



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE DIVERSAS ESTRATEGIAS
TECNOLÓGICAS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL SARGAZO QUE
ARRIBA AL CARIBE MEXICANO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

Sebastián Ríos Yunes



Ciudad Universitaria, CDMX, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: GRACIA FADRIQUE JESUS
VOCAL: Profesor: BARZANA GARCIA EDUARDO
SECRETARIO: Profesor: HERNANDEZ MELENDEZ OSCAR
1er. SUPLENTE: Profesora: GUINEA CORRES ELISA ELVIRA
2° SUPLENTE: Profesor: JANO ITO MARCO AURELIO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

EDIFICIO "H" MARIO MOLINA, FACULTAD DE QUÍMICA, CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX

ASESOR DEL TEMA:

DR. EDUARDO BÁRZANA GARCÍA

SUSTENTANTE:

SEBASTIÁN RÍOS YUNES

AGRADECIMIENTOS:

A mi mamá, no hay palabras para describir lo agradecido que estoy contigo, gracias por todo tu amor, enseñanzas y cariño, tanto en los momentos difíciles como en los más alegres, por ti es que soy el hombre que soy ahora, te amo mamá.

A mi papá, porque siempre has estado ahí para mí, para apoyarme a lograr mis sueños, ayudándome a mejorar día a día, siempre buscando como sacarme una sonrisa, compartiéndome tus consejos y sabiduría.

A mi hermana, por siempre brindarme tus consejos y por ser un tan impresionante ejemplo a seguir, sé que llegaras tan lejos que no te lo puedes ni imaginar. Este trabajo está dedicado a ustedes 3.

A mí, por todo el esfuerzo, dedicación y el no darme por vencido aún con tantas adversidades, las cuales al final del día, terminaron siendo enseñanzas.

A mis amigos, quienes siempre me brindaron su consejo y apoyo incondicional, con quienes pasé desde los momentos más difíciles hasta los más alegres en mi paso por la facultad, en especial a

Q. Diego Samuel Jiménez Cisneros

Q.A. Brian Axel Márquez Jácome

I.Q. Oscar Daniel Sandoval Arreola

A mi tutor de tesis el *Dr. Eduardo Bárzana García* quien siempre me apoyó, guió y dio consejo sobre temas variados, pero en especial, por toda su ayuda y paciencia, lo que nos permitió poder realizar este proyecto en una época tan compleja como la actual.

A mi tutor durante la carrera el *Ing. Carlos Galdeano Bienzobas* quien desde la primera vez que nos conocimos me trató como su colega, alguien que admiro y respeto, quien me impulso a lograr varios proyectos, los cuales además de marcar mi vida universitaria marcaron mi vida. Aunque ocupado, siempre se hizo tiempo para mí, nunca olvidare nuestras largas charlas, las cuales me brindaron guía a lo largo de toda la carrera y de las cuales aprendí mucho más allá de la Ing. Química.

A los **Dres.** Jesús Gracia y Oscar Hernández por sus comentarios y revisión del manuscrito.

A mi hermosa **Universidad Nacional Autónoma de México** mi Alma mater y a mi **Facultad de Química**, por todo el conocimiento, educación, vivencias, dificultades y alegrías que pude disfrutar aquí.

A la DGAPA-UNAM por el financiamiento del proyecto **PAPIIT No IT100919**.

To Masaryk University and all the international friends I made there, even though it was for a short time, you gave me some of the best memories and experiences in my life, you will always have a special place in my heart, I will always see a home in Vlnářská or wherever I happen to meet any of you.

En honor a mi amigo y colega, el

I.Q. Marco Antonio Torres Sparrowe

Porque para mí, tú y yo nos titulamos juntos.

Q.E.P.D

Índice de contenido

1 - Introducción.....	9
1.1 - ¿Qué es el sargazo?	9
1.2 - ¿De dónde viene el Sargazo?.....	12
1.3 - ¿Qué representan los arribazones?	15
2 - Composición del sargazo	19
2.1 Caracterización como materia prima	19
2.2 - Propuestas tecnológicas para el procesamiento del sargazo que arriba a las costas del caribe mexicano.	23
2.2.1 - Procesos Biológicos.....	26
2.2.2 - Procesos Químicos.....	34
2.3 - ¿Cuál sería la tecnología más viable?.....	45
2.2.1 - Después de la Carbonización hidrotermal ¿cuál sería el proceso térmico más viable?	46
2.2.2 - ¿Qué proceso biológico es el más viable?.....	47
3 - Proceso y equipos.	48
3.1 - Diagrama de flujo de proceso - DFP.	50
3.2 - Dimensionamiento.	51
4 - Análisis económico	54
4.1 - Estimación de costo por equipo.....	54
4.2 - Estimación del capital de inversión	58
4.3 - Estimación de ventas.....	63
4.4 - Análisis financiero	69
5 - Presencia de HTC y Gasificación en la actualidad.	72
5.1 - HTC	72
5.2 - Gasificación	74
6 - Conclusiones.....	75
7 - Glosario	77
8 - Referencias	78

Índice de ilustraciones

Ilustración 1-S.natans y S.fluitans ^[5]	10
Ilustración 2-S.natans y S.fluitans 2 ^[6]	11
Ilustración 3- Imágenes del MERIS: Océano atlántico central arriba 2010, abajo 2011, de izquierda a derecha mayo, julio y septiembre. ^[9]	13
Ilustración 4-Diversas zonas de sargazo. ^[10]	13
Ilustración 5-Área promedio cubierta en diversos periodos. ^[13]	14
Ilustración 6- Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico-GASB ^[13]	14
Ilustración 7-Áreas más afectadas de Q.Roo. ^[15]	16
Ilustración 8-Diagrama de flujo de proceso DFP, HTC (Arriba), Gasificación (Abajo).	50
Ilustración 9-Propuesta de área para localizar la planta ^[80]	60

Índice de Tablas

Tabla 1-Carbohidratos y compuestos orgánicos.	20
Tabla 2-Análisis fitoquímico cuantitativo.	20
Tabla 3-Análisis proximal Sargassum.	21
Tabla 4-Análisis proximal Sargassum (Continuación).	22
Tabla 5-Comparativo entre tecnologías.	42
Tabla 6-Comparativo entre tecnologías (Continuación).	43
Tabla 7-Costo en 2019 por equipo, total HTC, total Gasificación y total Conjunto.	57
Tabla 8-Capital de inversión planta HTC.	61
Tabla 9-Capital de inversión planta HTC-Gasificación.	62
Tabla 10-Estimación generación de hidrocarbón por el proceso HTC.	63
Tabla 11-Estimación generación energética por el proceso HTC-Gasificación.	63
Tabla 12-Precio Marginal Local promedio del valor mínimo, máximo y promedio de las zonas de Cancún y Riviera Maya.	64
Tabla 13-Relaciones PML y costos de hidrocarbón estimados.	65
Tabla 14-Escenario promedio HTC [MXN].	65
Tabla 15-Escenario promedio HTC-Gasificación.	66
Tabla 16-Flujos de utilidad neta HTC.....	68
Tabla 17-Flujos de utilidad neta HTC-Gasificación.....	68
Tabla 18-Flujos de efectivo HTC año 0-15.	70
Tabla 19-Flujos de efectivo HTC-Gasificación año 0-15.....	70
Tabla 20-Tabla comparativa con índices de evaluación de proyectos (Arriba) y Matriz de decisión (Abajo).	71

Resumen

El trabajo actual consiste en un análisis técnico y económico de diversas tecnologías posibles para el procesamiento de sargazo. Se buscó que, de todas estas, se obtenga el producto de mayor valor agregado. Para ello, se seleccionaron 6 tecnologías distintas, tres del tipo biológico y tres del tipo físico-químico. Las tres primeras fueron la fermentación alcohólica, la fermentación oscura y la digestión anaerobia. Las de tipo físico-químico fueron la pirólisis, la gasificación y la carbonización hidrotermal. Se analizaron los pros y contras de cada una de estas tecnologías y también se revisaron un par de experimentos reportados en la literatura con cada una de ellas y con el objeto de entender como deberían de ser los procedimientos para escalarlos. Con el cuadro comparativo entre las tecnologías se procedió a seleccionar aquellas que fueran más adecuadas para el escalamiento, donde se cuenta con sargazo recién recolectado como materia prima. Esta decisión dependió de numerosas variables, entre ellas, la humedad, el sitio de recolección y el producto principal, entre otras.

Una vez seleccionadas las tecnologías más adecuadas desde la perspectiva técnica, se procedió a hacer un análisis económico básico. Para esto, las dos tecnologías seleccionadas se analizaron en dos arreglos, uno donde solamente se tiene la tecnología seleccionada como más adecuada y el segundo con un proceso más robusto con ambas tecnologías en serie. Se planteó una ruta de proceso con los equipos principales los cuales fueron dimensionados en un primer rasero. Con ayuda de técnicas de estimación económica se les asignó un valor monetario. Con base en eso, se estimó un valor de capital total de inversión, enmarcado en tres escenarios posibles para ambos arreglos: precios de venta mínimos, máximos y promedio. Esta información sirvió para estimar los flujos de efectivo del proceso y una vez comparados permitieron determinar cuál era el más adecuado bajo un criterio económico y así

complementarlo con la viabilidad técnica para llevar a una propuesta de proceso final.

1 - Introducción

1.1 - ¿Qué es el sargazo?

El alga que llega al caribe mexicano es el "*Sargassum, Sp*" o "*Sargassum. Spp*" (nombre que se usa de manera indistinta), sin embargo, en este documento se usará "*Sargazo*" por ser su nombre común y trivial más conocido.

Esta es una macroalga parda pelágica^[1]; macroalga, ya que su intervalo de crecimiento cae dentro del rango de 1m hasta 100m ^[2]; parda, por su relación entre la fucoxantina (pigmento de color marrón) y la Clorofila (pigmento de color verde)^[2] donde el primero predomina; pelágica, porque su reproducción, vida y muerte se llevan a cabo en la superficie marina ^[3].

La mezcla de sargazo que llega a México está constituida por dos especies, "*Sargassum natans*" y "*Sargassum Fluitans*". Ambas especies son muy similares entre sí, al grado de ser fácilmente confundidas. Dentro de sus similitudes se encuentra su color, forma, método reproductivo de tipo vegetativo ^[4] (una parte fragmentada del alga crecerá para generar una nueva alga de manera totalmente asexual) y las vacuolas llenas de gas. Estas últimas les permiten flotar en la superficie marítima. Aun con las similitudes, para identificarlas se debe prestar atención en lo siguiente, el "S.Natans" en sus vacuolas de gas cuenta con una pequeña espina, sus láminas son angostas de talo largo y en los talos laterales no cuenta con espinas. Por otro lado, el "S.Fluitans" no cuenta con una espina en sus vacuolas de gas, tiene láminas lanceoladas con un talo corto y cuenta con espinas en los talos laterales ^[5,6]. (Il. 1 y 2, donde Il indica Ilustración)

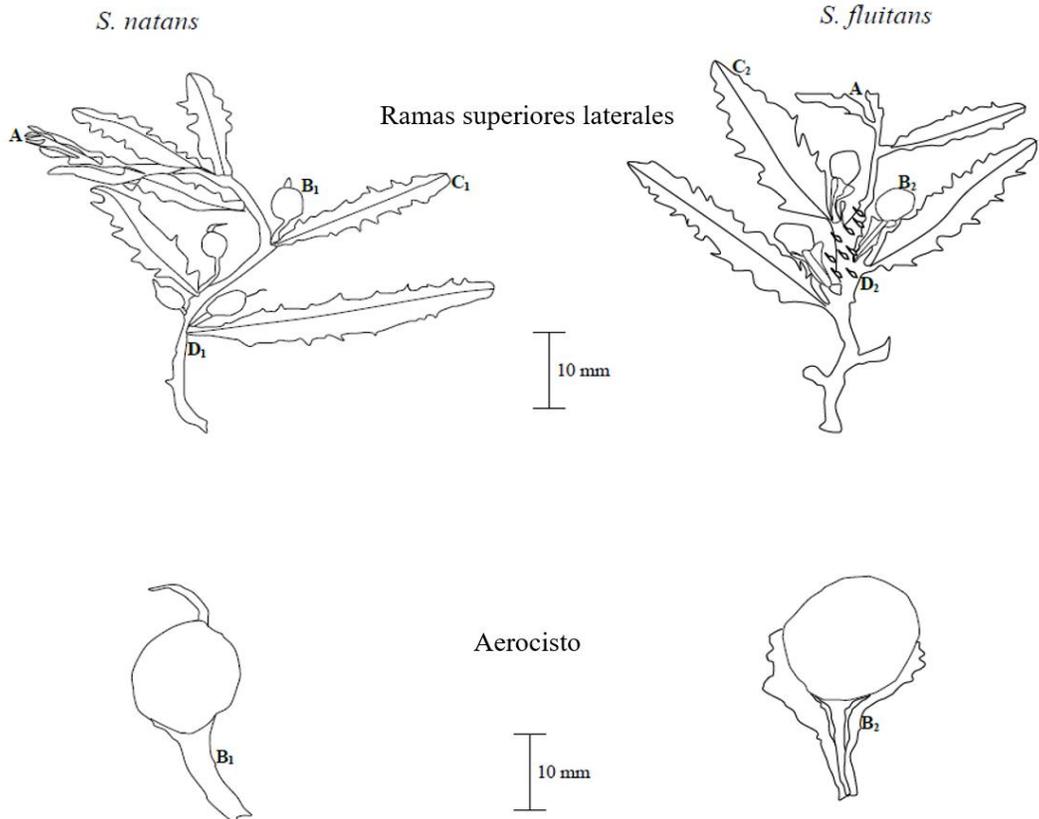


Ilustración 1-S.natans y S.fluitans^[5]

Sargassum natans: Alga de hoja estrecha (derecha) y
Sargassum fluitans: Alga de hoja ancha (izquierda)

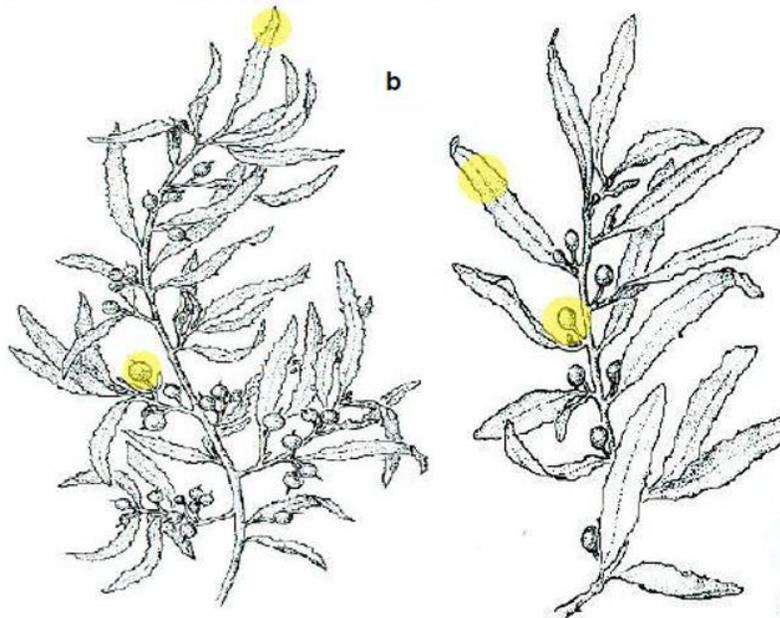


Ilustración 2-*S.natans* y *S.fluitans* 2 [6]

1.2 - ¿De dónde viene el Sargazo?

El primero en escribir sobre el tema fue Cristóbal Colón en 1492^[7], por lo que el sargazo no es algo “nuevo”. Anteriormente, solo se tenía identificado al “Mar de sargazo”, que se encuentra en la zona que rodea las islas Bahamas, específicamente en el giro subtropical del Atlántico Norte ^[8]. En el año 2011 con ayuda de imágenes satelitales del Espectrómetro de Imágenes de Resolución Media (MERIS; por sus siglas en inglés (Il.3)) de la agencia espacial europea, se encontró una masa de sargazo pelágico apodada como “El gran cinturón de sargazo del atlántico” (GASB; por sus siglas en inglés)^[13] en la zona noroeste de las costas de Brasil (Atlántico tropical occidental) cuyo tamaño fue 3 veces más grande que el récord reportado del mar de sargazos en el Atlántico Norte y Golfo de México ^[8](Il.4). El GASB se ha extendido desde las costas africanas de Sierra Leona y Ghana^[9] hasta las costas del Caribe y península de Yucatán (Il. 6) con un estimado de peso vivo para 2018 de 20 millones de toneladas métricas y una extensión de 8850 Km^[13]. En el periodo 2014-2015 el estudio “*Recent Sargassum Inundation Events in the Caribbean*” encontró que la concentración de sargazo en este periodo fue 10 veces mayor que la encontrada en el periodo de 2011 (Il.5), además, se encontró que el Mar de sargazo del atlántico norte no tuvo cambios significativos entre ambos periodos, por lo cual, basándose en la concentración de sargazo y la composición, se confirma que el Mar de sargazos del Atlántico norte no tiene conexión con las afectaciones del caribe; este sargazo, proviene del GASB, ubicado en el Atlántico tropical occidental^[10].

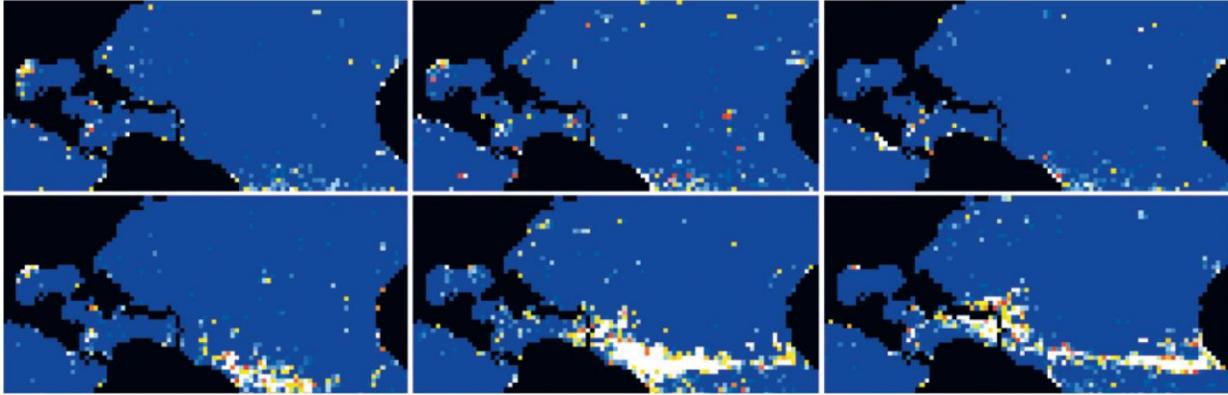


Ilustración 3- Imágenes del MERIS: Océano atlántico central arriba 2010, abajo 2011, de izquierda a derecha mayo, julio y septiembre.^[9]

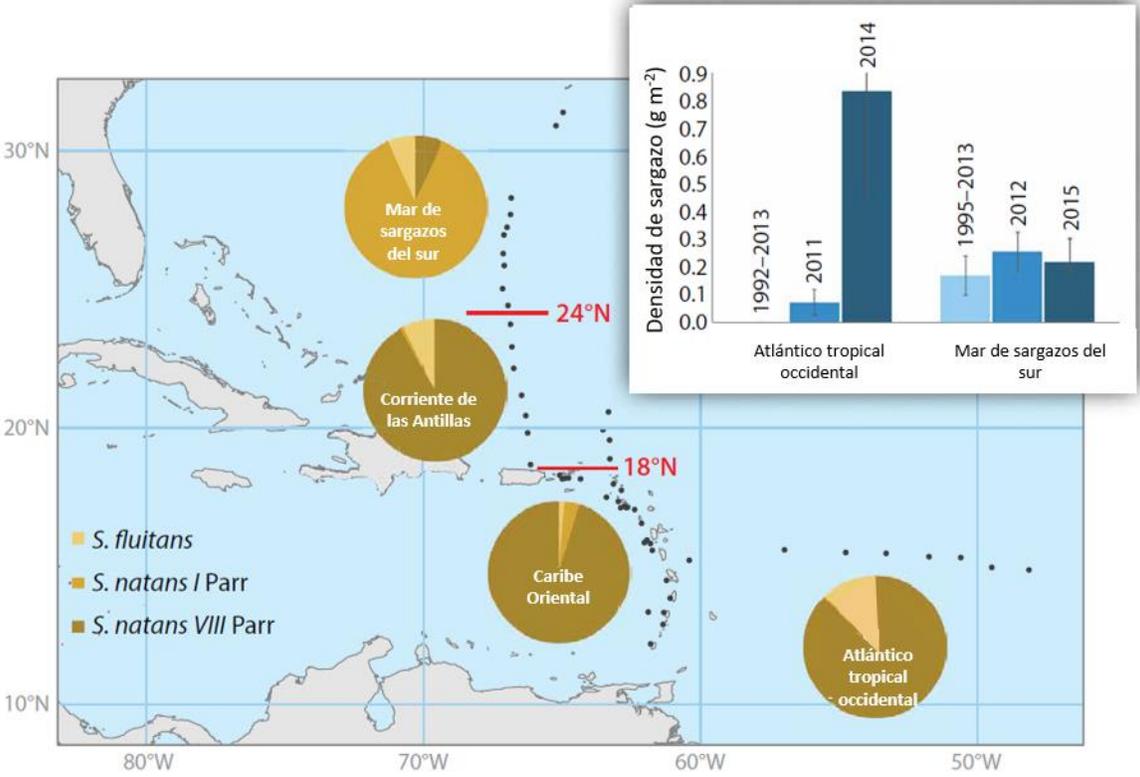


Ilustración 4-Diversas zonas de sargazo.^[10]



Ilustración 5-Área promedio cubierta en diversos periodos.^[13]

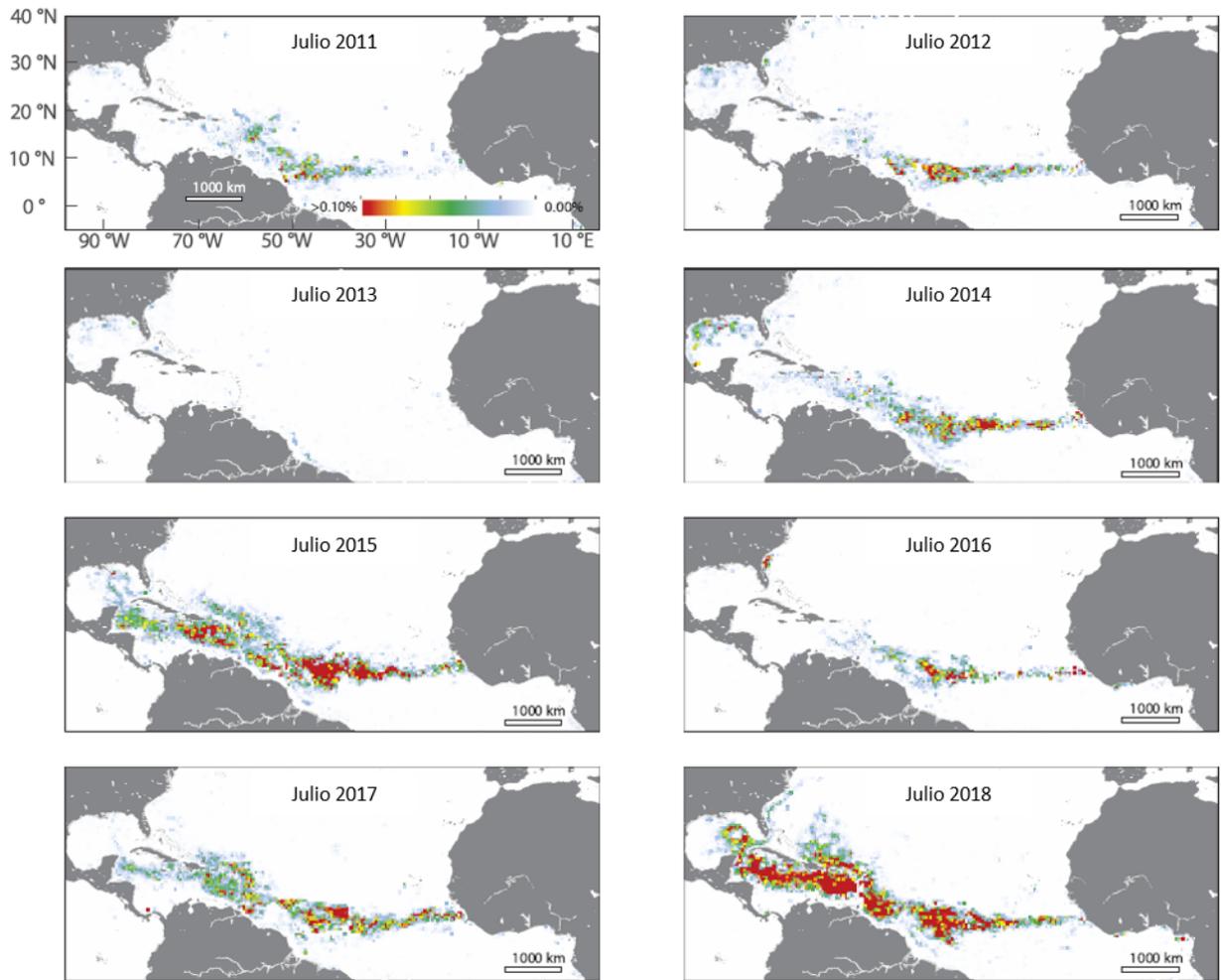


Ilustración 6- Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico-GASB^[13]

1.3 - ¿Qué representan los arribazones?

Con base en imágenes obtenidas con el Espectro-radiómetro de Resolución Moderada de la NASA (MODIS; por sus siglas en inglés), se vio que en 2014 entre los meses de **febrero y marzo** hubo una amplia proliferación de sargazo en la parte oriental del Atlántico Central. Subsecuentemente, por las corrientes de aire y las mareas ese sargazo se movió hacia el Mar del Caribe, teniendo un “segundo” periodo de proliferación en los meses de **mayo a agosto** del mismo año^[11]; En otro estudio de ese mismo año, se indicó que el arribazón de sargazo comenzó en verano de 2014 y terminó hasta el año 2015, con un pico máximo entre los meses de agosto-diciembre de este último^[1].

Al territorio mexicano han llegado grandes cantidades de sargazo. En 2015 se alcanzó un máximo de 2,360 m³ de alga por kilómetro de costa (m³/km) en la región entre la ciudad de Cancún y Puerto Morelos; se sabe que en el periodo de agosto-diciembre de ese mismo año se recibieron de manera mensual aproximadamente de 6.6 a 9.6x10³ m³/km de arribazón a Puerto Morelos ^[1]. En ese mismo año se hicieron esfuerzos para la remoción de esta alga, tanto por el gobierno como por la industria privada (Hotelera). Lo reportado por la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente fue un total de 71,353 m³ de sargazo removido. La industria privada por su parte, reportó un máximo de remoción de sargazo de 19,603 m³/km de playa. Aún con todos esos esfuerzos, no se removió ni el 10% de las playas del estado ^[1]. Acciones de remoción no han cesado en la actualidad; por ejemplo, en mayo de 2018 con una cantidad de 8,793m³/km^[12] se rebasó el récord histórico de 2015. Aunque la mayoría de las islas del caribe y ciertas costas del continente africano se ven afectadas por el GASB, este trabajo está centrado en aquellas que competen al territorio mexicano.

Con base en imágenes satelitales obtenidas del “Satellite-Based sargassum watch system- SaWS”(Il.7) utilizando el producto AFAI RRC (*Índice de Algas*

Flotantes Alternas en [unidades de reflectancia] para detectar características de la superficie del océano como el Sargassum, las macroalgas verdes y las cianobacterias-AFAI; por sus siglas en inglés) obtenido con el sensor satelital MODIS, y, con la distribución municipal del estado de Quintana Roo en 2018 (Mapa-Marco Geoestadístico, febrero 2018) se pudo apreciar que los municipios más afectados fueron: Benito Juárez, Puerto Morelos, Solidaridad, Tulum, Cozumel, Felipe Carrillo Puerto, Bacalar, Othón P. Blanco e Isla Mujeres; en menor medida el municipio de Lázaro Cárdenas; por último, José María Morelos que no se ve afectado de manera directa ya que no cuenta con salida al mar.

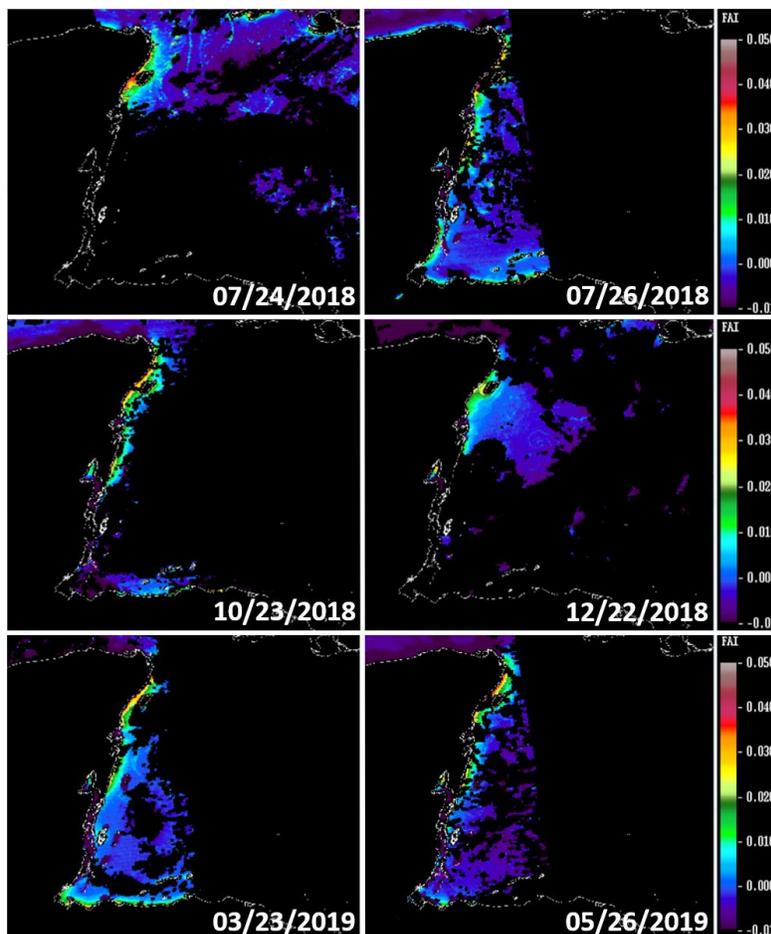


Ilustración 7-Áreas más afectadas de Q.Roo.^[15]

El sargazo presenta una gran cantidad de implicaciones desfavorables para la región de Quintana Roo y el país entero. Dentro de sus principales afectaciones se encuentran aquellas de carácter económico, ambiental y de salud pública.

Implicaciones económicas:

- Asignación de 60 millones de pesos en 2018 para mitigar la problemática, contratando maquinaria y 4,404 empleados para la remoción del sargazo en la playa ^[1].
- Cancelación de reservaciones en hoteles y disminución de comensales en los restaurantes cercanos a la costa debido a mala estética y olores desagradables^[3].
- Debido al H₂S que emite durante su descomposición, además del penetrante olor, se han reportado afectaciones a la salud, aparatos electrónicos y metales en general ^[3]
- Inversión por parte de la industria hotelera para la limpieza y remoción de sargazo de sus playas.
- Actividades ecoturísticas, como buceo, surf con vela, etc. se han visto seriamente afectadas ^[3].
- Problemas mecánicos y para maniobrar en la zona por parte de las embarcaciones de la industria pesquera, sus motores se atascan y sus tasas de captura disminuyen ^[3].
- Entre los meses de enero y mayo de 2019 se calcularon pérdidas de 12, 10 y 11 millones de dólares para las zonas turísticas de la Riviera Maya, Cancún y Puerto Morelos, respectivamente^[77].

Cabe destacar que la industria turística es la principal actividad económica de Quintana Roo (La cual contribuye fuertemente al PIB nacional) y que la industria pesquera es su segunda actividad económica más grande ^[1] por lo

cual, es posible notar que aun sin cuantificar, estos eventos suponen una gran pérdida económica no solo para el estado sino, para la nación.

Implicaciones ambientales:

- Se han encontrado gran cantidad de animales muertos entremezclados con el sargazo en descomposición (peces, tortugas, langostas, etc.)^[1].
- En un estudio realizado en 2018 se encontraron restos de 78 especies distintas de animales (peces 59%, crustáceos 28%, equinodermos 5%, moluscos el 4% y poliquetos un 4%)^[12].
- En 2018 hubo 5 casos de mortalidad en masa registrados (>100 individuos)^[12].
- Mortandad de pastos marinos, posiblemente por el bloqueo de la luz solar^[1].
- El sargazo al bloquear la luz solar no permite que las plantas del lecho marino lleven a cabo la fotosíntesis. A su vez aumenta la cantidad de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) en el medio, lo cual promueve zonas anoxias que bloquean los procesos aerobios de muchas especies [14].
- Eutrofización, genera turbidez en las aguas eliminando su característico color turquesa e induce cambios en los ecosistemas costeros [14].
- Tratamiento deficiente de los desechos generados (sargazo recolectado) pues éste se deposita en áreas tierra adentro. Los lixiviados contaminan los mantos acuíferos de la región que desembocan nutrientes en el mar y por consiguiente hay un mayor aumento en la cantidad de sargazo^[14].
- Mortandad de fauna y flora por ambientes hipóxicos y con agua de mala calidad^[12].
- Aumento en los niveles de amoníaco y fósforo durante su acumulación en las playas^[12].

- Presencia de iones sulfuro disueltos (S^{2-}) en el agua, el cual es tóxico para las especies aeróbicas aun en muy pequeñas concentraciones^[12].
- Erosión de las playas y destrucción de sitios de anidación de tortugas marinas^[14]. Esto se debe a la compactación de la arena por el uso de maquinarias para la remoción de sargazo^[1].
- Mortandad de corales ^[14].
- Acumulación de materia orgánica y crecimiento prolífico de epífitas ^[1].

Relacionado a la problemática de salud:

- La emisión de H_2S puede afectar a los seres humanos por su alto nivel de toxicidad, ya sea el que se encuentren en la playa o producido al remover el sargazo. Se han reportado casos de náuseas, dolores de cabeza, erupciones cutáneas y problemas para respirar ^[3].

2 - Composición del sargazo

2.1 Caracterización como materia prima

El sargazo se encuentra en diversos sitios de los océanos, por lo cual se entiende que su composición varíe. Algunos de los factores externos que tienen influencia son; la salinidad, las mareas, los nutrientes disueltos, la edad de las plantas, el tipo de tejido, su historial nutricional, la estructura geográfica del área ^[6], temperatura, luz, pH ^[16], entre otros. Debido a esto, la composición reportada en los diferentes artículos cambia de manera considerable, aunado a dichas diferencias, están los métodos de determinación y los compuestos a identificar de cada una de las investigaciones.

A continuación, se presentan tablas con diferentes datos de composición del sargazo, en ocasiones referido como Sargazo Sp (Sarg Sp.), Sargazo Spp

(Sarg Spp.), Alga café, Sargazo Natans (Sarg Nat.), Sargazo Fluitans (Sarg Flu.), o mezcla de ambos.

Tabla 1-Carbohidratos y compuestos orgánicos.

REFERENCIA	[4]	[17]	[18]
Muestra	Sarg Nat. y Flu. [Prom %]	Sarg Spp. [%]	Sarg Sp.
Lignina	15.6	/	/
Celulosa	31.2	/	/
Alfa Celulosa	/	20.35	22
Holo celulosa	/	46.08	41.6
Hemicelulosa	10.5	25.73	19.6
Manitol	/	5.04	/
Fenoles	18.7	/	/
Extraíble en solvente	3.1	/	/
Cenizas	35.5	/	/
Alginato	/	/	32.2

Tabla 2-Análisis fitoquímico cuantitativo.

REFERENCIA	[5]
Muestra	Sarg Nat. y Flu. [mg/100g]
Flavonoides	775
Saponinas	525
Taninos	122.5
Compuestos fenólicos	80
Alcaloides	77.5
Terpenoides	66.5
Glucósidos cardíacos	16.5

Tabla 3-Análisis proximal Sargassum.

REFERENCIA	[17]	[18]	[19]	[20]	[20]
Muestra	Sarg Spp. [%peso BH]	Sarg Sp. [%peso BH]	Alga café [%peso Promedio BS]	Sarg Nat [%peso BS]	Sarg Spp. [%peso BS]
Humedad	11.16	13.93	/	10.46	/
Cenizas	26.19	27.11	31	29.09	/
Fibra cruda	9.84	12.5	/	/	/
Proteína cruda	10.25	6.99	12	/	10.25
Lípidos crudos	0.75	/	1.7	/	0.74
Carbohidratos totales	41.81	/	55	/	41.81
Extracto de nitrógeno libre	/	51.43	/	/	/
Materia volátil	/	/	/	48.85	/
Carbono fijo	/	/	/	11.6	/
Extracto etéreo	/	/	/	/	/
Energía HHV [MJ/kg materia seca]	/	/	/	8.68	/

BH-Base húmeda BS-Base seca

Tabla 4-Análisis proximal *Sargassum* (Continuación).

Artículo	[5]	[21]	[22]	[22]
Muestra	Sarg Nat. y Flu. [%peso BH]	Sarg Spp [%peso BH]	Sarg Nat. n Flu. [%peso BS]	Sarg Nat [%peso BS]
Humedad	9	7.4	/	/
Cenizas	8.65	38.35	/	/
Fibra cruda	7.15	6.55	/	/
Proteína cruda (Nx6.25)	15.4	6.57	6.59	9.6
Lípidos crudos	2.5	1.93	0.54	1.39
Carbohidratos totales	57.3	/	76.43	63.97
Extracto de nitrógeno libre	/	40.08	/	/
Materia volátil	/	/	/	/
Carbono fijo	/	/	/	/
Extracto etéreo	/	1.05	/	/
Energía HHV [MJ/kg materia seca]	/	10.48	14.1	8.68

BH-Base húmeda BS-Base seca

Con base en la tabla anterior, se decidió utilizar la composición del sargazo reportado en la referencia “[5]”, que corresponde a una mezcla de Sargazo Natans y Sargazo Fluitans y presenta también el análisis más completo, tanto fitoquímico como proximal.

Es importante mencionar que el sargazo es considerado como una biomasa lignocelulósica, sin embargo, su reducido porcentaje de lignina ha llamado la atención de muchos científicos. En este sentido representa una ventaja ya que la complejidad estructural de la lignina, su alto peso molecular e insolubilidad en agua hacen que sea muy difícil de degradar^[86] La celulosa (en comparación a la lignina) por sus propiedades y características presenta menos retos para su aprovechamiento ^[87].

2.2 - Propuestas tecnológicas para el procesamiento del sargazo que arriba a las costas del caribe mexicano.

Actualmente existen una gran cantidad de procesos reportados para el tratamiento de diversos tipos de materia orgánica. Ejemplos de estos son: lodos de plantas de tratamiento de efluentes, residuos de la industria alimenticia, residuos de la industria de bebidas alcohólicas, el bagazo de agave en tequileras, el bagazo de caña de azúcar, las cáscaras de cítricos, residuos de la industria forestal, ramas de árboles (poda urbana), residuos domésticos, entre otros. En principio, estos procesos están direccionados a dos vertientes, una para la producción de energía, y la otra para la producción de precursores en síntesis de diversas sustancias químicas (que en la mayoría de los casos terminarán como combustible).

Algunos de los procesos aquí presentados tienen ciertas similitudes, por eso, es necesario tener cuidado en revisar las peculiaridades de cada uno, ya que esos cambios (que pueden parecer insignificantes) hacen que se obtengan

productos totalmente distintos. En ocasiones, cuando esas peculiaridades o variables no son controladas de manera adecuada se termina teniendo un proceso distinto al esperado.

La finalidad de cualquier proceso (al menos en la industria) es añadirle un valor agregado a una materia prima para poder generar una ganancia económica. La única diferencia, es que en esta ocasión se usará sargazo como materia prima, un residuo orgánico (a la cual también nos referiremos como biomasa), al cual se le ha prestado poca atención para la generación de energía a pesar de la tendencia a reducir la dependencia de combustibles fósiles. Esto se debe a diversos factores, particularmente la reciente problemática que esta alga representa. Al ser una nueva alternativa es necesario considerar los costos de la investigación requerida para su adecuado procesamiento, parte de las diversas razones que hacían que el costo beneficio no fuera tan atractivo al compararse con otros tipos de generación energética más tradicionales.

La tendencia de la sociedad a la utilización de combustibles alternativos a los fósiles está en auge, ideología que surge en respuesta a todo el daño antropogénico que ha sufrido el medio ambiente a lo largo de los años y cuyas repercusiones son más notorias e intensas en las últimas décadas y día a día.

Dentro de la búsqueda por el uso de energías renovables han surgido cuestionamientos como el siguiente; ¿Qué uso se le debe de dar a las tierras de cultivo? Dentro de la discusión se ha cuestionado si las tierras de cultivo deben ser utilizadas para crecer biomasa para la producción de combustibles (Ej: producción de etanol) o para la obtención de alimentos, conocido como el debate "Food versus Fuel" (Comida contra combustible) ^[84,85]. Debido a estas inquietudes es que la producción de combustibles a partir de algas, como el Sargazo por representar un ejemplo atractivo, ha tomado mucha relevancia, tanto para el sector académico, como el industrial.

Dejando a un lado el impacto ambiental que los arribazones conllevan, las algas no necesitan de tierra firme para crecer, ya que lo hacen en el mar abierto; aunado a eso, el consumo humano de esta alga es nulo, por lo que no se tiene que entrar a la discusión antes planteada. Estas son algunas de las razones por las cuales el procesamiento del sargazo puede ser tan llamativo, ya que, por un lado se combate el problema ambiental, y por otro, no se entra a la disputa de las tierras fértiles^[17], lo cual nos obligaría a entrar en la discusión moral que podemos evitar.

Con base en lo anterior, se investigó sobre productos que se han hecho a partir de sargazo, y posibles procesos que podrían ser implementados para su aprovechamiento. Se procedió a separar los procesos en tres categorías, los físicos, los biológicos y los químicos.

Por la naturaleza de los productos obtenidos mediante los procesos físicos se decidió no indagar más en el tema, ya que, aunque pueden generar ganancias económicas, se considera que la magnitud de estas no se compara con aquellas generadas por las otras categorías. Aunado a eso, dichos procesos no iban con la directriz del actual proyecto, ni generaron interés alguno al autor. Algunos de los productos obtenidos por la categoría de los procesos físicos son: zapatos a base de sargazo, ladrillos, platos, libretas, etc.

En la categoría de procesos biológicos se investigaron los siguientes tipos:

- Fermentación alcohólica.
- Fermentación oscura.
- Digestión anaerobia.

Para la categoría de procesos químicos se investigaron los siguientes tipos:

- Pirólisis.
- Gasificación.
- Carbonización hidrotermal.

Se hablará de cada uno de estos procesos, se expondrá una introducción de cada uno explicando de manera breve en qué consisten; posteriormente se presentarán un par de resúmenes sobre estudios/experimentos de cada tecnología utilizando como materia prima Sargazo u otro tipo de macro-alga para la producción de biocombustibles.

Se debe tener en mente, que en algunos casos se presentan experimentos realizados con biomasa distinta al Sargazo, si bien similar, por lo mismo, no se tiene en mente que con las mismas condiciones de operación se puedan reproducir los mismos resultados; En esos casos, lo importante será la forma en la que se lleva a cabo el procesamiento de la biomasa. El objetivo es generar una idea más clara de cómo es que se utiliza cada una de las tecnologías. Es por lo tanto un primer tamizaje para descartar aquellas metodologías con menores índices a partir de ciertos parámetros de priorización.

2.2.1 - Procesos Biológicos

2.2.1.1 - Fermentación alcohólica

Es necesario especificar a qué tipo de fermentación nos referimos, esto debido a que existen muchas rutas bioquímicas de fermentación y cada una genera productos distintos. En esta sección nos enfocaremos en la fermentación alcohólica en que se fundamenta la industria de las bebidas alcohólicas y cuyo conocimiento científico data desde las épocas de Pasteur. Consiste en metabolizar con levaduras a los azúcares simples como la glucosa, fructosa, galactosa, sacarosa, xilosa, entre otros, para producir alcohol etílico y CO_2 ^[23]; Estos azúcares se pueden obtener a partir de diversas materias primas, como:

las frutas, agaváceas, papas, cereales, uvas, caña de azúcar, etc. La generación de etanol a partir de estos azúcares se lleva a cabo por medio de reacciones bioquímicas en las cuales participan diferentes enzimas^[24], cofactores y compuestos inorgánicos como fuente de N, P y S, elementos esenciales para la nutrición de las levaduras. El principal microorganismo utilizado para este tipo de proceso es la levadura *Saccharomyces Cerevisiae*. También se han reportado otros microorganismos como los hongos y bacterias capaces de llevar a cabo la fermentación alcohólica, más no son tan comunes^[23]. Dependiendo el tipo de materia prima se podrá llevar a cabo la fermentación de manera directa o ser necesario un pretratamiento. Dicho paso consiste en una hidrólisis, cuyo objetivo es romper las cadenas de polisacáridos (comúnmente se hace referencia al almidón o a la celulosa) para así liberar el monosacárido que la conforma (Glucosa) para seguidamente llevar a cabo la fermentación.

La estequiometría dicta que se obtienen 2 moles de etanol por mol de glucosa, un rendimiento teórico de 0.511g de Etanol por gramo de Glucosa^[23]. Sin embargo, se ha visto que los rendimientos en un ambiente experimental están entre el 90 y 95% del teórico y en la industria son aún más bajos, del orden del 87% al 93%^[23]. Estas diferencias en los rendimientos de producción pueden deberse a muchos factores, entre ellos el tipo de microorganismo empleado, la fuente de la glucosa o el monosacárido para su reproducción, las condiciones de temperatura, pH, etc. Por lo anterior, es necesario tener bien definido el tipo de microorganismo y sus parámetros ambientales óptimos.

Con base en un estudio hecho a una cepa de *S. Cerevisiae* usando como materia prima melaza, se encontró que las condiciones óptimas para la producción de etanol son: una temperatura de 30°C, pH de 6.0, una agitación de 115 rpm y 24h de reacción^[25].

Una fermentación alcohólica requiere de 3 equipos principales: Un biorreactor, un decantador y una columna de destilación; en el biorreactor, se lleva cabo la reacción de asimilación de los azúcares, controlando las condiciones de operación; el decantador, servirá para separar las levaduras y reutilizarlas como inóculo en otro lote o para comercializarse como fuente de Vitamina B (i.e. la típica levadura de cerveza). También se puede elaborar el “extracto de levadura” o “levadura desamargada” que es comúnmente usado como aditivo alimentario o ingrediente en medios de cultivo. Finalmente en la columna de destilación el etanol se evapora para ser condensado y concentrado hasta el porcentaje requerido [23]. Para su uso como combustible este debe ser deshidratado hasta >99% en columnas empacadas de tamiz molecular.

Ejemplos seleccionados para fermentación alcohólica de sargazo.

Experimento 1 – Fermentación alcohólica [17]:

(Borines, et al.)El alga con la que se trabajó fue Sargazo Spp. Para preparar las muestras, el alga recolectada se lavó con agua de la llave, se escurrió, cortó y secó al aire. Se secó en un horno a 70°C y se molió, luego de esto, se llevó a cabo un pretratamiento ácido con H₂SO₄ al 4%(w/v) por 1.5 horas a una temperatura de 115°C; después, la biomasa se enjuagó con agua caliente, se centrifugó y decantó. Al terminar ambos pretratamientos se procedió a la sacarificación enzimática con la enzima β-glucosidasa (celobiosa) a un pH de 4.8, un tiempo de 96h y una temperatura de 50°C. Por último, se llevó a cabo la fermentación con *S. Cerevisiae* a un pH de 4.5 por 48h y una temperatura de 40°C. Como resultado de este proceso se obtuvieron porcentajes de rendimiento entre 65 y 89% del valor teórico. Los autores comentaron que toda la glucosa de su sistema fue consumida y por lo tanto piensan que otros azúcares fueron los que contribuyen a la producción de etanol. Los autores hicieron la observación de que las condiciones del

pretratamiento para esta alga fueron relativamente más suaves que las usadas para la biomasa terrestre. Por ello, piensan que el Sargasso Spp. podría funcionar bien como una materia prima renovable para la producción de bioetanol.

Experimento 2 – Fermentación alcohólica ^[18]:

(Jelynn) En esta ocasión se utilizó Sargazo Sp. Después de ser recolectado se enjuagó con agua de llave, se secó al sol y posteriormente se secó en un horno a 50°C. Se le realizó un primer pretratamiento con ácido al 1.0% v/v H₂SO₄ en una relación sólido/líquido de 1:20 por 15 min a 121°C y 15psi; seguido por un segundo pretratamiento referido a la hidrólisis enzimática que se llevó a cabo con enzima comercial (sin especificar) por 72 horas y a una temperatura de 50°C. Se realizaron 2 experimentos para la producción de etanol, ambos utilizando *S.Cerevisiae*; en uno, la producción fue de manera simultánea (i.e. la sacarificación enzimática y la fermentación en conjunto) y en el otro ambos pasos ocurrieron por separado y en forma secuencial. Para el primer caso se obtuvo un rendimiento de 0.112 gEtOH/g de biomasa seca. Con pasos por separado se obtuvo un rendimiento de 0.057gEtOH/g de biomasa seca. Claramente se observó un mejor rendimiento en el proceso simultáneo. Con base en su experimentación los autores concluyeron que el alga café como el Sargazo Sp. puede ser una materia prima prometedora para la producción de bioetanol.

2.2.1.2-Fermentación oscura

La fermentación oscura hace referencia a aquel proceso donde compuestos como los carbohidratos, ácidos orgánicos simples (i.e. formiatos, acetatos, etc), péptidos o aminoácidos son transformados por bacterias para producir

gas hidrógeno en un ambiente anóxico o anaerobio. Dada la gran biodiversidad todas estas reacciones dependen del tipo de bacteria y la cepa. Como en todo proceso fermentativo, es necesario que el ambiente cuente con las condiciones adecuadas para que se favorezca la reproducción de aquellas bacterias generadoras de hidrógeno y no de bacterias competidoras^[26]. El nombre de fermentación oscura se debe a que los compuestos orgánicos son la única fuente de carbono y energía metabólica para las bacterias ^[26].

La mejor carga orgánica para llevar a cabo la generación de H₂ son los carbohidratos y superiores en rendimiento a las proteínas, péptidos o aminoácidos, mientras que los sustratos menos adecuados son los lípidos^[26]. Para llevar a cabo esta fermentación es necesario conocer qué bacteria se va a utilizar y que sustrato se quiere degradar. Hay muchos factores que deben ser tomados en cuenta como: pH, fuerza iónica, temperatura, presión parcial del H₂ y CO₂, agitación, etc.^[27]

Se tiene información de cepas mesofílicas y termofílicas las cuales producen H₂ entre 20°-44°C y 45°-80°C respectivamente^[27].

Ejemplos seleccionados para fermentación oscura de sargazo.

Experimento 1 – Fermentación oscura^[28]:

(Margareta, et al.) El alga utilizada en esta experimentación fue la *Ulva sp.* (Alga verde); se lavó con agua 5 veces para eliminar sales y se secó en horno a 50°C hasta que no hubiera cambios de peso seguido de una molienda. Se efectuó un pretratamiento de hidrólisis ácida con H₂SO₄ al 4%(v/v) a 121°C en autoclave por 20 min. Al acabar se neutralizó añadiendo CaCO₃ hasta alcanzar un pH de 7. Posteriormente se centrifugó por 25min para remover el precipitado. La fermentación de los solubles se llevó a cabo con *Clostridium butyricum CGS5* usando la estrategia de fermentación continua, con un pH de

5.5 y por 6 horas. Como resultado, se obtuvo un rendimiento de 1.52mol H₂/mol azúcares reductores. (Aunque se hicieron otros experimentos se menciona aquel con los mejores rendimientos)

Experimento 2 – Fermentación oscura^[29]:

(Lee, et al) Se utilizó *Laminaria japonica* (Alga Café); se enjuagó con agua para la remoción de sales y contaminantes, seguido de un secado a temperatura ambiente y molidas hasta partículas finas. Subsecuentemente se les aplicó un pretratamiento en autoclave a 120°C por 30 min. El alga enfriada se mezcló con inóculo, un conjunto de nutrientes complementarios y una solución amortiguadora de fosfato al 0.07M logrando un pH 7.5. Las condiciones de operación fueron 35°C y 150 rpm por 62horas. En total se generaron 444ml de H₂ a partir de 10g de alga seca/L de medio de cultivo. El inóculo se obtuvo de lodos de una planta urbana de tratamiento de aguas de desecho, al cual se le dio un tratamiento térmico a 65°C por 20min. Al finalizar la fermentación se encontró que las bacterias que constituían el inóculo provenían de las especies *Clostridium* y *Bacillus*.

2.2.1.3-Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es aquel proceso donde se descompone materia orgánica por medio de bacterias en ausencia de aire ^[30]. Esta ocurre en cuatro etapas, la hidrólisis, la acidogénesis, cetogénesis y la metanogénesis, todos éstos procesos metabólicos ^[31]. Cada uno requiere (o selecciona de manera natural) de distintos microorganismos, sustratos y condiciones de operación.

A continuación, se explica cada una de las etapas. Inicia con la **hidrólisis** de moléculas complejas, como los polisacáridos, lípidos y proteínas para formar

ácidos grasos, aminoácidos y glucosa (o azúcares simples); el siguiente paso es la **acidogénesis**, que se encarga de transformar los productos de la primera etapa en ácidos grasos volátiles, por ejemplo los ácidos propiónico, butírico, acético, etc ^[31]; tercera etapa, la **cetogénesis** convierte la mayoría de los productos generados en la etapa de acidogénesis a ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono; por último, la **metanogénesis**, esta etapa se puede llevar a cabo por dos vías, una en la que el ácido acético es fermentado para generar gas metano y dióxido de carbono, o aquel donde se utiliza hidrógeno y dióxido de carbono para generar metano y agua ^[31].

Debido al uso de microorganismos se debe de tener un cuidado especial al controlar variables de proceso como: la temperatura, el tiempo de residencia, la presión parcial de hidrógeno, el pH, etc. Por ejemplo, operar fuera de los rangos de pH puede disminuir el rendimiento de los productos. Se recomienda llevar a cabo la hidrólisis con un pH entre 6-8; la acidogénesis entre 5.5 y 6.6; la cetogénesis entre 6.0 y 6.2, y la metanogénesis entre 7.0 y 7.2^[31]. Debido a que este proceso se lleva a cabo con microorganismos, los parámetros óptimos de proceso pueden variar, los cuales dependerán específicamente de los organismos a utilizar y los rendimientos o cantidades de producto deseado.

El principal producto de la digestión anaerobia es el Biogás (mezcla de gases con 50-70% metano) usado en la generación de energía térmica o eléctrica. Un producto secundario es el digestato sólido, el cual puede ser utilizado como acondicionador de suelos y fertilizante^[30].

Ejemplos seleccionados para digestión anaerobia de sargazo.

Experimento 1 – Digestión anaerobia^[4]:

(Tapía-Tussel, et al) El alga recolectada fue una mezcla de *S.Natans* y *S.Fluitans*. Las muestras se lavaron con agua de la llave para después ser secadas a 105°C. En la experimentación se utilizaron dos vías de pretratamiento biológico; aquí presentaremos aquella que tuvo mejor rendimiento. La biomasa se inoculó con el hongo *Trametes hirsuta* de la cepa BM-2, a 40°C, 150rpm por 24 horas. A la muestra se le añadió un consorcio microbiano mixto, el cual se dejó en una atmósfera de nitrógeno en una incubadora a 38°C, siendo mezclado manualmente una vez al día por 29 días. Al terminar el tiempo de generación de biometano, se tuvo una producción de 104L CH₄/kg sólidos volátiles. En las conclusiones los autores comentaron que dicho valor estadísticamente fue mayor que lo obtenido por pretratamientos enzimáticos, lo que los llevó a valorar el potencial del sargazo para la producción de biometano.

Experimento 2 – Digestión anaerobia^[32]:

(Barbot, et al) La biomasa utilizada fue residuo del alga *Laminaria Japónica* (Alga café). Se efectuaron experimentos a escala laboratorio, pero seleccionamos aquel llevado hasta escala planta piloto. El alga se utilizó tal cual se recibió, es decir, con impurezas. El inóculo utilizado se obtuvo a partir de inóculos previamente usados para experimentación, los cuales provenían de una mezcla de lodo del digestor de una planta de tratamiento de aguas y de una planta de biogás. Se llevó a cabo un pretratamiento de hidrólisis ácida usando una solución ácida de ácido clorhídrico o de condensado de gases de combustión, y un aumento de temperatura (Sin especificar) por 2 horas; después se añadió una solución de NaOH para ajustar el pH entre 6.8 y 7.1.

El experimento a escala piloto se llevó a cabo en un fermentador de 1,700L agitado con un sistema de calentamiento a 37°C+-1°C y aislado. Se empleó un tanque de 800L para el mezclado de sustrato y un tercer tanque de post fermentación para almacenar el digestato. Este proceso tenía una alimentación de sustrato cada 4 horas. En total se usaron 418kg de sólidos totales de sustrato, el experimento tuvo una duración de 50 días, en el cual se observó un pH promedio de 7.55. Como resultado se obtuvo un flujo promedio de gas de 63L Biogas/h, y un rendimiento promedio de 146.3L Biogas/kg sólidos totales (55% CH₄ y 38% CO₂), además del digestato como producto secundario. En la sección de conclusiones, los autores comentan que comprobaron la capacidad del escalamiento de este proceso el cual presentó resultados similares a los obtenidos a escala laboratorio, pero encontraron problemas como el atascamiento de los equipos del biorreactor por material insoluble. Además mencionaron que el contenido de arena disminuyó la eficiencia de producción de biometano.

2.2.2 - Procesos Químicos

2.2.2.1 – Pirólisis

La pirólisis es aquel proceso en el que materia prima orgánica como la biomasa es convertida en Syngas, bioaceite o biocarbón por medio de un aumento rápido de temperatura en ausencia de agentes oxidantes (Ej. oxígeno). Este proceso, generalmente se lleva a cabo en un rango de temperatura entre los 300°-650°C [33].

Su principal producto es el bio-aceite el cual puede contener más de 300 compuestos (con hasta un 20% de agua). Debido a su composición y contenido acuoso, este no puede ser utilizado como combustible de motor. Sus capacidades térmicas han sido comparadas con el Diesel, pero como

presenta retrasos indeseables en la ignición requiere refinación para su posible uso en motores [33-34-35]. Como producto alternativo está el biocarbón sólido que puede contener entre un 53%-96% peso de carbono. El resto puede ser oxígeno, hidrógeno y cenizas. Este material puede ser utilizado como mejorador de suelos, en catalizadores, almacenamiento de energía, entre otras aplicaciones [34-35]. Por último, está el Syngas (Gas de síntesis). Aunque puede contener algunos gases no condensables, los gases principales son hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO) [33], este gas se puede utilizar posteriormente para la generación de energía térmica o eléctrica, o como precursor de una gran variedad de productos químicos utilizados en la industria.

El rendimiento de la pirólisis tiene una gran dependencia en aspectos como, el diseño del equipo, las características de la biomasa, la temperatura, el tiempo de residencia en la zona de reacción y la velocidad de calentamiento [34].

El proceso se podría descomponer en 4 etapas, aunque no existe un lindero estricto entre ellas. Etapa de **secado**, la humedad libre de la biomasa se elimina; etapa **inicial**, en esta etapa comienza la deshidratación exotérmica, donde se libera el agua remanente y gases de bajo peso molecular como el CO y CO₂; etapa **intermedia**, aquí se produce la mayor cantidad de los vapores que serán los precursores del bioaceite, por último; la etapa **final**, donde se hace un craqueo secundario de los vapores, generando el biocarbón y los gases no condensables (CO, CO₂, H₂ y CH₄)^[34]. Al igual que otras tecnologías, existe una gran cantidad de variables para la pirólisis las cuales se modificarán dependiendo la materia prima a utilizar y los productos deseados. Algunos ejemplos son: la pirólisis rápida, la lenta, tipo Flash, pirólisis ultra rápida, hidropirólisis, entre otras [33].

Ejemplos seleccionados para pirólisis de sargazo.

Experimento 1 – Pirólisis^[36]:

(Ly, et al.) El alga utilizada fue *Saccharina japónica*. Se molió y fue secada en un horno a 105°C por 12h. El experimento se llevó a cabo en un reactor de lecho fluidizado burbujeante conteniendo arena de sílica. Las temperaturas de pirólisis usadas fueron entre los 350 y los 500°C, con una alimentación de 100g de biomasa por hora. En cada uno de estos experimentos se tuvo el cuidado de mantener un tiempo de residencia del vapor menor a 3s. Para la recolección de los gases condensables se utilizaron 2 condensadores con una temperatura de -20°C.

Con base en los resultados se obtuvo que la temperatura a la cual se consiguió una mayor cantidad de bio-aceite fue a los 350°C, con un rendimiento del 44.99% en peso; este aceite tuvo un HHV (High Heating Value-Cantidad de energía emitida cuando se usa como combustible) entre 24.80-28.27 MJ/kg. Los autores comentan que para poder comercializar este producto se necesita mayor investigación sobre su estabilidad, ya que deberá ser almacenado.

Experimento 2 – Pirólisis^[37]:

(Guida, et al) En esta serie de experimentos se utilizó el alga *Bifurcaria Bifurcata* (Alga café). Estas se enjuagaron con agua para remover las sales y se dejaron secar al sol por 10 días, por último, fueron molidas. Se llevaron a cabo 3 series de experimentos: El primero, para saber el flujo de nitrógeno óptimo; el segundo para conocer el tamaño de partícula óptimo y el tercero; con base en los resultados anteriores, fue para conocer el efecto de la temperatura en la pirólisis y el efecto de la velocidad de calentamiento. Con los dos primeros se obtuvo que un flujo de 100ml/min de N₂ y un tamaño de partícula de 0.2-0.5mm eran parámetros óptimos. El tercer experimento se

llevó a cabo con esos parámetros con rampas de 50°C a temperaturas entre los 300°C y los 800°C y con velocidades de calentamiento de 5, 10, 20 y 50°C/min, manteniendo la temperatura final de pirólisis por 15 min. Al terminar la experimentación, se observó que la temperatura óptima para la producción de bio-aceite fue de 600°C obteniendo un rendimiento de 41.3wt%. En sus conclusiones, los autores mencionan que la pirólisis de alga como biomasa es un proceso prometedor para la generación de combustibles renovables.

2.2.2.2 – Gasificación

La gasificación es aquel proceso en el que la materia combustible ya sea sólida, líquida o gaseosa se convierte en combustible gaseoso con mayor capacidad calorífica^[38-39]. El combustible gaseoso generado contiene compuestos como el dióxido de carbono, metano, nitrógeno, pero principalmente está compuesto por una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono, mejor conocido como Syngas^[38]. El proceso de gasificación, a diferencia de la pirólisis necesita de un agente oxidante, el cual puede ser un flujo de oxígeno, aire o vapor de agua^[40]. El uso de cada uno de estos traerá diferentes ventajas y desventajas en el gas de síntesis generado. Por ejemplo, al utilizar aire, la capacidad calorífica del Syngas se verá disminuida debido a que se diluye con el nitrógeno^[38].

Se puede decir que la Gasificación se lleva a cabo en 4 etapas principales, aunque estas no están separadas de manera específica. La primer etapa es la zona de **secado**, en esta se pierde la humedad, trabaja a temperaturas cercanas a los 100°C; la siguiente es la **pirólisis o descomposición térmica**, en la cual se generan productos como bio carbono, alquitranes líquidos y gases; cuando se trata de biomasa, el rango de temperatura varía entre los 125°C y los 500°C; la tercer etapa, **oxidación parcial o**

combustión, aquí la temperatura ronda entre los 1,100°C y los 1,500°C, y es la zona que determinará la calidad del producto final,. Por último, está la etapa de **reducción**, donde se recomienda operar a 1000°C con el objeto de reducir la presencia de alquitranes. Es en esta etapa donde ocurren reacciones de carácter exotérmico las cuales generan el Syngas y gas metano^[40]. Para tener un buen producto a partir de la gasificación es necesario tener en cuenta muchas variables como: el tiempo de residencia, la temperatura, los agentes oxidantes, la velocidad superficial, el contenido de humedad de la materia prima, el tamaño y forma, la materia volátil, etc^[38-40]. Al ser una tecnología vieja (Siglo XIX)^[40], se han generado una gran cantidad de procesos de gasificación. No obstante, se podrían dividir en cuatro clasificaciones básicas, los gasificadores de lecho móvil, lecho fluidizado, flujo arrastrado y gasificador de transporte^[41]. Cada uno de estos tipos de gasificador se utilizará dependiendo el tipo de biomasa a utilizar y la calidad de producto deseado. Es posible que exista confusión entre la pirólisis y la gasificación. Nótese, que el producto principal en la pirólisis es el bio-aceite mientras que en la gasificación es el Syngas. Otro aspecto son los intervalos de temperatura, ya que los utilizados en la gasificación son mayores que los de la pirólisis. Por último (entre otras diferencias) está el uso de los agentes oxidantes, en la gasificación es común y necesario utilizarlos y en la pirólisis no se requieren.

Ejemplos seleccionados para la gasificación de sargazo.

Experimento 1 – Gasificación^[42]:

(Maisano, et al.) En este experimento se trataron 3 materias primas distintas, madera de pino blanco, cáscaras de naranja y pastos marinos (*Posidonia oceánica*), el enfoque será hacia los pastos marinos. Estos fueron secados a 80°C por 16h, para posteriormente ser molidos. Las pruebas de gasificación se llevaron a cabo a escala laboratorio en un gasificador de lecho fluidizado

burbujeante el cual usó como agente oxidante aire y agua. La temperatura de gasificación fue de 750°C con una alimentación de 0.8g/min de *Posidonia oceanica*, un flujo de aire de 1300ml/min y una presión de 1 bar con un tiempo de residencia entre los 1.82s-2.38s. Al terminar la experimentación se obtuvo como resultado que la *Posidonia oceánica* tuvo el mejor rendimiento de producción de Syngas con 2.64Nm³/kg biomasa y 0.66Nm³/Kg biomasa de gas nitrógeno, sin embargo, no fue el combustible de mejor calidad obtenido. Al concluir, los autores indicaron que tanto la cáscara de naranja como los pastos marinos parecen adecuados para la producción de gas de síntesis por medio de la gasificación.

Experimento 2 – Gasificación^[52]:

(Tian, et al.) Este experimento se realizó usando *Enteromorpha intestinalis* como biomasa. Se llevó a cabo en un sistema de gasificación que contaba con 5 equipos principales, un gasificador, un ciclón, un sistema de limpiamiento de gases, un sistema de alimentación y uno de enfriamiento. La reacción se llevó a cabo entre 800° y 1000°C con una velocidad de calentamiento de 1°C/min usando como agente oxidante aire y vapor de agua.

Se investigó el uso de tres catalizadores, dolomita calcinada (CaO, MgO), olivino (Mg₂SiO₄, Fe₂SiO₄) y cal (CaO).

Los gases liberados fueron limpiados, enfriados y recolectados en bolsas para su posterior análisis. Como resultado de esta experimentación a 800°C y 50min con Dolomita, se obtuvo una eficiencia de gasificación del 71.5%, con una distribución de productos del 90.2% peso gas y un Syngas con HHV de 11.6MJ/Nm³. Según los autores la dolomita resultó ser el mejor catalizador para la producción de gas y la destrucción de alquitranes.

2.2.2.3 - Carbonización hidrotermal – (HTC por sus siglas en inglés)

La carbonización hidrotermal es aquel proceso donde biomasa con altos índices de humedad se somete a temperaturas entre los 180°-250°C en un recipiente cerrado, generando vapor para alcanzar una presión autógena del agua (Alrededor de los 20bar^[43]) y así llevar al agua a su región subcrítica. En esta región las propiedades del agua son distintas a aquellas a condiciones normales de presión y temperatura. Por ejemplo, en esta región los enlaces intermoleculares del agua se debilitan, generando una mayor cantidad de iones hidronio (H_3O^+) e hidróxido (OH^-) los cuales catalizan reacciones como la hidrólisis de polisacáridos, como por ejemplo la hemicelulosa, celulosa e inclusive la lignina (esta última en condiciones específicas). Subsecuentemente, los productos de la hidrólisis se descarboxilan y deshidratan ^[44-45-46].

Generalmente este proceso se lleva a cabo entre 1 y 12 horas^[43], dependiendo del tipo de biomasa, calidad y tipo de los compuestos a producir.

Los productos generados por el HTC son hidrocarbón (producto principal), agua de proceso (debido a la deshidratación de la biomasa, se tiene más agua libre a la salida del proceso) con nutrientes disueltos, por último, dióxido de carbono (como gas efluente) ^[47]. Entre los usos de sus productos se encuentra la generación de energía, absorción de CO_2 , remediación de suelos, fertilizante, carbón activado^[48], reciclaje del agua de proceso^[45], recuperación de fósforo^[49], etc.

Ejemplos seleccionados para la carbonización hidrotermal de sargazo.

Experimento 1 – Carbonización Hidrotermal^[50]:

(Méndez, et al.) Para este estudio se utilizó desecho industrial (Harina de alga) de la macroalga *Gelidium Sesquipedale*. Se tomaron muestras durante un mes para obtener una muestra representativa de la macroalga. Se hizo una suspensión de harina de alga al 30% de sólidos en 1 litro de agua. Esta mezcla se introdujo en una autoclave (que fungió como reactor HTC) y se llevaron a cabo cuatro pruebas a dos temperaturas (200° y 230°C) y dos tiempos de proceso (2h y 6h) a una presión autógena. Al terminar las reacciones, la solución se filtró y el hidrocarbón se secó a 80°C por 24h. Como resultado de esta experimentación se reportaron rendimientos entre el 52.3 y el 60.6% peso de biocarbón. La reacción a 230°C por 6h rindió un HHV de 23.25MJ/kg, el cual los autores reportaron similar al carbón de bajo rango.

Experimento 2 – Carbonización Hidrotermal^[51]:

(Smith, et al.) En este experimento se recolectaron muestras de 3 macroalgas *L. digitata*, *L.hyperborea* y *A.esculenta* que se deshidrataron por liofilización. La experimentación se llevó a cabo en un reactor tipo "batch" de 600ml a 200° y 250°C con una presión de 16bar y 40 bar respectivamente, por una hora y con una velocidad de calentamiento de 8°C/min. En cada experimento se utilizaron 24g de muestra liofilizada con 220ml de agua destilada teniendo un 10% de consistencia, cabe destacar que el alga no fue molida como en otros experimentos. Al terminar las reacciones, los reactores se enfriaron a temperatura ambiente y el gas producido se recolectó en bolsas para su posterior muestreo. El hidrocarbón y el líquido se separaron por filtración al vacío; el agua de proceso se recolectó y el hidrocarbón se secó con aire seco por 48h. Como resultado, se obtuvo que a 200°C el hidrocarbón rindió un valor calorífico de 22MJ/kg y a 250°C uno de 25MJ/kg. Asimismo, reportaron que el agua de proceso contenía grandes concentraciones de nutrientes, entre

ellos fósforo y potasio. Por último, dentro de las conclusiones de los autores, se indicó que el proceso de HTC puede **sobreponerse** a la química inorgánica y heteroatómica altamente desfavorable de las macroalgas, lo que evita su uso en **la combustión, pirólisis o gasificación**, debido a la generación de escoria, ensuciamiento en las tuberías y corrosión.

A continuación, se presentará una tabla comparativa de las tecnologías en las cuales se resumen algunos de los aspectos y características más importantes de cada una de ellas.

Tabla 5-Comparativo entre tecnologías.

Tecnología	Categoría	Tipo	Tiempo de residencia	Necesidad de materia prima seca	Necesidad de remover sales y arena	Temperatura de operación
Fermentación	Biológico	Degradación bioquímica	>48hr	No	Recomendable	Baja
Fermentación Obscura	Biológico	Degradación bioquímica	>48hrs	No	Recomendable	Baja
Digestión anaerobia	Biológico	Degradación bioquímica	>20 días	No	Recomendable	Baja
Pirólisis	Químico	Degradación Térmica	~1s, ~10-20s ^[43]	Sí	No	Alta
Gasificación	Químico	Degradación Térmica	~10-20s ^[43]	Sí	No	Alta
Carbonización hidrotermal	Químico	Degradación Térmica	1-12hrs ^[43]	No	No	Media-Baja

Tabla 6-Comparativo entre tecnologías (Continuación).

Tecnología	Presión de operación	Producto principal	Uso de catalizadores	Aditivos químicos (control de pH)	Uso de microorganismos	Necesidad de O ₂ u otro oxidante adicional
Fermentación	Atm	Bio-Etanol	Sí	Sí	Sí	No, perjudicial para el proceso
Fermentación Obscura	Atm	Bio-H ₂	Sí	Sí	Sí	No, perjudicial para el proceso
Digestión anaerobia	Atm	Bio-Metano	Sí	Sí	Sí	No, perjudicial para el proceso
Pirólisis	Atm	Bio-Aceite	Posible, mas no forzoso	No	No	No, perjudicial para el proceso
Gasificación	Atm	Syngas	Posible, mas no forzoso	No	No	Sí
Carbonización hidrotermal	~20 bar	Hidro-Carbón	Agua como catalizador (posiblemente otros)	Posible-mente	No	No

Cada uno de estos aspectos representa diferentes virtudes o puntos negativos de las tecnologías; a continuación, se explica el punto de vista que se usó para la discriminación de cada uno de los puntos.

- **Tiempo de residencia:** Debido al problema que azota las costas mexicanas se busca un tiempo de residencia relativamente corto, que sea un proceso que pueda estar funcionando de manera continua y trate la mayor cantidad de sargazo en el menor tiempo posible.
- **Necesidad de materia prima seca:** El secado de la materia prima genera pérdida de tiempo y aumento en los costos, ya que se desperdicia energía evaporando la humedad excedente de la biomasa. Resulta claro que el sargazo obtenido (preferentemente del mar antes de llegar a la playa) tendrá altos índices de humedad.
- **Necesidad de remover sales:** Es claro que la presencia de sales en exceso tiene un impacto negativo en todos los procesos, tanto en los rendimientos como en los equipos. Sin embargo, es bien sabido que los microorganismos pueden ser muy sensibles al medio en el que se encuentran, por lo cual, es posible que sales en exceso disminuyan su rendimiento o inclusive causen su muerte por efectos osmóticos.
- **Temperaturas de operación:** Las temperaturas de operación intermedias y bajas representan un menor costo energético y económico, sin embargo, si estas se mantienen por largos periodos de tiempo (en relación con la cantidad de producto generado), es posible que al final del día sean procesos más costosos que aquellos a altas temperaturas y de tiempo más corto.
- **Presión de operación:** El trabajar a presión atmosférica es lo preferible, ya que se utilizan equipos más baratos (menos material y normatividad aplicable) y evita costos de presurización del sistema.

- **Uso de catalizadores:** El uso de catalizadores genera un costo extra al proceso. Con base en la eficiencia de estos se puede definir si el proceso es o no rentable y saber si realmente su compra es necesaria.
- **Aditivos químicos para el control de pH:** Todo aditivo extra que se añada al proceso generará un costo mayor de producción, por lo tanto, es preferible que se use la menor cantidad posible.
- **Uso de microorganismos:** Los microorganismos son seres vivos, que al igual que nosotros requieren de ciertas condiciones para cumplir con sus necesidades básicas. Debido a esto, en este tipo de procesos se ve disminuida la flexibilidad al momento de utilizar diferentes tipos de biomasa. El sargazo arriba a la costa por temporadas, más no se mantiene todo el año, debido a esto se busca la mayor flexibilidad posible para sacar provecho de otro tipo de materia prima cuando el sargazo disminuya.
- **Necesidad de oxígeno u otro oxidante adicional:** En los procesos donde se requiere la ausencia de oxígeno hay un aumento en los costos operativos debido a la necesidad de utilizar gases (como el N_2) para lograr una atmósfera inerte. En contraparte, cuando el requerimiento es oxígeno de alta pureza los costos también aumentan, por lo cual se prefiere un proceso en el cual la adición extra de oxígeno u otro agente oxidante no sea una variable de gran relevancia al proceso.

2.3 - ¿Cuál sería la tecnología más viable?

Con base en lo anterior se observó que entre los procesos en cuestión el más viable es el proceso de carbonización hidrotermal. Ésto se debe a que 1) al ser comparado con los procesos de degradación biológica tiene tiempos de residencia mucho más cortos, 2) no tiene la desventaja de la limpieza de la materia prima para la remoción de sales, 3) no es forzosamente necesaria la adición de catalizadores, ya que el agua con la que viene cumple esa función,

4) la adición de químicos para la regulación del pH se puede evitar al mezclar distintos tipos de materia orgánica cuyos pH sean distintos, 5) no se utilizan microorganismos, por lo cual, la flexibilidad del proceso se expande prácticamente a cualquier tipo de biomasa, y 6) la presencia de oxígeno en el medio ambiente no es una variable de proceso con gran peso. Al ser comparado con los procesos de degradación térmica se tiene que los tiempos de residencia del HTC son más largos. Sin embargo, tanto la pirólisis como la gasificación requieren de materia prima con valores de humedad muy bajos, de otro modo, los costos de secado de esta serían enormes y un total desperdicio, ya que esa agua se estaría perdiendo en el ambiente sin poderle sacar provecho alguno. Al igual que los procesos bioquímicos la presencia de oxígeno u otro agente oxidante en el ambiente tienen grandes efectos en el producto generado por la pirólisis y gasificación, cosa que no ocurre con el HTC.

Ya que ninguna tecnología es perfecta, como desventajas, la carbonización hidrotermal tiene la necesidad de aumentar la presión de proceso, cosa que no ocurre con ninguna otra de las tecnologías aquí revisadas. Por otro lado, se obtiene un producto sólido, el cual presenta cierta dificultad al ser transportado cuando se compara con fluidos. Sin embargo, aunque tiene sus desventajas es posible ver que después de la argumentación anterior es la tecnología más factible para el tratamiento de sargazo que llega al Caribe mexicano, ya que es una tecnología flexible, rápida y relativamente sencilla.

2.2.1 - Después de la Carbonización hidrotermal ¿cuál sería el proceso térmico más viable?

El siguiente proceso más viable sería la gasificación, esto por dos factores principales. El primero es el producto generado ya que el gas de síntesis tiene

una mayor aplicación (no solamente generación de energía, sino como precursor de otros químicos) y estabilidad que el Bio-aceite generado por la pirólisis. Segundo, es más sencillo regular una entrada (por muy pequeña que sea) de aire, vapor, etc., que tener un recipiente totalmente hermético. Generalmente existen fugas o fisuras con filtraciones de aire en los equipos, y aunque estas sean muy pequeñas pueden llegar a afectar la calidad de los productos.

2.2.2 - ¿Qué proceso biológico es el más viable?

El proceso biológico más viable es la Digestión Anaerobia, a pesar de presentar el mayor tiempo de residencia. Su principal valor es que genera metano como combustible. El gas Metano (HHV 23,874[Btu/lb]^[53]) producido tiene un valor calorífico menor que el Hidrógeno (HHV 60,920[Btu/lb]^[53]) de la fermentación oscura pero mayor que el del etanol. Como combustible, esto lo posiciona en medio de los 3, sin embargo, su almacenamiento es más seguro que el del H₂. Con base en eso, se optó como la opción biológica más factible.

3 - Proceso y equipos.

Con base en las conclusiones anteriores, se decidió profundizar sobre los procesos de carbonización hidrotermal y gasificación. Para ello se analizaron dos procesos; el primero solamente con HTC y el segundo, otro que conjunta HTC y gasificación.

En este apartado se presenta la información del proceso HTC-Gasificación donde la única diferencia con el de HTC será eliminar los equipos referidos a la gasificación.

Debido a que la materia prima no cumple con las necesidades mínimas requeridas por el proceso de gasificación, se decidió que el primer proceso por el que pase fuese el de carbonización hidrotermal. De este modo, el primero se hace cargo de la materia prima con alta humedad y el segundo se encarga de la obtención de energía a partir de un producto más seco que es el hidrocarbón.

La descripción del proceso es la siguiente;

1. El sargazo crudo y recién recolectado se lleva a las instalaciones por medio de camiones.
2. Se deposita en una plancha al aire libre.
3. Un cargador frontal alimenta una **máquina trituradora de doble tornillo-TR.**
4. El material es enviado a un **tanque de almacenamiento de sargazo triturado-TA01.**
5. El sargazo triturado se bombea hacia el **reactor de HTC** por medio de una **bomba-BA.** El reactor está interconectado a una **caldera de aceite-CA** que le permitirá mantener la temperatura adecuada para el proceso.

6. Una segunda **bomba-BB** es la encargada de enviar el producto a un **tanque de almacenamiento de hidrocarbón húmedo-TA02**.
7. Del TA02 pasa a un **filtro prensa-FP**. Al terminar su ciclo de secado el producto se envía a un **tanque de almacenamiento de hidrocarbón seco-TA03**.
8. A la salida del TA03 se cuenta con una **banda transportadora-BT** para enviar el hidrocarbón seco a la entrada del **gasificador-GAS**.
9. Al salir del gasificador, se tiene un **Ciclón húmedo de limpieza de gases-CG** y un **condensador-CO**, los cuales sirven para eliminar la humedad y mejorar la calidad del gas de síntesis.
10. Al final del arreglo de gasificación, se cuenta con un **soplador-SO**. Este brinda la fuerza motriz al Syngas (por presión negativa dentro del sistema).
11. Por último, el proceso cuenta con un **motor generador-MG** para la generación de la energía eléctrica.

Debido a que el objetivo de este trabajo no es el diseño riguroso de una planta de procesamiento, sino el análisis técnico económico de los diversos procesos disponibles, se consideraron solamente los equipos principales de proceso.

Se optó por no adentrarse de manera rigurosa en el balance de materia y energía. En parte esto se debe a la composición del sargazo, la cual tiene gran cantidad de compuestos distintos cuyas cantidades varían a lo largo del año, y a la cinética de reacción del HTC. Aunque no es un proceso nuevo, aún la información sobre sus modelos de cinética de reacción es muy limitada además de ser muy particular de cada materia prima. Por lo anterior, se optó por la practicidad. Bajo este criterio fue necesario hacer ciertas aproximaciones y consideraciones, claro está, siempre dentro de la lógica.

Dicho lo anterior, el listado de equipos dimensionados y con los cuales se trabajó el análisis económico son los siguientes:

- Máquina trituradora de doble tornillo-TR
- Tanque de almacenamiento de sargazo triturado-TA01
- Bomba-BA
- Reactor de carbonización hidrotérmal-RHTC
- Caldera de aceite-CA
- Bomba-BB
- Tanque de almacenamiento de hidrocarbón húmedo-TA02
- Filtro prensa-FP
- Tanque de almacenamiento de hidrocarbón seco-TA03
- Banda transportadora-BT
- Gasificador-GAS
- Ciclón húmedo de limpieza de gases-CG
- Condensador-CO
- Soplador-SO
- Motor generador-MG

3.1 - Diagrama de flujo de proceso - DFP.

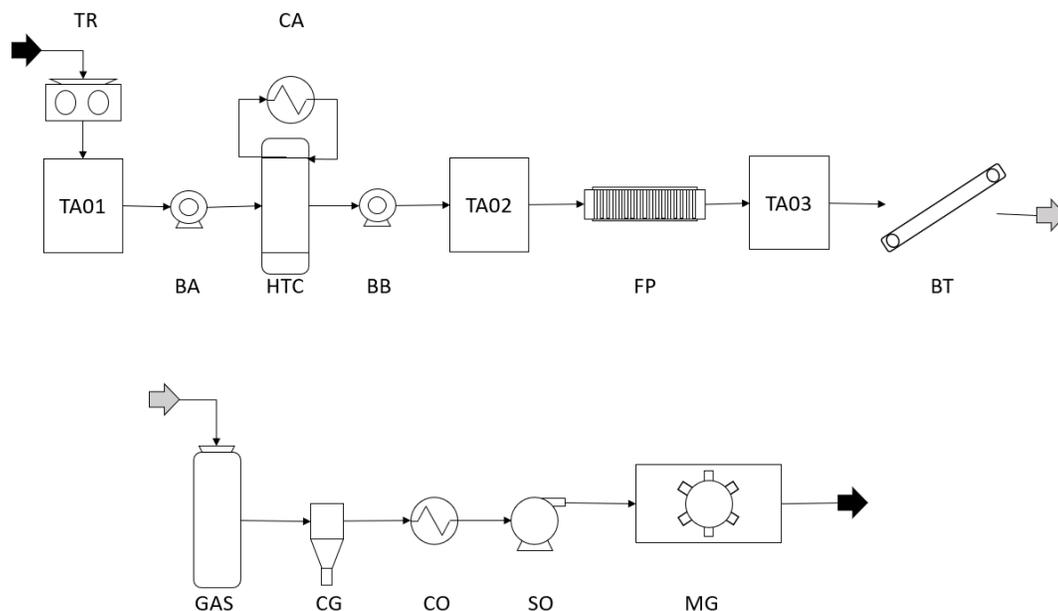


Ilustración 8-Diagrama de flujo de proceso DFP, HTC (Arriba), Gasificación (Abajo).

3.2 - Dimensionamiento.

Para iniciar el dimensionamiento de los equipos se consideraron las siguientes bases de diseño.

- Capacidad anual de 17,028 Ton/año de materia prima. (51.6 Ton/día o 2.15 Ton/hora)
- 330 días laborales por año. Hay sargazo prácticamente todo el año, ya sea llegando a las costas o acumulado. Inclusive, la flexibilidad del proceso HTC permite el uso de otras materias primas en caso de ser necesario.
- Producción 24 horas al día, 3 turnos al día, 8 horas por turno.
- Vida útil de la planta = 15 años.
- Debido a que el sargazo flota en el agua, se consideró que la densidad de la materia prima (mezcla de sargazo y agua) fuese de 1kg/l.
- Por cada tonelada de materia prima se tendrá 50% agua y 50% sargazo.
- Se considera una conversión total del sargazo (considerando que este tiene un 9% de humedad) entonces, por cada 1000kg de materia prima, se obtendrán 455kg de hidrocarbón.

Reactor RHTC: Se consideró un tiempo de reacción de 4 horas (@200°C y 20bar); un tiempo muerto de 4 horas, dentro del cual se añade la limpieza, llenado, aumento de presión, de temperatura y vaciado. Teniendo un total de 8 horas. Con base en lo anterior, se requiere que este tenga una capacidad de 17.2 Ton/corrida, por lo cual su volumen mínimo sería de 17.2m³ y por cuestiones de seguridad se añadió un 20% extra de volumen, dando como resultado un volumen final de 21.5m³.

Bomba-BA: Requiere tener la capacidad para poder llenar el reactor HTC en una hora. Su flujo será de 17.2m³/h.

Tanque de almacenamiento de sargazo triturado-TA01: Se necesita un volumen mínimo de $17.2\text{m}^3/\text{h}$ - Debido a la seguridad del personal y el proceso, el equipo tendrá un sobrediseño con un volumen final de 25m^3 . De esta manera podrá almacenar una mayor cantidad de materia prima en caso de que en algún momento se tenga un ligero déficit en las entregas por parte de los camiones.

Maquina trituradora de doble tornillo: Aunque se requiere un flujo de $2.15\text{m}^3/\text{h}$, se optó por un sobrediseño, para poderse ajustar a los requerimientos del equipo TA01, por lo cual, su capacidad final es de $2.5\text{Ton}/\text{h}$.

Bomba-BB: Con base en las consideraciones hechas en el reactor y de manera homóloga a la Bomba-BA, requiere tener un flujo de $17.2\text{m}^3/\text{h}$.

Tanque de almacenamiento de hidrocarbón húmedo-TA02: Requiere un mínimo de $17.2\text{m}^3/\text{corrida}$. Considerando un sobrediseño de seguridad del 20%, se tiene un tanque con un volumen final de 20m^3 .

Filtro prensa: Se requiere el prensado de 17.2m^3 por corrida. Aún cuando la literatura menciona un 20% ^[47] de sólidos en la corriente, se consideró utilizar un sobrediseño con 25% de sólidos. Con un grosor de torta de 3mm ^[54], y un área por placa de prensado de 1.44m^2 ^[54] se calculó que el filtro prensa debe de contar con 99 placas.

Tanque de almacenamiento de hidrocarbón seco-TA03: Se considera un hidrocarbón seco, con tan solo 5% de humedad ^[47]. Con base en lo anterior, se requiere un volumen mínimo de 8.3m^3 , añadiendo el 20% de seguridad. Se requiere un tanque con un volumen final de 10m^3 .

Banda transportadora: Debe poder vaciar el TA03 en 8 horas, por lo cual, un flujo de $1.1\text{ton}/\text{h}$ es suficiente. Ya que este equipo alimentará al gasificador, se estimó una longitud de 20m.

Gasificador: Se consideró una eficiencia del 77.73% [55], una producción de gas por kilogramo de biomasa de 1.04 Nm³/kg^[55] y un valor calorífico bajo de 7.9 MJ/Nm³ [56]. Con dicha información, se calculó que la capacidad del gasificador debe ser de 1,853kW; con una producción aproximada de 844m³/h de Syngas.

Ciclón húmedo de limpieza de gases: Su capacidad mínima es de 844m³/h o 0.234Nm³/s.

Condensador: Se consideró una temperatura de fluido caliente (Syngas) de 140°C a la entrada y 80°C a la salida, por el lado del fluido frío (agua), una temperatura de entrada de 25°C y una a la salida de 70°C; un Cp de H₂ (14.48 KJ/kg K)^[57] de CO (7.764 KJ/kg K) [58] y de H₂O (4.28 KJ/kg K) [59]; un valor promedio de coeficiente global de transferencia de calor para equipos con líquido en coraza o tubos y gases en coraza o tubos de 9 Btu/h-ft²-°F^[60]. Con base en esos datos se obtuvo un área de condensador de 32m².

Soplador: Requiere como flujo mínimo 844m³/h.

Motor generador: Considerando un flujo de 844m³/h y un valor calorífico bajo de 7.9 MJ/Nm³ [56], se estima una capacidad a la entrada de 1,853kW.

Caldera de aceite: El dimensionamiento se hizo de manera indirecta. Para su cálculo se revisaron las necesidades del reactor RHTC. Se consideró una masa a calentar de 17,200kg, con una temperatura a la entrada de 25°C y una a la salida de 200°C, un Cp para el H₂O de 4.49 KJ/kg K^[59] y uno para el sargazo de 1.9 KJ/kg K [61]. Con base en eso, se calculó una necesidad calorífica de 9,616,950 KJ/h.

4 - Análisis económico

Se realizó el análisis económico para el proceso de HTC y el proceso conjunto HTC-Gasificación. Dicho análisis se dividió en cuatro etapas; la **estimación del costo por equipo**; la **estimación del capital de inversión**; la **estimación de ventas**, y el **análisis financiero** de ambas tecnologías.

4.1 - Estimación de costo por equipo

Para la estimación de costos de cada equipo, se utilizó una ecuación que relaciona el costo, y una característica de un equipo A, con el costo, y la misma característica, pero de un equipo B. La parte de la ecuación en la que se encuentra un cociente lleva como exponente un factor cuyo valor puede variar.

La ecuación se ve de la siguiente manera^[62]:

$$\text{Costo } B = \text{Costo } A * \left(\frac{\text{Característica } B}{\text{Característica } A} \right)^n$$

- Los términos "Costo A" y "CaracterísticaA" representan datos reales de un equipo conocido.
- El término "CaracterísticaB" representa los datos con los que se cuenta del equipo cuyo costo se va a estimar.
- El término "n" representa el valor de un factor exponencial.

La información del capítulo 3 de este trabajo se utilizó en conjunto con la ecuación anterior. De ahí se obtuvieron los datos de "CaracterísticaB", útiles

para la estimación del costo de los equipos. Dependiendo de cada equipo se decidió una de las siguientes opciones para su estimación:

- Estimación del costo con base en los índices y correlaciones tomadas del libro "Rules of Thumb in Engineering Practice de Donald R. Woods-[62]". En el anterior, se usan los valores del "Chemical Engineering Plant Cost Index" o "CEPSI", dentro de las funciones de estos índices está la de ajustar los costos de equipos cotizados en años anteriores a los costos que tendrían esos mismos equipos en la actualidad. Son útiles ya que los costos dependen directamente de diversos factores económicos, los cuales, varían a lo largo del tiempo. (CEPSI 2019=619.2^[63])
- Estimación del costo utilizando datos actuales y reales de equipo industrial, obtenidos de diversas fuentes. En estos casos, el valor del exponente "n" se obtuvo tras consultar los exponentes de Williams^[64]
- Estimación del costo utilizando datos actuales y reales de equipo industrial, obtenidos de diversas fuentes. En estos casos, el valor del exponente "n" fue dado con base en la regla de los 6 décimos. (Esta regla se utilizó cuando no se encontraron datos específicos de factores en ninguno los casos anteriores)

A continuación, se presentan un par de ejemplos de cálculo:

1. Ejemplo de la estimación de costo con base en la información del libro "Rules of Thumb in Engineering Practice de Donald R. Woods"

Estimación del costo del reactor de carbonización hidrotermal-RHTC

$$Costo\ RHTC_B = Costo\ RHTC_A * \left(\frac{Vol\ RHTC_B}{Vol\ RHTC_A} \right)^n * \left(\frac{CEPSI_{19}}{CEPSI_{57-59}} \right) * F_{material} * F_{presión}$$

- Los subíndices de los términos “CEPSI” hacen referencia al año en que dicho índice tenía ese valor.
- $F_{material}$: factor por el tipo de material del tanque, en esta ocasión acero 316.
- $F_{presión}$: factor por la presión del tanque, en este caso 20bar.

Por lo cual, con base en lo indicado en el libro, se obtiene lo siguiente:

$$Costo RHTC_B = 75,000 * \left(\frac{21.5}{3}\right)^{0.53} * \left(\frac{619.2}{1000}\right) * 2 * 1.25 = \$317,324.68 USD$$

Considerando el tipo de cambio al cierre del 2019 ($18.86MXN^{[65]} = 1USD$). Se tiene que el reactor de HTC tiene un costo actual de \$5,984,743.49 MXN.

2. Ejemplo de la estimación de costos usando los exponentes de Williams. (El método de la regla de los 6 décimos es prácticamente el mismo, simplemente “n” será igual a 0.6).

Estimación de costo del Tanque de almacenamiento de sargazo triturado-TA01:

$$Costo TA_{01} = Costo TA_{Real} * \left(\frac{Vol TA_{01}}{Vol TA_{Real}}\right)^n$$

Se obtuvieron datos de un tanque de $10m^3$ con un costo de \$3,200 USD^[66]. Utilizando un exponente de Williams para depósitos cilíndricos de gran tamaño ($n=0.66^{[64]}$), entonces;

$$Costo TA_{01} = 3200 * \left(\frac{25}{10}\right)^{0.66} = \$5,858.55 USD$$

Con la misma conversión de divisas usada con anterioridad, entonces, el tanque tiene un costo actual de \$110,492.31 MXN.

Los mismos procedimientos se realizaron para todos los equipos listados en el capítulo 3, con lo cual, se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 7-Costo en 2019 por equipo, total HTC, total Gasificación y total Conjunto.

Código del equipo	Proceso	Costo en 2019 [MXN]	
BA	HTC	\$	119,159.04
BB	HTC	\$	119,159.04
BT	HTC	\$	63,838.99
CA	HTC	\$	138,955.51
FP	HTC	\$	4,648,315.68
RHTC	HTC	\$	5,984,743.49
TA01	HTC	\$	110,492.31
TA02	HTC	\$	95,361.15
TA03	HTC	\$	60,352.00
TR	HTC	\$	512,557.21
CG	Gasificación	\$	45,516.17
CO	Gasificación	\$	347,717.67
GAS	Gasificación	\$	7,492,455.80
MG	Gasificación	\$	3,931,955.03
SO	Gasificación	\$	14,122.39
Total, HTC		\$	11,852,934.42
Total, Gasificación		\$	11,831,767.07
Total, general		\$	23,684,701.49

4.2 - Estimación del capital de inversión

Para la estimación del capital de inversión existen muchos métodos distintos. El uso de cada uno dependerá en principio de la información con la que se cuente, y la etapa del proyecto. Dependiendo la rigurosidad del método se tendrán estimación de mayor o menor certeza.

En esta ocasión, se escogió el método de *Aproximación del capital de inversión por factores de Lang*^[67] (Lo abreviaremos como "factores de Lang"). Se basa en "multiplicar el costo de los equipos por ciertos factores para aproximar el capital fijo o total de inversión"^[67]. Este método, es utilizado para obtener estimación de costos del tipo: órdenes de magnitud^[67].

Esta decisión se debe a que; métodos de mayor rigurosidad como la *estimación detallada por artículo*; requiere de conocer a detalle todos los artículos, como lo son: la tubería, instrumentación, control, proceso, etc.^[67] Aquellos de menor rigurosidad como el *Factor de potencia aplicado a la relación planta/capacidad*. Que requiere que se conozca el costo capital de una planta ya construida para su estimación, no se pudo usar, ya que no se contó con dicha información. Este método estima el costo capital de inversión de una planta nueva relacionándolo con el costo capital de inversión de una planta ya construida y de características similares, elevándolo a una potencia^[67].

Dentro del método de factores de Lang, existen varios tipos de factores, los cuales se usan dependiendo el tipo de proceso de cada planta. Estos se separan en: plantas que operan con sólidos; plantas que operan sólidos y fluidos; plantas que operan fluidos^[67].

En este caso se usaron los factores referentes a las plantas de sólidos y fluidos, los cuales están relacionados con el costo de envío de equipo comprado.

Según el método, este costo de envío, tiene un valor del 10%^[67] del costo total de los equipos comprados.

Se notó que el método de factores de Lang no considera el costo del terreno, por lo cual, se decidió hacer una adaptación añadiendo dicho costo.

Se consideró que un lugar óptimo para la planta sería sobre la "Carretera Cancún-Puerto Morelos" (Il. 9). En dicha carretera se encuentra actualmente una cementera, junto con otras industrias. Debido a lo anterior es viable pensar que los permisos de construcción y operación sean más sencillos de obtener ya que existe el antecedente de actividad industrial en el área. Al estar más cerca de las ciudades, es posible que las regulaciones ambientales sean más laxas. Al ser estas mismas ciudades de las más afectadas por las arribazones, se considera que los costos de transporte de materia prima no deben ser muy altos, inclusive, se podría considerar llegar a un acuerdo para tener un subsidio por parte del gobierno local y que ellos suministren el sargazo.

Se realizó una búsqueda de los precios de terrenos a la venta en esa área; con base en el costo de venta y las extensiones de terreno ofertado, se obtuvo un promedio de \$704 MXN/m².

Para la planta de HTC se considera necesaria un área de 1,000m² y para la planta en conjunto HTC-Gasificación se considera un área de 1,500m², estos valores surgen de experiencia previa en la planta de gasificación de la UNAM ubicada en el extremo sur del campus central y adyacente al Centro de Convenciones, así como aproximaciones visuales de fotografías de plantas de HTC.

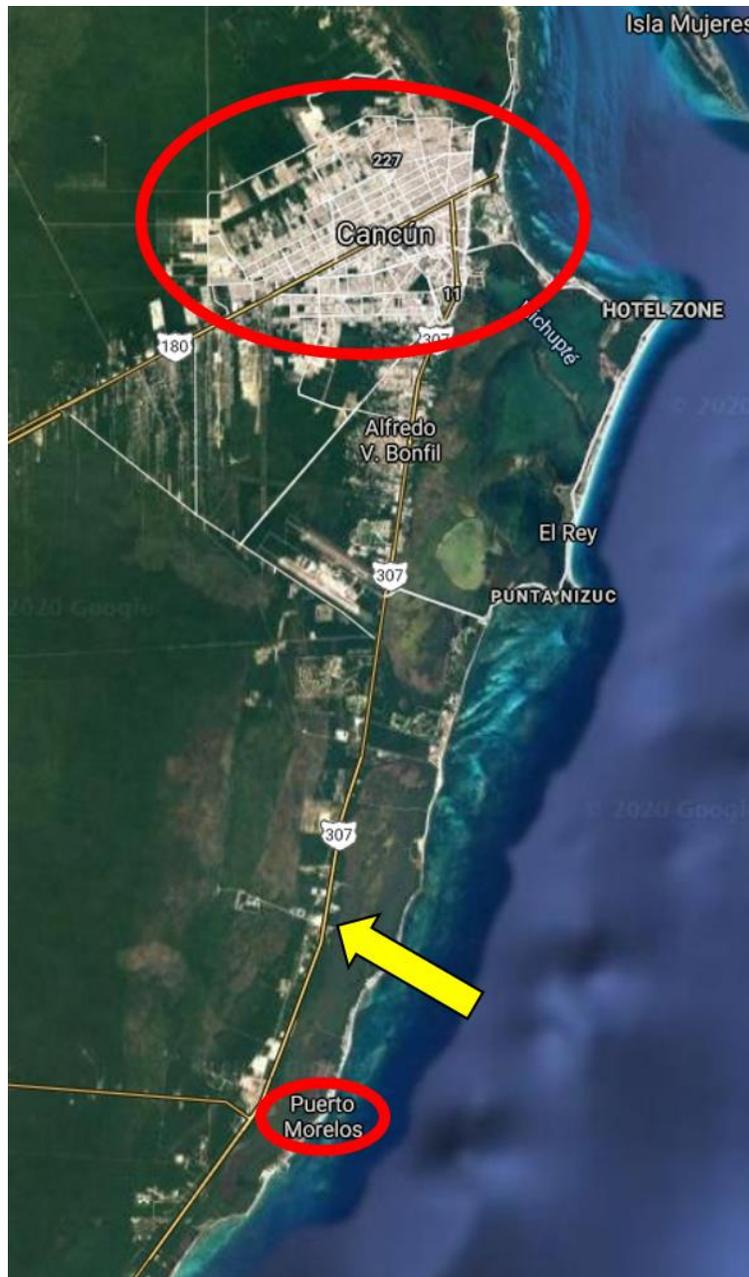


Ilustración 9-Propuesta de área para localizar la planta^[80]

A continuación, se presentan las estimaciones de capital de inversión para el proceso de HTC y el proceso conjunto de HTC-Gasificación.
Capital de inversión planta HTC. (Tabla y factores^[67])

Tabla 8-Capital de inversión planta HTC.

Costos Directos	Factores planta Sólido-fluido ^[67]	[MXN]
Equipo comprado		\$ 11,852,934.42
Subtotal: Costos de envío de los equipos (10% Eq.Comprado)	0.10	\$ 1,185,293.44
Instalación de equipo comprado	0.39	\$ 462,264.44
Control e instrumentación (Instalado)	0.26	\$ 308,176.29
Tuberías (Instalado)	0.31	\$ 367,440.97
Sistemas eléctricos (Instalado)	0.1	\$ 118,529.34
Edificaciones (Instalado)	0.29	\$ 343,735.10
Mejoramiento de áreas comunes	0.12	\$ 142,235.21
Instalaciones de servicio	0.55	\$ 651,911.39
Terreno*		\$ 704,000.00
Costo directo Total		\$ 16,136,520.61
Costos Indirectos		
Ingeniería y supervisión	0.32	\$ 379,293.90
Costos de construcción	0.34	\$ 402,999.77
Costos legales	0.04	\$ 47,411.74
Cuotas de contratistas	0.19	\$ 225,205.75
Contingencias	0.37	\$ 438,558.57
Costo Indirecto Total		\$ 1,493,469.74
Inversión Capital Fija		\$ 17,629,990.35
Capital Laboral	0.75	\$ 888,970.08
Inversión Capital Total		\$ 18,518,960.43

*Información extra añadida

Capital de inversión planta HTC-Gasificación. (Tabla y factores^[67])

Tabla 9-Capital de inversión planta HTC-Gasificación.

Costos Directos	Factores planta Sólido-fluido ^[67]	[MXN]
Equipo comprado		\$ 23,684,701.49
Subtotal: Costos de envío de los equipos (10% Eq.Comprado)	0.10	\$ 2,368,470.15
Instalación de equipo comprado	0.39	\$ 923,703.36
Control e instrumentación (Instalado)	0.26	\$ 615,802.24
Tuberías (Instalado)	0.31	\$ 734,225.75
Sistemas eléctricos (Instalado)	0.1	\$ 236,847.01
Edificaciones (Instalado)	0.29	\$ 686,856.34
Mejoramiento de áreas comunes	0.12	\$ 284,216.42
Instalaciones de servicio	0.55	\$ 1,302,658.58
Terreno*		\$ 1,056,000.00
Costo directo Total		\$ 31,893,481.33
Costos Indirectos		
Ingeniería y supervisión	0.32	\$ 757,910.45
Costos de construcción	0.34	\$ 805,279.85
Costos legales	0.04	\$ 94,738.81
Cuotas de contratistas	0.19	\$ 450,009.33
Contingencias	0.37	\$ 876,333.95
Costo Indirecto Total		\$ 2,984,272.39
Inversión Capital Fija		\$ 34,877,753.72
Capital Laboral	0.75	\$ 1,776,352.61
Inversión Capital Total		\$ 36,654,106.33

*Información extra añadida

4.3 - Estimación de ventas

Para la estimación de ventas, se elaboraron 3 estados de resultados anuales por 15 años para cada proceso, con tres escenarios distintos: precios de venta mínimos, máximos y promedio.

Para obtener cada estado de resultado fue necesario estimar la cantidad de producto generado por cada uno de los procesos y realizar ciertas consideraciones. A continuación, se presentan las estimaciones de producto generado tanto para el proceso de HTC como para el de HTC-Gasificación

Tabla 10-Estimación generación de hidrocarbón por el proceso HTC.

Días laborales	330.0
Materia prima [Ton/día]	51.6
Biomasa base seca [Ton/día]	24.8
Hidrocarbón producido [kg/día]	22538.9
Valor calorífico hidrocarbón [MJ/kg] ^[56]	29.0

Tabla 11-Estimación generación energética por el proceso HTC-Gasificación.

Días laborales	330
Flujo [m ³ /hr]	844.77
Valor calorífico SYNGAS [MJ/Nm ³] ^[56]	7.90
Energía generada [MJ/h] ($\eta=70\%$ motor)	4,671.58
Energía generada en un día [MJ]	112,117.83
Energía generada en un día [MWh]	31.14

Con esta información se pudo asignar un valor económico tanto a la energía eléctrica como al hidrocarbón generado. Esto se hizo de la siguiente manera: Para la energía eléctrica generada, los valores se obtuvieron con información de la base de datos del CENACE^[68] (Centro Nacional de Control de Energía); se tomó el valor del precio marginal local de energía mínimo, máximo y promedio de los días 15 de los meses de enero, mayo, junio y octubre (uno por trimestre) para los denominados “nodos” de Cancún y la Riviera Maya. Los datos de cada nodo por cada mes se promediaron entre sí, dando los siguientes valores para el área conjunta de Cancún-Riviera Maya (Zona donde se propone la planta y se encontrarían los principales consumidores).

Tabla 12-Precio Marginal Local promedio del valor mínimo, máximo y promedio de las zonas de Cancún y Riviera Maya.

PML Max Cancún-Riviera Maya [MXN/MW-hr]	\$	2,584.32
PML Min Cancún-Riviera Maya [MXN/MW-hr]	\$	853.21
PML PROM Cancún-Riviera Maya [MXN/MW-hr]	\$	1,737.31

Concerniente a los valores de precio del hidrocarbón. Se hizo lo siguiente: se obtuvo un valor único de precio de carbón mineral, el cual fue considerado como promedio de \$1,034 MXN/ton^[69]. Para obtener los valores máximos y mínimos se utilizaron las relaciones existentes entre el valor máximo/promedio y mínimo/promedio entre los precios de energía eléctrica; estas relaciones se multiplicaron por el valor promedio del hidrocarbón. A continuación, se presentan las relaciones obtenidas y los precios finales usados de hidrocarbón.

Tabla 13-Relaciones PML y costos de hidrocarbón estimados.

Relación respecto al promedio (PML Max/PML PROM)	1.49
Relación respecto al promedio (PML Mín/PML PROM)	0.49
[MXN/Ton-hidrocarbón] Max	\$ 1,538.12
[MXN/Ton-hidrocarbón] Min	\$ 507.81
[MXN/Ton-hidrocarbón] PROM	\$ 1,034.00

Contando con la información anterior, se hizo un estado de resultados para cada año de vida útil y cada escenario de cada proceso. A continuación, se presentan ejemplos de estos estados de resultados; el primer año del proceso HTC y el primer año HTC-Gasificación ambos del escenario promedio.

Tabla 14-Escenario promedio HTC [MXN].

Venta anual total	\$	7,690,716.63
Costo de Ventas	\$	(1,718,200.00)
Utilidad Bruta	\$	5,972,516.63
Gastos de Venta	\$	-
Gastos Administrativos	\$	(1,481,616.80)
Utilidad Operativa	\$	4,490,899.83
Gastos Financieros	\$	-
Utilidad antes de impuestos	\$	4,490,899.83
Rep. utilidades e impuestos	\$	(1,886,177.93)
Utilidad Neta	\$	2,604,721.90

Tabla 15-Escenario promedio HTC-Gasificación.

Venta anual total	\$	17,855,146.96
Costo de Ventas	\$	(2,258,740.00)
Utilidad Bruta	\$	15,596,406.96
Gastos de Venta	\$	-
Gastos Administrativos	\$	(2,960,587.69)
Utilidad Operativa	\$	12,635,819.27
Gastos Financieros	\$	-
Utilidad antes de impuestos	\$	12,635,819.27
Rep. utilidades e impuestos	\$	(5,307,044.09)
Utilidad Neta	\$	7,328,775.18

Los estados de resultados anteriores se construyeron de la siguiente manera:

- Venta anual total: Cantidad de dinero generado por la venta total del producto de cada proceso, ya sea hidrocarbón o energía eléctrica respectivamente.
- Costo de ventas: Considera la nómina de los trabajadores de cada planta. Para HTC 12 operadores, 3 ingenieros de proceso y 1 director de planta. Para HTC-Gasificación; 18 operadores, 3 ingenieros de proceso y 1 director de planta. (se consideran los 3 turnos laborales)
- Gasto de venta: Se considera que no se requerirá de mercadotecnia ni publicidad, ni tampoco comisiones, etc. Por eso el valor de cero.

- Gastos administrativos: Consideran la depreciación de la planta a lo largo de 15 años para su cálculo se utilizó el método de suma de los dígitos.
- Gastos financieros: Considera que no se requiere de un préstamo, por lo cual no hay intereses por deuda que pagar, otorgándole así un valor de cero.
- Reparto de utilidades e impuestos:
 - Impuestos: El porcentaje que paga se consideró del 32%, este valor se obtuvo al analizar la información financiera de carácter público de los años 2017-2019 de tres empresas que cotizan en la Bolsa Mexicana de Valores (CEMEX^[70], FEMSA^[71] y IENOVA^[72]).
 - Reparto de utilidades: Por ley, se le debe asignar un valor del 10%^[73,74].
 - Por lo tanto, este apartado representa el 42% del valor de la Utilidad antes de impuestos.
- Utilidad Neta: El remanente después del ejercicio.

En las tablas a continuación se presentan los flujos de Utilidad neta de cada uno de los 15 años para cada escenario de cada proceso:

Tabla 16-Flujos de utilidad neta HTC.

Año	1	2	3	4	5
Utilidad Neta promedio	\$ 2,604,721.90	\$ 2,662,011.09	\$ 2,719,300.27	\$ 2,776,589.45	\$ 2,833,878.63
Utilidad Neta pesimista	\$ 334,758.40	\$ 392,047.58	\$ 449,336.76	\$ 506,625.95	\$ 563,915.13
Utilidad Neta optimista	\$ 4,779,455.29	\$ 4,836,744.47	\$ 4,894,033.65	\$ 4,951,322.84	\$ 5,008,612.02
Año	6	7	8	9	10
Utilidad Neta promedio	\$ 2,891,167.82	\$ 2,948,457.00	\$ 3,005,746.18	\$ 3,063,035.37	\$ 3,120,324.55
Utilidad Neta pesimista	\$ 621,204.31	\$ 678,493.50	\$ 735,782.68	\$ 793,071.86	\$ 850,361.05
Utilidad Neta optimista	\$ 5,065,901.20	\$ 5,123,190.39	\$ 5,180,479.57	\$ 5,237,768.75	\$ 5,295,057.94
Año	11	12	13	14	15
Utilidad Neta promedio	\$ 3,177,613.73	\$ 3,234,902.92	\$ 3,292,192.10	\$ 3,349,481.28	\$ 3,406,770.46
Utilidad Neta pesimista	\$ 907,650.23	\$ 964,939.41	\$ 1,022,228.60	\$ 1,079,517.78	\$ 1,136,806.96
Utilidad Neta optimista	\$ 5,352,347.12	\$ 5,409,636.30	\$ 5,466,925.48	\$ 5,524,214.67	\$ 5,581,503.85

Tabla 17-Flujos de utilidad neta HTC-Gasificación.

Año	1	2	3	4	5
Utilidad Neta promedio	\$ 7,328,775.18	\$ 7,443,251.24	\$ 7,557,727.29	\$ 7,672,203.35	\$ 7,786,679.41
Utilidad Neta pesimista	\$ 2,058,715.98	\$ 2,173,192.04	\$ 2,287,668.09	\$ 2,402,144.15	\$ 2,516,620.21
Utilidad Neta optimista	\$ 12,377,743.44	\$ 12,492,219.50	\$ 12,606,695.56	\$ 12,721,171.61	\$ 12,835,647.67
Año	6	7	8	9	10
Utilidad Neta promedio	\$ 7,901,155.46	\$ 8,015,631.52	\$ 8,130,107.58	\$ 8,244,583.64	\$ 8,359,059.69
Utilidad Neta pesimista	\$ 2,631,096.27	\$ 2,745,572.32	\$ 2,860,048.38	\$ 2,974,524.44	\$ 3,089,000.49
Utilidad Neta optimista	\$ 12,950,123.73	\$ 13,064,599.79	\$ 13,179,075.84	\$ 13,293,551.90	\$ 13,408,027.96
Año	11	12	13	14	15
Utilidad Neta promedio	\$ 8,473,535.75	\$ 8,588,011.81	\$ 8,702,487.86	\$ 8,816,963.92	\$ 8,931,439.98
Utilidad Neta pesimista	\$ 3,203,476.55	\$ 3,317,952.61	\$ 3,432,428.67	\$ 3,546,904.72	\$ 3,661,380.78
Utilidad Neta optimista	\$ 13,522,504.01	\$ 13,636,980.07	\$ 13,751,456.13	\$ 13,865,932.19	\$ 13,980,408.24

4.4 - Análisis financiero

Para llevar a cabo el análisis, fue necesario definir un valor de Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento (TMAR) y obtener los flujos de efectivo por año. Dichos flujos, se obtuvieron con el valor del capital de inversión total y los valores anuales de utilidades netas. A estos, se les sumó el valor de la depreciación, ya que esta se considera como una salida de dinero “virtual”. Por lo que las entradas de dinero al proyecto son mayores que aquellos valores en la utilidad neta.

Al tener estos datos, se procedió a analizar y comparar cada escenario posible de cada uno de los proyectos. Para su análisis, fue necesario el uso de distintos índices de evaluación de proyectos, los cuales se mencionan a continuación:

- Periodo de recuperación – PR
- Tasa Interna de Retorno Modificada – TIRM
- Valor Presente Neto – VPN
- Índice de Rentabilidad – IR

Para iniciar el análisis lo primero que se tuvo que hacer fue definir el valor de la TMAR. Para eso, es necesario conocer dos cosas; la tasa de inflación y el riesgo de la inversión.

El valor de la tasa de inflación entre enero de 2019 y diciembre de 2019 fue de 2.74%^[75]. Respecto al valor del riesgo de inversión, se le asignó un porcentaje del 10%^[76], ya que se denominó como un proyecto de alto riesgo; esto se debe, a que si bien no se puede considerar como una tecnología nueva en el estricto uso de la palabra, si es una tecnología reinventándose, por lo cual, se optó por usar los valores más estrictos. Entonces:

$$TMAR = \text{Inflación} + R. \text{Inversión} = 2.74 + 10 = 12.74\%$$

A continuación, como ejemplo, se presentan los flujos de efectivo de los escenarios promedio del proyecto HTC y HTC-Gasificación:

Tabla 18-Flujos de efectivo HTC año 0-15.

Año	0	1	2	3
Flujo de efectivo	\$ (18,518,960.43)	\$ 4,086,338.70	\$ 4,044,853.43	\$ 4,003,368.16
Total	\$ (18,518,960.43)	\$ (14,432,621.73)	\$ (10,387,768.29)	\$ (6,384,400.13)
Año	4	5	6	7
Flujo de efectivo	\$ 3,961,882.89	\$ 3,920,397.62	\$ 3,878,912.35	\$ 3,837,427.08
Total	\$ (2,422,517.24)	\$ 1,497,880.39	\$ 5,376,792.74	\$ 9,214,219.82
Año	8	9	10	11
Flujo de efectivo	\$ 3,795,941.81	\$ 3,754,456.54	\$ 3,712,971.27	\$ 3,671,486.00
Total	\$ 13,010,161.63	\$ 16,764,618.17	\$ 20,477,589.44	\$ 24,149,075.44
Año	12	13	14	15
Flujo de efectivo	\$ 3,630,000.73	\$ 3,588,515.46	\$ 3,547,030.19	\$ 3,505,544.92
Total	\$ 27,779,076.17	\$ 31,367,591.63	\$ 34,914,621.82	\$ 38,420,166.74

Tabla 19-Flujos de efectivo HTC-Gasificación año 0-15.

Año	0	1	2	3
Flujo de efectivo	\$ (36,654,106.33)	\$ 10,289,362.86	\$ 10,206,466.41	\$ 10,123,569.95
Total	\$ (36,654,106.33)	\$ (26,364,743.47)	\$ (16,158,277.06)	\$ (6,034,707.11)
Año	4	5	6	7
Flujo de efectivo	\$ 10,040,673.50	\$ 9,957,777.04	\$ 9,874,880.59	\$ 9,791,984.13
Total	\$ 4,005,966.39	\$ 13,963,743.44	\$ 23,838,624.02	\$ 33,630,608.16
Año	8	9	10	11
Flujo de efectivo	\$ 9,709,087.68	\$ 9,626,191.22	\$ 9,543,294.77	\$ 9,460,398.31
Total	\$ 43,339,695.83	\$ 52,965,887.06	\$ 62,509,181.82	\$ 71,969,580.14
Año	12	13	14	15
Flujo de efectivo	\$ 9,377,501.86	\$ 9,294,605.40	\$ 9,211,708.95	\$ 9,128,812.49
Total	\$ 81,347,081.99	\$ 90,641,687.39	\$ 99,853,396.34	\$ 108,982,208.83

Al tener la TMAR y los flujos de efectivo se logró construir la siguiente tabla:

Tabla 20-Tabla comparativa con índices de evaluación de proyectos (Arriba) y Matriz de decisión (Abajo).

TMAR	12.74%					
Tabla comparativa	HTC Prom	HTC-GAS Prom	HTC Mín	HTC-GAS Mín	HTC Max	HTC-GAS Max
PR [años]	4.6	3.6	11.6	7.7	3.0	2.4
TIRM%	22%	29%	-13%	5%	33%	39%
VPN	\$6,140,364	\$24,921,112	(\$7,048,016)	(\$5,697,683)	\$18,775,463	\$54,255,381
IR	0.33	1.35	-0.38	-0.31	1.01	2.93

Matriz de decisión	HTC Prom	HTC-GAS Prom	HTC Mín	HTC-GAS Mín	HTC Max	HTC-GAS Max
PR<10 años	1	1	0	1	1	1
TMAR < TIRM	1	1	0	0	1	1
VPN > 0	1	1	0	0	1	1
Suma	3	3	0	1	3	3
¿El proyecto es viable?	Si	Si	No	No	Si	Si

Con base en la tabla anterior, se puede ver que ninguno de los proyectos es redituable en caso del peor escenario, caso contrario a lo que ocurre cuando se ven los mejores escenarios. Por lo anterior, se prefirió usar el caso promedio para el análisis.

Es posible ver que el proceso de HTC tiene un periodo de recuperación mayor al del proceso en conjunto, un valor de TIRM menor y un índice de rentabilidad menor que el de HTC-Gasificación. Debido a esto, aunque ambos proyectos son económicamente rentables, se recomienda optar por el proceso en conjunto, ya que se tiene mayor ganancia, en menor tiempo y con el mismo riesgo a la inversión.

5 - Presencia de HTC y Gasificación en la actualidad.

5.1 – HTC

Debido a la necesidad actual de buscar fuentes de energía que no dependen de combustibles fósiles, gran cantidad de universidades, centros de estudio y empresas se han dado a la tarea de investigar, innovar y producir tecnología referente a la carbonización hidrotermal. Por lo cual, se puede prever gran futuro para esta tecnología y por lo mismo, no se debería de dejar pasar la oportunidad de investigar e invertir en ella.

Debido al auge en su popularidad, en los días 14 y 16 de mayo de 2019, se celebró el “2^{do} simposio internacional de carbonización hidrotermal”.

Con base en la lista de asistencia, podemos saber de algunas de las instituciones que actualmente se encuentran interesadas en dicha tecnología son^[78]:

- Aalto University
- Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg
- HAWK (University of Applied Sciences and Arts)
- Processum Biorefinery Initiative AB/ Umeå University
- Queen Mary University of London
- Seoul Women's University
- Technical University of Munich
- Tokyo Tech University
- Umeå University
- University of the Negev
- Universidad Autónoma de Madrid
- University of Extremadura

- University of Leeds
- University of Rostock
- University of Sheffield
- ZHAW (Zurich University of Applied Sciences)
- Imperial College London
- Leibniz Institute for Agricultural Engineering and Bioeconomy (ATB)
- Tokyo Institute of Technology
- Agrokraft GmbH
- Banpu Investment (China) Ltd.
- Biokol Sverige AB
- BV-HTC e.V. / HTCycle AG
- Gooch ThermChem Corporation
- Grenol GmbH
- HBI
- Hunnu Resources
- TerraNova Energy GmbH
- USDA-United States Department of Agriculture
- Entre otras.

Por otro lado, un proyecto basado en esta tecnología se está llevando actualmente en la zona del relleno sanitario del municipio de Texcoco, cerca del AICM, que se dio a conocer de manera pública el día 8 de septiembre de 2020 en un extracto de la sección metrópoli de la versión impresa del periódico “El Universal”. El nombre de dicho proyecto es “Valorización de Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos Mediante Carbonización Hidrotermal”, el cual consistirá en una planta de HTC que aprovechará la biomasa generada por la CDMX para generar hidrocarbón, con el cual se busca reemplazar al carbón mineral usado para la generación de energía eléctrica en centrales termoeléctricas^[79].

5.2 – Gasificación

El proceso de gasificación, al igual que el de HTC, no es un proceso nuevo. Sin embargo, a diferencia del HTC, éste ha recibido mayor interés por la comunidad científica e industrial. Por esto, es posible ver una gran cantidad de plantas gasificadoras alrededor del mundo, inclusive. Debido a la búsqueda de energías renovables, actualmente hay empresas apostando por esta tecnología para aprovechar de mejor manera los desechos generados día a día.

A continuación, se enlistan algunas de las empresas que hacen uso de esta tecnología:

- Dinamarca: DTI, VOLUND R&D Center, Hollesen Engg.^[40]
- EUA: CLEW, Stwallet Engg. ^[40]
- Nueva Zelanda: Fluidyne^[40]
- Francia: Martezo^[40]
- Reino Unido: Energos^[81], Newcastle University of Technology^[40], Shawton Engineering. ^[40]
- Suiza: DASAG^[40]
- India: Associated Engg. Works^[40], Ankur Scientific Energy Technologies^[40].
- Bélgica: SRC Gazel^[40]
- Sudáfrica: SystBM Johansson gas producers^[40]
- Finlandia: Ahlstrom Corporation, VTT^[40]
- Holanda: KARA Energy Systems^[40]
- China: Huairou Wood Equipment^[40], Huantai Integrate Gas supply System^[40], Tianyan Ltd, GIEC^[40].
- Japón: Ebara^[81], Nippon Steel^[81], Thermostelect/JFE^[81]
- Canadá: AlterNRG^[81]

Algunas de estas empresas cuentan con más de una planta de gasificación en diversas partes del mundo. Por ejemplo: “Nippon Steel” cuenta con 33 plantas en diferentes partes de Japón y Corea del sur^[81].

Esta es una tecnología muy conocida en el mundo, por lo que actualmente se está invirtiendo en forma importante para su desarrollo y mejoramiento de procesos, adecuándolos a las necesidades actuales. Dicho lo anterior, no es desatinado pensar que esta es aún una tecnología con mucho futuro por delante.

6 – Conclusiones

Con base en la información anteriormente mencionada se puede concluir lo siguiente:

- Como se menciona en el capítulo 2, la tecnología de carbonización hidrotermal (HTC) es la más adecuada para lidiar con una materia prima tan compleja como lo es el sargazo. Al ser un proceso fisicoquímico se evitan los cuidados necesarios y rigurosos de un proceso biológico. Dentro de los procesos fisicoquímicos analizados, es el único que puede operar usando materia prima con altos niveles de humedad, sin embargo, se recomienda más investigación al respecto.
- El proceso de HTC puede ser utilizado como un proceso secundario después de algún proceso biológico de los mencionados anteriormente. Se debe a que los lodos generados por los procesos biológicos cumplen con las características necesarias para ser empleados como materia prima en el HTC.

- Con base en lo mencionado en el capítulo 4, aunque el proceso de HTC se presenta como viable, se recomienda invertir en un proceso de HTC-Gasificación. La razón radica en que este último proceso presenta mayores rendimientos de inversión y mejores ganancias al analizar el escenario con precios de venta promedio
- Es pertinente precisar que esta primera aproximación técnico-económica da como resultado la viabilidad de procesos HTC y/o HTC-Gasificación para el tratamiento/aprovechamiento del sargazo en las costas del caribe mexicano.
- Debido a que la metodología empleada en este trabajo fue para la obtención de estimados de costos del tipo órdenes de magnitud, se recomienda llevar a cabo estudios más profundos y con metodologías más rigurosas para obtener estimados con mayor cercanía a los costos reales.

7 – Glosario

- **Aminoácidos:** Sustancia química que es el componente básico de las proteínas.
- **Análisis fitoquímico:** Análisis cuyo objetivo es determinar los metabolitos y su cantidad dentro de una especie vegetal.
- **Celulosa:** Biopolímero compuesto por moléculas de glucosa.
- **CENACE:** Centro Nacional de Control de Energía.
- **Descarboxilar:** Grupo carboxilo eliminado en forma de CO₂.
- **Eutrofización:** Fenómeno que ocurre en un medio acuático, existe un incremento de nutrientes y por consiguiente existe un crecimiento acelerado de materia orgánica.
- **Formiato:** Sal o éster del ácido fórmico.^[82]
- **GASB:** Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico GASB; por sus siglas en inglés.
- **HHV:** Mayor poder calorífico HHV; por sus siglas en inglés.
- **Lignina:** Biopolímero de gran estabilidad presente en una gran cantidad de plantas.
- **Liofilización:** Secado por sublimación.
- **MERIS:** Espectrómetro de Imágenes de Resolución Media MERIS; por sus siglas en inglés.
- **Mesófilo:** Organismos que crecen en intervalos de temperatura moderados.
- **MODIS:** Espectro-Radiómetro de Resolución Moderada MODIS; por sus siglas en inglés.
- **N x 6.25:** Factor de conversión; Permite calcular la cantidad de proteína cruda a partir del contenido de nitrógeno determina analíticamente (i.e. Kjeldahl)
- **NASA** : Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio NASA por sus siglas en inglés.
- **Olivino:** Mineral cuya fórmula química es (Mg,Fe)₂SiO₄.
- **PML:** Precio Marginal Local: Precio de la energía eléctrica en un nodo del Sistema Eléctrico Nacional^[83].
- **Termófilo:** Organismos que crecen en intervalos de temperatura altos.

8 - Referencias

- [1]. Rodríguez-Martínez, Rosa & Tussenbroek, Brigitta & Jordán-Dahlgren, Eric. (2016). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe mexicano (2014-2015).
- [2]. Title: Brown algae. Website name: Encyclopaedia Britannica. Publisher: Encyclopaedia Britannica, Inc. Date published: 10 March 2018. URL: <https://www.britannica.com/science/brown-algae> Access date: March 13, 2020
- [3]. United Nations Environment Programme; Caribbean Environment Programme (2016-10-06), Sargassum influx in the Wider Caribbean Region. Recuperado 12 de diciembre, 2020 de: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/27269?show=full>
- [4]. Tapia-Tussell, Raul & Avila-Arias, Julio & Maldonado, Jorge & Valero, David & Olguin Maciel, Edgar & Perez-Brito, Daisy & Alzate-Gaviria, Liliana. (2018). Biological Pretreatment of Mexican Caribbean Macroalgae Consortia Using Bm-2 Strain (*Trametes hirsuta*) and Its Enzymatic Broth to Improve Biomethane Potential. *Energies*. 11. 494. 10.3390/en11030494.
- [5]. Oyesiku, Olubukunola & A., Egunyomi. (2014). Identification and chemical studies of pelagic masses of *Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillon and *S. fluitans* (Borgesen) Borgesen (brown algae), found offshore in Ondo State, Nigeria. *African Journal of Biotechnology*. 13. 1188-1193. 10.5897/AJB2013.12335.
- [6]. Addico, Gloria & Kweku, Amoako. (2016). Preliminary investigation into the chemical composition of the invasive brown seaweed *Sargassum* along the West Coast of Ghana. *African Journal of Biotechnology*. 15. 2184-2191. 10.5897/AJB2015.15177.
- [7]. Laffoley, D.d'A.1, Roe, H.S.J.2, Angel, M.V.2, Ardrón, J.3, Bates, N.R.4, Boyd, I.L.25, Brooke, S.3, Buck, K.N.4, Carlson, C.A.5, Causey, B.6, Conte, M.H.4, Christiansen, S.7, Cleary, J.8, Donnelly, J.8, Earle, S.A.9, Edwards, R.10, Gjerde, K.M.1, Giovannoni, S.J.11, Gulick, S.3, Gollock, M. 12, Hallett, J. 13, Halpin, P.8, Hanel, R.14, Hemphill, A. 15, Johnson, R.J.4, Knap, A.H.4, Lomas, M.W.4, McKenna, S.A.9, Miller, M.J.16, Miller, P.I.17, Ming, F.W.18, Moffitt, R.8, Nelson, N.B.5, Parson, L. 10, Peters, A.J.4, Pitt, J. 18, Rouja, P.19, Roberts, J.8, Roberts,

- J.20, Seigel, D.A.5, Siuda, A.N.S.21, Steinberg, D.K.22, Stevenson, A.23, Sumaila, V.R.24, Swartz, W.24, Thorrold, S.26, Trott, T.M. 18, and V.Vats1 2011. The protection and management of the Sargasso Sea: The golden floating rainforest of the Atlantic Ocean. Summary Science and Supporting Evidence Case. Sargasso Sea Alliance, 44 pp.
- [8]. Jim Gower , Erika Young & Stephanie King (2013) Satellite images suggest a new Sargassum source region in 2011, *Remote Sensing Letters*, 4:8, 764-773, DOI: 10.1080/2150704X.2013.796433
- [9]. Smetacek, Victor & Zingone, Adriana. (2013). Green and Golden Seaweed Tides on the Rise. *Nature*. 504. 84-8. 10.1038/nature12860.
- [10]. Schell, J.M., D.S. Goodwin, and A.N.S. Siuda. 2015. Recent Sargassum inundation events in the Caribbean: Shipboard observations reveal dominance of a previously rare form. *Oceanography* 28(3):8–10, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2015.70>.
- [11]. Wang, M., and C. Hu (2017), Predicting Sargassum blooms in the Caribbean Sea from MODIS observations, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 3265–3273, doi:10.1002/2017GL072932.
- [12]. R.E. Rodríguez-Martínez, A.E. Medina-Valmaseda, P. Blanchon, L.V. Monroy-Velázquez, A. Almazán-Becerril, B. Delgado-Pech, L. Vásquez-Yeomans, V. Francisco, M.C. García-Rivas, Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic Sargassum, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 146, 2019, Pages 201-205, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.015>.
- [13]. Wang, Mengqiu & Hu, Chuanmin & Barnes, Brian & Mitchum, Gary & Lapointe, Brian & Montoya, Joseph. (2019). The great Atlantic Sargassum belt. *Science*. 365. 83-87. 10.1126/science.aaw7912.
- [14]. Van Tussenbroek, B. (5-6 sept 2018). TALLER SOBRE EL CONOCIMIENTO DE LA ARRIBAZÓN DE SARGAZO A LA COSTA DEL CARIBE MEXICANO: INVESTIGACIÓN, MANEJO Y COLABORACIÓN MULTISECTORIAL. De: https://www.conacyt.gob.mx/sargazo/images/pdfs/Impacto_de_las_afluencias_masivas_de_Sargassumpdf.pdf

- [15]. Imágenes obtenidas del Satellite-based Sargassum Watch System (SaWS) con uso de MODIS- AFFAI RCC. Recuperado el 23 Mayo, 2020 de: https://optics.marine.usf.edu/cgi-bin/optics_data?roi=YUCATAN¤t=1
- [16]. Juneja, Ankita & Ceballos, Ruben & Murthy, Ganti. (2013). Effects of Environmental Factors and Nutrient Availability on the Biochemical Composition of Algae for Biofuels Production: A Review. *Energies*. 6. 4607-4638. 10.3390/en6094607.
- [17]. Borines, Myra & de Leon, Rizalinda & Cuello, Joel. (2013). Bioethanol Production from the Macroalgae Sargassum spp.. *Bioresource technology*. 138C. 22-29. 10.1016/j.biortech.2013.03.108.
- [18]. P., Jelyne. (2014). Chemical Analysis and Utilization of Sargassum sp. as Substrate for Ethanol Production. *Iranica Journal of energy and environment*. 5. 10.5829/idosi.ijee.2014.05.02.12.
- [19]. Offei, Felix & Mensah, Moses & Thygesen, Anders & Kemausuor, Francis. (2018). Seaweed Bioethanol Production: A Process Selection Review on Hydrolysis and Fermentation. *Fermentation*. 4. 99. 10.3390/fermentation4040099.
- [20]. Pourkarimi, Sara & Hallajisani, A. & Alizadehdakhel, Asghar & Nouralishahi, Amideddin. (2019). Biofuel production through micro- and macroalgae pyrolysis – A review of pyrolysis methods and process parameters. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 10.1016/j.jaap.2019.04.015.
- [21]. Carrillo, Silvia; Bahena, A.; Casas, M.; Carranco, M.E.; Calvo, C.C.; Ávila, E.; Pérez-Gil, F. El alga Sargassum spp. como alternativa para reducir el contenido de colesterol en el huevo *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, vol. 46, núm. 2, 2012, pp. 181-186
- [22]. Lenstra, Jip & Van Hal, Jaap & Reith, Hans. (2020). Economic aspects of open ocean seaweed cultivation.
- [23]. Vázquez, Héctor & Dacosta, Ophélie. (2007). Fermentación alcohólica: Una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas. *Ingeniería, investigación y tecnología*. 8. 249-259. 10.22201/fi.25940732e.2007.08n4.020.

- [24]. Morton, J. S. 1980. Glycolysis and Alcoholic Fermentation. *Acts & Facts*. 9 (12).
Date Retrieved April 30, 2020 from: <https://www.icr.org/article/glycolysis-alcoholic-fermentation/>
- [25]. Md. Fakruddin, Md. Abdul Quayum, Monzur Morshed Ahmed and Naiyyum Choudhury, 2012. Analysis of Key Factors Affecting Ethanol Production by *Saccharomyces cerevisiae* IFST-072011. *Biotechnology*, 11: 248-252.
- [26]. Wijffels, René & Janssen, Marcel. (2003). Bio-methane & Bio-hydrogen. Status and perspectives of biological methane and hydrogen production.
- [27]. Rittmann, Simon & Herwig, Christoph. (2012). A comprehensive and quantitative review of dark fermentative biohydrogen production. *Microbial cell factories*. 11. 115. 10.1186/1475-2859-11-115.
- [28]. Margareta, Winny & Nagarajan, Dillirani & Chang, Jo-Shu & Lee, Duu-Jong. (2020). Dark fermentative hydrogen production using macroalgae (*Ulva* sp.) as the renewable feedstock. *Applied Energy*. 262. 114574. 10.1016/j.apenergy.2020.114574.
- [29]. Lee, Jae-Hwa & Lee, Dong-Geun & Park, Jae-Il & Kim, Ji-Youn. (2010). Bio-hydrogen production from a marine brown algae and its bacterial diversity. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 27. 187-192. 10.1007/s11814-009-0300-x.
- [30]. Pullen, TIM. (2015). *Anaerobic Digestion – Making Biogas – Making Energy The Earthscan Expert Guide*.
- [31]. Pham Van, Dinh & Fujiwara, Takeshi & Tho Bach, Leu & Pham Phu, Song Toan & Hoang, Minh. (2019). A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. *Environmental Engineering Research*. 25. 10.4491/eer.2018.334.
- [32]. Barbot, Yann & Thomsen, Claudia & Thomsen, Laurenz & Benz, Roland. (2015). Anaerobic Digestion of *Laminaria japonica* Waste from Industrial Production Residues in Laboratory- and Pilot-Scale. *Marine Drugs*. 13. 5947. 10.3390/md13095947.
- [33]. Chowdhury, Zaira & Pal, Kaushik & Yehye, Wageeh & Suresh, Sagadevan & Shah, Syed Tawab & Adebisi, Abimbola & Marlina, Emy & Rafique, Rahman & Johan, Rafie. (2017). Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste. 10.5772/intechopen.69036.

- [34]. Basu, Prabir. (2013). Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. Chapter 5, 155-187.
- [35]. Hu, Xun & Gholizadeh, Mortaza. (2019). Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. Journal of Energy Chemistry. 39. 10.1016/j.jechem.2019.01.024.
- [36]. Ly, Hoang Vu & Kim, Seung-Soo & Woo, Hee & Choi, Jae Hyung & Suh, Dong & Kim, Jinsoo. (2015). Fast pyrolysis of macroalga *Saccharina japonica* in a bubbling fluidized-bed reactor for bio-oil production. Energy. 93. 1436-1446. 10.1016/j.energy.2015.10.011.
- [37]. Guida, Mohamed. (2018). Pyrolysis of Brown Algae (*Bifurcaria Bifurcata*) in a Stainless Steel Tubular Reactor: From a Review to a Case Study. Progress in Agricultural Engineering Sciences. 14. 10.1556/446.14.2018.1.2.
- [38]. De, Santanu & Agarwal, Avinash & Bhaskar, Thallada. (2017). Coal and Biomass Gasification: Recent Advances and Future Challenges. 10.1007/978-981-10-7335-9.
- [39]. Basu, Prabir. (2013). Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. Chapter 7, 211-262.
- [40]. Sansaniwal, Sunil & Pal, Kunwar & Rosen, Marc & Tyagi, S.. (2017). Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 72. 363-384. 10.1016/j.rser.2017.01.038.
- [41]. Breault, Ronald. (2010). Gasification Processes Old and New: A Basic Review of the Major Technologies. Energies. 3. 10.3390/en3020216.
- [42]. Maisano, Susanna & Urbani, Francesco & Cipiti, Francesco & Freni, Fabrizio & Chiodo, Vitaliano. (2018). Syngas production by BFB gasification: Experimental comparison of different biomasses. International Journal of Hydrogen Energy. 44. 10.1016/j.ijhydene.2018.11.148.
- [43]. Libra, Judy & Ro, Kyoung & Kammann, Claudia & Funke, Axel & Berge, Nicole & Neubauer, York & Titirici, Magda & Fühner, Christoph & Bens, Oliver & Kern,

- Jürgen & Emmerich, Karl-Heinz. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*. 2. 10.4155/bfs.10.81.
- [44]. Zhai, Yunbo. (2018). A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, fundamentals, and physicochemical properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 90. 223–247. 10.1016/j.rser.2018.03.071.
- [45]. Jin, Fangming. (2014). Application of Hydrothermal Reactions to Biomass Conversion. 10.1007/978-3-642-54458-3.
- [46]. Reza, M. Toufiq & Andert, Janet & Wirth, Benjamin & Busch, Daniela & Pielert, Judith & Lynam, Joan & Mumme, Jan. (2014). Review Article: Hydrothermal Carbonization of Biomass for Energy and Crop Production. *Applied Bioenergy*. 1. 10.2478/apbi-2014-0001.
- [47]. Hitzl, Martin & Corma, Avelino & Pomares, Fernando & Renz, Michael. (2014). The hydrothermal carbonization (HTC) plant as a decentral biorefinery for wet biomass. *Catalysis Today*. 257. 10.1016/j.cattod.2014.09.024.
- [48]. Sharma, Ronit & Jasrotia, Karishma & Singh, Nicy & Ghosh, Priyanka & Srivastava, · & Neeta, · & Sharma, Raj & Singh, Joginder & Kanwar, Rameshwar & Kumar, Ajay & Sharma, Neeta. (2019). A Comprehensive Review on Hydrothermal Carbonization of Biomass and its Applications.
- [49]. De Mena Pardo, B; Doyle, L; Renz, M and Salimbeni, A (Editors) (2016): Industrial Scale Hydrothermal Carbonization: new applications for wet biomass waste.
- [50]. Méndez, Ana & Gascó, G. & Ruiz, B. & Fuente, E.. (2018). Hydrochars from industrial macroalgae "Gelidium Sesquipedale" biomass wastes. *Bioresource Technology*. 275. 10.1016/j.biortech.2018.12.074.
- [51]. Smith, Aidan & Ross, Andrew. (2016). Production of bio-coal, bio-methane and fertilizer from seaweed via hydrothermal carbonisation. *Algal Research*. 16. 1-11. 10.1016/j.algal.2016.02.026.
- [52]. Tian, Ye & Zhou, Xiong & Lin, Shunhong & Ji, Xuanyu & Bai, Jisong & Xu, Ming. (2018). Syngas production from air-steam gasification of biomass with natural

- catalysts. *The Science of the total environment*. 645. 518-523. 10.1016/j.scitotenv.2018.07.071.
- [53]. Engineering ToolBox, (2003). Fuels - Higher and Lower Calorific Values. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html [Accessed 09/05/2020].
- [54]. Datos de una cotización de Filtro prensa, México, Julio 2020.
- [55]. Ma, Jing & Chen, Mengjun & Yang, Tianxue & Liu, Zhengang & Jiao, Wentao & Li, Dong & Gai, Chao. (2019). Gasification performance of the hydrochar derived from co-hydrothermal carbonization of sewage sludge and sawdust. *Energy*. 173. 10.1016/j.energy.2019.02.103
- [56]. Gunarathne, Duleeka & Mueller, Andreas & Fleck, Sabine & Kolb, Thomas & Chmielewski, Jan & Yang, Weihong & Blasiak, Wlodzimierz. (2014). Gasification Characteristics of Hydrothermal Carbonized Biomass in an Updraft Pilot-Scale Gasifier. *Energy & Fuels*. 10.1021/ef402342e.
- [57]. Engineering ToolBox, (2005). Hydrogen - Specific Heat. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/hydrogen-d_976.html [Accessed 09/06/2020].
- [58]. Engineering ToolBox, (2005). Carbon Monoxide - Specific Heat. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/carbon-monoxide-d_975.html [Accessed 09/06/2020].
- [59]. Engineering ToolBox, (2004). Water - Specific Heat . [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-water-d_660.html [Accessed 09/06/2020].
- [60]. Engineers Edge, L. (n.d.). Overall Heat Transfer Coefficient Table Charts and Equation. Retrieved September 07, 2020, from https://www.engineersedge.com/thermodynamics/overall_heat_transfer-table.htm
- [61]. Wang, Shouqi & Jiang, Xin-Min & Wang, Qian & Ji, H. & Wu, L. & Wang, J. & Xu, S.. (2013). Research of specific heat capacities of three large seaweed biomass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 115. 10.1007/s10973-013-3141-0.

- [62]. Woods, D. R. (2008). Rules of thumb in engineering practice. Weinheim: Wiley-VCH-Verl.
- [63]. Economic Indicators. (2019). Chemical Engineering Magazine, (April), 60.
- [64]. Márquez-Robles, José & López-Sandoval, Eduardo. (1999). Estimado del costo de inversión. Ingeniería Industrial. 49. 10.26439/ing.ind1999.n023.520.
- [65]. Tipo de cambio dólar peso promedio anual 2019, serie de 1954 a 2019. (07, Enero, 2020). Recuperado el 15 de agosto, 2020, de <https://economicon.mx/2020/01/07/tipo-de-cambio-dolar-peso-promedio-anual-2019-serie-de-1954-a-2019/>
- [66]. YUANZHONG (n.d.). Alibaba. Recuperado el 2 de agosto, 2020, de https://www.alibaba.com/product-detail/10m3-Stainless-steel-chemical-storage-tank_60776009551.html?spm=a2700.7724857.normalList.37.3b71401dII9mwW
- [67]. Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2006). Plant design and economics for chemical engineers. Boston: McGraw-Hill.
- [68]. CENACE (n.d.). Historia de Precios de Energía de Nodos Distribuidos. Recuperado el 20 de agosto, 2020, de https://www.cenace.gob.mx/SIM/VISTA/REPORTES/H_RepPreEnergiaSisMEM.aspx?N=29
- [69]. Solís, A. (2020, Julio 14). CFE gastará 2,000 millones de pesos en carbón para generar electricidad • Forbes México. Recuperado 20 de agosto, 2020, de <https://www.forbes.com.mx/negocios-cfe-carbon-electricidad/>
- [70]. Información Financiera Trimestral, CEMEX, trimestre: 4 Año: 2019
- [71]. Reporte anual que se presenta de acuerdo con las disposiciones de carácter general aplicables a las emisoras de valores y otros participantes del mercado, correspondiente al ejercicio fiscal terminado el 31 de diciembre de 2019, FOMENTO ECONÓMICO MEXICANO, S.A.B. DE C.V. General Anaya 601 Pte. Col. Bella Vista Monterrey, N.L. México 64410
- [72]. Reporte Anual que se presenta de acuerdo con las disposiciones de carácter general aplicables a las emisoras de valores y a otros participantes del mercado, para el año terminado el 31 de diciembre de 2019, Infraestructura Energética

Nova, S.A.B. de C.V., Paseo de la Reforma 342, Piso 24 Col. Juárez Ciudad de México, 06600.

- [73]. Martínez, M. (2019, agosto 12). Reparto de utilidades: A revisión porcentaje de la prestación. Recuperado el 20 de septiembre, 2020, de <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Reparto-de-utilidades-a-revision-porcentaje-de-la-prestacion-20190811-0081.html>
- [74]. Impuestum.com. (2010, mayo 20). Todo sobre el Reparto de Utilidades (PTU). Recuperado el 20 de septiembre, 2020, de <https://www.entrepreneur.com/article/263301>
- [75]. INEGI-Calculadora de inflación. (n.d.). Recuperado el 20 de septiembre, 2020, de <https://www.inegi.org.mx/app/indicesdeprecios/calculadorainflacion.aspx>
- [76]. Fundación Carlos Slim, Capacitación para el Empleo, Formulación y evaluación de proyectos, Cálculo de la TMAR Valor Presente Neto. Diapositivas de ayuda de estudio, Recuperado el 19 de septiembre, 2020, de <https://cdn3.capacitateparaempleo.org/assets/4eqz4uo.pdf>.
- [77]. Gaceta del Senado de la República (01 de julio de 2019). Proposición con punto de acuerdo de urgente resolución, que presentan diversos senadores del grupo parlamentario del partido acción nacional, por el que se cita a comparecer ante esta asamblea al secretario de turismo federal, al titular de la COFEPRIS y al coordinador nacional de protección civil, para que en el ámbito de sus competencias y responsabilidades informen a detalle sobre la gravedad del problema del sargazo en quintana roo, recuperado el 10 de abril de 2020, de: https://www.senado.gob.mx/64/gaceta_del_senado/documento/97008
- [78]. DBFZ Tagungsreader, Nr. 142nd International Symposium on Hydrothermal Carbonization | Hydrothermal carbonization as a building block for a sustainable bioeconomy | May, 14th – 16th 2019 | Berlin, Leipzig: DBFZ, 2019, Date of publication: 10th May 2019, ISSN: 2199-9856 (online)ISBN: 978-3-946629-40-5
- [79]. S/n (2020, septiembre 8), EXTRACTO.EL UNIVERSAL, p. A17.
- [80]. Google. (n.d.). [Imagery ©2020 Terrametrics, Map data©2020 INEGI]. Recuperado 14 de mayo de 2020, de:

<https://www.google.com/maps/@21.0344574,-86.9109461,62142m/data=!3m1!1e3>

- [81]. Simona Ciuta, Demetra Tsiamis, Marco J. Castaldi, Chapter Four - Field Scale Developments, Editor(s): Simona Ciuta, Demetra Tsiamis, Marco J. Castaldi, Gasification of Waste Materials, Academic Press, 2018, Pages 65-91, ISBN 9780128127162, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812716-2.00004-2>.
- [82]. REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: Diccionario de la lengua española, 23.^a ed., [versión 23.4 en línea]. <<https://dle.rae.es>> [30 noviembre, 2020]
- [83]. CENACE (n.d) Precios Marginales Locales. Recuperado el 30 de septiembre, 2020 de <https://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/Reportes/PreciosEnergiaSisMEM.aspx>
- [84]. Tenenbaum, David. (2008). Food vs. Fuel: Diversion of Crops Could Cause More Hunger. *Environmental health perspectives*. 116. A254-7. 10.1289/ehp.116-a254.
- [85]. Farm-Energy, D. H., & J. V. (2019, April 12). Biodiesel and the food vs. fuel debate. Retrieved April 17, 2021, from <https://farm-energy.extension.org/biodiesel-and-the-food-vs-fuel-debate/>
- [86]. Pérez, J., Muñoz-Dorado, J., de la Rubia, T. *et al.* Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *Int Microbiol* **5**, 53–63 (2002). <https://doi.org/10.1007/s10123-002-0062-3>
- [87]. Abdelaziz, Omar & Brink, Daniel & Prothmann, Jens & Ravi, Krithika & Sun, Mingzhe & García-Hidalgo, Javier & Sandahl, Margareta & Hulteberg, Christian & Turner, Charlotta & Lidén, Gunnar & Gorwa-Grauslund, Marie. (2016). Biological valorization of low molecular weight lignin. *Biotechnology advances*. 34. 10.1016/j.biotechadv.2016.10.001.