	Puede utilizarse con facilidad en sistemas	3	11.55
		12.9%	Facilidad de almacenamiento	Sólido/líquido/gas	Sólido	3	3.62
		100.0%					
18.0%	Tiempo de implementación	100%	Tiempo para puesta en marcha*	Meses	12	1	6.00
100%							72.67

También puede observarse que aunque esta es una propuesta prometedora, no obtuvo un puntaje cercano a 100. Esto demuestra que el esquema de evaluación propuesto brinda una primera valoración pero no está diseñado para identificar alguna propuesta que alcance una puntuación del 100%, sino más bien para servir como una herramienta de análisis comparativo entre distintas tecnologías.

Los grupos de características en los que la propuesta de HTC obtuvo mejores resultados son los siguientes:

- Aprovechamiento del producto, con 23.79/28.1 puntos. El hidrocarbón que se obtendría tiene propiedades muy favorables para su transporte y almacenamiento, además de que, al fungir como sustituto de carbón mineral, tiene un mercado real bien definido.
- Características del proceso, con 13.53/17.5 puntos. Este valor está dado por la madurez de la tecnología de HTC, la cantidad de sargazo que se podría procesar por unidad de tiempo y el rendimiento energético del proceso.
- Características del producto, con 6.41/6.9 puntos. El poder calorífico del producto es comparable al de combustibles fósiles como el carbón mineral, al tiempo que, con el aprovechamiento adecuado, se obtiene un flujo de residuos relativamente pequeño y de fácil disposición.

En conclusión, la propuesta aquí planteada de aprovechar el sargazo mediante carbonización hidrotermal para producir hidrocarbón representa una opción atractiva, principalmente tomando en cuenta que el proceso tendría una alta eficiencia energética a pesar de que la materia prima tiene un contenido de humedad sumamente alto. Asimismo, el producto tiene un alto potencial de comercialización y su uso con fines energéticos contribuiría a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Este ejercicio muestra también que el esquema de valoración propuesto puede aplicarse fácilmente a otras propuestas de aprovechamiento energético de sargazo que se sometan a la consideración de CONACyT. Desafortunadamente, al momento de terminar este trabajo, aún no se contaba con los detalles técnicos de otras propuestas, por lo que no fue posible hacer su valoración con esta herramienta y comparar el potencial de cada una de ellas.

5. Proyecto 2. Planta de carbonización hidrotérmica de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) de la Ciudad de México

5.1 Antecedentes

5.1.1 Definición de residuos sólidos urbanos

De acuerdo con el Informe de la Situación del Medio Ambiente en México (2015), la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) define a los residuos como aquellos materiales o productos que se desechan ya sea en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso y que son susceptibles de ser valorizados o que deben ser sujetos a tratamiento o disposición final. Los residuos se clasifican en tres grandes grupos en función de sus características y origen:

- residuos sólidos urbanos (RSU),
- residuos de manejo especial (RME), y
- residuos peligrosos (RP).

La SEMARNAT (2019) define a los residuos sólidos urbanos son aquellos que se producen en las casas habitación como resultado de la eliminación de materiales que se utilizan en actividades domésticas (como los residuos orgánicos y los residuos de productos de consumo y sus empaques). También entran en este grupo los residuos provenientes de cualquier otra actividad que se realice en establecimientos o en la vía pública, así como aquellos resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos (siempre y cuando no sean considerados como residuos de otra índole).

5.1.2 Generación de residuos

La generación de residuos está directamente relacionada con el nivel de urbanización de un determinado lugar, pues ello conlleva un aumento en la concentración poblacional, en el poder adquisitivo de dicha población, así como en la cantidad y tipo de actividades económicas que se llevan a cabo (SEMARNAT, 2018a). Estos factores implican estilos de vida con un elevado consumo de bienes y servicios, lo que se traduce en una mayor producción de residuos. No es así en las comunidades rurales, donde los productos que se consumen por lo general están menos manufacturados, es decir, carecen de partes o materiales que terminan como residuos.

Un tema importante en la actualidad son las altas tasas de crecimiento de la población a nivel mundial porque, aunadas al desarrollo económico, darán lugar a una mayor generación de residuos sólidos urbanos. El manejo y disposición de dichos residuos es una de las problemáticas globales de mayor interés y que es necesario abordar con más urgencia. De acuerdo con las cifras reportadas en el Informe de la Situación del Medio Ambiente en México (2018a), la producción mundial de residuos sólidos urbanos fue de aproximadamente 1,300 millones de toneladas diarias en 2012 y se estima que podría llegar hasta 2,200 millones de toneladas por día en el 2025.

5.1.3 Gestión de los residuos y sus implicaciones

La generación y manejo de los residuos es un tema de gran importancia por sus efectos ambientales, de salud pública y de gestión de recursos naturales. Un manejo adecuado de los residuos procura disminuir su generación y lograr una disposición final adecuada, de forma que se mitigue su impacto sobre el medio ambiente. Ello también reduce de forma indirecta la presión sobre los recursos naturales, ya que disminuye en cierta medida la extracción de recursos no renovables, disminuye el consumo de energía y agua necesarios para su extracción y procesamiento y reduce la emisión de gases de efecto invernadero asociada. Estas medidas, a su vez, conllevan importantes beneficios económicos y sociales (SEMARNAT, 2018a).

Un paso indispensable para lograr una gestión sostenible de los residuos es la separación desde la fuente de generación (es decir, los hogares, las empresas y los comercios), de los materiales reciclables o compostables del flujo de residuos. De este modo, el costo y los esfuerzos de la separación se comparten entre los generadores, encargados de la separación inicial, y los municipios, que se encargan de la recolección, procesamiento y disposición de los residuos (Klinghoffer y Castaldi, 2013). Asimismo, cuando los residuos se separan de forma previa a su recolección, es posible aumentar tanto la cantidad como la calidad de los materiales reciclables. En cambio, el reciclaje es más difícil cuando se busca su recuperación desde un flujo de residuos no separados, pues generalmente están contaminados y disminuye su valor en el mercado.

5.1.4 Métodos de disposición de residuos

Existen distintas formas de gestionar y disponer de los residuos sólidos. La elección de un sistema de gestión de residuos debe considerar numerosos aspectos como el costo, el impacto ambiental, la sostenibilidad, la demanda de energía, la percepción pública, la creación de empleos y la ubicación. Entre los sistemas más ampliamente utilizados actualmente se encuentran los siguientes, en orden descendente de preferencia:

- reducción de residuos,
- reutilización,
- reciclaje y/o compostaje,
- conversión de residuos a energía, y
- disposición final (rellenos sanitarios).

De acuerdo con el texto de Klinghoffer y Castaldi (2013), los países que cuentan con las estrategias de gestión de residuos más exitosas del mundo utilizan todas estas opciones en diferentes grados y/o lugares.

El reciclaje permite convertir parte de los residuos en materiales útiles para procesos productivos, es decir, revalorizarlos. Este proceso permite reducir tanto el volumen de residuos que van a sitios de disposición final como el consumo de materias primas y energía necesarios para la extracción y la producción de materiales nuevos. Los materiales que más comúnmente se reciclan incluyen papel, cartón, vidrio, algunos metales y PET.

Una vez que se han recuperado y extraído del flujo de residuos aquellos que son susceptibles de ser reciclados, solo quedan dos vías posibles para los residuos restantes: su disposición final o su conversión a energía por medio de tratamientos térmicos.

La disposición final de los residuos se refiere a su depósito y confinamiento permanente en sitios determinados con el fin de evitar su diseminación y posibles afectaciones a los ecosistemas y la salud de la población (Gobierno de México, 2015). Históricamente se ha dispuesto de los residuos sólidos —sobre todo en países en desarrollo y en zonas rurales— en sitios con poco o nulo control o medidas de seguridad (tiraderos a cielo abierto). En las últimas décadas se ha buscado sustituir los tiraderos por rellenos sanitarios, sitios que deben cumplir con una serie de requisitos en cuanto su ubicación, construcción y operación para reducir los riesgos a los recursos naturales (por ejemplo, suelo, mantos freáticos, etc.), los ecosistemas y las poblaciones humanas. En el caso de México, la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, y clausura que deben cumplir los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos (DOF, 2004).

No obstante lo anterior, los rellenos sanitarios tienen muchos inconvenientes, principalmente en cuatro grandes áreas: el uso significativo —y siempre creciente— de terreno y la degradación inevitable que conlleva; la liberación de metales y otras sustancias tóxicas que se transportan a los cuerpos de agua en los lixiviados; la interacción potencialmente peligrosa de los materiales desechados; y la liberación de grandes cantidades de metano a la atmósfera. Según lo reportado en el texto de Klinghoffer y Castaldi (2013), anualmente, los rellenos sanitarios aportan aproximadamente el 2% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global.

En los últimos años, la conversión de residuos a energía se ha convertido en una alternativa mucho más conveniente que el relleno sanitario, por varias razones. En primer lugar, los residuos son un producto que cada vez se produce en mayor medida y que debe ser gestionado y mitigado, mientras que la energía es un bien que debe ser generado, y cuya demanda también ha crecido de forma desmedida —y lo seguirá haciendo en el futuro—. La conversión de residuos puede reducir su volumen a una décima parte del original, al tiempo que se aprovecha la energía inherente al flujo de residuos. De esta manera, contribuye a reducir significativamente el impacto ambiental de la eliminación de los residuos y, al mismo tiempo, a satisfacer parte de la creciente demanda de energía. En esas condiciones, no resulta descabellado pensar en los residuos como un recurso con gran potencial en vez de como un residuo. Además, la conversión de residuos en energía también contribuye a mitigar la emisión de gases de efecto invernadero por dos vías: al evitar tanto las emisiones (principalmente de metano) de los rellenos sanitarios como las provenientes de la quema de combustibles fósiles para generar energía. De este modo, la conversión de residuos en energía puede volverse un elemento crucial dentro de un sistema integrado de gestión de residuos.

Desde el punto de vista práctico, otra ventaja de los sistemas de conversión de residuos a energía es que ya existe la infraestructura necesaria para la recolección de los residuos, por lo que no se requiere inversión en ese sentido. Debido a su heterogeneidad característica, la trituración y el mezclado de los residuos puede contribuir de manera importante a su homogeneización. Esto también reduce el volumen y mejora las características de combustión.

Por estas razones, la conversión de residuos a energía ha ido cobrando cada vez mayor relevancia a nivel mundial. No obstante, las plantas y equipos requeridos para ello son plantas sofisticadas que, por lo general, cuentan con tecnología de control de emisiones de última generación. Por esta razón,

se requiere una inversión importante, que puede ser mayor que la requerida para las alternativas de gestión de residuos sólidos (Klinghoffer y Castaldi, 2013).

5.2 Definición del problema o contexto de la participación profesional

5.2.1 Generación de residuos en México y en la CDMX

En México se generaron 53.1 millones de toneladas de RSU en 2015, lo que representa una producción promedio de 1.2 kg diarios por habitante. En comparación con la generación reportada para 2003, estas cifras representan un aumento del 61.2%, asociado principalmente al crecimiento urbano, el desarrollo industrial, las modificaciones tecnológicas y el cambio en los patrones de consumo de la población (Gobierno de México, 2015). La Figura 6 muestra la composición de los residuos sólidos urbanos que se generan en el país, donde la fracción más grande corresponde a los residuos orgánicos, seguida de productos de papel, plásticos y otros tipos de basura.

Para la Ciudad de México en particular, se estima que cada habitante generó alrededor de 1.38 kg de residuos al día en 2018. La principal fuente generadora de residuos sólidos fueron los domicilios, seguida de los comercios, servicios y la Central de Abastos, que es el centro de distribución más grande e importante de productos de origen vegetal y animal en la ciudad (SEMARNAT, 2018a).

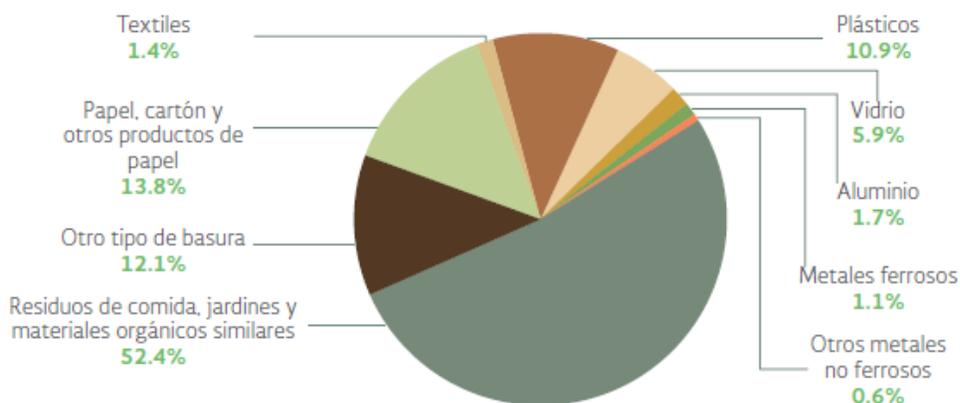


Figura 6. Composición de los RSU en México, 2012 (Gobierno de México, 2015)

5.2.2 Disposición de residuos sólidos urbanos en la CDMX

Como se describe en el informe presentado por la SEMARNAT (2018a), actualmente, la infraestructura de manejo y disposición de residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México incluye los siguientes elementos:

- 12 estaciones de transferencia,
- 2 plantas de selección,
- 8 plantas de composta,
- 2 plantas de compactación, y
- 5 sitios de disposición final

Las estaciones de transferencia son los sitios a los que se trasladan diariamente los residuos recolectados por los vehículos encargados. En estas instalaciones se realiza la descarga de los residuos a vehículos de mayor capacidad para su traslado a instalaciones de tratamiento, aprovechamiento o disposición final, como se muestra en la Figura 7:

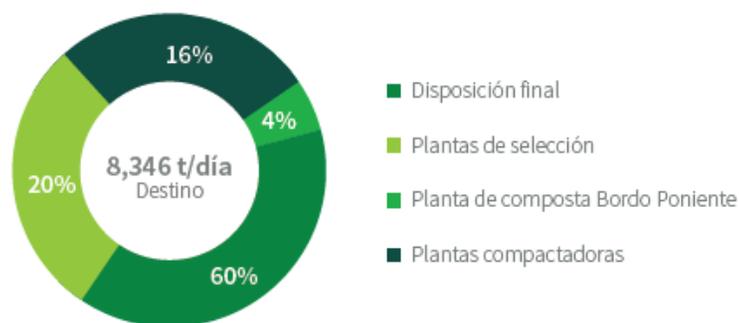


Figura 7. Destino de los residuos que ingresan a las estaciones de transferencia (SEMARNAT, 2018a)

En las plantas de selección se recuperan de forma manual todos los materiales reciclables, susceptibles de ser aprovechados, como PET, cartón, papel, vidrio, metales, entre otros. En 2018 se recuperó tan solo el 5% del total de residuos generados en la Ciudad de México. Los residuos restantes se trasladan a plantas compactadoras o de composta, o bien a sitios de disposición final (SEMARNAT, 2018a).

Las plantas de compactación y de composta son sitios en los que se puede tratar y/o aprovechar una fracción de los residuos no reciclables y evitar que estos terminen en sitios de disposición final. Los residuos que se trasladan a las plantas de compactación tienen como objetivo ser utilizados como reemplazo de la fuente de energía térmica en la industria cementera mediante procesos de combustión; este co-procesamiento reduce significativamente las emisiones de CO₂ a la atmósfera que se generarían si dichos residuos fuesen enviados a rellenos sanitarios. En la actualidad, tan solo el 4% de los residuos de la Ciudad de México se utiliza para el co-procesamiento mencionado, mientras que el resto de los que ingresan a estas plantas van a sitios de disposición final (SEMARNAT, 2018a).

Las plantas de composta reciben la fracción orgánica de los residuos sólidos; mediante su degradación natural se obtiene un abono con alto contenido de nutrientes que puede ser aprovechado para mejorar suelos agrícolas y de parques, jardines y áreas verdes de la ciudad. Para que los residuos puedan aprovecharse mediante compostaje es indispensable la separación efectiva de los residuos biodegradables en las distintas etapas de la gestión de residuos; esta operación es más asequible cuando la separación se lleva a cabo desde las fuentes generadoras.

De acuerdo con la SEMARNAT (2018a), la Ciudad de México tiene una capacidad de procesamiento de residuos orgánicos mediante compostaje de 923,419 toneladas anuales. La planta de composta de mayor capacidad es la de Bordo Poniente, que procesa el 98% del total de los residuos orgánicos

generados en la ciudad y produce 100,646 toneladas de composta cada año. La mayor parte de los residuos que se procesan en esta planta son residuos orgánicos de alimentos, mientras que la fracción restante corresponde a residuos de poda.

Actualmente, la mayor parte de los residuos orgánicos con alto contenido de humedad son destinados a composta. A pesar de sus bondades, el compostaje tiene algunos inconvenientes importantes. Por una parte, implica altos costos de operación y genera cantidades considerables de metano y otros gases de efecto invernadero. En el caso de la Ciudad de México, uno de los principales problemas es la saturación del mercado de composta, por lo que existe una sobreproducción en las plantas y un volumen importante de la composta termina como material que no se aprovecha. Por estas razones ha surgido la necesidad de buscar tecnologías alternativas para el tratamiento y aprovechamiento de los residuos orgánicos (Mena et al., 2016).

Los residuos que no son susceptibles de ser valorizados, así como aquellos que resultan de las etapas anteriores de gestión, son trasladados a los sitios de disposición final. Como se menciona en el informe presentado por el Gobierno de México (2015), en el país, un alto porcentaje de los residuos generados termina en rellenos sanitarios o en sitios no controlados y tiraderos a cielo abierto. Como consecuencia, muchos de los rellenos sanitarios que dan servicio a la Ciudad de México se encuentran ya saturados o en malas condiciones, por lo que es indispensable la búsqueda de métodos alternativos de disposición de residuos.

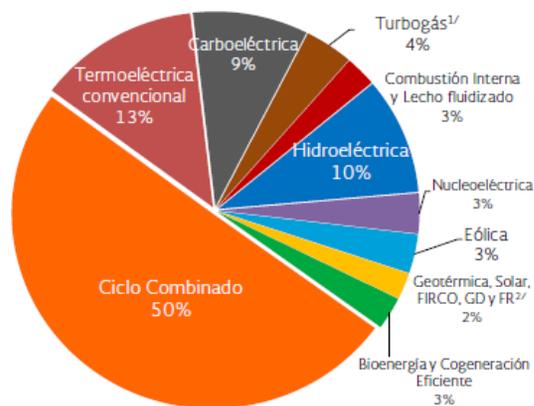
La valorización energética de los residuos es un tema que ha cobrado creciente interés tanto a nivel mundial como nacional, ya que puede contribuir al desarrollo de un sistema de gestión de residuos más efectivo e integral tanto en la Ciudad de México, donde se encuentra la mayor concentración de producción de residuos, como en el resto del país.

Nordahl et al. (2020) compararon las emisiones promedio de CO₂ de varias alternativas para la disposición de residuos, y encontraron que los sitios de disposición final (es decir, los rellenos sanitarios), son la alternativa con mayores emisiones, aproximadamente 400 kg de CO₂ por tonelada de residuos. El compostaje es la opción con menores emisiones y puede, incluso, tener un balance negativo si la composta producida se utiliza de manera efectiva. De lo contrario, sus emisiones son de alrededor de 80 kg de CO₂ por tonelada de residuos.

5.2.3 Generación de electricidad en México

La energía eléctrica es un insumo primario indispensable para las actividades productivas tanto de transformación como de servicios, y es también un bien final que se ha vuelto imprescindible en la sociedad actual. Hoy en día, el carbón es la fuente principal de energía para la generación de electricidad a nivel mundial (Wallace, 2009). El aumento en la demanda de energía eléctrica, aunado a una mayor conciencia ambiental ante las perspectivas de cambio climático, ha orillado a los países a diversificar su matriz energética para buscar alternativas menos contaminantes. No obstante, la producción de carbón ha seguido aumentando en los últimos años a pesar del esfuerzo colectivo a nivel global para disminuir las emisiones, promover la sostenibilidad del sector energético y aumentar el uso de energías renovables (Gobierno de México, 2019).

Como se muestra en la Figura 8, en México la generación eléctrica se basa principalmente en combustibles fósiles.



^{1/}Incluye plantas móviles. ^{2/} Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), Generación Distribuida (GD) de varias tecnologías y Frenos Regenerativos (FR). El total puede no coincidir por redondeo. Información preliminar 2017. Fuente: Elaborado por la SENER con datos de la CFE, la CRE, el CENACE y la Subsecretaría de Planeación y Transición Energética.

Figura 8. Generación de energía eléctrica en México por tipo de tecnología, 2017 (Secretaría de Energía, 2018)

Aunque las plantas carboeléctricas son similares a las plantas termoeléctricas convencionales, las primeras necesitan sistemas especiales anticontaminantes y equipos de desulfuración, ya que, si bien son más eficientes, emiten mucho más gases de efecto invernadero. Como menciona Wallace (2009), se estima que la combustión de carbón emite hasta un 40% más de CO₂ que el petróleo.

De acuerdo con lo presentado en el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (2018), México cuenta con tres centrales carboeléctricas: Río Escondido y Carbón II, en Coahuila, y Petacalco, en Guerrero, y tienen una capacidad instalada conjunta de 5,378 MW. Las plantas ubicadas en Coahuila utilizan carbón mineral proveniente del mismo estado, mientras que la central de Petacalco utiliza carbón importado. La razón por la que es necesario importar carbón es que la carboeléctrica de Petacalco requiere carbón de calidad superior y el carbón mexicano posee un alto contenido de azufre y otras impurezas. Esto se ve reflejado en la densidad energética del combustible: el carbón térmico nacional tiene un poder calorífico neto de 19.432 MJ/kg, mientras que el del carbón térmico de importación es de 22.543 MJ/kg en promedio (Gobierno de México, 2019). Como referencia, la Tabla 33 muestra las especificaciones del carbón mineral que la CFE pide como requisitos mínimos para la adquisición del combustible.

Tabla 33. Características de carbón mineral (CFE) (Transparencia Mexicana)

Parámetro	Valor - Especificación CFE
Poder calorífico superior [kcal/kg]	6,200 mínimo (25.08 [MJ/kg])
Contenido de ceniza [% peso]	13.0 máximo
Contenido de materia volátil [% peso]	22.0 mínimo 40.0 máximo
Contenido de humedad total [% peso]	12.0 máximo
Contenido de azufre [% peso]	1.0 máximo
Índice de libre expansión FSI [-]	3.0 máximo
Índice de dureza HGI [-]	48 mínimo
Temperatura de deformación inicial de la ceniza [°C]	1,200 mínimo

Asimismo, dado que la mayor producción de carbón a nivel nacional se lleva a cabo en el estado de Coahuila, el envío de dicho carbón por la Sierra Madre Occidental a las carboeléctricas de la costa del Pacífico resulta más costoso por tonelada que su importación (Wallace, 2009). Como se muestra en la Figura 9, la importación de carbón representa casi el 100% de las importaciones totales de energía primaria del país.

	2017	2018	Variación Porcentual (%) 2018/2017
Exportaciones totales	2,609.34	2,681.84	2.78
Carbón	0.08	0.14	82.97
Petróleo crudo	2,609.26	2,681.70	2.78
Condensados	0.00	0.00	0.00
Importaciones totales	301.22	277.24	-7.96
Carbón	301.22	268.66	-10.81
Petróleo crudo	0.00	8.57	0.00
Condensados	0.00	0.00	0.00
Saldo neto total	2,308.12	2,404.61	4.18
Carbón	-301.14	-268.52	-10.83
Petróleo crudo	2,609.26	2,673.13	2.45
Condensados	0.00	0.00	0.00

Figura 9. Comercio exterior de energía primaria (PJ) (Gobierno de México, 2019)

Si bien el carbón no representa un porcentaje alto dentro de la matriz de generación eléctrica del país, la importación de dicho combustible ha ido en aumento (Figura 10).

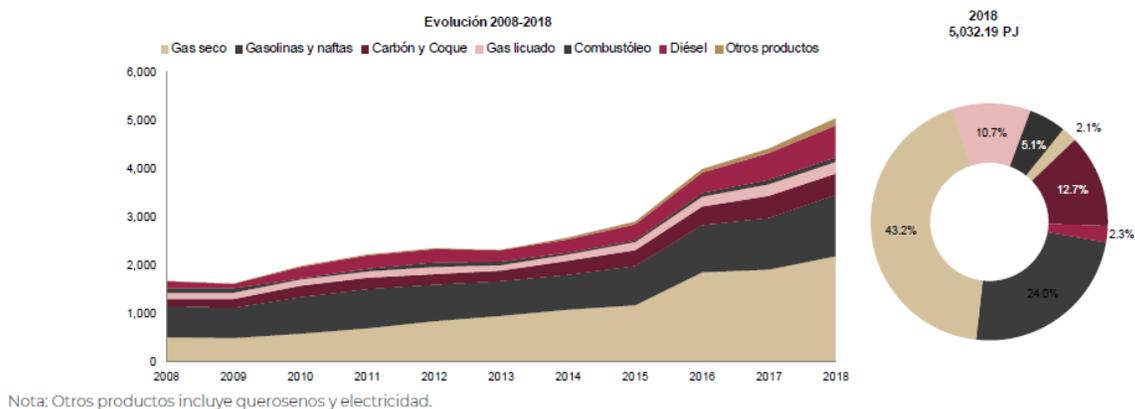


Figura 10. Importación de energía en México 2008-2018 [PJ] (Gobierno de México, 2019)

De acuerdo con el Balance Nacional de Energía (2019), en 2018 los principales exportadores de carbón a México fueron Estados Unidos, Colombia, Canadá y Australia. En 2019, la empresa suiza-británica Glencore International AG ganó la licitación de la CFE para adquirir 4.9 millones de toneladas de carbón térmico para abastecer a la central carboeléctrica de Petacalco, por un total de 519 millones 610 mil dólares (Nava, 9 de abril de 2019; Reforma, 10 de abril de 2019).

De acuerdo con las estrategias adoptadas por la administración actual para diversificar el uso de combustibles en México, se busca aumentar la generación eléctrica con carbón con el fin de reducir la dependencia energética que existe actualmente con Estados Unidos para el suministro de gas natural. Otro de los argumentos planteados es que la generación de energía mediante carbón es mucho más económica que mediante energías renovables. Así, se planea la apertura de más plantas carboeléctricas en el país.

5.2.4 Emisiones

De acuerdo con el Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (2018b), en 2015 se emitió un total de casi 700 millones de toneladas de CO₂ equivalente (699,564.3 Gg) en el país, con la siguiente distribución por sector de generación (Figura 11).

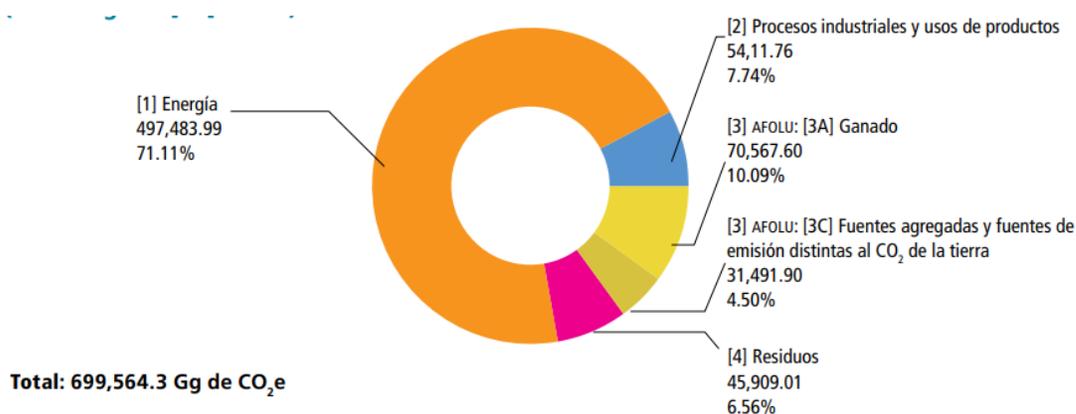


Figura 11. Emisiones y contribución de gases de efecto invernadero por sector, 2015 (SEMARNAT, 2018b)

El sector de energía incluye a las industrias de transporte, generación de energía, manufactura y construcción, emisiones fugitivas y otros sectores. La industria de generación de energía fue responsable del 25.9% del total de las emisiones del país, con 181 millones de toneladas de CO₂ equivalente; de estas, las plantas carboeléctricas aportaron 31.876 millones de toneladas de CO₂ equivalente o 4.6% de las emisiones totales. La importancia de las emisiones de las plantas carboeléctricas puede apreciarse mejor si se considera que la generación eléctrica mediante plantas de carbón representa el 9% del total, pero sus emisiones representan casi el 20% del total de emisiones de la industria de generación de energía (Figura 11). En otras palabras, la producción de energía mediante carbón es una de las tecnologías de generación con mayores emisiones de gases de efecto invernadero (SEMARNAT, 2018b).

Asimismo, el reporte muestra que los niveles de emisiones de CO₂ de las plantas carboeléctricas del país se han mantenido relativamente constantes desde el año 2000 (al menos hasta 2015), por lo que los valores de 2005 presentados por la Comisión para la Cooperación Ambiental (CEC, 2011) pueden servir como una referencia aproximada de los niveles de emisión de cada una de las plantas carboeléctricas, como se muestra en la Tabla 34 a continuación:

Tabla 34. Emisiones de CO₂ en las centrales carboeléctricas de México, 2005 (CEC, 2011)

<i>Planta</i>	Estado de la República	Generación eléctrica [MWh]	Emisiones de CO₂ [t]	Tasa de emisión de CO₂ [kg/MWh]
<i>CFE CT Pdte. Plutarco Elías Calles (Petacalco)</i>	Guerrero	14,275,114	15,162,296	1,062
<i>CFE CT José López Portillo (Río Escondido)</i>	Coahuila	9,357,259	10,106,597	1,080
<i>CFE CT Carbón II</i>	Coahuila	8,996,793	9,072,240	1,008

Cabe resaltar que dichas centrales son las tres plantas con las mayores tasas de emisión de CO₂ del país, y se encuentran también entre los primeros lugares para emisiones de NO_x y SO_x.

5.2.5 Propuesta: Planta de Carbonización Hidrotermal

La información anterior deja claro que existe una creciente problemática relativa a la generación, manejo y disposición de residuos sólidos urbanos en la Cd. de México, aunada a la también creciente demanda de electricidad y consumo e importación de carbón mineral. Por tal motivo, el Instituto de Ingeniería, en colaboración con G2E, desarrolló una propuesta tecnológica para aprovechar la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que se generan en la Ciudad de México y someterla a un proceso de carbonización hidrotermal para producir hidrocarbón que podría utilizarse en una o más de las plantas carboeléctricas del país. La propuesta persigue los siguientes objetivos:

- brindar una opción para el aprovechamiento de residuos que, a la vez, solucionaría el problema de la saturación de rellenos sanitarios y el exceso de composta producida;
- sustituir parte del carbón mineral que actualmente se consume en la central carboeléctrica de Petacalco con el hidrocarbón producido, reduciendo así la cantidad de carbón fósil que se importa; y
- brindar una alternativa con un balance neutro de carbono que reduciría significativamente la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera en comparación con la combustión de carbón mineral.

5.3 Metodología utilizada

5.3.1 Caracterización fisicoquímica

Como parte inicial del proyecto se realizó una investigación bibliográfica exhaustiva sobre las propiedades fisicoquímicas de las materias primas a utilizar. De manera complementaria, se obtuvieron datos experimentales de humedad y de poder calorífico inferior de muestras de hidrocarbón por medio de pruebas en una balanza termogravimétrica y una bomba calorimétrica, respectivamente.

5.3.2 Validación de tecnología de HTC

Para conformar las bases para plantear el proyecto de aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) de la Ciudad de México como alternativa a la planta de composta que actualmente se encuentra en operación, se hizo una investigación bibliográfica exhaustiva para conocer el estado del arte de la tecnología de carbonización hidrotermal y su aplicación con materias primas similares. La investigación permitió conocer los valores de los parámetros de operación, características de los productos obtenidos, subproductos, residuos, distribución de los productos (balance de masa), balance energético del proceso, eficiencias de conversión, tratamiento previo de la materia prima (pre-proceso), tratamiento posterior de los productos y subproductos (post-proceso), usos y aplicaciones de los productos, emisiones, integración con otros procesos, problemas y limitaciones en el proceso, etc.

5.3.3 Estado del arte de la industria de Carbonización Hidrotermal

Se hizo una investigación sobre los avances más recientes de la industria de carbonización hidrotermal en el mundo con el fin de conocer el estado actual de esta tecnología. Esta investigación permitió conocer el número de plantas en operación existentes, sus capacidades de procesamiento, materia prima de entrada, productos obtenidos, integración de procesos, nivel de investigación y desarrollo, alcances, etc. Esta información fue crucial para identificar las empresas con que podría colaborarse para el desarrollo e implementación del proyecto.

5.3.4 Propuesta de proyecto

A partir de la investigación realizada se formuló una propuesta detallada para la valorización energética de la FORSU de la Ciudad de México por medio de carbonización hidrotermal. Para desarrollar la propuesta se tomaron en cuenta todas las etapas del proceso: el pretratamiento necesario de la biomasa de entrada; los parámetros de operación del reactor de HTC; los flujos de productos, subproductos y residuos, así como los respectivos post-tratamientos y formas de disposición de cada uno; el suministro tanto de energía térmica como eléctrica necesaria para el proceso y la forma de generarlas, entre otros.

Los parámetros y procesos presentados en este reporte son tentativos, ya que se propusieron con base en los datos e información disponible de plantas ya existentes de HTC a nivel industrial, así como de sistemas experimentales a escala laboratorio. Sin embargo, el diseño final del sistema y los parámetros de operación pueden variar y se deberán definir en colaboración con otras empresas especializadas, los equipos disponibles, costos, etc.

5.4 Resultados

5.4.1 Caracterización fisicoquímica

A continuación se presentan valores recopilados de la literatura sobre la composición elemental y el análisis proximal de FORSU e hidrocarbón.

- FORSU

Tanto en los valores presentados para análisis elemental como proximal se pueden observar variaciones significativas en los niveles de humedad, así como en el contenido de carbono y otros elementos. Esto se debe a que, en las distintas referencias bibliográficas, el tipo de FORSU cambia (en algunos casos se habla únicamente de residuos alimentarios, por ejemplo) y a que, aún si se trata del mismo tipo de FORSU, la composición de éste varía de una región a otra —dependiendo del tipo predominante de materia orgánica que se produce en la región del estudio en cuestión. No obstante, desde el punto de vista del aprovechamiento energético de FORSU, resaltan la gran heterogeneidad en cuanto a contenido de humedad (33–72%) y la relativa homogeneidad en contenido de carbón (43–61%) de FORSU de diferentes fuentes. Como se discute en la sección 3.2 arriba, estas características son críticas para la selección de las tecnologías de conversión que son aplicables o practicables.

Tabla 35. Composición elemental de FORSU

<i>Fuente</i>	Contenido de humedad [%]	Contenido de cenizas [%]	C [%]	N [%]	H [%]	S [%]	O [%]	Poder Calorífico Inferior (base seca) [MJ/kg]
<i>Pandey et al., 2015</i>	-	12.4	48.5	1.1	6.7	0.16	14.9	-
<i>Ingelia, 2016</i>	67.3	6.7	46.75	2.75	-	-	-	-
<i>Zhang, Guangming, Wenzhi, Juwen y Haochen Z., 2017</i>	-	-	46.6	2.9	6.6	0.3	-	-
<i>Komilis, Evangelou, Giannakis y Lymperis, 2012 (FORSU)</i>	38.4	-	59.4	1.57	9.00	0.15	29.9	25.17
<i>Komilis et al., 2012 (residuos alimentarios)</i>	71.2	-	48.0	5.75	7.66	0.52	32.7	20.90
<i>Espinosa Lloréns et al., 2007</i>	50.7-66.0	-	45.72	1.11	6.04	0.25	41.55	-
<i>Pecorini, Rossi y Iannelli, 2020</i>	-	6.64	43.06	2.16	5.98	0.17	-	-
<i>Pecorini et al., 2020</i>	-	6.41	42.65	2.07	6.07	1.10	-	-
<i>Pecorini et al., 2020</i>	-	7.23	44.63	2.21	6.32	0.14	-	-
<i>Olusola, Freeman y Mbohwa, 2016</i>	63.47	5.56	45.03	1.98	6.20	0.0	41.16	-
<i>Campuzano y González-Martínez, 2016</i>	72.8	-	46.6	2.9	6.6	0.3	-	-
<i>Durán et al., 2013 (Ciudad de México)</i>	33.7	13.04	61.16	2.92	15.41	0.02	7.45	10.9
<i>Paritosh et al., 2018</i>	63.8	-	46.28	2.96	6.50	0.27	-	-

Tabla 36. Análisis proximal de FORSU

<i>Fuente</i>	Contenido de humedad [%]	Sólidos Totales [%]	Sólidos Volátiles [%]	Lignina [%]	Fibra [%]	Proteína [%]	Grasas y aceites [%]	Carbohidratos [%]
<i>Zhang et al., 2017</i>	-	-	-	7	23	13	13	44
<i>Campuzano y González-Martínez, 2016 (Ciudad de México)</i>	70.3	29.7	22.3	13.5	39.5	15.2	17.5	14.3

- Hidrocarbón

El poder calorífico es una de las características de mayor interés en los combustibles. A continuación se presentan los datos obtenidos experimentalmente de poder calorífico inferior (PCI) para unas cuantas muestras de hidrocarbón con diferente contenido de humedad. El hidrocarbón utilizado para estas determinaciones fue producido a partir de FORSU y de madera de poda y fue proporcionado por una empresa española dedicada a la carbonización hidrotermal de distintos tipos de biomasa.

Tabla 37. Poder calorífico de muestras de Hidrocarbón producido a partir de FORSU y madera de poda a diferentes porcentajes de humedad

<i>Prueba</i>	Muestra	Biomasa de proceso	Humedad [%]	Masa [g]	PCI [MJ/kg]
1	<i>Hidrocarbón</i>	<i>FORSU con plástico</i>	0.91%	0.7570	25.7308
2	<i>Hidrocarbón</i>	<i>FORSU con plástico</i>	0.91%	0.7570	25.7610
	Promedio				25.7459
3	<i>Hidrocarbón</i>	<i>Poda</i>	11.07%	0.7575	18.4003
4	<i>Hidrocarbón</i>	<i>Poda</i>	11.53%	0.7576	18.1612
	Promedio				18.2808

Como puede observarse, el hidrocarbón obtenido a partir de FORSU tiene un poder calorífico inferior comparable, o incluso un poco mayor, al del carbón mineral (25.08 MJ/kg; Tabla 33). Aunque la cantidad de muestras que se analizaron fue muy pequeña, puede observarse una diferencia marcada entre los valores de poder calorífico obtenido para el hidrocarbón proveniente de cada tipo de biomasa, así como una consistencia relativa entre ambas muestras de cada tipo, por lo que se considerará el valor promedio.

5.4.2 Tecnología y proceso de HTC

A continuación se presenta una síntesis de los parámetros típicos de operación más importantes del proceso de carbonización hidrotermal, así como datos sobre los productos, residuos, balances de masa y energía, entre otros.

Parámetros de proceso de la HTC

Tabla 38. Parámetros de operación

<i>Fuente</i>	Temperatura [°C]	Presión [bar]	Tiempo de residencia [h]	Relación biomasa (seca)/agua	Rendimiento másico [kg _{hidrocarbón} /kg _{biomasa}] [%]
<i>Erlach, 2014 (FORSU)</i>	220	-	4	-	64
<i>Antaco, 2020</i>	200	25	4-10	-	-
<i>SoMax BioEnergy, 2017</i>	200	-	0.5-10	-	30
<i>HTCycle, 2020</i>	>185	>20	-	-	-
<i>Hitzl, Hernandez y Ponce, 2016</i>	205-215	18-20	4	-	45
<i>Nizamuddin et al., 2017</i>	180-350	-	0.5-6	-	30-90
<i>Lucian, Merzari y Fiori, 2017</i>	180-250	10-50	0.5-8	0.07-0.19	-
<i>Erlach, Harder y Tsatsaronis, 2012</i>	200-250	-	3-8	0.11	68
<i>Zhang et al., 2017</i>	180-350	-	-	-	>50
<i>Merzari, Lucian, Volpe, Andreottola y Fiori, 2018</i>	180-250	-	3	0.1-0.15	-
<i>Basso et al., 2015</i>	180-250	-	1-8	0.07	-
<i>Stemann, Erlach y Ziegler, 2013</i>	220	-	4	0.2	56
<i>Zhai et al., 2017</i>	180-350	20-50	1	0.22	45-60
<i>Lucian y Fiori, 2017</i>	180-250	10-50	0.5-8	0.19	-
<i>Tradler et al., 2018</i>	200	10-40	6	0.14-0.20	50

De manera general, puede observarse que todos los sistemas presentados operan en un intervalo de temperatura entre 180 y 350°C, a presiones entre 10 y 50 bar y con tiempos de residencia que varían entre media hora y 10 horas. Asimismo, la relación biomasa/agua de un máximo de 20% hace énfasis en el uso de esta tecnología para el procesamiento de biomasa con alto contenido de humedad. Los valores de rendimiento presentan grandes variaciones que se deben tanto al tipo de biomasa utilizada, como a la combinación de parámetros de operación (temperatura, presión y tiempo de residencia) del sistema; estos, a su vez, dependen de la robustez del equipo.

Tabla 39. Distribución másica de los productos

<i>Fuente</i>	Fase sólida (hidrocarbón) [%]	Fase líquida [%]	Fase gaseosa [%]
<i>Hitzl et al., 2016</i>	58	39	3
<i>Ingelia, 2016</i>	50-55	37-48	2-8
<i>Merzari et al., 2018</i>	54.2	37.3	5.5
<i>Merzari et al., 2018</i>	50.9	32.3	16.8
<i>Merzari et al., 2018</i>	34.8	44.8	20.4

Tabla 40. Concentración de metales pesados en el agua de proceso (Hitzl et al., 2016)

Elemento	Concentración [ppb]
<i>As</i>	221
<i>Cd</i>	8
<i>Cr</i>	66
<i>Co</i>	23
<i>Cu</i>	22
<i>Pb</i>	94
<i>Mo</i>	29
<i>Ni</i>	171
<i>Se</i>	50
<i>Zn</i>	5207
<i>B</i>	4088

La tabla anterior muestra las concentraciones de diferentes metales pesados en el agua de proceso de HTC, según el estudio realizado por Hitzl et al. (2016). Aunque ésta fue la única referencia que se encontró, la presencia de metales pesados en el agua de proceso es de gran importancia tanto para la disposición final del agua, como para su posible uso posterior. Por ejemplo, el Acuerdo CE-CCA-001/89 que establece los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua para México (DOF, 1989) indica los siguientes valores límites para agua de riego: arsénico – 100 ppb; cadmio – 10 ppb; cobre – 200 ppb; plomo – 5000 ppb; níquel – 200 ppb; selenio – 20 ppb; zinc – 2000 ppb; boro – 700 ppb. Como puede apreciarse, los niveles de algunos de estos metales en el agua de proceso son muy superiores a los niveles máximos permisibles. Esto impone la necesidad de analizar en detalle estos contenidos en cada caso particular y, con base en eso, tomar las decisiones adecuadas tanto para el posible uso posterior, como para la disposición final del agua resultante del proceso.

Tabla 41. Composición del gas producto

<i>Fuente</i>	CO₂ [%]	CO [%]	CH₄ [%]	H₂ [%]
<i>Erlach et al., 2012</i>	91.8	7.1	0.1	1.0
<i>Stemann et al., 2013</i>	95.32	4.65	0.03	0

Tabla 42. Balance de energía del proceso

<i>Fuente</i>	ENTRADA [kWh/t_{biomasa}]		SALIDA [kWh/t_{biomasa}]		Total Neto [kWh/t_{biomasa}]
	Energía térmica	Energía eléctrica	Hidrocarbón	Energía disponible (agua de proceso)	
<i>C-Green Technology AB, 2019</i>	0	250	2100	420	+2270
<i>Hitzl et al., 2016</i>	614	148	6603	-	+5841
<i>Lucian et al., 2017</i>	117-628	<300	-	-	-
<i>Lucian y Fiori, 2017</i>	1170	160	-	-	-

De forma general, el consumo energético total del proceso (tomando en cuenta tanto energía eléctrica como térmica) es menor del 15% del contenido energético total del hidrocarbón obtenido y la eficiencia energética del proceso se encuentra por encima del 70% (Antaco, 2020; Badescu, 2019; Zhai et al., 2017). El 7-18% de la energía de biomasa se pierde como energía química presente en los compuestos orgánicos disueltos en el flujo de aguas residuales, y otro 12-21% se pierde como energía térmica irrecuperable en los flujos de gases de escape y aguas residuales (Erlach, 2014).

Por otra parte, la eficiencia de conversión de carbono es superior al 90%; de forma comparativa, las eficiencias de conversión de carbono de los procesos de digestión anaerobia y de compostaje son del 25% y el 15%, respectivamente. Las principales pérdidas de carbono se encuentran en los subproductos disueltos (5–15%) y en el CO₂ producto de la combustión (11-18%), cuando se utiliza parte del hidrocarbón para suministrar la energía térmica del proceso (Badescu, 2019; HTCycle, 2020).

Caracterización fisicoquímica del hidrocarbón obtenido mediante HTC

Tabla 43. Análisis proximal del hidrocarbón

<i>Fuente</i>	Contenido de humedad [%]	Contenido de volátiles [%]	Contenido de Carbono [%]	Contenido de Cenizas [%]	Poder Calorífico Inferior [MJ/kg]	Temperatura de fusión de cenizas [°C]
<i>Ingelia, 2019 (FORSU)</i>	7	60-70	55-60	9-16	21-22.5	>1250
<i>Ingelia, 2019 (residuos de jardinería)</i>	7	45-55	55-60	5-10	22-23	>1250
<i>Ingelia, 2019 (residuos alimentarios)</i>	7	45-55	60-65	3-5	23-24	>1250
<i>Ingelia, 2019 (lodos residuales)</i>	7	60-70	52-60	8-15	20-22	>1250
<i>Hitzl et al., 2016</i>	3.1	63.3	22.8	13.6	-	-
<i>Hitzl et al., 2016</i>	4.1	66.1	21.0	12.9	-	-
<i>Ingelia, 2016</i>	4-8	-	>60	2-10	>23	>1200
<i>Erlach et al., 2012</i>	-	-	64.88	0.49	26.37	-
<i>Zhang et al., 2017 (composta)</i>			44-54	18.56	>19	-
<i>Zhang et al., 2017 (lodos residuales)</i>	-	-	18-30	46.8	20-31	-
<i>Merzari et al., 2018 (FORSU)</i>	-	39.5	66.7	5.84	29.9	-
<i>Stemann et al., 2013</i>	0.37	64.3	64	3	15.22	-
<i>Zhai et al., 2017</i>	47.50	38.38	40.37	50.08	16.90	-
<i>Benavente, Calabuig y Fullana, 2015</i>	55.10	-	66.05	2.26	-	-

Tabla 44. Análisis elemental del hidrocarbón

Fuente	C [%]	N [%]	H [%]	S [%]	O [%]
<i>Erlach, 2014 (FORSU)</i>	47.95	1.51	3.61	0.14	19.44
<i>C-Green Technology AB, 2019</i>	51	4.6	4.6	1.8	17.6
<i>C-Green Technology AB, 2019</i>	32	3.0	4.6	1.5	10.0
<i>Ingelia, 2016</i>	>60	0.6-2.0	5.8-6.2	<0.2	-
<i>Erlach et al., 2012</i>	64.88	-	5.7	-	28.93
<i>Zhang et al., 2017</i>	52.3	2.7	8.4	-	-
<i>Zhang et al., 2017</i>	37.7	2.8	4.8	-	-
<i>Merzari et al., 2018</i>	66.66	3.65	7.05	-	16.8
<i>Merzari et al., 2018</i>	50.38	1.44	6.26	-	39.21
<i>Stemann et al., 2013</i>	63.69	0.74	6.63	0.08	25.64
<i>Zhai et al., 2017</i>	50.13	3.28	4.89	0.64	4.70
<i>Benavente et al., 2015</i>	66.05	1.43	7.96	<0.1	22.30
<i>Benavente et al., 2015</i>	70.10	1.60	7.97	<0.1	18.26

En las tablas anteriores se pueden observar algunas características generales del hidrocarbón en comparación con la materia prima inicial (FORSU), cuyos valores se incluyen en la Tabla 35: como primer punto, el contenido de humedad se reduce de valores incluso superiores al 70% en algunos casos, a valores menores al 10%, mientras que en la Tabla 33 se especifica un valor máximo permisible del 12% para el carbón mineral que actualmente utiliza la CFE. También se observa una densificación energética, ya que el contenido de carbono pasa de valores cercanos al 45% en el FORSU a valores que rondan mayormente en un intervalo del 50-70% en el hidrocarbón; aunque se hallaron pocos datos relativos al poder calorífico de FORSU —y estos presentan una gran variabilidad entre sí— la densificación energética proveniente del incremento en el contenido de carbono también debe verse reflejada en un incremento en el poder calorífico que, de acuerdo con los datos hallados para el hidrocarbón, es superior a 20 MJ/kg.

Cenizas

Tabla 45. Composición de las cenizas producto del proceso

Fuente	Na₂O [%]	K₂O [%]	MgO [%]	CaO [%]	Al₂O₃ [%]	Fe₂O₃ [%]	SiO₂ [%]	P₂O₅ [%]	Cl [%]	SO₃ [%]
<i>Hitzl et al., 2016</i>	1.4	2.2	2.0	8.1	4.2	3.3	27.4	18.4	-	-
<i>Hitzl et al., 2016</i>	1.0	1.7	1.6	7.3	4.8	1.9	21.8	24.5	-	-
<i>Benavente et al., 2015</i>	-	17.48	3.22	0.24	-	0.97	5.97	13.15	0.08	-
<i>Benavente et al., 2015</i>	-	22.17	2.05	-	-	0.39	2.74	3.30	0.38	3.05

Emisiones

A continuación se presenta una tabla de emisiones evitadas con el uso de hidrocarbón producido mediante HTC para diferentes escenarios.

Tabla 46. Emisiones evitadas mediante el uso de hidrocarbón

Fuente	Tipo de aplicación	Emisiones evitadas
<i>Antaco, 2020</i>	Plantas de tratamiento de lodos residuales	Reducción del ~96% de las emisiones totales
<i>Ingelia, 2019</i>	Combustible sólido sustituto de carbón mineral	- Reducción de 2.2 kg de CO ₂ /kg _{hidrocarbón} (no toma en cuenta emisiones evitadas por disposición alternativa de la materia prima) - Reducción de 0.54 kg de CO ₂ por cada 1440 kg de residuos (materia prima) procesados
<i>Owsianiak, Ryberg, Renz, Hitzl y Hauschild, 2016</i>		
<i>C-Green Technology AB, 2019</i>	Fábricas de papel - tratamiento de lodos	Más de 7,000 toneladas de CO ₂ evitadas por cada 20,000 toneladas de lodos (materia prima) procesadas

Para contabilizar de forma adecuada las emisiones de gases de efecto invernadero de un proyecto es necesario tomar en cuenta todas las etapas, incluyendo el cultivo y la cosecha de la materia prima, su almacenamiento, los procesos de acondicionamiento y transformación de la biomasa, la combustión en la planta de generación de energía y el transporte tanto de la biomasa como de los biocombustibles en las diferentes etapas. Cuando el proceso se utiliza como método de disposición de residuos, las emisiones dependen del escenario de referencia, es decir, las emisiones generadas por los residuos que no se utilicen como materia prima se tomarán como emisiones evitadas. Para el caso de la FORSU, el escenario de referencia es el compostaje (Erlach, 2014).

De acuerdo con lo descrito en el trabajo de Antaco (2020), en la Unión Europea, las emisiones potencialmente evitables de CO₂ representan alrededor de 80 millones de toneladas, tomando en cuenta que hay más de 130 millones de toneladas de potencial materia prima (residuos orgánicos).

Asimismo, a diferencia de otros procesos termoquímicos de transformación de biomasa, la HTC favorece la disminución de nitrógeno y azufre en la fase sólida del producto (hidrocarbón), lo que ocasiona que su combustión genere muy bajas emisiones de NO_x y SO_x (Zhai et al., 2017).

Parámetros económicos

A continuación se presentan algunos parámetros económicos típicos a considerar en la evaluación de proyectos energéticos.

Tabla 47. Parámetros económicos de una planta de HTC

Parámetro	Valor	Fuente
<i>Inversión total [Mill. €]</i>	6-10 (llave en mano)	AVA-CO2, 2013
<i>Costos de operación y mantenimiento [% anual]</i>	10	Stemann et al., 2013
<i>Vida económica de la planta [años]</i>	15	Buttman, 2018; Stemann et al., 2013
<i>Capacidad anual [$t_{biomasa}$]</i>	12,000 ¹	AVA-CO2, 2013
<i>Producción anual de hidrocarbón [t]</i>	8,200	AVA-CO2, 2013
<i>Consumo de electricidad</i>	18 kWh/t ~ 0.15 €/kWh	Buttman, 2018
<i>Consumo de energía térmica</i>	130 kWh/t ~ 0.01 €/kWh ²	Buttman, 2018
<i>Costo total de tratamiento [€/t_{biomasa}]</i>	~40	Buttman, 2018; TerraNova Energy, 2019
<i>Costo total de producción [€/t_{hidrocarbón}]</i>	157-200	Lucian et al., 2017; Lucian y Fiori, 2017
<i>Valor de comercialización del hidrocarbón [€/t_{hidrocarbón}]</i>	>170	AVA-CO2, 2013; Ingelia, 2019
<i>Superficie de planta [$m^2/t_{biomasa}$]</i>	0.167	AVA-CO2, 2013

Notas:

¹ Considerando biomasa con un contenido de humedad de ~30%

² Considerando recuperación de energía térmica del proceso y generación con parte del hidrocarbón producido.

En esta tabla no se consideran costos de transporte de la materia prima; sin embargo, deben considerarse los costos de recolección de la biomasa residual en el punto de generación y su posterior transporte a la instalación de HTC.

Cabe mencionar que el uso de HTC como sistema de disposición de residuos se traduce en un ahorro del 20-50% en comparación con otras alternativas de tratamiento como compostaje, relleno sanitario, combustión directa y gasificación, entre otros (HTCycle, 2020). Asimismo, en los escenarios de disposición de residuos, el proceso de HTC debe concebirse como una tecnología de tratamiento de residuos, más que como un proceso de producción de biocombustibles.

5.4.3 Propuesta de proyecto

Con base en los resultados de la investigación realizada, se formuló una propuesta de proyecto de valorización energética de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) de la Ciudad de México mediante una planta de carbonización hidrotermal. En una primera etapa se construirá una planta piloto de dos reactores que procesarían 50 toneladas de FORSU (contenido de humedad de ~75%) por día, los que serían transformados en aproximadamente 6.5 toneladas de hidrocarbón. De forma paralela al proceso de HTC, se integraría un sistema de gasificación para procesar residuos de poda de la ciudad a fin de suministrar la energía térmica y eléctrica necesaria para la operación de la planta. A continuación se presenta un diagrama del proceso en el que se identifican las distintas etapas (Figura 12).

Diagrama de proceso: Carbonización Hidrotermal de FORSU

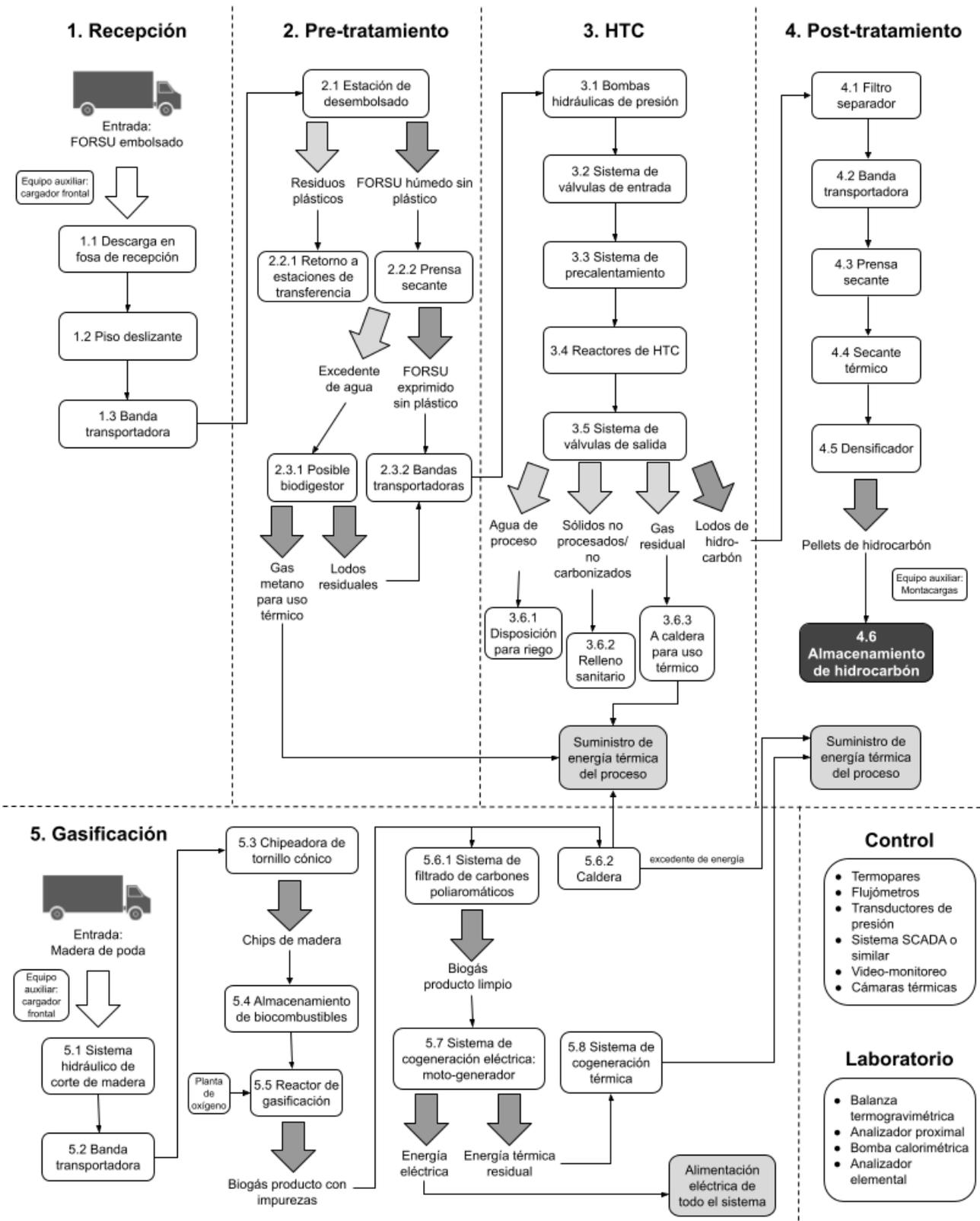


Figura 12. Diagrama de proceso: HTC de FORSU (Elaboración propia)

En la Tabla 48 a continuación se describen cada una de las etapas y procesos mostrados en el esquema.

Tabla 48. Descripción de proceso de HTC de FORSU

Actividad	Descripción
1. Recepción	
<i>Para iniciar el proceso, a cada línea llegará diariamente un camión cargado con aproximadamente 25 toneladas de FORSU embolsado.</i>	
1.1 Descarga en fosa de recepción	Cada camión descargará todo el contenido en una fosa de recepción a partir de la cual se suministrará la materia prima a procesar. Como equipo auxiliar para esta etapa se hará uso de un cargador frontal.
1.2 Piso deslizante	Por medio de este equipo se dosificará la materia prima desde la fosa de recepción a una banda transportadora para procesar una tonelada por hora.
1.3 Bandas transportadoras	La materia prima entregada por el piso deslizante será transportada por medio de bandas hacia la estación de desembolsado.
2. Pre-tratamiento	
<i>Validación de componentes y sistemas integrados en un ambiente relevante</i>	
2.1 Estación de desembolsado	En este proceso, con ayuda de equipo especializado, se retirarán las bolsas con el fin de separar el contenido de residuos urbanos a ser procesados. Con ello se obtendrán, por una parte, todos los residuos plásticos, y por otra, el FORSU húmedo sin plástico.
2.2.1 Retorno a estaciones de transferencia	Los residuos plásticos obtenidos en el proceso anterior serán regresados a las estaciones de transferencia para su disposición.
2.2.2 Prensa secante	El FORSU húmedo libre de plástico obtenido en la estación de desembolsado (2.1), inicialmente con una humedad de ~75% en peso, pasará a una prensa secante con el fin de eliminar mecánicamente el exceso de agua presente en la materia. Los productos de este proceso serán el excedente de agua y el FORSU exprimido sin plástico.
2.3.1 Posible biodigestor	El excedente de agua obtenido en el proceso anterior se utilizará en un posible biodigestor con el que se obtendrá gas metano para uso térmico y lodos residuales que se descargarán en las bandas transportadoras mencionadas a continuación (2.3.2).
2.3.2 Bandas transportadoras	El FORSU exprimido y sin plástico obtenido en la prensa secante (2.2.2) se transportará por medio de bandas al sistema de HTC.
3. HTC	
3.1 Bombas hidráulicas de presión	Con estos equipos se bombeará la materia prima recibida de las bandas transportadoras (FORSU

	exprimido sin plástico y los lodos residuales) hacia el sistema de válvulas de entrada.
3.2 Sistema de válvulas de entrada	Este sistema permitirá el acceso de la materia prima hacia el sistema de precalentamiento del proceso.
3.3 Sistema de precalentamiento	En esta etapa se precalentará la materia prima hasta una temperatura de 205 °C y 20 bar previo a su ingreso a los reactores de HTC, por medio de energía térmica recuperada del reactor de HTC (3.4).
3.4 Reactores de HTC	En estos reactores ocurrirá el proceso de carbonización hidrotermal de la materia orgánica. Este proceso se llevará a cabo a una temperatura de 205 °C, una presión de 18 bar y un tiempo de residencia de 8 h. La energía térmica necesaria para este proceso proviene del sistema de gasificación (5.6.2).
3.5 Sistema de válvulas de salida	Este sistema permitirá la salida de los productos del reactor. Con el proceso de HTC se obtienen tres productos principales: Lodos de hidrocarbón, que posteriormente pasarán a la etapa de post-tratamiento; agua de proceso; y sólidos no carbonizados.
3.6.1 Disposición para riego	El agua de proceso obtenida en la etapa anterior será posteriormente utilizada para riego.
3.6.2 Relleno sanitario	Asimismo, los sólidos no carbonizados obtenidos serán posteriormente dispuestos en rellenos sanitarios.
3.6.3 Gas para uso térmico	Se aprovechará la energía térmica del flujo de residuos gaseosos para el suministro térmico del proceso y posteriormente, con el mismo fin, los gases serán quemados en la caldera junto con parte del biogás producido.
4. Post-tratamiento	
4.1 Filtro separador	Los lodos de hidrocarbón obtenidos tras el proceso de HTC pasarán a un filtro en el que se separará el agua de los lodos provenientes del reactor.
4.2 Banda transportadora	Los lodos filtrados en la etapa anterior (4.1) serán transportados por medio de bandas.
4.3 Prensa secante	Los lodos filtrados de hidrocarbón pasarán a una prensa secante para eliminar mecánicamente el agua remanente tras el proceso de filtrado.
4.4 Secante térmico	En este proceso se evaporará el agua restante tras la prensa secante, para obtener polvo de hidrocarbón con una humedad final entre 4 y 8% wt.
4.5 Densificador	El polvo obtenido será ahora sometido a un proceso de densificación para obtener pellets compactos de hidrocarbón.
4.6 Almacenamiento de hidrocarbón	Como último paso del proceso de carbonización hidrotermal, los pellets serán transportados a una zona de almacenamiento para su posterior aprovechamiento. En este proceso se utilizará como equipo auxiliar un montacargas para facilitar su manejo.

5. Gasificación	
<i>Este proceso es independiente del sistema de HTC y, utiliza como materia prima de entrada madera de poda con 20% humedad, que será llevada a un sistema hidráulico de corte de madera con ayuda de un cargador frontal.</i>	
5.1 Sistema hidráulico de corte de madera	En este sistema se procesará la madera recibida para un primer proceso de corte en que se obtendrán pedazos más pequeños.
5.2 Bandas transportadoras	La madera cortada obtenida anteriormente (5.1) será transportada por medio de bandas a una chipeadora de tornillo cónico.
5.3 Chipeadora de tornillo cónico	En este equipo se cortará la madera en pedazos más pequeños y con dimensiones más uniformes. Con ello se obtienen chips de madera listos para ser procesados en sistemas posteriores.
5.4 Almacenamiento de biocombustibles	Las chips de madera obtenidas serán almacenadas para su dosificación y aprovechamiento posterior en el gasificador.
5.5 Reactor de gasificación	En este reactor ocurrirá el proceso de gasificación de las chips de madera, y el sistema estará alimentado por una bomba de oxígeno. El proceso se llevará a cabo a 950 °C con un tiempo de residencia de 15 min para obtener finalmente biogás con impurezas que saldrá a 300 °C.
5.6.1 Sistema de filtrado de carbonos poliaromáticos	Una parte del biogás producido, aún con impurezas, pasará a un sistema de filtrado de carbonos poliaromáticos con el fin de limpiar las impurezas presentes. Tras este proceso, el biogás saldrá a temperatura ambiente.
5.6.2 Caldera	La otra parte del biogás producido en el reactor (5.5) se quemará en una caldera para suministrar la energía térmica necesaria para el proceso de HTC (3). Asimismo, el excedente de energía térmica obtenida en la caldera se utilizará para proveer una parte del suministro de energía térmica de la etapa de post-tratamiento (4).
5.7 Sistema de cogeneración eléctrica: moto-generador	El biogás limpio obtenido tras el proceso de filtrado (5.6.1) se utilizará en un sistema de cogeneración eléctrica. Los productos obtenidos serán energía eléctrica destinada a la alimentación eléctrica de todo el sistema, tanto HTC (1-4) como gasificación (5), y energía térmica residual.
5.8 Sistema de cogeneración térmica	En este sistema se aprovechará la energía térmica residual obtenida en 5.7 para generar el resto de la energía térmica necesaria para la etapa de post-tratamiento (4).
Control	
<i>Los sistemas antes descritos estarán instrumentados con termopares, flujómetros, transductores de presión, sistemas SCADA (o similar), video-monitoreo y cámaras térmicas para poder monitorear y controlar todos los parámetros de operación de los procesos. Asimismo, servirán para detectar posibles fallas o perturbaciones en la operación de los sistemas.</i>	

Laboratorio

La planta también contará con un laboratorio en el que se tendrán equipos como balanzas termogravimétricas, analizadores proximales, bombas calorimétricas y analizadores elementales. Estos equipos permitirán cotejar las características fisicoquímicas tanto de la materia prima a procesar como de los productos obtenidos para optimizar su aprovechamiento.

Además de la valorización energética mediante el hidrocarbón y de servir como una alternativa a la disposición de residuos actual (composta), la planta tendrá como efecto colateral importante evitar una cantidad considerable de emisiones en la CDMX.

El proyecto se desarrollará en la planta de composta localizada en el bordo poniente de la Ciudad de México utilizando la FORSU que llega a la misma. El anexo 8.2 muestra un plano de sitio del bordo poniente.

Un punto a destacar es que, dado que los residuos se generan de manera continua durante todo el año, se supone que no es necesario el almacenamiento a largo plazo, por lo que las pérdidas de materia seca y los costos de almacenamiento son despreciables. Adicionalmente, se asume que el costo de recolección de la materia prima sería el mismo que el actual, ya que los residuos ya llegan actualmente a la planta de composta, ubicación donde se abrirá la planta.

5.4.4 Empresas de HTC

A continuación se presenta una breve descripción de las empresas de HTC identificadas que se encuentran en operación en diversas partes del mundo y que podrían participar como potenciales colaboradores para la implementación del proyecto. Es importante notar que solamente se consideraron en esta lista aquellas empresas cuyo nivel de desarrollo ya se encuentra en escala industrial, es decir, que ya cuentan con al menos una planta piloto en operación.

C-Green Hydrothermal carbonization (C-Green Technology AB, 2020)

C-Green es una empresa sueca enfocada en la disposición eficiente de lodos de aguas residuales, lodos industriales y biomasa húmeda por medio de carbonización hidrotermal. Su objetivo es contribuir a que el proceso de HTC se vuelva una solución moderna y económica para la disposición y tratamiento de casi cualquier tipo de biomasa húmeda y lodos residuales, ya sean industriales, de agricultura o de aguas residuales.

Su proceso puede tratar materias primas con un contenido de humedad de hasta 90% y hasta 30,000 toneladas de lodo por año en una unidad. Una de los aspectos más destacados que mencionan sobre su proceso es que, a diferencia de los procesos convencionales de HTC que suelen ser energéticamente intensivos, no requiere ninguna fuente externa de energía térmica, sino que utiliza la energía presente en los lodos para producir la energía necesaria para el proceso.

Actualmente esta empresa tiene una planta de HTC instalada en Finlandia, en la que se procesan los lodos residuales de la fábrica de papel Heinola-Stora Enso. Con ello contribuyen no solo a resolver su

problema de disposición de residuos, sino también a solventar casi por completo el suministro eléctrico de la fábrica y reducir su impacto ambiental y costos de operación.

Antaco (Antaco, 2020)

Antaco es una empresa inglesa dedicada a la producción de biocarbón por medio de HTC. Su tecnología, capaz de procesar cualquier tipo de residuos y lodos industriales, busca contribuir a la mejora de las condiciones de salubridad e higiene en países en desarrollo, así como ser una opción para la producción de energía térmica y electrificación rural.

La empresa cuenta con aplicaciones para el sector de aguas residuales, residuos domésticos, residuos de jardín, residuos de agricultura y algas, entre otros. Entre sus servicios se encuentran la evaluación de residuos orgánicos para la producción de biocarbón; el diseño, planeación y desarrollo de plantas de HTC, incluyendo factibilidad y costos (proyectos llave en mano); y la operación y mantenimiento de plantas de biocarbón. Además de la producción de biocarbón, su sistema también permite la producción de carbón activado y sustrato para mejoramiento de suelos.

TerraNova Energy (TerraNova Energy, 2019)

TerraNova es una empresa alemana que emplea la tecnología de HTC para producir biocarbón a partir de lodos residuales, con la recuperación integrada de nitrógeno y fósforo en forma de fertilizantes orgánicos. Esto se logra por medio de la adsorción de estos elementos por minerales naturales, obteniendo como resultado un fertilizante granulado de fosfatos cuyo costo de producción es muy bajo. Asimismo, su sistema cuenta con un proceso integrado de plantas de digestión anaerobia para el tratamiento del agua de proceso del reactor de HTC; el propósito del biogás obtenido es satisfacer la demanda de energía térmica del proceso de HTC.

La tecnología de TerraNova Ultra puede implementarse con el fin de:

- producir biocarbón mediante el tratamiento de lodos con HTC
- reducir la cantidad de lodos mediante su tecnología de secado inteligente
- consumir 80% menos energía que las tecnologías convencionales de secadores térmicos
- recuperar fósforo

Actualmente cuenta con los siguientes proyectos:

- Kaiserslautern - Planta de tratamiento de aguas residuales de Kaiserslautern, Alemania
- Jining - Planta de tratamiento de lodos residuales para la producción de biocarbón en Jining, China. Capacidad: tratamiento de 40,000 toneladas de lodos al año.
- Carbowert - Planta demostrativa de tratamiento de aguas residuales y producción de biocarbón para mejoramiento de suelos y captura de carbono en Düsseldorf, Alemania.
- Maribor - Planta de tratamiento de lodos residuales en Maribor, Eslovenia.

SoMax BioEnergy (SoMax BioEnergy, 2017)

Es una empresa estadounidense que utiliza la tecnología de HTC para el tratamiento de residuos orgánicos dentro de la industria agrícola, de manufactura y de saneamiento, y su transformación en distintos productos por medio de un sistema llamado Plataforma de Reducción de Carbono.

El biocarbón producido puede utilizarse como mejorador de suelos, como material para filtración de agua o como materia prima (biocombustible) para producción de energía; también puede pasar por un proceso posterior para producir carbón activado. Como parte del proceso que se lleva a cabo en la Plataforma de Reducción de Carbono se produce agua tras la deshidratación de la biomasa inicial; este subproducto líquido puede ser utilizado directamente como fertilizante o para recuperación de nitrógeno y fósforo.

Recientemente finalizaron la construcción de su primera planta piloto para procesar agua de una planta de tratamiento en Filadelfia, Estados Unidos.

AVA Biochem (AVA-CO2, 2013)

Es una empresa suiza que ofrece soluciones para la conversión de biomasa y residuos en una fuente sustentable de energía por medio de HTC para la producción de biocombustible sólido (biocarbón). En 2010, la empresa puso en operación la primera planta demostrativa a escala industrial en Karlsruhe, Alemania; en 2012 se comisionó la primera planta comercial industrial de HTC para la producción de biocarbón con un balance neutro de CO₂ en Relzow, Alemania, en colaboración con la empresa HTCycle.

Entre las materias primas que han utilizado con su tecnología se encuentran los lodos residuales, residuos orgánicos domésticos, residuos de poda y jardinería y residuos de la industria agrícola.

Suncoal (SunCoal Industries, 2020)

Es una empresa alemana dedicada al desarrollo y comercialización de tecnologías de tratamiento hidrotermal para la producción de diferentes tipos de carbón, síntesis de productos químicos y biocombustibles. Después del proceso de HTC, integra un proceso para la gasificación del biocarbón obtenido para la producción de biogás. Asimismo, ofrece soluciones para la deshidratación de lodos orgánicos.

Entre sus productos se pueden destacar los siguientes:

- Carbón técnico: utilizado para la fabricación de filtros en hules, termoplásticos, etc.
- Carbón activado: aplicaciones para tratamiento de agua o para captura de gases.
- Carbón especializado: utilizado para nanomateriales basados en carbono o para la producción de supercapacitores.
- Productos químicos: producción de furfural y de 5-HMF/FDCA
- Biocombustibles: pellets de biocarbón (sustituto de carbón mineral) y polvo de biocarbón para uso en sistemas de gasificación.

- Tortas de filtración: a partir de la deshidratación y tratamiento de lodos residuales, adecuadas para combustión en plantas de energía.

HTCycle (HTCycle, 2020)

Es una empresa alemana que desarrolla tecnología de HTC con enfoque en la disposición de residuos. Su tecnología permite tratar lodos residuales y distintos tipos de biomasa y residuos para transformarlos en productos de alto valor, como biocombustibles, carbón activado para tratamiento de agua, materiales para mejoramiento de suelos y recuperación de casi 100% de fósforo. Sus procesos buscan el desarrollo de un nuevo mercado basado en la economía circular por medio de la revalorización de residuos.

En 2010 abrió una planta de HTC a escala industrial (una de las primeras en el mundo) y en 2017 abrió su segunda planta, en Relzow, como parte del proyecto BioBoost, desarrollado en colaboración con AVA CO2. Actualmente, uno de sus principales proyectos es el que desarrollan con la Unión Europea con el fin de demostrar y comercializar la tecnología de HTC para uso principalmente con lodos residuales como materia prima para convertir su disposición en una actividad económicamente atractiva.

Ingelia (Ingelia, 2019)

Es una empresa española que ha desarrollado tecnología de HTC desde 2005 para el tratamiento de diversos tipos de biomasa. Los principales productos que obtienen con su proceso son pellets de biocarbón (combustible sólido o acondicionador de suelos) y fertilizante proveniente de la fracción líquida.

En 2010 abrió la primera planta a escala industrial en Valencia, España, capaz de procesar actualmente 14,000 toneladas de residuos orgánicos al año. Posteriormente desarrolló el proyecto de NEWAPP con el fin de demostrar la eficiencia de esta tecnología para procesar y valorizar de forma industrial los residuos orgánicos y lodos residuales y transformarlos en biocombustibles sólidos y fertilizantes líquidos.

En la Tabla 49 a continuación se presenta una síntesis de la industria de HTC.

Tabla 49. Características de las empresas de HTC en el mundo

Empresa	No. de plantas en operación	Capacidades de procesamiento	Materias primas utilizadas	Productos obtenidos	Tipo de proceso
<i>C-Green</i>	1. Finlandia	16,000 t _{biomasa} /año	Aguas residuales, lodos industriales y casi cualquier tipo de biomasa	- Biocarbón	Continuo
<i>Antaco</i>	1. Planta piloto, Reino Unido	-	Lodos industriales, aguas residuales, cualquier tipo de biomasa (residuos agroforestales e industriales)	- Pellets de biocarbón - Carbón activado - Sustrato para acondicionamiento de suelos	Continuo
<i>TerraNova</i>	1. Kaiserslautern, Alemania 2. Jining, China 3. Carbowert, Alemania 4. Maribor, Eslovenia	- 40,000 t _{lodos} /año - 13,000 t _{lodos} /año	Aguas residuales, lodos residuales	- Pellets de biocarbón - Fertilizantes orgánicos (recuperación de nitrógeno y fósforo)	Continuo
<i>SoMax BioEnergy</i>	1. Planta piloto, Filadelfia, EUA	-	Residuos orgánicos de industria agrícola, de manufactura y de saneamiento	- Sustrato para acondicionamiento de suelos - Carbón activado - Pellets de biocarbón - Fertilizante líquido - Recuperación de nitrógeno y fósforo	-
<i>AVA CO2</i>	1. Karlsruhe, Alemania 2. Relzow, Alemania	- 8,000 t _{biomasa} /año ~ 2,664 t _{biocarbón} /año	Lodos residuales, residuos orgánicos domésticos, residuos de poda y jardinería y residuos de la industria agrícola	- Pellets de biocarbón	Lote
<i>SunCoal</i>	1. Königs Wusterhausen, Alemania	60,000 t _{biomasa} /año ~ 20,000 t _{biocarbón} /año	Residuos de industria agrícola, residuos orgánicos domésticos, residuos de poda, azúcares, lodos industriales y aguas residuales	- Pellets de biocarbón - Carbón activado - Carbones técnicos - Carbones especializados - Tortas de filtración - Biogás - Productos químicos (furfural)	Continuo
<i>HTCycle</i>	1. Karlsruhe, Alemania 2. Relzow, Alemania	- 8,000 t _{biomasa} /año ~ 2,664 t _{biocarbón} /año	Lodos residuales, diferentes tipos de residuos orgánicos, biomasa	- Pellets de biocarbón - Carbón activado - Sustrato para acondicionamiento de suelos - Recuperación de fósforo	-
<i>Ingelia</i>	1. Valencia, España	14,000 t _{residuos} /año	Residuos orgánicos domésticos, lodos residuales, residuos agroforestales, residuos de industria agroalimentaria	- Pellets de biocarbón - Fertilizante líquido	Continuo

5.4.5 Aprobación de proyecto

Con base en la investigación realizada, el gobierno de la ciudad aprobó el proyecto de valorización energética de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México mediante carbonización hidrotermal.

Tras la construcción y operación de la primera etapa del proyecto (procesamiento de 50 t/d de FORSU) se evaluará el potencial de la tecnología de carbonización hidrotermal para su posterior escalamiento al manejo de toda la FORSU que llega a la planta de composta. Específicamente, se plantea evaluar un segundo escenario del proyecto donde se puedan procesar 384 t/día por medio de 16 módulos de HTC con una capacidad de producción anual de 45,000 t/año de hidrocarbón. El tercero y último escenario a evaluar comprende el procesamiento de la totalidad de residuos de la planta de composta: 1,250 t/día a procesar en 52 módulos de HTC, con lo que la planta tendría una capacidad de producción anual de 140,000 t/año de hidrocarbón.

6. Conclusiones

6.1 Sargazo

Las arribazones y acumulaciones masivas de sargazo que han ocurrido en los últimos años en las costas del Caribe mexicano representan una amenaza tanto ecológica como económica que debe atacarse a gran escala durante cada temporada. Los análisis y la investigación realizados demuestran claramente que el sargazo es una materia prima difícilmente aprovechable con sistemas convencionales de transformación de biomasa debido a su alto contenido de humedad y cenizas. Sin embargo, su tratamiento por medio de carbonización hidrotermal puede ser una opción viable y conveniente para resolver esta problemática. Aunque el uso de HTC para el tratamiento de sargazo aún pueda suponer ciertas dificultades y desafíos tecnológicos, es una opción prometedora que permitiría no solamente resolver el problema de acumulación, sino también obtener un producto útil fácilmente utilizable en sistemas existentes de generación de energía en el país.

Asimismo, la matriz de evaluación de propuestas tecnológicas para el aprovechamiento energético del sargazo es una herramienta útil que permite visualizar, de forma simultánea y cuantitativa, las características clave de los distintos procesos y sistemas que se propongan. Esto permite comparar entre sí a las diferentes alternativas e identificar objetivamente las características más (o menos) convenientes de cada una de ellas para el fin determinado.

6.2 FORSU Ciudad de México

La investigación realizada permitió obtener una validación muy completa de la tecnología de carbonización hidrotermal, conocer sus características, limitaciones y ventajas y estado actual tanto de la tecnología como de la industria.

Tras analizar las características y parámetros de operación del proceso de HTC, se concluye que es un método adecuado para procesar los residuos orgánicos que se producen en la ciudad, ya que es apto para tratar eficientemente materias primas con alto contenido de humedad. Asimismo, las propiedades del hidrocarbón reportadas en la literatura cumplen con las especificaciones mínimas de la CFE para el carbón mineral que actualmente compran, por lo que el proceso parece ser una opción favorable para reemplazar dicho combustible fósil.

Así, fue posible formular una propuesta para la valorización energética de FORSU de la Ciudad de México tomando en cuenta todos los elementos necesarios: el pretratamiento previo de la materia prima, la alimentación térmica y energética necesarias para el proceso, las condiciones de operación, el tratamiento y disposición de los residuos y el postratamiento del hidrocarbón.

Aunque la propuesta necesariamente deberá sufrir ajustes a lo largo del desarrollo del proyecto en cuanto a diseño, parámetros de operación y acoplamiento de procesos, entre otros, la opción preliminar presentada parece ser una alternativa prometedora para aprovechar de forma integral los

residuos orgánicos generados en la ciudad y que, además, tendría un flujo mínimo de residuos. Ello permitirá dar solución a parte del importante problema de gestión de los residuos sólidos urbanos, al tiempo que se produce un biocombustible de alto valor capaz de sustituir —al menos parcialmente— el carbón mineral que se utiliza en algunas plantas del país para la generación de electricidad.

6.3 Conclusiones generales

En la actualidad, más del 80% del consumo de energía primaria a nivel mundial se basa en combustibles fósiles, lo que ha ocasionado numerosos efectos adversos al medio ambiente, como las altas emisiones de gases de efecto invernadero causantes del calentamiento global. Por ello, se han buscado fuentes alternativas de energía no solamente para mitigar dichos efectos, sino también para tener opciones renovables, ya que el suministro energético y las reservas limitadas de combustibles fósiles son una problemática que ha cobrado creciente interés dadas las perspectivas a futuro. [1,5]

La biomasa es una de las fuentes de energía renovable con mayor potencial y más abundantes del mundo y, además, la única fuente alternativa de carbono. Por lo tanto, puede ser un elemento clave en la transición de la economía actual basada en combustibles fósiles a una de bajas emisiones de carbono basada en biocombustibles y energías renovables. En este contexto, será importante no solo aumentar el uso de biomasa como materia prima, sino también aprovechar los flujos de residuos domésticos e industriales.

La carbonización hidrotermal es una tecnología que permite utilizar de forma eficiente la biomasa y otros tipos de materias primas residuales con altos contenidos de humedad que serían difícilmente aprovechables de forma directa o con otros métodos. Este proceso permite obtener un producto sólido susceptible de ser utilizado con fines energéticos utilizando la infraestructura ya existente, o bien para la fabricación de distintos productos para acondicionamiento de suelos, captura de carbono y el filtrado de agua y aire, entre otros. Así, la HTC abre nuevas alternativas de mercado para el aprovechamiento de la biomasa y representa una solución que puede ser determinante para lograr los objetivos globales de mitigación del cambio climático y seguridad energética.

Referencias

- Antaco. (2020). *Converting Organic Waste into Energy*. Recuperado de <https://www.antaco.co.uk/> (Abril 2020)
- AVA-CO2. (2013). *Energy of the Future*. Recuperado de www.ava.co2.com (Mayo 2020)
- Badescu, V. (Ed.). (2019). *Power engineering: Advances and challenges. Part A: Thermal, Hydro and Nuclear Power*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Baker, E. (2018). *The Spread of Sargassum Seaweed*. Recuperado de <http://grid-arendal.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=f616ec1db45f4e898970bd448b190f50> (Enero 2020)
- Basso, D., Weiss-Hortala, E., Patuzzi, F., Castello, D., Baratieri, M. y Fiori, L. (2015). Hydrothermal carbonization of off-specification compost: a byproduct of the organic municipal solid waste treatment. *Bioresource technology*, 182, 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.118>
- Benavente, V., Calabuig, E. y Fullana, A. (2015). Upgrading of Moist Agro-Industrial Wastes by Hydrothermal Carbonization. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 113, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.11.004>
- Binod, P., Pandey, A., Negi, S. y Larroche, C. (2015). Pretreatment of Biomass: Process and Technologies. En *Pretreatment of Biomass*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800080-9.00001-3>
- Brian Dunbar. (2012). *Technology Readiness Level*. Recuperado de https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html (Noviembre 2019)
- Buttman, M. (2018). *Industrial scale plant for sewage sludge treatment by Hydrothermal Carbonization in Jining/China and Phosphate Recovery by Terranova Ultra HTC Process*. Recuperado de <https://terranova-energy.com/en/project/process/> (Diciembre 2019)
- Campuzano, R. y González-Martínez, S. (2016). Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review. *Waste management (New York, N.Y.)*, 54, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.016>
- CEC. (2011). *North American Power Plant Air Emissions*. Recuperado de <http://www.cec.org/files/documents/publications/10236-north-american-power-plant-air-emissions-en.pdf> (Mayo 2022)
- C-Green Technology AB. (2019). *Hydrothermal Carbonization: Towards industrial implementation of HTC treatment of biosludge*. Recuperado de <https://www.c-green.se/> (Febrero 2020)
- C-Green Technology AB. (2020). *The smart way to recycle wet waste into biocoal and biogas*. Recuperado de <https://www.c-green.se/> (Febrero 2020)
- DOF (1989). *Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad de Aguas CE-CCA-001/89*, (). Ciudad de México, México.
- DOF (2004). *Norma Oficial Mexicana NOM-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras*

- complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial*, (). Ciudad de México, México.
- Durán, A., Garcés, M., Velasco, A., Marín, J. C., Gutiérrez, R., Moreno, A. y Delgadillo, N. (2013). Mexico City's municipal solid waste characteristic and composition analysis. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(1), 39–46.
- El diario MX. (2019). *Cancún en alerta roja por "ataque" de sargazo*. Recuperado de http://diario.mx/Nacional/2018-07-28_f16bf697/cancun-en-alerta-roja-por-ataque-de-sargazo/ (Diciembre 2019)
- Elliott, D. C., Biller, P., Ross, A. B., Schmidt, A. J. y Jones, S. B. (2015). Hydrothermal liquefaction of biomass: developments from batch to continuous process. *Bioresource technology*, 178, 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.132>
- Erlach, B., Harder, B. y Tsatsaronis, G. (2012). Combined hydrothermal carbonization and gasification of biomass with carbon capture. *Energy*, 45(1), 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.057>
- Erlach, B. (2014). Biomass upgrading technologies for carbon-neutral and carbon-negative electricity generation: Techno-economic analysis of hydrothermal carbonization and comparison with wood pelletizing, torrefaction and anaerobic digestion. Technische Universität Berlin, Berlin, Alemania.
- Espinosa Lloréns, María del Carmen, López Torres, Matilde, Pellón Arrechea, Alexis, ... Alejandro. (2007). La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos como fuente potencial de producción de biogás. *Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CENIC) Ciencias Biológicas*, 38(1), 33–37.
- Fogarty, P. (2018). The seaweed deluge hitting Caribbean shores. *BBC News*. Recuperado de <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-45044513>
- Frank, E. D., Elgowainy, A., Han, J. y Wang, Z. (2013). Life cycle comparison of hydrothermal liquefaction and lipid extraction pathways to renewable diesel from algae. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(1), 137–158. <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9395-1>
- Gobierno de México. (2015). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2015*. México.
- Gobierno de México. (2019). *Balance Nacional de Energía 2018*. México.
- Goepel y Klaus, D. (2013). AHP Excel Template with multiple Inputs.
- Gollakota, A.R.K., Kishore, N. y Gu, S. (2018). A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1378–1392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.178>
- Hitzl, M., Hernandez, M. y Ponce, E. (2016). *Prueba de Carbonización Hidrotermal con Bio-Residuos*. Valencia, España.
- HTCycle. (2020). *HTCycle Technology: Best solution for waste disposal*. Recuperado de <https://htcycle.ag/en> (Marzo 2020)
- Ingelia. (2016). *Pruebas Realizadas en la Planta HTC*. Valencia, España. (Marzo 2020)
- Ingelia. (2019). *La planta HTC patentada por Ingelia*. Recuperado de ingelia.com (Marzo 2020)

- Klinghoffer, N. B. y Castaldi, M. J. (2013). *Waste to energy conversion technology*. Woodhead Publishing series in energy: number 40. Oxford, Philadelphia: Woodhead Publishing.
- Komilis, D., Evangelou, A., Giannakis, G. y Lymperis, C. (2012). Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. *Waste management (New York, N.Y.)*, 32(3), 372–381. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.034>
- Kruse, A. (2009). Hydrothermal biomass gasification. *The Journal of Supercritical Fluids*, 47(3), 391–399. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.10.009>
- Lucian, M. y Fiori, L. (2017). Hydrothermal Carbonization of Waste Biomass: Process Design, Modeling, Energy Efficiency and Cost Analysis. *Energies*, 10(2), 211. <https://doi.org/10.3390/en10020211>
- Lucian, M., Merzari, F. y Fiori, L. (2017). *Biochar production through hydrothermal carbonization: Energy efficiency and cost analysis of an industrial-scale plant*.
- Mena, P. de, Doyle, L., Renz, M. y Salimbeni, A. (2016). *Industrial Scale Hydrothermal Carbonization: new applications for wet biomass waste* (De Mena, P.; Doyle, L.; Renz, M; Salimbeni, A.). Alemania.
- Merzari, F., Lucian, M., Volpe, M., Andreottola, G. y Fiori, L. (2018). Hydrothermal Carbonization of Biomass: Design of a Bench- Scale Reactor for Evaluating the Heat of Reaction. *Chemical Engineering Transactions*, 65, 43–48. <https://doi.org/10.3303/CET1865008>
- Milledge, J. y Harvey, P. (2016). Golden Tides: Problem or Golden Opportunity? The Valorisation of Sargassum from Beach Inundations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(3), 60. <https://doi.org/10.3390/jmse4030060>
- Nava, D. (9 de abril de 2019). Glencore gana contrato por 520 mdd para venderle carbón a la CFE. *El Financiero*. Recuperado de <https://www.elfinanciero.com.mx/economia/glencore-gana-contrato-por-520-mdd-para-venderle-carbon-a-la-cfe>
- Nizamuddin, S., Baloch, H. A., Griffin, G. J., Mubarak, N. M., Bhutto, A. W., Abro, R., ... Ali, B. S. (2017). An overview of effect of process parameters on hydrothermal carbonization of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1289–1299. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.122>
- Nordahl, S. L., Devkota, J. P., Amirebrahimi, J., Smith, S. J., Breunig, H. M., Preble, C. V., ... Scown, C. D. (2020). Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions and Human Health Trade-Offs of Organic Waste Management Strategies. *Environmental science & technology*, 54(15), 9200–9209. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00364>
- Olusola, A., Freeman, N. y Mbohwa, C. (2016). Utilization of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW) as Compost: A Case Study of Florida, South Africa. *World Congress on Engineering and Computer Science*, 2.
- Optical Oceanography Laboratory. (2020). *Satellite-based Sargassum Watch System (SaWS)*. Recuperado de <https://optics.marine.usf.edu/projects/saws.html> (Junio 2020)
- Orfield, N. D., Fang, A. J., Valdez, P. J., Nelson, M. C., Savage, P. E., Lin, X. N. y Keoleian, G. A. (2014). Life Cycle Design of an Algal Biorefinery Featuring Hydrothermal Liquefaction: Effect of Reaction Conditions and an Alternative Pathway Including Microbial Regrowth. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(4), 867–874. <https://doi.org/10.1021/sc4004983>

- Owsianiak, M., Ryberg, M. W., Renz, M., Hitzl, M. y Hauschild, M. Z. (2016). Environmental Performance of Hydrothermal Carbonization of Four Wet Biomass Waste Streams at Industry-Relevant Scales. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(12), 6783–6791. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01732>
- Oyesiku, O. O. y Egunyomi, A. (2014). Identification and chemical studies of pelagic masses of *Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillon and *S. fluitans* (Borgessen) Borgesen (brown algae), found offshore in Ondo State, Nigeria. *African Journal of Biotechnology*, 13(10), 1188–1193. <https://doi.org/10.5897/AJB2013.12335>
- Pandey, A., Bashkar, T., Stöcker, M. y Sukumaran, R. K. (2015). *Recent advances in thermochemical conversion of biomass*. Amsterdam: Elsevier. Recuperado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=614162>
- Paritosh, K., Yadav, M., Mathur, S., Balan, V., Liao, W., Pareek, N. y Vivekanand, V. (2018). Organic Fraction of Municipal Solid Waste: Overview of Treatment Methodologies to Enhance Anaerobic Biodegradability. *Frontiers in Energy Research*, 6, 8631. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2018.00075>
- Pecorini, I., Rossi, E. y Iannelli, R. (2020). Bromatological, Proximate and Ultimate Analysis of OFMSW for Different Seasons and Collection Systems. *Sustainability*, 12(7), 2639. <https://doi.org/10.3390/su12072639>
- Reforma (10 de abril de 2019). Arrasa Glencore en licitación de carbón. *Reforma*. Recuperado de https://www.reforma.com/aplicacioneslibre/preacceso/articulo/default.aspx?__rval=1&urlredirect=https://www.reforma.com/arrasa-glencore-en-licitacion-de-carbon/ar1651324?v=2&referer=-7d616165662f3a3a6262623b727a7a7279703b767a783a--
- Riviera Maya News (2018). Cancun hardest hit by arrival of endless seaweed. Cancun, Q.R.: Riviera Maya News. Recuperado de <https://www.riviera-maya-news.com/cancun-hardest-hit-by-arrival-of-endless-seaweed/2018.html>
- Ryan Schuessler. (2018). *The Eastern Caribbean Is Swamped by a Surge of Seaweed*. Recuperado de <https://www.hakaimagazine.com/news/the-eastern-caribbean-is-swamped-by-a-surge-of-seaweed/> (Marzo 2020)
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process - what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9, 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Secretaría de Energía. (2018). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032*. México.
- SEMARNAT. (2018a). *Inventario de Residuos Sólidos de la Ciudad de México 2018*. México.
- SEMARNAT. (2018b). *México: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015*. Ciudad de México, México.
- SEMARNAT. (2019). *Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial: Introducción al tema de manejo de residuos*. Recuperado de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-y-de-manejo-especial> (Junio 2020)
- SoMax BioEnergy. (2017). *The future of sanitation: Elevating and simplifying waste to energy methods for everyone*. Recuperado de <https://www.somaxbioenergy.com/> (Abril 2020)

- Stemann, J., Erlach, B. y Ziegler, F. (2013). Hydrothermal Carbonisation of Empty Palm Oil Fruit Bunches: Laboratory Trials, Plant Simulation, Carbon Avoidance, and Economic Feasibility. *Waste and Biomass Valorization*, 4(3), 441–454. <https://doi.org/10.1007/s12649-012-9190-y>
- SunCoal Industries. (2020). *High-value carbons from biomass*. Recuperado de <https://www.suncoal.com/> (Febrero 2020)
- Tekin, K., Karagöz, S. y Bektaş, S. (2014). A review of hydrothermal biomass processing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 673–687. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.216>
- TerraNova Energy. (2019). *Hydrothermal Carbonization*. Recuperado de <https://terranova-energy.com/en/> (Abril 2020)
- Tradler, S. B., Mayr, S., Himmelsbach, M., Priewasser, R., Baumgartner, W. y Stadler, A. T. (2018). Hydrothermal carbonization as an all-inclusive process for food-waste conversion. *Bioresource Technology Reports*, 2, 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.04.009>
- Transparencia Mexicana. *Testimonio para el monitoreo de la Invitación Restringida No. CFE-0001-IRAAA-0001-2018 para la adquisición de carbón mineral térmico tipo 2 con destino a la Central Termoeléctrica Presidente Plutarco Elías Calles, convocado por la Comisión General de Electricidad*, Ciudad de México, México.
- Vázquez, P. y Mora, R. (2019). *Se adelanta la arribazón masiva de sargazo a playas de Quintana Roo*. Recuperado de <https://www.jornada.com.mx/2019/01/04/estados/023n1est#> (Diciembre 2019)
- Wallace, R.-B. (2009). El Carbón en México. *Economía Informa*, 359, 138–160.
- Zhai, Y., Peng, C., Xu, B., Wang, T., Li, C., Zeng, G. y Zhu, Y. (2017). Hydrothermal carbonisation of sewage sludge for char production with different waste biomass: Effects of reaction temperature and energy recycling. *Energy*, 127, 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.116>
- Zhang, J., Guangming, L., Wenzhi, H., Juwen, H. y Haochen Z. (2017). *Hydrothermal Carbonization (HTC) for Solid Recovery of Organic Fractions in Municipal Solid Waste (OFMSW)* (5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management). Shanghai, China.

7. Anexos

8.1 Anexo 1: Tablas de evaluación de tecnologías para procesar sargazo

Tabla 1 – Características del producto

Criterios		¿Cuál es más importante?	Escala
A	B	A o B	(1-9)
PCI	Residuos		

Tabla 2 – Personal de operación

Criterios		¿Cuál es más importante?	Escala
A	B	A o B	(1-9)
Personal necesario	Especialización del personal		

Tabla 3 – Aprovechamiento del producto

Criterios		¿Cuál es más importante?	Escala
A	B	A o B	(1-9)
Mercado potencial	Facilidad de aprovechamiento		
	Facilidad de almacenamiento		
Facilidad de aprovechamiento	Facilidad de almacenamiento		

Tabla 4 - Aspectos económicos

Criterios		¿Cuál es más importante?	Escala
A	B	A o B	(1-9)
CapEx inicial	OpEx		
	Valor de comercialización del producto		
	Volumen potencial de mercado		
	Flexibilidad		
OpEx	Valor de comercialización del producto		
	Volumen potencial de mercado		
	Flexibilidad		
Valor de comercialización del producto	Volumen potencial de mercado		
	Flexibilidad		
Volumen potencial de mercado	Flexibilidad		

Tabla 5 - Características del proceso

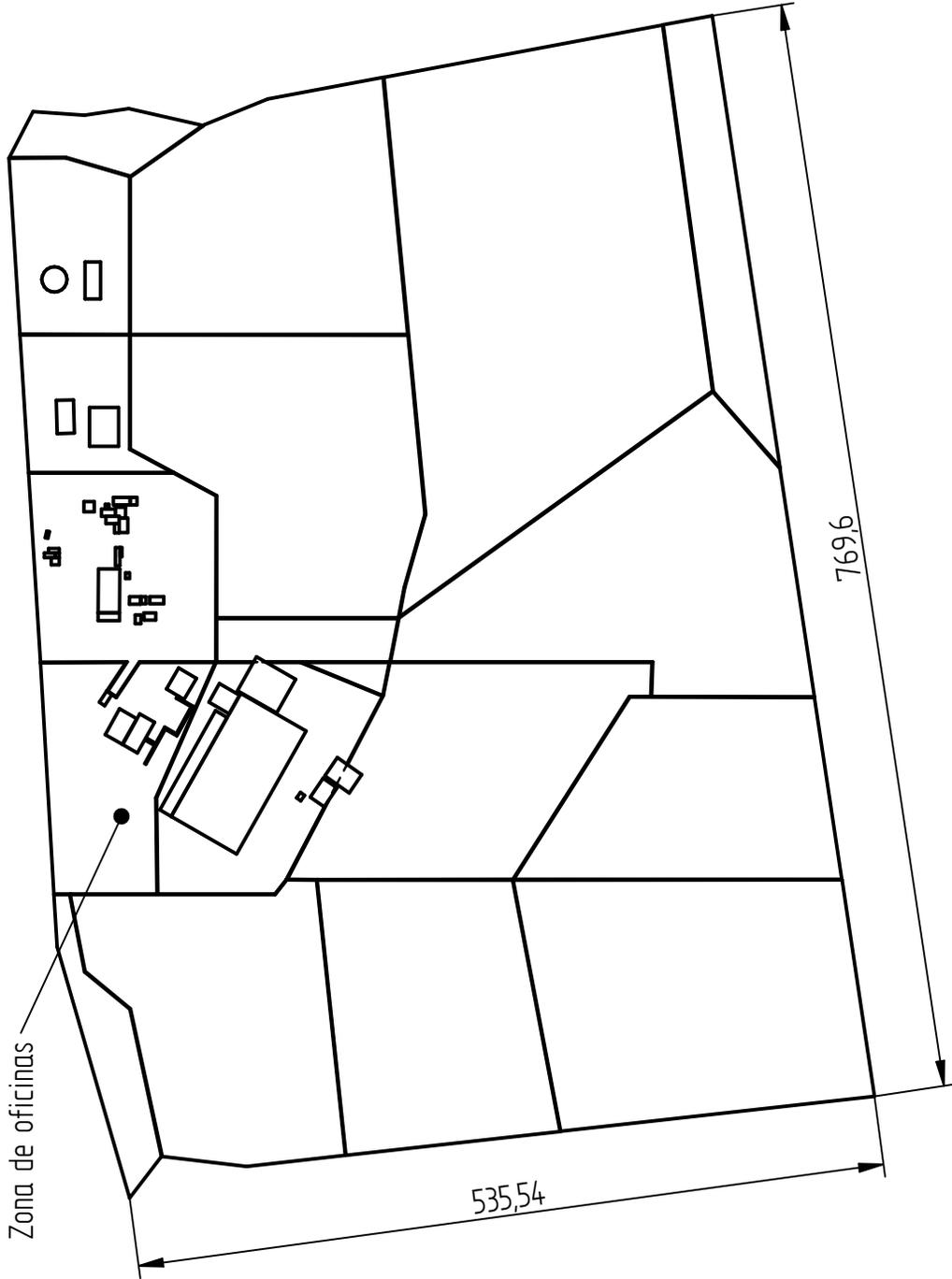
Criterios		¿Cuál es más importante?	Escala
A	B	A o B	(1-9)
Rendimiento energético	Madurez de la tecnología		
	Disponibilidad en el mercado		
	Capacidad de procesamiento		
	Superficie		
Madurez de la tecnología	Disponibilidad en el mercado		
	Capacidad de procesamiento		
	Superficie		
Disponibilidad en el mercado	Capacidad de procesamiento		
	Superficie		
Capacidad de procesamiento	Superficie		

Tabla 6 - Ponderación por bloques

Criterios		¿Cuál es más importante?	Escala
A	B	A o B	(1-9)
Características del producto	Personal de operación		
	Aprovechamiento del producto		
	Aspectos económicos		
	Características del proceso		
	Tiempo de implementación		
Personal de operación	Aprovechamiento del producto		
	Aspectos económicos		
	Características del proceso		
	Tiempo de implementación		
Aprovechamiento del producto	Aspectos económicos		
	Características del proceso		
	Tiempo de implementación		
Aspectos económicos	Características del proceso		
	Tiempo de implementación		
Características del proceso	Tiempo de implementación		

8.2 Plano de sitio de la planta de composta Bordo Poniente

AUTOPISTA PEÑÓN - TEXCOCO



A	7/11/19	PARA REVISIÓN	E. S. S.	D. C.
REVISIÓN	FECHA	DESCRIPCIÓN DE REVISIONES	REVISOR	REVISOR
	LUGAR	Planta de Composta de la CDMX, Bordo Poniente		
	PROYECTO	Planta de Carbonización Hidrotermal de FORSU		
	TÍTULO	Plano de Sitio		
carta		ALCOTACIONES	PLANO	HOJA
		ESCALA	1:5000	1
		REVISIÓN	A	1/1



INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM