

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y
ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**PROPUESTA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA
PLANTA PILOTO PARA LA OBTENCIÓN DE
BIOCOMBUSTIBLE A PARTIR DEL PROCESAMIENTO
DEL JACINTO DE AGUA (EICHHORNIA CRASSIPES)**

PRESENTADO POR

WILBER MANASÉS MARTÍNEZ MEDRANO

ALFREDO LEONEL MEJÍA CHÁVEZ

RONALD SAMUEL VENTURA LÓPEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA "DR. FABIO CASTILLO FIGUEROA"

NOVIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARÍA GENERAL:

M.Sc. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR INTERINO:

M.Sc. e Ing. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título:

**PROPUESTA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA
PLANTA PILOTO PARA LA OBTENCIÓN DE
BIOCOMBUSTIBLE A PARTIR DEL PROCESAMIENTO
DEL JACINTO DE AGUA (EICHHORNIA CRASSIPES)**

PRESENTADO POR

WILBER MANASÉS MARTÍNEZ MEDRANO

ALFREDO LEONEL MEJÍA CHÁVEZ

RONALD SAMUEL VENTURA LÓPEZ

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente asesor:

M.Sc. e Ing. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO

San Salvador, noviembre de 2021

Trabajo de Graduación aprobado por:

Docente Asesor:

M.Sc. e Ing. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RÍOS LAZO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	i
JUSTIFICACIÓN.....	ii
OBJETIVOS.....	iii
1. Marco de referencia.....	1
1.1. Breve descripción del Jacinto de Agua	1
1.1.1. Impacto del Jacinto de Agua.	6
1.1.2. Estudios de caracterización del Jacinto de Agua.....	17
1.1.3. Usos actuales y futuros del Jacinto de Agua.	23
1.1.4. Energías renovables.....	33
1.1.5. Energía, desarrollo social y medio ambiente.....	38
1.1.6. Deterioro medioambiental atribuido al Jacinto de Agua en El Salvador.	44
1.1.7. Biomasa y usos de la biomasa como fuente de energía.....	47
1.1.8. Potencial energético del Jacinto de Agua.....	51
1.1.9. Selección de un cuerpo de agua para el proyecto.....	56
1.1.10. Generalidades sobre el humedal seleccionado.	57
Resumen del capítulo 1	60
2. Procesamiento de la biomasa para la obtención de biocombustibles sólidos	
61	
2.1. Uso de la biomasa para la generación energética en El Salvador	61

2.2.	Presentaciones de la biomasa	63
2.2.1.	Briquetas.....	63
2.2.2.	Pellets	64
2.2.3.	Normas reguladoras de pellets y briquetas.....	64
2.2.4.	Caracterización de una máquina briquetadora.	68
2.2.5.	Tipos de máquinas briquetadoras	71
2.2.6.	Variables de operación	74
2.2.7.	Etapas de proceso de elaboración de briquetas	76
2.2.8.	Flujo de materia y energía en una planta briquetadora.....	82
	Resumen del capítulo 2	84
3.	Diseño de sistemas y componentes para una planta productora de biocombustibles.....	85
3.1.	Selección del emplazamiento de la planta.....	85
3.2.	Clasificación de la materia prima útil.....	92
3.3.	Picado o triturado del Jacinto de Agua.....	93
3.4.	Secado del Jacinto de Agua.....	94
3.5.	Molido del Jacinto de Agua.....	95
3.6.	Mezclado con agua.....	96
3.7.	Diseño de la briqueta y su proceso de fabricación.	98
3.8.	Alimentación de materia prima.	98

3.9. Selección de la geometría de la briqueta.	99
3.10. Compactación de la briqueta.	99
3.11. Secado y manipulación del producto final.	99
3.12. Elementos de una planta briquetadora a gran escala.	100
Resumen del capítulo 3	112
4. Fabricación de briquetas a partir del procesamiento del Jacinto de Agua	113
4.1. Extracción y procesamiento de ejemplares de Jacinto de Agua.....	113
4.2. Análisis de las variables para el aprovechamiento del Jacinto de Agua como materia prima para la elaboración de briquetas	115
4.3. Diseño y construcción de prototipo de máquina briquetadora.	119
4.4. Fabricación de briquetas.....	132
4.5. Pruebas de combustión	135
4.6. Discusión de resultados	138
Resumen del capítulo 4	140
Conclusiones generales	141
Referencias	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Inflorescencia del Jacinto de Agua.....	1
Figura 1-2. Partes principales del Jacinto de Agua.....	2
Figura 1-3. Ejemplares de Jacinto de Agua interconectados debido a la reproducción vegetativa a través de estolones	3
Figura 1-4. Cortes en peciolos de Jacinto de Agua en sus diferentes etapas	4
Figura 1-5. Carpa alimentándose de Jacinto de Agua.....	6
Figura 1-6. Canal de irrigación bloqueado por Jacinto de Agua en Tenali, India	7
Figura 1-7. Un muelle en la ciudad ribereña de Badajoz, España, atascado por completo de Jacinto de Agua, lo que impide que las embarcaciones salgan o lleguen a este	8
Figura 1-8. Embalse de una central hidroeléctrica afectado por el Jacinto de Agua	8
Figura 1-9. Jacinto de Agua ha invadido el embalse de la central hidroeléctrica Huaneng Sichuan Qingju, en la provincia de Sichuan, China.....	9
Figura 1-10. Centenares de peces muertos entre plantas de Jacinto de Agua.....	10
Figura 1-11. Deterioro de la calidad del agua debido a <i>E. crassipes</i>	11
Figura 1-12. Pescadores artesanales del Lago Victoria, en Kenia, hacen esfuerzos para apartar el Jacinto de Agua y poder desplazarse y pescar	11
Figura 1-13. Humedales de El Salvador con presencia de <i>E. crassipes</i>	13
Figura 1-14. Remoción de Jacinto de Agua en el embalse “Cerrón Grande”.....	14
Figura 1-15. Barcaza recolectora de Jacinto de Agua propiedad del MARN.....	15
Figura 1-16. Puntos de recolección de muestras de Jacinto de Agua para el estudio de MARN-FIAES realizado en 2014.....	19
Figura 1-17. Ejemplares de Jacinto de Agua recolectados	19

Figura 1-18. Usos que los habitantes le dan al Jacinto de Agua.....	24
Figura 1-19. Tratamiento previo que los habitantes le dan al Jacinto de Agua	25
Figura 1-20. Partes del Jacinto de Agua usadas por los habitantes del embalse.....	25
Figura 1-21. Esquema básico de un biodigestor	28
Figura 1-22. Etapas finales de maduración del compostaje orgánico.....	28
Figura 1-23. Elaboración de sobres de papel reciclado a partir del Jacinto de Agua	29
Figura 1-24. Aprovechamiento de la fibra del Jacinto de Agua	29
Figura 1-25: Tableros de fibrocemento fabricados con Jacinto de Agua.....	30
Figura 1-26. Fuentes primarias de energía renovable y sus formas aprovechables	35
Figura 1-27. Proyectos de generación de energía renovable en El Salvador	35
Figura 1-28. Diversificación de la Matriz Energética en El Salvador	37
Figura 1-29. Electrificación en El Salvador en el periodo 1991-2018.....	38
Figura 1-30. Evolución del precio promedio de la energía eléctrica	39
Figura 1-31. Evolución de la capacidad instalada para generación energética.....	43
Figura 1-32. Jacinto de Agua en el embalse de una Central Hidroeléctrica	45
Figura 1-33. Acumulación de Jacinto de Agua en la Laguna de Metapán	46
Figura 1-34. Depósito a cielo abierto de Jacinto acuático extraído	46
Figura 1-35. Pellets de biomasa, fabricados a partir de residuos vegetales.	50
Figura 1-36. Briquetas de biomasa.....	50
Figura 1-37. Ubicación de la Laguna de Metapán	56
Figura 1-38. Laguna de Metapán durante la época seca	57
Figura 1-39. Cuenca del complejo de humedales Güija, sección perteneciente a El Salvador. Los cuerpos de agua que lo componen son mostrados en el mapa.	58

Figura 2-1. Ingenios Azucareros de El Salvador	62
Figura 2-2. Manipulación de grandes volúmenes del bagazo de caña.....	62
Figura 2-3. Diversas presentaciones para briquetas de biomasa.....	63
Figura 2-4. Ejemplos de pellets de biomasa y sus fuentes de origen.....	64
Figura 2-5. Briquetadora manual	70
Figura 2-6. Esquema de la máquina briquetadora experimental por extrusión.....	71
Figura 2-7. Briquetadora de impacto por pistón recíprocante.....	72
Figura 2-8. Briquetadora de tornillo.....	73
Figura 2-9. Utilización de secadores solares.....	79
Figura 2-10. Picadora de martillos accionada por un motor de combustión.....	79
Figura 2-11. Intercambiador de calor de tubo y coraza	80
Figura 2-12. Densificación de la biomasa usando una briquetadora de tornillo.....	80
Figura 2-13. Banda transportadora metálica utilizada para el enfriamiento	81
Figura 2-14. Una tarima con briquetas de biomasa.....	81
Figura 2-15. Esquema de una planta de producción de briquetas idealizada.....	82
Figura 3-1. Uso de una barcaza cosechadora	87
Figura 3-2. Ubicación del terreno comunal de las ADESCO de la Laguna de Metapán.	88
Figura 3-3. Extracción de Jacinto de Agua en la Laguna de Metapán.....	89
Figura 3-4. Almacenamiento de briquetas en pilas.....	90
Figura 3-5. Corte raíz de Eichhornia Crassipes.	93
Figura 3-6. Picado de Jacinto de Agua, Laguna de Metapán.....	94
Figura 3-7. Proceso de secado al sol del Jacinto de Agua	95
Figura 3-8. Molido del Jacinto de Agua, previamente secado.....	96

Figura 3-9. Mezclado de Eichhornia Crassipes con agua.	97
Figura 3-10. Vista satelital de la Laguna de Metapán en octubre de 2021..	102
Figura 3-11. Barcaza recolectora de malezas acuáticas, del fabricante Fine Dredge	103
Figura 3-12. Acoplamiento entre banda transportadora y camión de volteo	104
Figura 3-13. Molino de martillos del fabricante Liyang Rongda Machinery.	106
Figura 3-14. Transportadora de tornillo sinfín para partículas de tamaño reducido.....	107
Figura 3-15. Secador de tambor rotativo para biomasa,	108
Figura 3-16. Briquetadora de extrusión por tornillo sinfín	109
Figura 3-17. Gasificador para biomasa,	110
Figura 3-18. Elementos de una planta productora de briquetas de biomasa.....	111
Figura 4-1. Extracción del Jacinto de Agua en Laguna de Metapán	113
Figura 4-2. Extracción de muestras de Jacinto de Agua en lago de Suchitoto	114
Figura 4-3. Prensa hidráulica de 20 toneladas de fuerza.....	119
Figura 4-4. Esquema del sistema de compresión para la elaboración de briquetas	122
Figura 4-5. Distribución de esfuerzos en un cilindro de pared gruesa sin rotación, sometido a presión interna	124
Figura 4-6. Barra de acero AISI 1020 CD de 2 ¾ pulgadas.	127
Figura 4-7. Barra de acero AISI 1020 CD luego del maquinado.....	128
Figura 4-8. Ensamble removible entre la prensa hidráulica y el molde.....	129
Figura 4-9. Fabricación de conjunto del molde para la máquina briquetadora.....	130
Figura 4-10. Prototipo de máquina briquetadora.	131
Figura 4-11. Llenado del molde con Jacinto de Agua molido	132
Figura 4-12. Medición del peso de la materia prima	133

Figura 4-13. Compresión de Jacinto de Agua aplicando 15 toneladas fuerza	134
Figura 4-14. Briquetas de Jacinto de Agua fabricadas.....	135
Figura 4-15. Ignición de briquetas de Jacinto de Agua.....	136
Figura 4-16. Combustión del Jacinto de Agua únicamente secado	136
Figura 4-17. Ignición de una briqueta fabricada a bajas presiones.	137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Listado de humedales con presencia de Jacinto de Agua en El Salvador.	16
Tabla 1-2. Análisis bromatológico realizado a las muestras de Jacinto de Agua	20
Tabla 1-3. Resultados del estudio de detección de pesticidas.....	23
Tabla 1-4. Proyectos de generación de energía con fuentes renovables más recientes ...	36
Tabla 1-5. Precio promedio al consumidor final de la energía en El Salvador.....	40
Tabla 1-6. Poder Calorífico Superior (PCS) de algunos combustibles.....	52
Tabla 1-7. Resultados del análisis próximo realizado a muestras de Jacinto de Agua	53
Tabla 2-1. Normativas aplicables a los biocombustibles sólidos según región o país.....	65
Tabla 2-2. Propiedades químicas y de composición de pellets o briquetas.	67
Tabla 2-3. Propiedades físicas de los pellets o briquetas.	67
Tabla 2-4. Características de los pellets según las Normas DIN 51731 y DIN Plus.	68
Tabla 2-5. Comparativa entre briquetadoras de pistón y de tornillo.....	73
Tabla 3-1. Información geográfica sobre la Laguna de Metapán.	101
Tabla 3-2. Características de la barcaza recolectora de Jacinto de Agua recomendada.	103
Tabla 3-3. Características del molino de martillos propuesto para el proyecto.	107
Tabla 3-4. Características principales de la transportadora de tornillos sugerida.	107
Tabla 3-5. Principales características de la máquina briquetadora recomendada.	109
Tabla 3-6. Principales características del gasificador recomendado para el proyecto...	110
Tabla 4-1. Poder calorífico de Jacinto de Agua con variación en su composición.....	118
Tabla 4-2. Características principales de la prensa hidráulica seleccionada.....	120
Tabla 4-3. Selección del diámetro de la barra sólida.	126

RESUMEN

El Jacinto de Agua o *Eichhornia crassipes* se ha extendido en gran parte de los cuerpos de agua dulce en El Salvador, exceptuando los de origen volcánico, esto implica un gran impacto negativo debido a su rápido crecimiento, con el fin de presentar propuestas para controlar de manera sostenible su crecimiento se plantea en los capítulos introductorios un panorama general sobre los efectos que el Jacinto de Agua causa sobre el ecosistema acuático, cuál ha sido su origen, sus medios de propagación y además, se hace un análisis sobre la caracterización de esta planta y las aplicaciones existentes o futuras que se le pueden dar a la misma, considerando la problemática social, económica y medioambiental de la Laguna de Metapán.

Se hace un análisis sobre una de las potenciales aplicaciones del Jacinto de Agua con énfasis en aquellas de aprovechamiento energético, se desarrolla una selección en base a criterios sobre la alternativa más viable, la fabricación de briquetas, además de presentar la caracterización de las máquinas comúnmente utilizadas para el procesamiento de su biomasa y un posible flujo en un proceso productivo, así como los criterios para diseñar la geometría y dimensiones de la briqueta y el desarrollo de un prototipo que sirva como medio físico para darle un uso adecuado a la especie acuática .

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, por estar conmigo en todo momento, el cual me dio la inteligencia y sabiduría que me permitió culminar mis estudios y así cumplir uno de mis objetivos.

En segundo lugar, agradezco a mis padres que me apoyaron y me brindaron todos los recursos y herramientas que tuvieron a su alcance, a mi madre Noemy Medrano por su amor, por confiar y creer en mí, por todos esos días que se ha preocupado por mis estudios, a mi padre Moisés Martínez por ser la pieza clave para seguir y culminar mis estudios agradezco además cada uno de sus consejos y siempre desearme lo mejor para mi vida, desde mi corazón les agradezco y los amo. A mis hermanos Gerson y Ivania Martínez también les doy las gracias por su apoyo y ser buenos hermanos. A todos mis familiares cercanos y lejanos que siempre me apoyaron, desearon y se preocuparon durante el transcurso de mis estudios les doy las gracias.

A mis compañeros de tesis les doy las gracias por permitirme compartir juntos esta experiencia, por su confianza y su amistad, siempre les estaré agradecido.

A los docentes y tutor por compartir sus conocimientos durante estos años, con lo que pude desarrollarme profesionalmente y alcanzar esta meta.

A todos mis amigos/as que formaron parte de alguna manera en esta etapa de mi formación académica les agradezco por que en algún momento fueron un apoyo para mí.

Wilber Manasés Martínez Medrano

En primer lugar, quiero agradecerle a mi familia por haberme apoyado a lo largo de toda mi vida en cada uno de los proyectos que he emprendido: me dieron el privilegio de estudiar, de vivir con ellos y de aprender de sus consejos, me han enseñado el valor del trabajo y la importancia de ser leal a quienes lo darían todo por uno. Sin ellos nada de lo que he hecho en mi vida sería posible.

Agradezco también el apoyo incondicional de mi novia, Isi, quien ha estado conmigo desde el inicio de mi carrera y me ha devuelto la confianza en mí mismo cuando me he sentido desfallecer, me ha dado las mayores alegrías y me ha hecho soñar con un mundo mejor, solo por el hecho de que ella está aquí. Quisiera también incluir a mis amigos y compañeros, quienes me han apoyado de muchas formas para continuar incluso si ya no me quedan fuerzas: Melissa, Christian, Benjamín, Sergio, Oscar, Ever, Juan Carlos, Wilber, Ronald, Alexis, Camila, Gaby, Diana, Eliseo, Alicia, y muchos otros que quizá me reclamen por no haberles incluido. Son muy importantes.

No puedo no mencionar a la Asociación de Estudiantes de Ingeniería Mecánica (ASEIM), de la cual formé parte y en la que pude conocer gente nueva, trabajar en equipo junto a grandes personas y aprender algunas de las lecciones más valiosas en cuanto a las relaciones con otros seres humanos.

Y, por último, pero no menos importante, agradecer a la Universidad de El Salvador y a sus docentes, en especial a aquellos que, por su conocimiento, sus consejos o su forma de enseñar han dejado su huella en mí y cuyas lecciones perdurarán por siempre: Julio Huezo, Cecilia Rivas, Mario Martínez, Jorge Zetino y Salomón Torres.

Alfredo Leonel Mejía Chávez

Me siento agradecido por muchas cosas y doy gracias a muchas personas que en todo mi proceso de formación estuvieron apoyándome incondicionalmente, sus consejos, su ayuda y sobre todo su presencia, agradezco sobre todo a mi familia, a mi querida madre María Blanca Luz López de Ventura, quien con su constante preocupación y aliento para mí se convirtió en la fuerza impulsora para continuar, a mi gran padre Oscar Milton Ventura López quien con su apoyo y sacrificio se convirtió en un gran pilar de apoyo y una persona de admiración, a mis estimados hermanos Oscar Ventura, Henry Ventura y Estefany Ventura, quienes siempre fueron una gran motivación para ser perseverante, doy gracias a nuestro asesor y docentes de la Universidad de El Salvador por darme la oportunidad de educarme, por toda la orientación y brindarme el acceso a formarme profesionalmente.

A mis estimados amigos y compañeros de tesis, por no solo compartir su conocimiento y apoyo durante el trabajo de graduación sino en el transcurso de toda la carrera, sin ellos no habría podido llegar tan fácil a estas instancias, razón por la cual les estimare por siempre.

A mis amigos queridos que siempre estuvieron a mi lado y fueron fuente de fortaleza y amistad, algunos con los cuales nunca compartí materias en la universidad y pese a eso siempre me brindaron su ayuda, agradezco a todos aquellos que de forma directa e indirectamente contribuyeron a que todo esto sea posible y pese a que no los mencione en este texto siempre les agradeceré y estimare. Gracias a la vida por permitir que el esfuerzo valga la pena y poder culminar la finalización de esta tesis.

Ronald Samuel Ventura López

INTRODUCCIÓN

El Jacinto de Agua es una planta flotante invasora que causa grandes impactos desfavorables debido a su descontrolado crecimiento en los cuerpos de agua en los que reside, en El Salvador se realizan constantes esfuerzos para limpiar los espejos de agua, realizando labores de extracción de dicha especie, sin embargo, estos esfuerzos son insostenibles en el tiempo.

Entre los diversos cuerpos de agua contaminados por dicha planta se encuentra la Laguna de Metapán, un lugar donde la especie flotante afecta directamente el medio ambiente y a los pobladores de las comunidades aledañas, los cuales dependen en gran medida de la pesca, es debido a esto que se plantea la posibilidad de darle un uso posterior a la extracción, un proceso en el cual las actividades de extracción se conviertan en un proceso productivo que beneficie a las comunidades, reduzca la contaminación y mejore la calidad de vida del entorno de la laguna.

Este estudio se enfoca en la determinación de las características de la planta, se estudian diferentes técnicas de aprovechamiento energético de la especie y se analiza la viabilidad como principal materia prima para la elaboración de briquetas de biomasa, además se realiza el diseño y construcción de un prototipo de máquina briquetadora y los posibles procesos en la línea productiva de la elaboración de briquetas en una planta piloto.

JUSTIFICACIÓN

En El Salvador se realizan con cierta frecuencia labores de limpieza y extracción de Jacinto de Agua de humedales, donde se eliminan aproximadamente 477 hectáreas de superficie cubierta por dicha especie solo en la Laguna de Metapán. En dichas actividades, al no hacerse un uso apropiado de la planta y ser tratada como desperdicio y no como materia prima, se desaprovecha la oportunidad de obtener biocombustibles a partir del procesamiento del Jacinto de Agua extraído, haciendo insostenibles dichas actividades. Tal aprovechamiento se ve limitado debido a la ausencia de dispositivos físicos que tengan la capacidad de realizar el debido procesamiento para la obtención de biocombustibles a partir de esta planta.

El procesamiento adecuado del Jacinto de Agua representa una actividad de vital importancia desde el punto de vista medioambiental, económico y social, potenciando a las regiones aledañas a humedales afectados por esta planta invasora.

OBJETIVOS

Objetivo General

Conceptualizar, diseñar y construir un dispositivo de Ingeniería para la obtención de briquetas de biomasa a partir del procesamiento del Jacinto de Agua, empleando dicho biocombustible en proyectos de desarrollo local.

Objetivos Específicos

- Proponer una alternativa a las organizaciones de desarrollo social y las comunidades en la investigación para mitigar los impactos negativos de esta planta sobre los humedales de El Salvador.
- Caracterizar al Jacinto de Agua y determinar su potencial como materia prima para producción de biocombustibles.
- Definir el método más apropiado para la obtención de biocombustibles a partir del procesamiento del Jacinto de Agua, tomando en cuenta las capacidades técnicas y la tecnología disponible en El Salvador.

1. Marco de referencia

En este capítulo introductorio se presentan las generalidades sobre el Jacinto de Agua, su impacto en el ecosistema, los estudios que se han realizado para identificar alguna potencial aplicación y se desarrollan algunos conceptos clave que permitan entender el rol de esta planta en el ámbito de las energías renovables.

1.1. Breve descripción del Jacinto de Agua

El Jacinto de Agua, cuyo nombre científico es *Eichhornia crassipes*, es originaria de Suramérica y se caracteriza por ser una planta flotante de agua dulce que se ha propagado en la mayor parte de cuerpos de agua en las regiones tropical y subtropicales. Ha sido catalogada como la planta acuática más problemática del mundo, y a pesar de esto, sigue siendo introducida con fines ornamentales por el hombre, dada la vistosidad de su inflorescencia (ver figura 1.1).



Figura 1-1. Inflorescencia del Jacinto de Agua. a) Asta floral que alberga entre tres y ocho flores. B) La asta floral se abre y aparecen las flores, con seis pétalos. El pétalo que crece más arriba en cada flor desarrolla una mancha amarilla. Fuente: Elaboración propia. Fotografía tomada por los autores el 7 de julio de 2019.

Los primeros registros taxonómicos sobre esta planta se tienen en 1801 en Colombia, y según los estudios de la época, su origen se haya en la cuenca de la selva Amazónica, precisamente en Brasil. Dada su naturaleza exótica y su belleza, fue introducida como un souvenir en el resto de los países del continente americano, llegando a EE. UU. en 1884. Antes de 1930, había sido introducida en jardines botánicos y estanques de la mayor parte de países de África, el sureste asiático e incluso las islas de Oceanía.

Se presenta en la figura 1-2 una ilustración del Jacinto de Agua y se señalan sus partes más importantes.

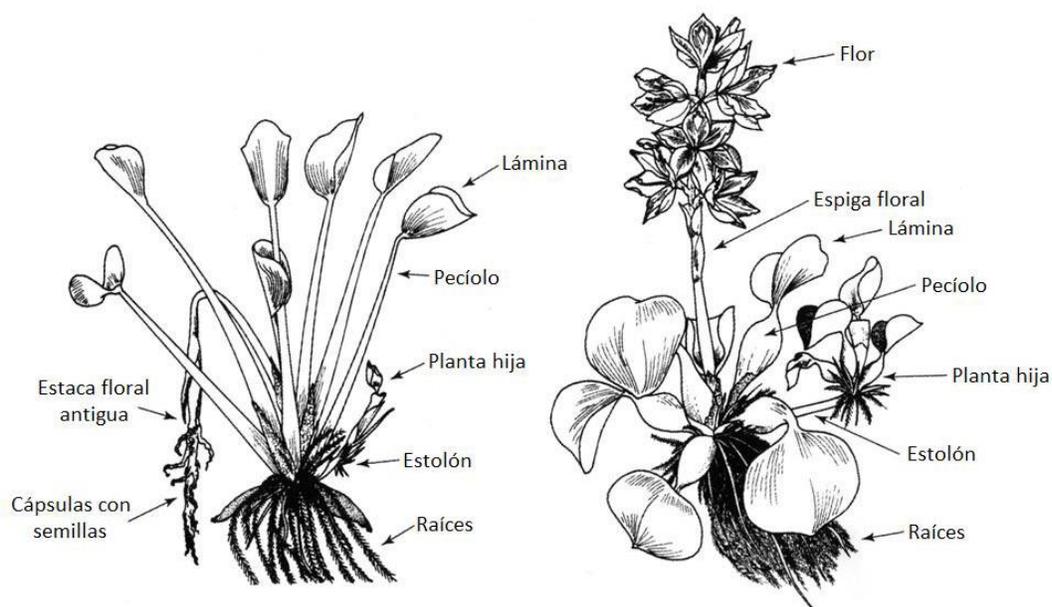


Figura 1-2. Partes principales del Jacinto de Agua. Fuente: Universidad Nacional de Singapur (NUS).

Su naturaleza es tal que en agua dulce con poco movimiento (como en lagos, lagunas y embalses) su población se multiplica aceleradamente utilizando dos mecanismos de reproducción:

Propagación vegetativa: La planta se reproduce a través de estolones, los cuales son brotes laterales que no crecen hacia la superficie, sino que lo hacen hacia los lados. En el estolón, de cada nodo saldrá una planta hija. De esta forma, pueden encontrarse plantas conectadas a otras y formar una cadena, como la mostrada en la parte derecha de la figura 1-2 o como se muestra en la figura 1-3.

Reproducción sexual: Las flores del Jacinto de Agua son hermafroditas, es decir, se fecundan a sí mismas, produciendo una cápsula con semillas (ver figura 1-2, parte izquierda). La estaca o espiga floral con semillas se dobla y cae al agua, y la cápsula con semillas se abre, dispersándose así estas semillas. Sin embargo, este método de reproducción no es el más efectivo, pues la densidad de las semillas provoca que caigan al lecho del cuerpo de agua en el que habitan, y las condiciones para su germinación pudieran no ser las apropiadas, sin embargo, este defecto lo compensan con la alta capacidad de germinación y con la cantidad de semillas producidas (hasta 400 en una cápsula), llegando incluso a permanecer activas por más de 10 años.



Figura 1-3. Ejemplares de Jacinto de Agua interconectados debido a la reproducción vegetativa a través de estolones. Batanouny y El-Fiky reportan una descendencia de hasta 43 ejemplares en 50 días en el sistema del Rio Nilo, Egipto. Fuente: Universidad Nacional de Singapur (NUS), con créditos a Leslie J. Mehrhoff, University of Connecticut.

De la figura 1-2 puede extraerse que existen dos momentos cruciales en el ciclo de vida de esta planta, y esto se refleja en la estructura de sus peciolo: estos son altamente porosos, y se llenan de aire para permitir que la planta se mantenga a flote en la época de floración, y cuando la cápsula de semillas cae al agua, los peciolo se alargan y para asegurar que la cápsula quede sumergida, la planta pierde flotación. Se muestra en la figura 1-4 un corte transversal practicado a un peciolo de Jacinto de Agua cuando este está inflado y su comparación contra un peciolo elongado.



Figura 1-4. Cortes en peciolo de Jacinto de Agua en sus diferentes etapas. A la izquierda, un peciolo inflado cortado de forma longitudinal y transversal, exhibiendo una gran porosidad, lo cual lo hace ser menos denso que el agua y, por ende, le confiere flotación a la planta. A la derecha, un peciolo que empieza a alargarse, y en este caso, las fibras de la planta se comprimen unas a otras, reduciendo el aire en el interior del peciolo. Fuente: SFRC – University of Florida, con créditos a Leslie J. Mehrhoff, University of Connecticut.

Las condiciones óptimas para que el Jacinto de Agua se reproduzca son las siguientes:

Temperatura: El rango óptimo oscila entre 25°C ~ 30°C, y por encima de los 40°C y por debajo de los 10°C su actividad reproductiva y su crecimiento cesan (Kriticos & Brunel, 2016).

Condiciones eutróficas en el agua: La eutrofización se debe a la sobrecarga de nutrientes en el agua, principalmente Nitrógeno (N) y Fósforo (P), procedentes principalmente de la actividad del hombre (actividad agrícola, ganadera e industrial, residuos urbanos y emisiones contaminantes que luego precipitan en forma de lluvia ácida). Esta abundancia de nutrientes hace que las plantas acuáticas crezcan aceleradamente, incrementándose así el consumo de oxígeno disuelto en agua.

Salinidad: Para el Jacinto de Agua, una salinidad igual o mayor al 8% es letal. Por esta razón es que el Jacinto de Agua no prospera en entornos salinos como los manglares (15% aprox.) o el mar abierto (>35%), y se establece bien en agua dulce. El límite de tolerancia a la salinidad en agua para el Jacinto de Agua es de un 0.2% (Ellis, 2011).

pH del agua: El Jacinto de Agua puede sobrevivir en entornos cuyo pH oscila entre 4 y 8. Condiciones alcalinas (pH > 8) o acídicas (pH < 4) inhiben el crecimiento de esta especie. El rango de pH óptimo para *E. crassipes* se encuentra entre 5.8 y 6.0 (El-Gendy, Biswas, & Bewtra, 2004).

El Jacinto de Agua se ha propagado a nivel mundial de forma exitosa por varios factores, principalmente debido a la acción del ser humano que lo ha introducido de forma artificial en regiones en las que no existen depredadores naturales para esta planta. Entre

los enemigos naturales para esta planta se encuentran insectos y hongos que, como es de esperarse, son también originarios de la Cuenca del Amazonas. Sin embargo, en China se ha encontrado que hay especies de Carpa (por ejemplo, la *Ctenopharyngodon idella*) que se alimentan del Jacinto de Agua. Vea la figura 1-5.



Figura 1-5. Carpa alimentándose de Jacinto de Agua. Fuente: Canal de YouTube “Nhà Nghèo TV”.

1.1.1. Impacto del Jacinto de Agua.

El Jacinto de Agua ha cambiado la dinámica de los cuerpos de agua en este último siglo, aunque sus efectos en algunas regiones del mundo las conocemos hasta hace una o dos décadas. Se presenta un panorama general y luego se traslada el estudio hacia la experiencia nacional.

Impacto del Jacinto de Agua a nivel mundial. Esta planta es responsable del constante deterioro en los cuerpos de agua de los países en los que se ha confirmado su presencia. Diversos autores, entre los que se pueden mencionar a (Navarro & Phiri, 2001) y (Cock,

2001) presentan las que, con base a estudios detallados, son las principales formas de impacto del Jacinto de Agua en diversas regiones del mundo. Los principales problemas que se identifican son:

Taponamiento de canales de irrigación: El Jacinto de Agua se expande con facilidad en aguas con poco movimiento, como en canales de riego o de sedimentación. Esto afecta de dos formas: disminuyendo el agua que el canal transporta y comprometiendo la calidad misma del agua. Véase la figura 1-6.



Figura 1-6. Canal de irrigación bloqueado por Jacinto de Agua en Tenali, India. Fuente: The Observers (observers.france24.com).

Obstrucción de vías navegables y atracaderos: El agua en torno a muelles o vías navegables es también susceptible de ser afectada por el Jacinto de Agua, imposibilitando la salida del puerto o atracar en el mismo. Además, ejemplares de estas plantas pueden viajar con la embarcación hacia otras aguas al enredarse en las anclas o el casco, lo que

favorece su propagación. En las embarcaciones pequeñas, si en sus hélices se enredan Jacintos de Agua, pueden fallar (Crafter & Matiza, 1994). Vea la figura 1-7.

Deterioro en embalses y equipos de generación eléctrica: El coste de la energía eléctrica encarece debido a los esfuerzos que deben hacerse de forma periódica para evitar que los ejemplares de Jacinto de Agua lleguen hasta las instalaciones de generación eléctrica, ya que se compromete la integridad de los equipos y la continuidad en la prestación del servicio. Vea las figuras 1-8 y 1.9.



Figura 1-7. Un muelle en la ciudad ribereña de Badajoz, España, atascado por completo de Jacinto de Agua, lo que impide que las embarcaciones salgan o lleguen a este. Fuente: Euractiv (euractiv.com).



Figura 1-8. Embalse de una central hidroeléctrica afectado por el Jacinto de Agua en Hengyang sobre el río Xiang, en la provincia de Hunan, China. El embalse se llenó con Jacinto de Agua ya que esta planta proviene de uno de sus tributarios, el río Zheng. Fuente: ECNS.cn.



Figura 1-9. Un trabajador de la central hidroeléctrica Huaneng Sichuan Qingju, en la provincia de Sichuan, China, muestra cómo el Jacinto de Agua ha invadido el embalse de dicha central. Una tormenta produjo que el Jacinto de Agua fuera arrastrado desde el río Jialing. Fuente: Xinhuanet.com.

Cambios en la dinámica de los ecosistemas acuáticos: Las densas “alfombras” que produce el Jacinto de Agua impiden que la luz solar penetre al agua, modificando las condiciones del ecosistema acuático de diversas formas: el Jacinto de Agua toma los nutrientes de los que se valen el fitoplancton, el zooplancton y los peces para subsistir; restringe el movimiento del agua, haciendo que esta se estanque; toma el oxígeno del agua, creando condiciones anaeróbicas que conllevan a la muerte de las especies acuáticas. Produce, además, oscuridad en el fondo del cuerpo de agua, impidiendo que los peces se reproduzcan y que la actividad fotosintética de las plantas del fondo se lleve a cabo. Se presenta en la figura 1-10 de la página siguiente una de las fatales consecuencias para el ecosistema acuático: la destrucción de las especies acuáticas.



Figura 1-10. Centenares de peces muertos entre plantas de Jacinto de Agua en un lago de Ciudad de México. Se presume que la deficiencia de oxígeno en el agua es la causante del fallecimiento de todos estos peces. Fuente: El Universal (eluniversal.com.mx).

Cambios en la dinámica de las poblaciones cercanas: Los pobladores ya no pueden recurrir al uso de medios como la atarraya para pescar, no pueden desplazarse con sus embarcaciones ni pueden usar el agua para cocinar alimentos ni para ninguna otra aplicación debido a los malos olores y a su contenido de agentes contaminantes. Esto hace que el día a día de las comunidades ribereñas se vuelva difícil, y se viertan de lleno hacia la agricultura intensiva, acción que contribuye aún más a la contaminación de los cuerpos de agua debido al uso de pesticidas y fertilizantes agroindustriales que son arrastrados por la escorrentía o penetran el subsuelo hasta llegar a los mantos acuíferos. En los lugares en los que el desarrollo de la agricultura no es factible, se recurre a la remoción de ejemplares de Jacinto de Agua para poder desplazarse y pescar, como lo establecen los autores (Labrada & Fornasari, 2002). Ver las figuras 1-11 y 1-12.



Figura 1-11. El agua, cuando es invadida por el Jacinto de Agua, adquiere un color y un olor que la hacen inapropiada para realizar cualquier actividad, ni siquiera los peces que se extraen de estas aguas son aptos para el consumo humano. Fotografía tomada por los autores en la Laguna de Metapán el día 9 de agosto de 2019.



Figura 1-12. Pescadores artesanales del Lago Victoria, en Kenia, hacen esfuerzos para apartar el Jacinto de Agua y poder desplazarse y pescar, lo que se traduce en pérdida de tiempo y, con el movimiento de las aguas, los peces generalmente se van, reduciéndose las posibilidades de éxito en esta labor. Fuente: Management of problematic aquatic weeds in Africa, FAO.

Impacto del Jacinto de Agua a nivel nacional. El Jacinto de Agua se ha extendido en gran parte de los cuerpos de agua de El Salvador. No se han visto afectados los cuerpos de agua dulce de origen volcánico, los manglares ni los ríos, pues el Jacinto de Agua prefiere y se adapta mejor a los ambientes con corrientes mínimas o nulas y con salinidad mínima.

De conformidad al Inventario de Humedales publicado por el MARN en 2018, se ha recopilado en un mapa generado con el software ArcGIS® la presencia del Jacinto de Agua en los humedales de El Salvador. Este mapa es presentado en la figura 1-13 y la leyenda de este puede consultarse en la Tabla 1-1, incluyendo la información necesaria para identificar el cuerpo de agua usando un servicio de mapas. Hay que destacar que muchos de los cuerpos de agua forman parte de un mismo sistema hídrico, por ejemplo, los que se encuentran sobre la cuenca del Río Lempa, sin embargo, existen cuerpos de agua no conectados entre sí y se descarta la introducción del Jacinto de Agua a estos cuerpos aislados debido al transporte de ejemplares o semillas por los ríos, sin embargo, discutir el origen o las razones por las que esta planta se ha establecido en algunos cuerpos de agua de El Salvador se escapa de los alcances de esta investigación.

Como era de esperarse, en todos los humedales con presencia de Jacinto de Agua se tienen dificultades similares a las descritas anteriormente: limitación para la pesca artesanal y la navegación, no puede disponerse del agua del humedal para actividades domésticas, mal olor, entre otras ya mencionadas. Según los estudios incluidos en el Inventario Nacional de Humedales, en 2016 se encontraron concentraciones por encima de la norma de cianuro, mercurio, arsénico, plomo, cobre, cinc, níquel, aluminio y cadmio en el lago de Güija. Se cuenta además con coliformes fecales por encima de la norma, y

otros contaminantes de origen orgánico (producto de actividades agrícolas) y doméstico (jabón, grasa, restos alimenticios).

El mantenimiento de humedales con usos relevantes como los embalses de las centrales hidroeléctricas debe ser también incluido en la medición del impacto que supone la invasión del Jacinto de Agua: a finales de 2019, la CEL removió, en conjunto con FIAES y MARN, un total de 1,710 toneladas de Jacinto de Agua que cubrían 5.71 hectáreas del embalse Cerrón Grande, con un costo total de \$18,500.00.



Figura 1-13. Humedales de El Salvador en los que se confirma la presencia de *E. crassipes*. Fuente: Elaboración propia a partir de datos tomados del Inventario Nacional de Humedales El Salvador.

Así como este, han existido en diferentes momentos de la historia reciente proyectos de remoción de Jacinto de Agua en los que se combinan los esfuerzos de trabajadores, lugareños, y en el mejor de los casos, se facilita el trabajo con la implementación de maquinaria pesada y equipos especializados, como las barcas pantaneras, para la remoción de grandes cantidades de Jacinto de Agua y otras malezas

acuáticas, citando a modo de ejemplo la que CEL ha adquirido precisamente para dar mantenimiento a sus embalses (ver figura 1-14).



Figura 1-14. Remoción de Jacinto de Agua en el embalse “Cerrón Grande” a finales de 2019. Es notable el uso de maquinaria pesada y una barcaza especial para este cometido. Fuente: Dinero.com.sv.

El MARN adquirió en 2014 una barcaza para remover el Jacinto de Agua de los humedales nacionales, principalmente las lagunas de Olomega, El Jocotal, Metapán y el embalse Cerrón Grande. Para adquirirla, se contó con el apoyo de la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), invirtiendo más de \$221,000.00 para comprarla a través del proyecto Fondo del Agua. Se muestra esta barcaza en acción en la figura 1-15.

El Jacinto de Agua, además de la contaminación y los costos asociados a su extracción, provoca elevados costos sociales pues hace difícil la vida de quienes buscan en los cuerpos de agua su sustento a través de la pesca o el turismo, además, compromete

la salud y la seguridad de las personas o animales domésticos y/o de granja debido a la proliferación de vectores infecciosos, y reduce al mínimo la utilización de dicha agua para consumo o actividades domésticas aunque sigue usándose para riego, sin embargo, no se han medido los efectos de usar este tipo de agua en cultivos aunque existe evidencia científica de concentraciones de metales pesados y coliformes fecales en los cuerpos de agua con presencia de *E. crassipes*, por lo que pueden formularse conclusiones adelantadas a la luz de los hechos. Nuevamente, esto queda fuera del alcance de esta investigación.



Figura 1-15. Barcaza recolectora de Jacinto de Agua propiedad del MARN, trabajando en el embalse Cerrón Grande en la jurisdicción del municipio de Suchitoto. Esta ha sido bautizada como “Jacinta”, dada la naturaleza de sus funciones.

Tabla 1-1. Listado de humedales con presencia confirmada de Jacinto de Agua en El Salvador.

N°	Nombre del cuerpo de agua	Coordenadas
1	Embalse de Central Hid. 15 de septiembre	13°41'53.3"N, 88°29'47.0"W
2	Embalse de la Central Hid. 5 de noviembre	13°58'51.8"N, 88°46'33.7"W
3	Laguna de San Antonio de La Cruz	14°00'48.3"N, 88°47'19.6"W
4	Planicie inundable Sn. Antonio de La Cruz	14°00'24.1"N, 88°47'30.8"W
5	Embalse de la Central Hid. Cerrón Grande	14°01'54.2"N, 89°02'07.1"W
6	Lago de Güija	14°16'04.6"N, 89°31'26.2"W
7	Embalse de Central Hid. Guajoyo	14°13'55.1"N, 89°28'12.6"W
8	Laguna de Metapán	14°18'30.4"N, 89°27'54.6"W
9	Laguna de San Diego	14°17'45.4"N, 89°27'56.7"W
10	Pantano del Lempita	13°34'00.4"N, 88°38'27.9"W
11	Laguna verde	13°53'29.4"N, 89°47'12.7"W
12	Laguna de Las Ninfas	13°52'39.6"N, 89°47'57.6"W
13	Laguna de Nahualapa	13°28'05.6"N, 89°00'06.3"W
14	Laguneta El Zorral	13°28'17.7"N, 89°0'22.35"W
15	Laguneta Los Garrobos	13°32'50.1"N 88°45'39.6"W
16	Laguneta de San Carlos Lempa	13°22'57.6"N, 88°45'59.8"W
17	Laguna de El Talquezal	13°26'01.5"N, 88°42'58.7"W
18	Laguna de Bijagual	13°47'27.3"N, 90°02'54.9"W
19	Estero de Jaltepeque (parte de agua dulce)	13°19'55.0"N, 88°51'38.4"W
20	Laguna de San Juan	13°22'40.9"N, 88°11'12.8"W
21	Laguna El Jocotal	13°19'56.6"N, 88°14'58.8"W
22	Laguna de Olomega	13°18'29.0"N, 88°03'41.1"W
23	Laguneta El Coco	13°18'54.1"N, 88°06'28.7"W
24	Laguna Los Chorros	13°16'05.5"N, 87°54'52.5"W
25	Laguna de Los Negritos	13°16'57.3"N, 87°56'15.4"W
26	Laguna El Pilón	13°17'08.0"N, 87°55'48.6"W
27	Laguna de Piedras Blancas	13°27'31.8"N, 87°44'05.1"W

Fuente: Adaptado de "Inventario Nacional de Humedales El Salvador", MARN, 2018.

1.1.2. Estudios de caracterización del Jacinto de Agua.

Esta planta acuática ha sido estudiada por diversos investigadores, sin embargo, se tomará como referencia el realizado por el MARN en conjunto con FIAES (Fondo de Iniciativa para las Américas – El Salvador) y la ADEL (Asociación de Desarrollo Económico Local) de Chalatenango, por tener mayor relevancia ya que se hicieron las investigaciones en el Embalse de la Central Hidroeléctrica “Cerrón Grande”, identificado con el punto número 5 en el mapa presentado en la figura 1-13.

Este estudio se titula “Investigación de la Caracterización del Jacinto de Agua *Eichhornia crassipes* del humedal Cerrón Grande, para determinar su aprovechamiento como materia prima en la elaboración de productos agroindustriales, industriales o artesanales”, y tiene por objetivo controlar, manejar y usar de manera sostenible al Jacinto de Agua, fomentando el uso de esta especie como materia prima para diversos productos, con lo cual se requiere conocer sus características fisicoquímicas a través de experiencias de laboratorio.

El embalse Cerrón Grande es el cuerpo de agua dulce de origen artificial más grande de El Salvador, su espejo de agua tiene una superficie de 6,900 hectáreas en época seca y 10,224 hectáreas en época lluviosa (MARN, 2018), y provee bienes y servicios ambientales de gran relevancia para nuestro país, destacando la producción eléctrica y pesquera. Fue declarado humedal de importancia medioambiental el 22 de noviembre de 2005 por la Convención Ramsar (MARN, 2016). En torno a este humedal habitan aproximadamente 98,000 personas distribuidas en los catorce municipios colindantes al embalse (El Paisnal, Suchitoto, Cinquera, Jutiapa, Potonico, San Luis del Carmen, San

Francisco Lempa, Azacualpa, Nueva Concepción, Chalatenango, Santa Rita, San Rafael, El Paraíso y Tejutla).

Este humedal y su cuenca experimentan problemas importantes, siendo el más relevante para el cuerpo de agua la eutrofización y contaminación, debidas a la expansión de la actividad agrícola y a la colmatación (relleno de un cuerpo de agua a través del arrastre de materiales de pequeño tamaño, provenientes de una cuenca sedimentaria). Estas condiciones se ven amplificadas de manera significativa debido a la presencia del Jacinto de Agua. Los efectos de esta planta fueron analizados en la sección 1.1.2.

Se recolectaron muestras de Jacinto de Agua en tres puntos repartidos por todo el embalse el día 20 de julio de 2014 y fueron transportadas ese mismo día a un laboratorio local, donde se practicaron diversas pruebas, entre las que se pueden mencionar:

Análisis proximal (bromatológico general): Sirve para cuantificar la fracción de nutrientes que componen a la muestra bajo estudio. Se realiza a los alimentos, sustratos, plantas, lodos, en fin, sobre cualquier sustancia con contenido orgánico. En la investigación de referencia, se hace el análisis bromatológico para conocer las siguientes características: Proteína, grasa, fibra cruda, ceniza, carbohidratos y contenido de humedad, las cuales son de interés para el aprovechamiento de esta planta con fines alimenticios o energéticos.

Cuantificación de metales pesados contenidos: Se hace énfasis en el Mercurio, Plomo y Arsénico, los cuales comprometen la calidad del agua en el embalse.

Pesticidas contenidos en la planta: Se busca identificar la presencia de pesticidas en el Jacinto de Agua, pues se sospecha que, debido a la fuerte actividad agroindustrial en la

cuenca del embalse Cerrón Grande, existan concentraciones por encima de lo recomendado en esta planta y, por consiguiente, en el agua en que habita.

Se muestra en la figura 1-16 el mapa de recolección de muestras de Jacinto de Agua por parte del equipo de FIAES, MARN y ADEL Chalatenango, y en la figura 1-17 las etapas de la recolección y almacenaje de muestras.

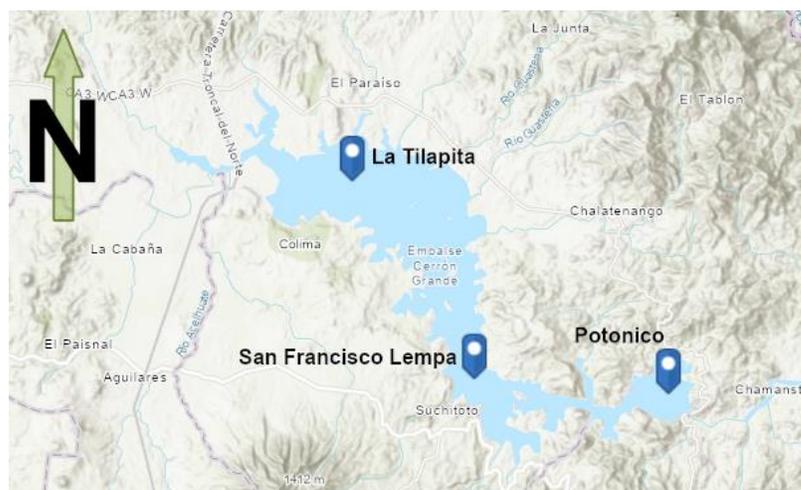


Figura 1-16. Puntos de recolección de muestras de Jacinto de Agua para el estudio de MARN-FIAES realizado en 2014. Fuente: Elaboración propia a partir del mapa publicado en el citado estudio, el cual estaba en baja resolución.



Figura 1-17. A los ejemplares de Jacinto de Agua recolectados se les dividió en raíces, tallos y hojas, se pesaron, cortaron y empaquetaron para luego ser transportados a un laboratorio para su posterior análisis. Fuente: Estudio de referencia MARN-FIAES, 2014.

Los resultados del estudio se presentan en las tablas 1-2 y 1-3, tomándose en cuenta que se han mezclado en iguales proporciones las hojas y los tallos. Los resultados fueron determinados con base en muestras de 100 gramos.

De los resultados presentados en la tabla 1-2 pueden extraerse conclusiones con respecto a los posibles usos que se le pueden dar al Jacinto de Agua como materia prima para diversas aplicaciones.

Tabla 1-2. Resultados del análisis bromatológico realizado a las muestras de Jacinto de Agua extraídas del embalse Cerrón Grande el 20 de julio de 2014.

Variable bromatológica	Puntos de recolección de Jacinto de Agua		
	Tilapita	San Francisco Lempa	Potonico
Proteína (g)	0.83	0.68	0.73
Grasa base húmeda (g)	0.09	0.09	0.09
Fibra cruda (g)	3.35	3.59	3.65
Ceniza (%)	2.74	3.42	3.24
Carbohidratos (%)	9.14	11.22	11.24
Humedad (%)	87.21	84.09	84.70
Metales pesados (ppm)	Mercurio: 0	Mercurio: 0	Mercurio: 0
	Plomo: 3	Plomo: 2.5	Plomo: 2.4
	Arsénico: 0	Arsénico: 0	Arsénico: 0

Fuente: Adaptado del estudio de referencia para el Jacinto de Agua realizado por MARN-FIAES, 2014.

Los resultados han sido agrupados por tipo de variable estudiada. Por ejemplo:

Proteína, grasa y fibra cruda: Las tres son variables nutricionales importantes. De la cantidad presente en cada 100 gramos, se hace énfasis en la proteína, pues no es por sí sola suficiente para el aporte nutricional que requieren las especies animales, pero que

puede mezclarse con otras sustancias para mejorarse. El contenido de grasa no afecta el uso de esta planta en otras aplicaciones. La fibra es una sustancia compuesta por celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales son de gran interés para la obtención de biocombustibles, principalmente etanol.

Ceniza, carbohidratos y humedad: Estas propiedades están relacionadas con aplicaciones energéticas. La ceniza es un componente que se desea en la menor cantidad posible cuando se aplicará la materia prima en procesos de combustión. Los carbohidratos están ligados con la fibra cruda descrita anteriormente (cadenas moleculares que pueden descomponerse en procesos de fermentación), que además pueden usarse como sustrato para germinación de cultivos. La humedad condiciona el momento en el que la biomasa del Jacinto de Agua puede usarse para procesos de combustión, pues a mayor humedad tenga, menor será su aprovechamiento, pero en procesos de compostaje, es una variable que juega a favor, pues la elevada humedad disminuye la necesidad de riego a medida esta humedad se va consumiendo.

Metales pesados: El contenido de metales pesados condiciona en gran medida el uso de esta planta en aplicaciones alimenticias dados los nocivos efectos de estos en la salud de quien lo ingiere o lo manipula. Sin embargo, no se encontraron trazas de mercurio ni arsénico, el único elemento encontrado es el plomo y su concentración no es peligrosa para aplicaciones como el compostaje: el límite de concentración de materias primas para el compostaje es 800 mg de plomo por kg de materia prima en base seca, según se establece en la Norma Chilena NCh2880:2015 (Instituto Nacional de Normalización, 2015).

Se puede concluir de manera general respecto a los resultados de la tabla 1-2 que, debido a que las concentraciones de metales pesados en la biomasa de esta planta son inferiores a los niveles mínimos permisibles, existe un potencial de aplicación para el Jacinto de Agua extraído del embalse Cerrón Grande para el estudio realizado en el año 2014 por MARN-FIAES.

Pesticidas y otras sustancias químicas peligrosas: El Salvador es firmante del Convenio de Rotterdam, celebrado en el Reino de los Países Bajos el 10 de septiembre de 1998, y fue adoptado como Ley de la República en 1999. En este se establecen regulaciones para el uso, comercio y distribución de sustancias químicas peligrosas. Cabe destacar que, según los resultados del estudio de referencia, no se encuentra ninguna de estas sustancias nocivas en la biomasa del Jacinto de Agua, lo que significa que El Salvador ha dado pasos en el rumbo correcto en materia medioambiental al impedir que al territorio nacional lleguen estos productos.

Al estar libres de trazas de sustancias químicas dañinas (nótese la precisión del método para la cuantificación de estos agentes contaminantes en microgramos por kilogramo de muestra), se concluye que no existe un riesgo asociado a los agentes químicos prohibidos por el Convenio de Rotterdam para la manipulación del Jacinto de Agua ni para su uso como materia prima. Se presentan en la tabla 1-3 los resultados del estudio para la detección de pesticidas de uso prohibido llevados a cabo en las muestras de Jacinto de Agua extraídas del embalse Cerrón Grande en el año 2014 por los investigadores del MARN-FIAES.

Tabla 1-3. Resultados del estudio de detección de pesticidas organoclorados y organofosforados prohibidos realizado a muestras de Jacinto de Agua extraídas del embalse Cerrón Grande el 20 de julio de 2014.

Análisis de detección de pesticidas prohibidos	Puntos de recolección de Jacinto de Agua	Puntos de recolección de Jacinto de Agua		
		Tilapita	San Fco. Lempa	Potonico
Compuesto químico	Resultados	Límite menor de detección por el método GC-ECD (µg/kg)		
Hexaclorbenzeno C ₆ Cl ₆	N/D	3.7	3.9	3.8
Lindano C ₆ H ₆ Cl ₆	N/D	1.6	1.7	1.6
Heptacloro C ₁₀ H ₅ Cl ₇	N/D	0.9	1.0	0.9
Aldrín C ₁₂ H ₈ Cl ₆	N/D	0.6	0.7	0.6
Epóxido de Heptacloro C ₁₀ H ₅ C ₇ O	N/D	0.6	0.7	0.6
Gamma Clordano C ₁₀ H ₆ Cl ₈	N/D	0.8	0.9	0.9
2'4-DDE C ₁₄ H ₈ Cl ₄	N/D	0.7	0.8	0.8
Endosulfán C ₉ H ₆ Cl ₆ O ₃ S	N/D	0.8	0.8	0.8
Alfa Clordano C ₁₀ H ₆ Cl ₈	N/D	0.7	0.7	0.7
Dieldrin C ₁₂ H ₈ Cl ₆ O	N/D	0.7	0.7	0.7
4'4-DDE C ₁₄ H ₈ Cl ₄	N/D	0.4	0.5	0.5
Endrín C ₁₂ H ₈ Cl ₆ O	N/D	0.4	0.4	0.4
Endosulfán II C ₉ H ₆ Cl ₆ O ₃ S	N/D	0.8	0.9	0.9
4'4-DDT C ₁₄ H ₉ Cl ₅	N/D	1.7	1.8	1.8
2'4-DDT C ₁₄ H ₉ Cl ₅	N/D	1.5	1.6	1.5
Diazinón C ₁₂ H ₂₁ N ₂ O ₃ PS	N/D	0.7	0.8	0.8
Metil Paratión C ₈ H ₁₀ NO ₅ PS	N/D	1.0	1.0	1.0
Malatión C ₁₀ H ₁₉ O ₆ PS ₂	N/D	1.0	1.1	1.0
Paratión C ₁₀ H ₁₄ NO ₅ PS	N/D	0.8	0.8	0.8
Etión C ₉ H ₂₂ O ₄ P ₂ S ₄	N/D	0.5	0.6	0.6

Fuente: Adaptado del estudio de referencia para el Jacinto de Agua realizado por MARN-FIAES, 2014.

Notas: N/D significa "NON-DETECTED", traducido al español como "no se detecta".

GC-ECD: Cromatografía de gases – Detector de captura de electrones.

1.1.3. Usos actuales y futuros del Jacinto de Agua.

En la Investigación de la Caracterización del Jacinto de Agua del humedal Cerrón Grande realizada en 2014, se hizo un sondeo para conocer si la población local conocía

algún uso para esta planta, qué partes de la planta se usan y qué tratamiento previo le dan a esta antes de usarla. Se presentan los resultados del estudio realizado con el apoyo de los lugareños en las figuras 1-18 a 1-20.

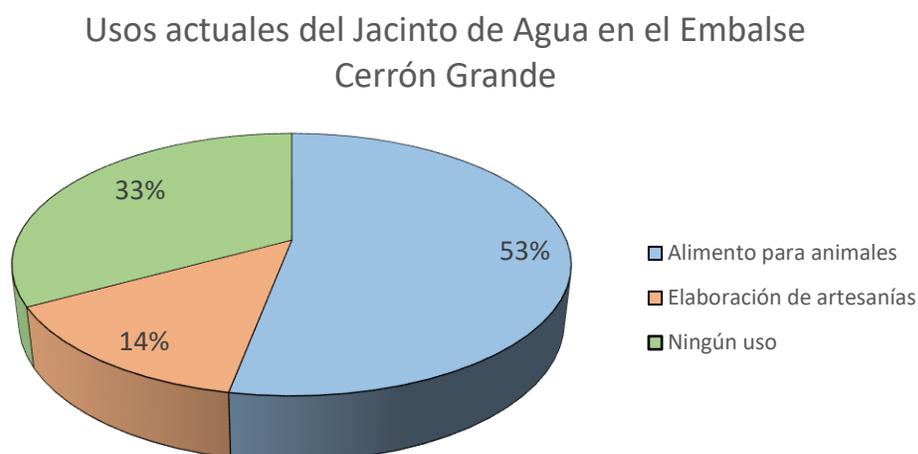


Figura 1-18. Usos que los habitantes de las comunidades aledañas al embalse Cerrón Grande le dan al Jacinto de Agua. Fuente. Elaboración propia a partir de los datos de la Investigación de la Caracterización del Jacinto de Agua, MARN-FIAES, 2014.

De la gráfica mostrada en la figura 1-18 puede extraerse que por lo menos un 67% de los encuestados conoce algún uso potencial del Jacinto de Agua, aunque no se sabe con certeza si son experiencias personales o si es a raíz de haberlo la experiencia de terceros. Esto es un buen punto de partida, pues se busca que las personas reconozcan al Jacinto de Agua como una oportunidad y no solo como a una amenaza para el ecosistema en el que viven.

De los datos mostrados en la figura 1-19 se puede concluir que los habitantes, antes de usar esta planta, le dan un tratamiento básico de lavado para eliminar el lodo o cualquier suciedad superficial que esta pudiera tener. Los que lo usan en artesanías prefieren lavar

con lejía esta planta, las razones no son citadas en la investigación, sin embargo, puede asumirse que es por motivos sanitarios.

Proceso o tratamiento previo que le da al Jacinto de Agua para su aprovechamiento

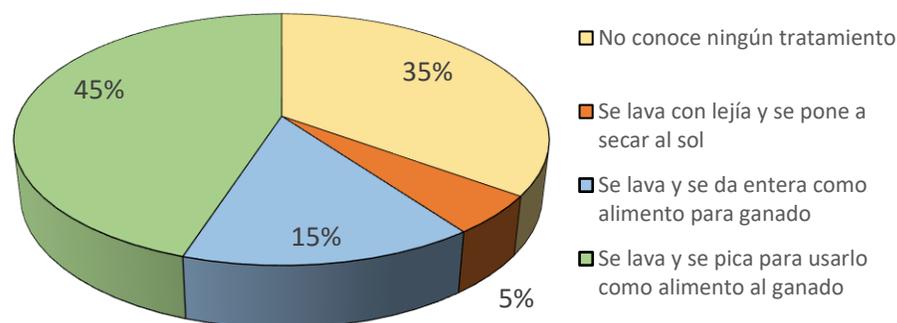


Figura 1-19. Tratamiento previo que los habitantes le dan al Jacinto de Agua extraído del embalse Cerrón Grande antes de usarlo. Fuente. Elaboración propia a partir de los datos de la Investigación de la Caracterización del Jacinto de Agua, MARN-FIAES, 2014.

Partes usadas del Jacinto de agua

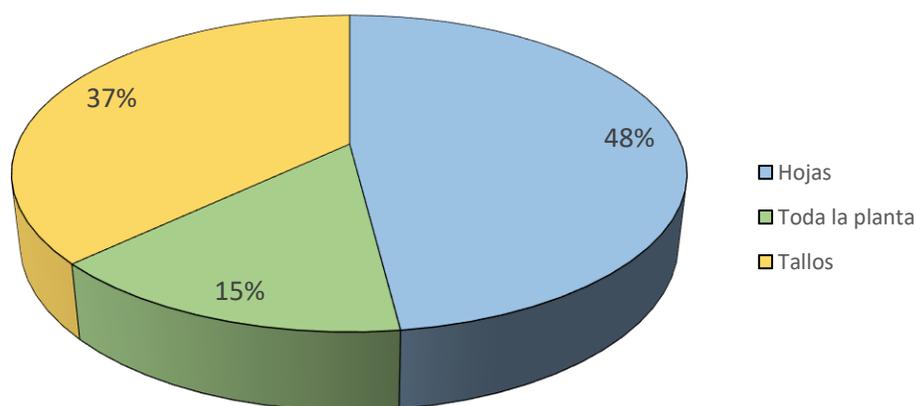


Figura 1-20. Partes del Jacinto de Agua usadas por los habitantes del embalse Cerrón Grande posterior a su tratamiento. Fuente. Elaboración propia a partir de los datos de la Investigación de la Caracterización del Jacinto de Agua, MARN-FIAES, 2014.

Finalmente, la figura 1-20 presenta un escenario en donde se clasifica lo que para cada lugareño es la parte más valiosa de la planta para su aplicación particular. Debe

destacarse que solo un 15% hace uso de las raíces del Jacinto de Agua, el resto de los entrevistados separa las raíces y aprovecha en mayor medida las hojas, y luego los tallos.

A la luz de los resultados tanto del estudio bromatológico y de detección de pesticidas y de la consulta realizada con los lugareños, MARN-FIAES propone cinco alternativas de uso. Estas alternativas son:

Generación de gas mediante biodigestores: Esta idea está en consonancia con las características socioeconómicas y medioambientales presentes en el Embalse Cerrón Grande, pues es un medio para disponer de forma segura tanto del Jacinto de Agua como de los desechos de origen animal o vegetal producidos localmente, y obteniéndose dos productos: el principal es una mezcla de gases con alto contenido de metano (CH_4) conocido como biogás, y como subproducto una mezcla líquida rica en nutrientes como fósforo, nitrógeno, potasio, entre otros, por lo que es usado como agua de riego y fertilización. El proceso para la obtención del biogás se conoce como **digestión anaeróbica**, y como su nombre lo indica, ocurre en total ausencia de oxígeno. Se muestra un esquema básico para la obtención de biogás con aplicación de cocina en zonas rurales en la figura 1-21.

Elaboración de abono orgánico o compostaje: Este producto beneficiaría a las comunidades aledañas al Embalse Cerrón Grande dedicadas al cultivo de diversas especies ornamentales o con fines alimenticios. La FAO define como compostaje a la mezcla de materia orgánica en descomposición en condiciones aeróbicas que se emplea para mejorar la estructura del suelo y proporcionar nutrientes. Sin embargo, no todos los materiales que han sido transformados aeróbicamente son considerados compost. El

proceso de compostaje incluye diferentes etapas que deben cumplirse para obtener compost de calidad. Los riesgos que pueden acarrear al usar materiales que no han pasado satisfactoriamente por esas etapas son: fitotoxicidad, bloqueo de nitrógeno, reducción de oxígeno radicular, exceso de amonio y nitratos en plantas y contaminación de las fuentes de agua. La descripción de las fases del compostaje excede el alcance de esta investigación, sin embargo, se sugiere al lector que consulte el texto publicado por la FAO “Manual de compostaje del Agricultor – Experiencias en América Latina” (Martínez, Román, & Pantoja, 2013). Se muestran aplicaciones satisfactorias del Jacinto de Agua como materia prima para el compostaje en la figura 1-22.

Producción de papel a partir de la fibra vegetal: El proceso para obtención de papel a partir del Jacinto de Agua no es distinto al seguido para transformar cualquier fibra en papel: picado de la materia prima, mezcla, cocción, moldeo, secado, prensado y secado. Se muestran ejemplos de productos de papel que han sido fabricados a partir de la fibra del Jacinto de Agua en la figura 1-23.

Producción de fibras textiles: Los tallos del Jacinto de Agua pueden ser tratado a través de procesos termoquímicos y mecánicos para reducir la tendencia que este tiene a despedir sustancias adhesivas o gomosas, al tiempo que sus fibras se ablandan hasta alcanzar la textura de la lana, facilitando su posterior procesamiento en hilo o tela, solo o combinado con otras fibras textiles como el poliéster en proporciones de 80/20 y hasta 65/35 poliéster/Jacinto, según lo reportado por (Chanana & Tanushree) en el sitio web *Technical Textile*. Se muestran ejemplos de productos textiles terminados elaborados a partir de la fibra del Jacinto de agua en la figura 1-24.

Producción de paneles de aglomerado fibra-cemento: Los tableros de aglomerado fibrocemento son fabricados a partir de cemento, agua y fibras naturales o sintéticas. Las fibras se mezclan con agua formando una pasta a la que luego se añade el cemento. Tras un proceso de fabricación por láminas, se obtiene un material ligero, de alto rendimiento, resistente, y de larga vida útil (Construpedia). Se presentan en la figura 1-25 algunas muestras con diversas composiciones de tablero de fibrocemento, usando como material de refuerzo las fibras del Jacinto de Agua.

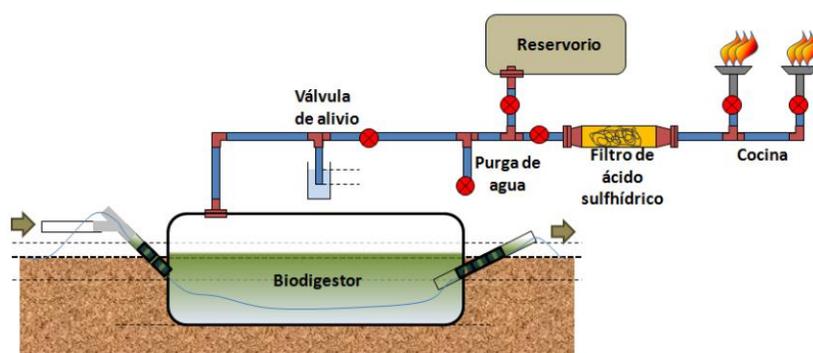


Figura 1-21. Esquema básico de un biodigestor usado en zonas rurales para la producción de biogás. Fuente: Biodigestores tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación, 2019.



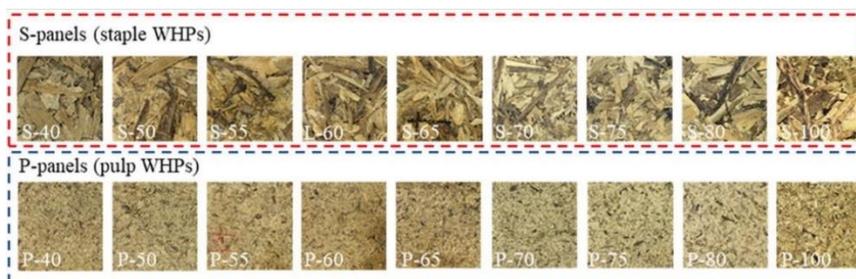
Figura 1-22. Etapas finales de maduración del compostaje orgánico producido a partir del Jacinto de Agua en la cuenca del Lago Victoria, Kenia. Fuente: Production of Organic Compost from Water Hyacinth in the Lake Victoria Basin: A Lake Victoria Research Initiative, 2016.



Figura 1-23. Taller artesanal en Migosi, Kenia, que elabora sobres de papel reciclado que incluyen a la fibra del Jacinto de Agua en su formulación. Fuente: Business Daily Africa, Kenia.



Figura 1-24. Profesores investigadores de la Rajamangala University of Technology Thanyaburi, en Tailandia, muestran las etapas del proceso de aprovechamiento de la fibra del Jacinto de Agua que han desarrollado, desde que es un tallo seco hasta convertirse en una pieza de tela. Fuente: RMUTT.



a)



b)

Figura 1-25: a): muestras de tableros de fibrocemento que varían en composición desde el 40:60 (Jacinto de Agua-cemento) hasta el 100% de Jacinto de Agua. Se pone de manifiesto la diferencia entre usar la materia prima finamente picada (P-Panels) y usar los recortes de tallo de gran tamaño (S-Panels). b) Tamaños relativos de partículas usadas para la fabricación de los S-Panels y P-panels. Fuente: Performance Assesment of water hyacinth-cement composite.

Existen otros usos que no fueron contemplados en la investigación de referencia, llevada a cabo en el Embalse Cerrón Grande. Estas se listan a continuación:

Purificación de agua: El Jacinto de Agua puede usarse para remover impurezas del agua aprovechando el fenómeno conocido como *biorremediación*, el cual consiste en el uso de organismos vivos para prevenir o restaurar daños provocados por acciones antropogénicas que alteran la estabilidad de los diferentes ecosistemas. Estos organismos son capaces de eliminar los contaminantes orgánicos e inorgánicos de un medio, dada su capacidad de

utilizar dichos compuestos contaminantes presentes en su entorno y transformarlos en precursores de sus constituyentes celulares (Amores-Sánchez, Coto-Pérez, & Marrero-Coto, 2012). En este contexto, el Jacinto de Agua puede usarse para la remoción de floculantes en las etapas preliminares de un sistema de tratamiento de agua potable, dando como resultado una reducción en la turbidez y en la cantidad de sólidos suspendidos en el agua tratada. En el caso de las aguas negras, se usa el Jacinto de Agua para remover los metales pesados, elementos orgánicos y patógenos del agua, pues todos estos componentes favorecen el crecimiento de la planta (Intermediate Technology Development Group, 1997).

Fabricación de briquetas de biomasa: Esta alternativa busca desplazar al consumo de biomasa de fuentes tradicionales (leña o carbón vegetal) lográndose dos objetivos primordiales: reducción de las poblaciones del Jacinto de Agua y reducción en la tala de árboles. En las poblaciones ribereñas de Kenia (cercanas al Lago Victoria), la disponibilidad de la biomasa es un factor clave para la selección del combustible a elegir, mucho más que su costo o la energía que esta biomasa produzca. La disponibilidad de energía accesible está relacionada estrechamente con las mejoras en la calidad de vida de las poblaciones rurales, y el aprovechamiento del Jacinto de Agua en forma de briquetas de biomasa permite generar oportunidades de desarrollo a través de la generación de empleos y el acceso a la energía para una población constantemente creciente. De no cubrirse satisfactoriamente la demanda energética, existirá una necesidad que será suplida con combustibles no renovables o con leña/carbón, ambas situaciones desfavorables para el medio ambiente (Rodrigues, Omondi-Odero, Akuno, Kerich, & Maobe, 2014).

Alimentación de animales de corral: En algunos países del sureste asiático se ha experimentado con el Jacinto de Agua para alimentar animales de corral, mezclado con otras sustancias orgánicas (residuos vegetales, arroz integral, pulpa seca de coco, sal, entre otros ingredientes de bajo costo y relativa gran disponibilidad en las zonas rurales). Algo que debe notarse es que debido a su alto contenido de humedad y minerales no es del agrado de todos los animales (Rodrigues *et al*, 2014). Por lo general, el Jacinto de Agua es rechazado por todos los animales de corral en un estado fresco, pero al ensilarlo mezclado con melaza y arroz integral, o arroz y yuca, se tiene un nivel de aceptación entre “bien” y “muy bien” por parte del ganado (Indulekha, Thomas, & Anil, 2019).

Alimentación de peces: Algunas especies de pez, como la carpa china (*Ctenopharyngodon idella*), la tilapia (peces de la familia *Oreochromis*), la carpa plateada (*Hypophthalmichthys molitrix*), el pez dólar (peces de la familia *Characidae*) y el bagre (peces de la familia *Ariidae*) pueden ser usados para controlar directamente al Jacinto de Agua, pues esta planta es del agrado de estas especies. Cabe destacar que algunas de estas especies tienen interés comercial por su carne (carpas, tilapia, bagre) y, al no haber otras fuentes de alimentación, la carpa china puede comer hasta un 40% de su peso corporal al día, reduciendo así las poblaciones de Jacinto de Agua (Intermediate Technology Development Group, 1997). La FAO describe en su Manual Básico de Acuicultura Integrada (2004) un sistema Jacinto de Agua – Peces en el que se logran rendimientos de hasta 6 ton/ha/año de carne de carpa china, usando como alimento únicamente al Jacinto de Agua.

Estas aplicaciones han sido probadas en otras regiones del mundo, sin embargo, no pueden solamente importarse y hacer una réplica exacta, existen diversos factores que condicionan y limitan su aplicación, por lo tanto, las soluciones que se planteen para abordar el problema del Jacinto de Agua deben diseñarse acorde al lugar en donde se pretende tomar acción.

1.1.4. Energías renovables.

En cualquier discusión sobre el calentamiento climático, el tema de las energías renovables es recurrentemente invocado como el primero de muchos cambios que el mundo puede implementar para contrarrestar los negativos efectos del incremento de la temperatura media global. Esto es sujeto a debate por muchos debido a sus pro y contras, pero lo que también es debatible es una definición exacta para las energías renovables: todos saben citar ejemplos de fuentes de energías renovables, pero no un concepto que las describa o englobe a todas (Nunez, 2019).

La Administración de la Información de Energía de los Estados Unidos (IEA, por sus siglas en inglés) define a la energía renovable como aquella que proviene de fuentes que se regeneran naturalmente, pero en un flujo limitado. Los recursos renovables son virtualmente inagotables en duración, pero su disponibilidad energética por unidad de tiempo es limitada.

El Diccionario Collins ofrece tres definiciones para la palabra Energía Renovable:

1) Es un sinónimo de Energía Alternativa, la cual se define como una forma de energía proveniente de una fuente natural como el viento, el sol, cascadas u olas. 2) Es la energía producida por el viento, el sol, y otras fuentes que nunca se agotan. 3) Energía procedente

de fuentes derivadas del Sol, viento, o cualquier otro proceso natural, y que están disponibles siempre.

Una tercera fuente consultada es la web de Iberdrola, y la definición que ofrece es la siguiente: Las energías renovables son aquellas que provienen de fuentes naturales inagotables, bien porque contienen una gran cantidad de energía (como el sol o el viento) o porque son capaces de regenerarse en poco tiempo (como la biomasa).

Al analizar detenidamente estas definiciones (o cualquier otra que el lector encuentre), debe detenerse y conectar las palabras que comparten en común: natural e inagotable. La forma en que se relacionan estas dos palabras con el Jacinto de Agua es que esta planta tiene un origen natural (aunque en algunas regiones haya sido introducida de forma artificial, con o sin intención de dañar el ecosistema) y su disponibilidad, una vez se ha logrado diseminar en un cuerpo de agua, se vuelve virtualmente infinita si el recurso es explotado de forma sostenible. Partiendo de esto, puede catalogarse al Jacinto de Agua como una fuente de energía renovable.

Existen, a su vez, diferentes tipos de energía renovable. Estos pueden diferenciarse, principalmente, al identificar el fenómeno que las origina. Existen tres fuentes mayores de energía renovable, la más fácilmente identificable es El Sol, y las dos restantes son la interacción gravitacional del sistema Tierra – Luna, y el calor del núcleo terrestre. Se muestra en la figura 1-26 un diagrama que muestra las tres fuentes principales de energía renovable y las formas aprovechables de estas.

En El Salvador, la matriz energética nacional muestra una progresión hacia las energías renovables. Solamente en el año 2020 se prevé finalice la construcción y puesta

en línea de diez proyectos de generación eléctrica con energías renovables, según se muestra en la figura 1-27, y se muestran en la tabla 1-4 algunos detalles relevantes sobre cada uno de estos proyectos.



Figura 1-26. Fuentes primarias de energía renovable y sus formas aprovechables. Fuente: Adaptado de “Centrales de Energías Renovables: Generación Eléctrica con Energías Renovables”, p. 28.

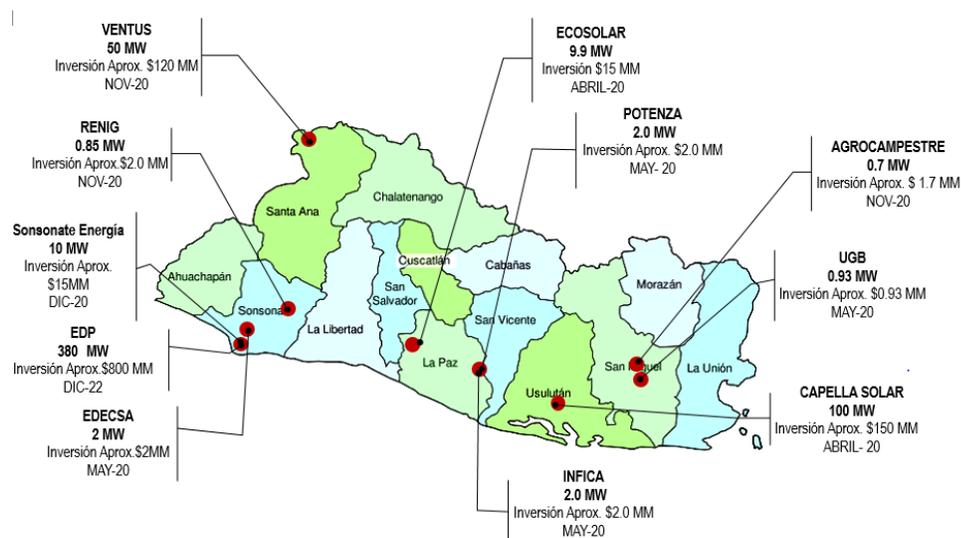


Figura 1-27. Proyectos de generación de energía renovable en El Salvador, fechas previstas de finalización y capacidad proyectada. Fuente: Avance de la Diversificación de la Matriz Energética, CNE.

Tabla 1-4. Detalles de los proyectos de generación de energía con fuentes renovables más recientes en El Salvador.

Nombre del Proyecto	Capacidad		Inicio de operación estimado	Inversión (USD \$)
	Instalada (MW)	Recurso		
Capella Solar (Albireo I)	50	Solar Fotovoltaico	Abril 2020	\$75 millones
Capella Solar (Albireo II)	50	Solar Fotovoltaico	Abril 2020	\$75 millones
ECOSOLAR	9.9	Solar Fotovoltaico	Abril 2020	\$15 millones
Sonsonate Energía Ltd.	10	Solar Fotovoltaico	Diciembre 2020	\$15 millones
Agrocampestre S.A. de C.V.	0.7	Biogás	Noviembre 2020	\$1.68 millones
RENIG, S.A. de C.V.	0.85	Biogás	Noviembre 2020	\$2.04 millones
POTENZA, S.A. de C.V.	2	Solar Fotovoltaico	Mayo 2020	\$2 millones
EDECSA	2	Solar Fotovoltaico	Mayo 2020	\$2 millones
Universidad Gerardo Barrios	0.93	Solar Fotovoltaico	Mayo 2020	\$0.93 millones
IMFICA, S.A. de C.V.	2	Solar Fotovoltaico	Mayo 2020	\$2 millones
Tracia Network Corporation	50	Eólico	Noviembre 2020	\$120 millones
Energía Del Pacífico	355	Gas Natural	Diciembre 2022	\$800 millones

Fuente: Adaptado de "Plataforma de Información para Proyectos con Energías Renovables", CNE.

De todos los proyectos mostrados en la figura 1-27 y detallados en la tabla 1-4, la mayor parte son de energía solar fotovoltaica. Esto obedece al abaratamiento de los costos de los paneles solares y las baterías: desde su lanzamiento comercial a finales de los años 70 hasta la actualidad, el costo por producir un watt de energía eléctrica ha disminuido exponencialmente, costando \$76.77 en el año 1977 y cayendo hasta un valor de \$0.34 en 2014 (Diamandis, 2014). La matriz energética de El Salvador ha cambiado mucho a lo

largo de los años. Se presenta en la figura 1-28 un gráfico que muestra el porcentaje que la capacidad instalada de determinado recurso aportó a nuestra matriz energética entre los años 1990 y 2018.

A partir del año 2017, el CNE ha tomado a bien incluir en la matriz energética a aquellos generadores que no participan en el mercado mayorista (proyectos de autoconsumo principalmente), pues estos forman un porcentaje considerable de la capacidad instalada, un 7.5% del total).

Diversificación de la Matriz Energética en El Salvador Periodo 1990-2018

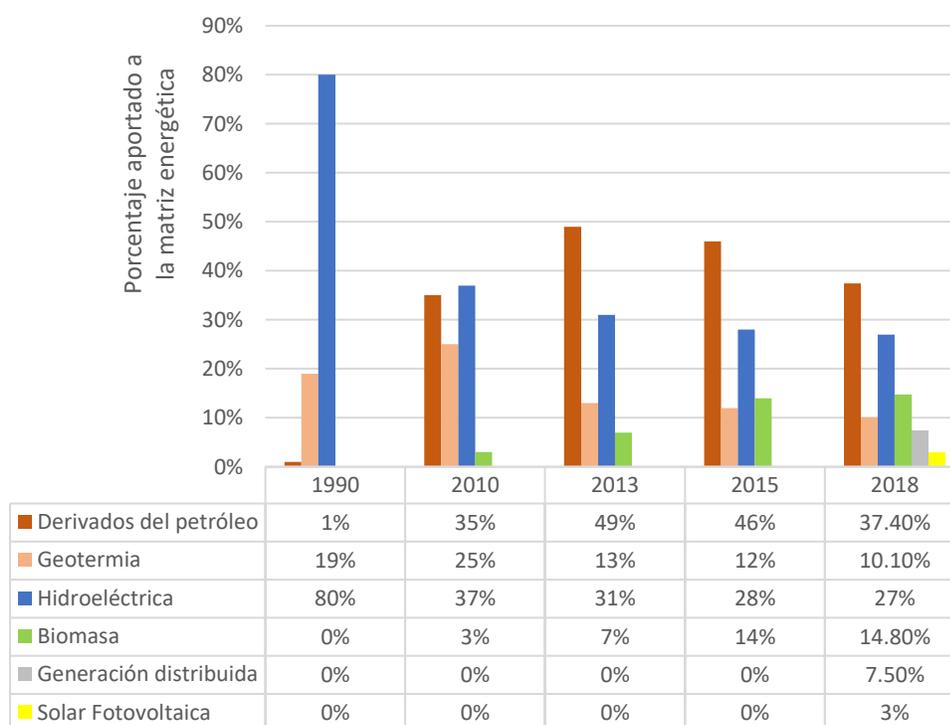


Figura 1-28. Diversificación de la Matriz Energética en El Salvador. Debe destacarse que entre los años 1990 y 2010 la información relacionada a los balances energéticos no fue documentada, esta práctica fue retomada hasta la conformación del CNE en 2007. Fuentes: “Plan Indicativo de la Expansión de la Generación Eléctrica de El Salvador 2019-2018”, CNE; “Country Report – El Salvador”, Guzmán, R; “Informe del Sector Eléctrico de El Salvador”, Zumma Ratings; “El camino del cambio de la matriz energética en El Salvador”, CNE.

1.1.5. Energía, desarrollo social y medio ambiente.

En la medida que la matriz energética de El Salvador se ha diversificado, y la capacidad instalada aumenta, es natural suponer que los costos de la energía, el acceso a la misma y el consumo per cápita crecen en esa misma medida. Sin embargo, todo proyecto a desarrollarse tiene repercusiones energéticas (incluso si se aprovechan energías renovables), y en esta sección se discutirá la relación entre energía, sociedad y medio ambiente.

Como primer punto, se analiza cómo ha evolucionado la disponibilidad de la energía eléctrica en El Salvador, como porcentaje de la población. Véase la figura 1-29.

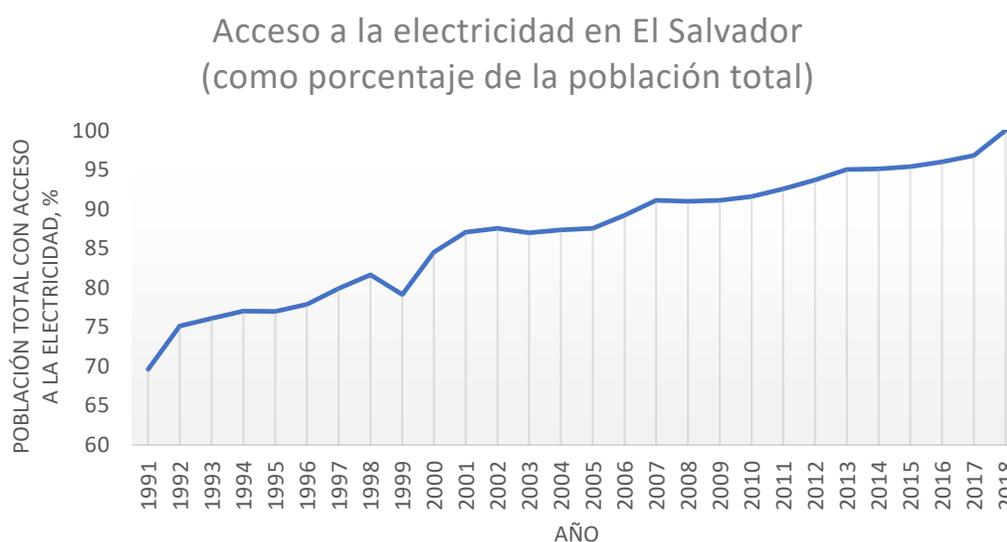


Figura 1-29. Electrificación en El Salvador en el periodo 1991-2018. Según cifras oficiales, se tiene un 100% de acceso a la electricidad a partir del año 2018. Fuente: Banco de datos del Banco Mundial.

Como pudo verse en la figura 1-29, la tendencia siempre ha sido hacia el alza. En torno al año 2018 se reporta un 100% de electrificación (incluidas las poblaciones rurales). Sin embargo, queda en el lector el cuestionarse esta aseveración. Si bien, la capacidad para producir energía de forma local aumenta, el costo de esta no baja como consecuencia

de un aumento en la oferta, por el contrario, el precio por kilowatt experimentó un aumento sin precedentes entre los años 2008 y 2012, esto como efecto del incremento a nivel mundial de los precios del petróleo, y si se revisa nuevamente la figura 1-28, el lector puede evidenciar que más de la mitad de la energía consumida se produce a partir de derivados del petróleo, lo cual justifica este encarecimiento. Se presenta en la figura 1-30 un gráfico con los precios de la energía para el usuario final en el periodo 2001-2019 y en la tabla 1-5 los valores correspondientes al gráfico.

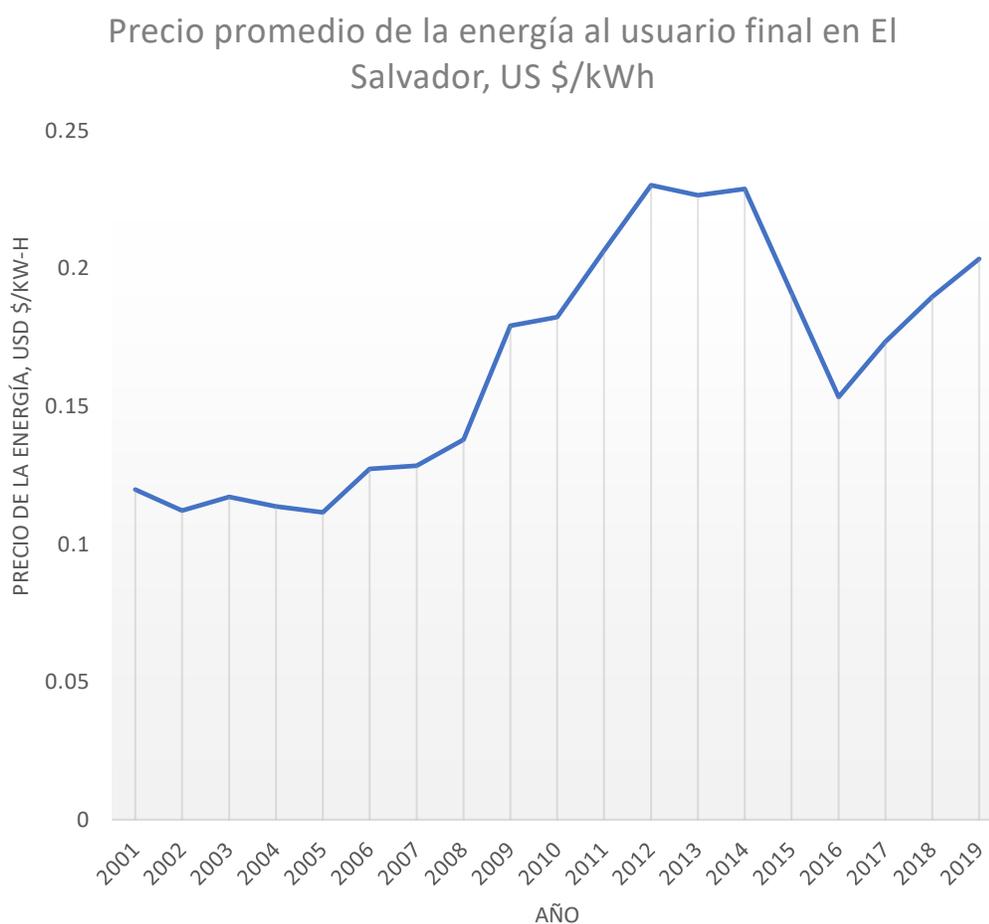


Figura 1-30. Evolución del precio promedio de la energía eléctrica para el usuario final entre los años 2001 y 2019. Los precios máximos de este periodo coinciden con la crisis mundial por los altos costos del petróleo y la posterior recesión económica entre 2008 y 2014. Fuente: “Boletín de Estadísticas Eléctricas No. 4 al 21”, SIGET.

Tabla 1-5. Precio promedio al consumidor final de la energía en El Salvador, US \$/kWh.

Año	Precio (\$/kWh)	Año	Precio (\$/kWh)
2001	0.1198	2010	0.1823
2002	0.1122	2011	0.2064
2003	0.1171	2012	0.2302
2004	0.1136	2013	0.2265
2005	0.1115	2014	0.2289
2006	0.1273	2015	0.1911
2007	0.1284	2016	0.1533
2008	0.1379	2017	0.1735
2009	0.1792	2018	0.1897
		2019	0.2035

Fuente: Adaptado de los Boletines de Estadísticas Eléctricas, del número 4 al 21, publicados por SIGET

Revisando nuevamente la figura 1-29, y tomando en cuenta la información de la gráfica presentada en la figura 1-30, es natural pensar que la capacidad de generación eléctrica debe aumentar para poder suplir la demanda y alcanzar a llegar a más usuarios finales. Esto es correcto, la capacidad instalada para generación eléctrica ha aumentado y se ha diversificado, evidenciando un importante desarrollo de las energías renovables: el 66% de la energía entre enero y mayo de 2020 ha sido producida a partir de fuentes renovables. Se presenta en la figura 1-31 un gráfico que muestra la evolución de la capacidad instalada en El Salvador en los últimos 30 años.

La incorporación a la matriz energética nacional de las energías renovables obedece, en primer lugar, a los múltiples tratados internacionales en materia medioambiental a los que El Salvador está suscrito, a la agenda de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, y a nivel ejecutivo, de la Política Energética Nacional, la cual tiene

entre sus objetivos “reducir la dependencia energética del petróleo y sus derivados” y “minimizar los impactos ambientales y sociales de los proyectos energéticos, así como aquellos que propician el cambio climático” (Consejo Nacional de Energía, 2010). Para lograrlo, en su momento se plantearon seis líneas de trabajo, las cuales son:

- Diversificación de la matriz energética y fomento a las energías renovables.
- Fortalecimiento de la institucionalidad del sector eléctrico y protección al usuario.
- Promoción de una cultura de eficiencia y ahorro energético.
- Ampliación de cobertura y tarifas sociales preferentes.
- Innovación y desarrollo tecnológico.
- Integración energética regional.

Estas líneas de trabajo han presentado distintos niveles de avance en la consecución de los objetivos fijados, sin embargo, puede concluirse que efectivamente ha existido una mejora en cuanto al sector eléctrico de El Salvador a comparación de diez años atrás.

No hay un actor principal responsable de ejecutar todos estos cambios, se han establecido las condiciones para el favorecimiento a la inversión en energía con proyectos renovables y esto trae como consecuencia el surgimiento de nuevos proyectos, como los que fueron presentados en la figura 1-27. El aumento de la capacidad instalada en energías renovables (vea nuevamente las figuras 1-27, 1-28 y 1-31) permite reducir la dependencia del petróleo y sus derivados, limitándose estos únicamente a cubrir picos de demanda y a aplicaciones vehiculares. El desarrollo de las energías renovables en El Salvador armoniza con los elementos antes mencionados: tratados internacionales en materia

medioambiental, objetivos de desarrollo sostenible y la política energética nacional. Sin embargo, y como el lector debe suponer, existe siempre una afectación al medio ambiente, incluso si el proyecto energético está catalogado como renovable. Citando, a modo de ejemplo, la construcción de la Central Hidroeléctrica “Cerrón Grande” entre los años 1972 y 1976, la cual requiere en su diseño la creación de un embalse artificial de aproximadamente 2180 millones de metros cúbicos de agua, de los cuales son útiles 1,430 millones (Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa).

Para la creación de esta central hidroeléctrica, 12 mil personas fueron desplazadas, 9 mil reubicadas y un porcentaje tomó una baja cifra monetaria para construir su casa en otros lugares, o bien, migrar al extranjero o a ciudades vecinas. Por otra parte, este proyecto permitió abastecer de energía a bajo costo no solo a El Salvador, sino también a Guatemala y Nicaragua, países que fueron invitados a la inauguración de la Central Hidroeléctrica el 14 de enero de 1977 y en un discurso agradecieron a El Salvador por desarrollar este proyecto (Barrientos, 2020).

La nueva política energética persigue minimizar el impacto negativo derivado de la creación de proyectos energéticos, y a comparación de los años 70, se ha crecido en materia medioambiental, existiendo ahora mayores controles por parte del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) para poder desarrollar un proyecto, de cualquier clase, en la que se altere el ecosistema, ejemplo de esto es la construcción de la Planta Fotovoltaica “Capella Solar”, la cual se encuentra en los municipios de Ozatlán, Puerto El Triunfo y Jiquilisco, del departamento de Usulután. (Consejo Nacional de Energía).

Evolución de la Capacidad Instalada para la Generación Eléctrica en El Salvador
Periodo 1990-2020
Valores en Megavatios (MW)

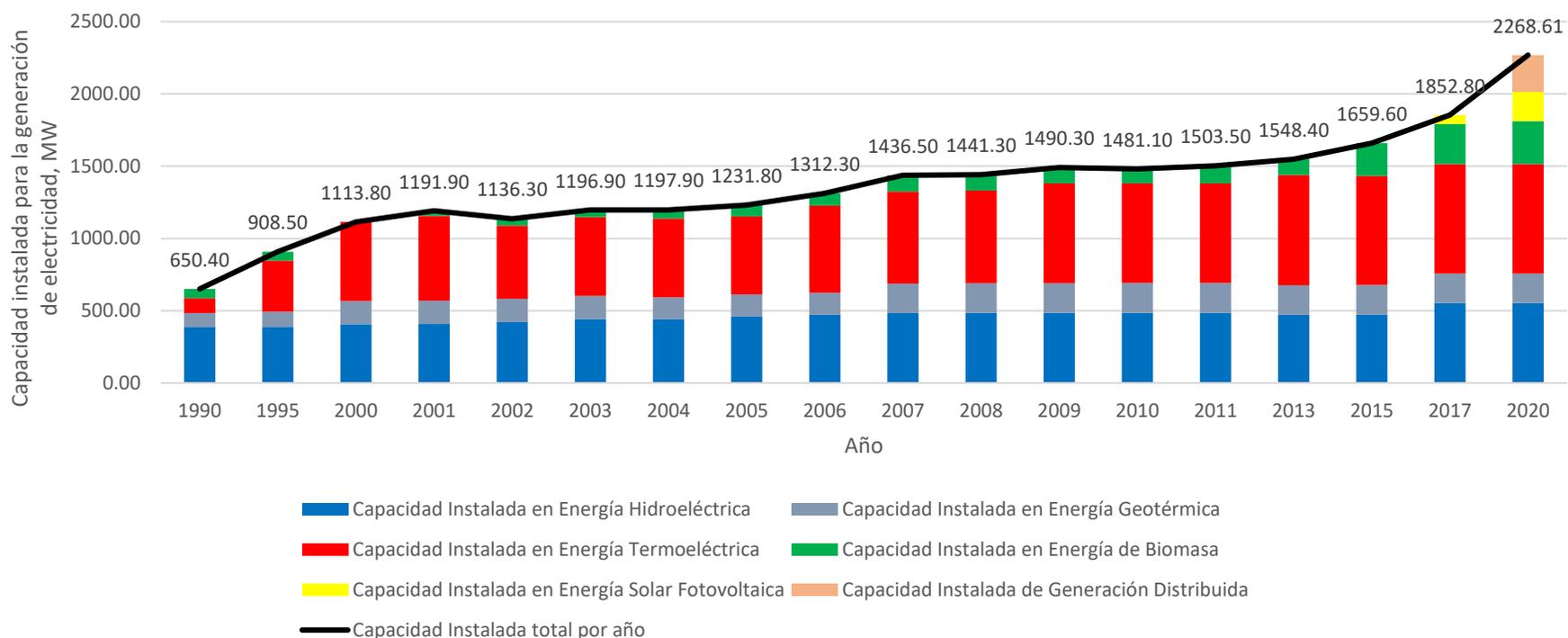


Figura 1-31. Evolución de la capacidad instalada para generación energética en El Salvador. Se puede apreciar que la capacidad instalada de energía hidroeléctrica y geotérmica ha cambiado poco en treinta años, sin embargo, la capacidad de generación con derivados del petróleo ha aumentado en un 725%. Otro punto que destacar es el ingreso al mercado mayorista de las energías a la tecnología solar fotovoltaica a partir del año 2017. Nota (*): Los datos del año 2020 corresponden al mes de mayo. Fuentes: “ASER: PANORAMA ENERGÉTICO NACIONAL”, ASER.ORG.SV; “Centroamérica: Estadísticas de producción del subsector eléctrico, 2011”, CEPAL; “Sector Eléctrico de El Salvador”, PROESA-CNE; “Boletín de Estadísticas Eléctricas N°15”, SIGET; “El Salvador prepara reglas para almacenamiento energético”, BNAmeric.

1.1.6. Deterioro medioambiental atribuido al Jacinto de Agua en El Salvador.

El Jacinto de Agua está incluido en el listado de IUCN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, por sus siglas en inglés) de las 100 especies invasoras más dañinas del planeta. Dicha especie se expande en cuencas de ríos o cualquier cuerpo de agua dulce que presente las condiciones necesarias para su reproducción, esta especie se acumula en ríos y lagos produciendo toneladas de materia vegetal flotante, debido a su acelerado crecimiento sin control, perjudica el hábitat de las especies locales favoreciendo fenómenos como: eutrofización del agua, azolvamiento, y la reducción de superficies en los cuerpos de agua.

A simple vista la alfombra de color verde intenso (ver figura 1-32), que flota y se expande sobre algunos humedales del país, provoca un singular paisaje. Sin embargo, el Jacinto de Agua está causando graves consecuencias para esos cuerpos de agua.

Uno de los diversos factores que favorece la expansión del Jacinto de Agua es la eutrofización del agua, en El Salvador el mal manejo de aguas residuales en algunos lugares ha llevado a algunos cuerpos de agua a ser idóneos para la reproducción de dicha especie, en todo el país menos del 90% de las aguas residuales reciben un tratamiento adecuado (MARN, 2017), en los departamentos de Chalatenango, San Salvador, Cuscatlán y Cabañas, los cuales comparten el humedal del embalse de Cerrón Grande, 14 municipios que rodean el embalse, de los cuales los alcaldes calculan que un 75% del espejo de agua, de unos 132 kilómetros cuadrados, está invadido por las plantas acuáticas. En 2004, este embalse recibió el nombramiento de la Organización de las Naciones Unidas

(ONU) como sitio Ramsar, es decir un humedal de importancia por las aves migratorias y toda la biodiversidad del lugar.



Figura 1-32. Jacinto de Agua acumulado en el embalse de la Central Hidroeléctrica 5 de noviembre (2019). Fotografía tomada por los autores.

Otro sitio con una problemática similar es el municipio de Metapán donde la Laguna de Metapán está siendo alterada su calidad de agua debido en gran parte por el río San José, que desemboca en la laguna después de recibir las aguas residuales de la ciudad de Metapán (UCA, 2012), en este lugar se realizan actividades de extracción del Jacinto de Agua que luego es depositado en las playas del mismo sin un proceso o manejo posterior a la extracción (ver figura 1-33), lo cual no solo hace las actividades insostenibles sino que también se convierte en un foco de contaminación al encontrarse a cielo abierto (ver figura 1-34).



Figura 1-33. Acumulación de Jacinto de Agua en la Laguna de Metapán (2020). Fotografía tomada por los autores.



Figura 1-34. Depósito a cielo abierto de Jacinto acuático extraído en Laguna de Metapán (2020). Fotografía tomada por los autores.

El Jacinto de Agua, dependiendo su entorno, es capaz de duplicarse en un mes, lo que ocasiona que se formen densas superficies de materia vegetal flotante, los deterioros ambientales atribuidos al Jacinto de Agua es debido al descenso del flujo de agua en los embalses, reducción en la cantidad de luz necesaria para los ecosistemas acuáticos en los cuerpos de agua, contaminación del agua por los ya mencionados fenómenos de azolvamiento y eutrofización, reducción de la movilización de las personas en los cuerpos

de agua, pérdida de agua por evapotranspiración de 3.2 a 7.8 veces más que la pérdida por evapotranspiración en superficies de agua limpias (D.R. Bayne), finalmente su impacto en la salud humana debido a la proliferación de mosquitos y otros vectores infecciosos que producen daños en la salud humana y del ganado.

1.1.7. Biomasa y usos de la biomasa como fuente de energía.

Se menciona la biomasa en el apartado 1.2.1, y se profundizará el estudio en esta sección. La biomasa es una fracción de la energía solar, como pudo verse en el esquema mostrado en la figura 1-26 en la sección precedente.

La biomasa puede catalogarse como primaria (producida a partir de la fotosíntesis) o secundaria (cuando ha sufrido alguna transformación, por ejemplo, el excremento). Esto abre paso a las dos clasificaciones de la biomasa en cuanto a su obtención: biomasa de cultivos energéticos y biomasa residual, que se puede dividir en cuatro categorías: biomasa de residuos urbanos, de residuos agrícolas, de residuos ganaderos y de residuos forestales. (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009).

Para aprovechar la energía química contenida en la biomasa, existen diferentes procesos de transformación, siendo el más simple de todos, la quema directa de la materia prima para aprovechar el calor que se desprende.

Debe tomarse en cuenta que el rendimiento de una biomasa siendo quemada directamente está relacionado con la humedad que esta contenga, pues la energía que se invierte en extraer la humedad que contenga la biomasa al momento de ser quemada no es aprovechable. Para mejorar la eficiencia de combustión de la biomasa, hablando principalmente de la madera, esta puede ser sometida a un proceso de **carbonización**,

consistente en someter a la madera a temperaturas de alrededor de 280°C para fraccionar todos los compuestos orgánicos y producir carbón vegetal y otros compuestos, principalmente alquitrán y gases no condensables como el hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono. Entre más alta la temperatura de carbonización, mayor cantidad de carbono fijo contendrá el producto final, aunque esto depende también de la madera usada (FAO, 1983).

Otras técnicas para aprovechar la energía de la biomasa requieren el uso de procesos termoquímicos, fisicoquímicos o mecánicos para la obtención de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. Los procesos termoquímicos son descritos a continuación:

Gasificación: Un combustible sólido es sometido a oxidación parcial para obtener un combustible gaseoso, que contiene CO₂, CO, H₂, CH₄ y vapor de agua. La composición final del gas obtenido depende de varios factores, entre estos la materia prima, las condiciones del proceso (uso de aire u oxígeno puro, presión, temperatura) y del tipo de dispositivo. Para que este proceso sea eficiente, la temperatura no debe ser inferior a 700°, por lo que se limita a aplicaciones industriales.

Pirólisis. Este proceso permite transformar cualquier tipo de biomasa (incluidos los residuos sólidos urbanos) en combustible sólido, líquido o gaseoso, y su principio es el procesamiento de un combustible para obtener uno de mejores características, al calentarlo por arriba de los 260°C en ausencia total de oxígeno.

Por otra parte, los procesos fisicoquímicos son:

Digestión anaerobia: Se aprovecha la energía química contenida en la biomasa cuando esta es descompuesta por la acción de bacterias en ausencia total de oxígeno (de ahí su

nombre, *anaeróbica*). El resultado de este proceso es un combustible gaseoso conformado principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono. Un producto secundario de este proceso es un efluente líquido con alto contenido de compuestos orgánicos, usado como fertilizante.

Fermentación alcohólica: Los carbohidratos contenidos en la biomasa (celulosa, lignina) pueden ser transformados en alcohol por la acción de microorganismos, y posteriormente, el contenido energético de estos combustibles puede mejorarse a partir de procesos de destilación. Estos alcoholes tienen potencial de uso en motores de combustión interna en aplicaciones de transporte y generación energética en sustitución directa de la gasolina.

Transesterificación: Es la síntesis de un ácido graso obtenido a partir de algunas fuentes de biomasa como semillas o plantas, unido a un alcohol para lograr un éster de cadena larga, usado en motores diésel.

Y, por último, el tratamiento mecánico para el aprovechamiento de la biomasa es la **densificación**, consistente en producir un combustible homogéneo y de alta densidad energética a partir de biomasa vegetal o de residuos vegetales, usualmente con baja densidad de energía como la madera, arbustos o sus derivados (recursos leñosos o herbáceos, en general), empleando sistemas mecánicos con o sin incorporación de aditivos. Sobre este proceso, hay dos vertientes que catalogan a la biomasa densificada como un fluido o como un sólido, siendo representadas estas categorías mediante los siguientes productos:

- **Pellet:** Pequeños cilindros de entre 8 y 12 mm y con longitudes entre los 30 y 50 mm. Se manipulan por volumen, siendo considerados como un fluido particulado.

- **Briqueta:** Su tamaño es muy superior al de un pellet, pues su intención de uso es similar al uso que se da a la leña. No hay restricción en cuanto al tamaño o la forma de la briqueta.

Esta investigación se centrará en el aprovechamiento de la biomasa del Jacinto de Agua para la producción de biocombustibles sólidos, de los cuales se presentan en las figuras 1-35 y 1-36 ejemplos de pellets y briquetas, respectivamente.



Figura 1-35. Pellets de biomasa, fabricados a partir de residuos vegetales. Fuente: guíadelacalefaccion.com.ar.



Figura 1-36. Briquetas de biomasa. Como se mencionó antes, la presentación de estas no está limitada más que por la máquina que la produzca. Así como las hay con un hueco central, se encuentran también con una geometría sólida. Fuente: generalkinematics.com.

1.1.8. Potencial energético del Jacinto de Agua.

Para establecer qué tan eficiente es el Jacinto de Agua al ser usado como materia prima para la obtención de energía (con énfasis en los procesos de combustión y densificación) se deben considerar dos estudios: uno propiamente en materia energética, y otro a modo de prospección para determinar su disponibilidad en el tiempo.

En cuanto a la energía que de esta planta puede extraerse se deben realizar estudios de calorimetría y un análisis próximo el cual, a través de pruebas estandarizadas, determina de forma porcentual la masa de humedad, cenizas, materia volátil y el carbono fijo en una muestra de materia orgánica sujeta a un proceso de combustión. Se procede a definir estas variables:

Poder calorífico: Es la energía química del combustible que puede ser transformada directamente en energía térmica mediante un proceso termoquímico de oxidación (García-Galindo, Nogués, & Rezeazu, 2010). Se cuantifica de dos formas, una incluye la fracción de energía requerida para evaporar el agua contenida en el combustible (poder calorífico superior), en tanto que la otra deja esta fuera del cálculo, conservando únicamente la energía realmente aprovechable (poder calorífico inferior). Se determina experimentalmente usando una bomba calorimétrica. Se presenta en la tabla 1-6 el resultado de una investigación en la que se determinó, de forma experimental, el poder calorífico del Jacinto de Agua y de otras fuentes tradicionales de energía térmica disponibles en Zimbabue.

Tabla 1-6. Poder Calorífico Superior (PCS) de algunos combustibles comúnmente usados en Zimbabue.

Muestra	Jacinto de Agua	Carbón mineral (lignita/antracita)	Madera seca	Gasolina	Diesel	Parafina	Etanol	GLP
PCS (MJ/kg)	14.6	15.0/27.0	14.4-17.4	48.0	44.8	46.0	29.7	46.1

Fuente: Adaptado de “On the potential of water hyacinth as a biomass briquette for heating applications”, por Munjeri, Ziuku, Maganga, Siachigoma y Ndlovu (2016).

Contenido de humedad: Se refiere a la masa total de agua remanente en la biomasa seca (Gaber, Handlos, & Metschina, 2014). Una humedad excesiva repercute negativamente en el aprovechamiento energético que pueda hacerse de la biomasa, pues parte de la energía térmica producida por la combustión será invertida en evaporar dicha humedad (como se expuso en la definición de poder calorífico).

Contenido de cenizas: Las cenizas en la biomasa representan la fracción de materia no combustible. Controlar la cantidad de cenizas es importante pues los equipos de aprovechamiento térmico podrían dañarse debido a la acumulación de hollín en su interior (Fernández-Puratich, Oliver-Villanueva, Valiente, Verdú, & Albert, 2014).

Materia volátil: Son aquellos componentes del combustible sólido que son fácilmente quemados en presencia de oxígeno, y usualmente son una mezcla de hidrocarburos aromáticos, hidrocarburos de cadena corta o larga, y azufre. Cuando la biomasa sólida se calienta, la materia volátil y el agua inherente a biomasa se evaporan, formando alquitrán, aceites y gases (Kumar & Anand, 2019). Un valor bajo de materia volátil es algo no deseado en un combustible sólido, pues es indicativo de una baja reactividad, es decir, arderá con dificultad (Sukarni, y otros, 2018).

Carbono fijo: Es la porción de la biomasa que permanece como residuo sólido de la combustión después que la materia volátil se ha destilado y una vez que se ha descontado el contenido de cenizas y la humedad. El carbono fijo ayuda a diseñar los equipos de combustión, ya que la naturaleza de este carbono determina la capacidad que tiene este residuo de formar grumos que dificulten la limpieza del equipo (Sarkar, 2015).

Se presenta en la tabla 1-7 el resultado de la investigación de Sukarni *et al.* referente a las propiedades físicas y químicas de *E. crassipes*. Los datos mostrados se expresan en porcentaje-peso.

Tabla 1-7. Resultados del análisis próximo realizado a muestras de Jacinto de Agua,

Parámetro	Condición “como recibido”, %	Muestras en base seca, %
Humedad	4.9%	--
Materia volátil	61.2	64.4
Carbono fijo	13.8	14.5
Cenizas	20.1	21.1

Fuente: Adaptado de “Physical and Chemical Properties of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as a Sustainable Biofuel Feedstock”, por Sukarni *et al.*

Habiendo conocido estas variables de una muestra de la biomasa elegida como fuente de combustible (en el caso de esta investigación el Jacinto de Agua), y atendiendo los requerimientos propios del producto a presentar según su mercado objetivo (normas técnicas como la UNE-EN ISO 18125 para determinar el poder calorífico en biocombustibles sólidos), con base a los resultados que se obtengan, se hace una prospección para determinar la tasa a la que el recurso puede explotarse de forma sostenible. En el caso del Jacinto de Agua, se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

Disponibilidad del Jacinto de Agua: Como se vio en la figura 1.13, esta planta está presente en la totalidad de los cuerpos de agua dulce en El Salvador, con excepción de los lagos de Ilopango y Coatepeque. Se repite la figura para conveniencia del lector.

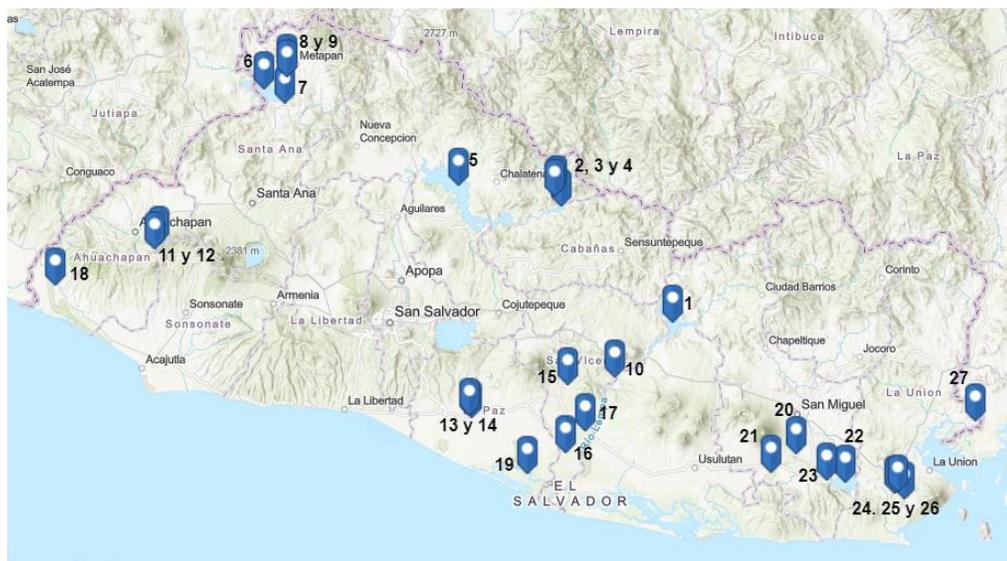


Figura 1-13 (repetida). Humedales de El Salvador en los que se confirma la presencia del Jacinto de Agua.

Tasa de reproducción del Jacinto de Agua: Un único espécimen es capaz de producir 140 millones de plantas hijas en un año, con una masa total de 28,000 toneladas. (Weiping, Qingpin, Meisheng, Zhengshung, & Zhitong, 2018). En el caso particular de Nigeria, un estudio en tres cuerpos de agua de ese país dio como resultado una producción media anual de 28.8 a 33.2 toneladas de Jacinto de Agua en base seca por hectárea en cada uno de los tres cuerpos de agua estudiados (Akinwande, Mako, & Babayemii, 2013). Estas dos investigaciones ponen de manifiesto que el Jacinto de Agua es una planta que se reproduce aceleradamente si las condiciones son propicias, y tal es el caso de El Salvador, pues la temperatura media anual nunca supera los 35°C ni cae por debajo de los 5°C, ambos extremos que *E. crassipes* no puede tolerar y que, de persistir por mucho tiempo, acabarían por matar a la planta (Kriticos & Brunel, 2016).

Según investigaciones llevadas a cabo por la Unidad Ambiental de CEL sobre el impacto del Jacinto acuático en los embalses hidroeléctricos de El Salvador (1996), sobre el embalse Cerrón Grande se acumulaban ejemplares de *E. crassipes* sobre un aproximado de 6km² de su espejo de agua, equivalentes a un 5% de la superficie del embalse; para el 2011 la situación ha empeorado: el Jacinto de Agua cubría el 30% del embalse según estudios de CENDEPESCA, esto equivale a 40.5 km² de su superficie. Si se tradujera en unidades de peso, para el 2011 había aproximadamente 116,640 toneladas de Jacinto de Agua, de modo que es un recurso que puede aprovecharse.

Crecimiento del Jacinto de Agua: Las observaciones realizadas en el proceso de investigación en los puntos de Extracción, así como también los resultados obtenidos por (Wilson, Rees, Holst, Thomas, & Hil, 2001), permiten confirmar que el crecimiento o altura alcanzada por el Jacinto de Agua depende de condiciones en el entorno como lo son la temperatura (30°C), pH, salinidad (0.2%) y contenidos de nutrientes disueltos en el agua (nitrógeno con una saturación media de 0.05 a 1 mg/mL y fosforo con una saturación media de 0.02 a 1 mg/mL) y perturbación (corriente de agua), de estos parámetros el de mayor incidencia en el crecimiento de la planta es la temperatura, ya que las temperaturas debajo de 10°C y arriba de 35°C cesan su crecimiento, las temperaturas inferiores a ese rango afectan el tallo y las hojas, esto produce una reducción en el peso que hace emerger al rizoma a la superficie, donde se hace más vulnerable y que en ultimas instancia destruye la planta (MELLA, 2005). En la Laguna de Metapán la temperatura oscila entre los 27 a 31°C, mientras en el Lago de Suchitoto oscila entre los 20 a 31 °C, las características observadas en la planta es que la extraída de la Laguna de Metapán, alcanzaba alturas mayores a las del lago de Suchitoto hasta 125 cm de longitud en hojas esto posiblemente

debido a las temperaturas más cercanas a las condiciones ideales en la Laguna de Metapán y abonado a que en la Laguna de Metapán la perturbación del agua es menor debido a que no existe una corriente grande como el caso del Lago de Suchitoto, posiblemente esta diferencia también se deba a la cantidad de nutrientes disueltos sin embargo el estudio de estos se alejan de los alcances de esta investigación, por lo que se recomienda un mayor estudio.

1.1.9. Selección de un cuerpo de agua para el proyecto.

Como grupo de investigadores se ha tenido acercamientos a uno de los humedales que se ha visto más afectado por la proliferación del Jacinto de Agua, la Laguna de Metapán, situada al noroeste del lago de Guija y a 3 km. al suroeste de la ciudad, entre los cantones de Las Piedras y Tecomapa, Municipio de Metapán y en el Departamento de Santa Ana, El Salvador, entre las coordenadas: 14°17' Latitud Norte 89 °27' Longitud Oeste. Se muestra en la figura 1-37 un croquis con la ubicación de este humedal.

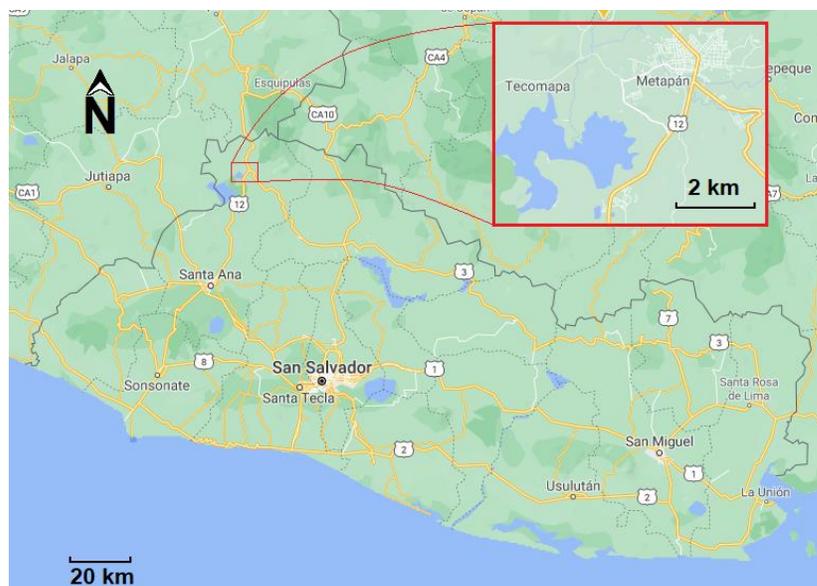


Figura 1-37. Ubicación de la Laguna de Metapán, en el municipio del mismo nombre. Fuente: Elaboración propia a partir del mapa disponible en la aplicación web Google Maps®.

1.1.10. Generalidades sobre el humedal seleccionado.

La Laguna de Metapán forma parte del complejo de humedales Güija, el cual es compartido entre Guatemala y El Salvador, y aunque la Laguna de Metapán no esté físicamente conectada al mencionado lago, se consideran parte del mismo sistema hídrico a estos dos cuerpos de agua y a todos los humedales del complejo, pues así han sido catalogados en la declaración de sitio Ramsar (Herrera & Rivera, 2010), (MARN, 2018). Los humedales más significativos del Complejo Lago de Güija son: i) Laguna de Metapán, ii) Laguneta Clara y iii) Laguneta verde. Se presenta en la figura 1-38 una vista de la Laguna de Metapán y en la figura 1-39 un mapa con los humedales del complejo Güija.



Figura 1-38. Laguna de Metapán durante la época seca. Como el lector podrá anticipar, las zonas verdes son bancos de Jacinto de Agua, los cuales se desplazan según sea la dirección del viento en la zona. Fuente: Turismo SV.

Con respecto a la Laguna de Metapán, esta se describe como un valle inundado, definido por corrientes de lava y rodeado de pequeños volcanes. El nivel de la Laguna de Metapán tiene variaciones significativas de nivel: en la época seca, la Laguna se divide en

dos, dejando entre ambas partes una barra con pastizales y una pequeña franja arbolada con sauces. El efecto estacional es notable en la superficie del espejo de agua: en la época lluviosa, la Laguna de Metapán tiene una extensión de 525 hectáreas, mientras que en la época seca esta se reduce hasta 85.4 hectáreas (MARN, 2018).

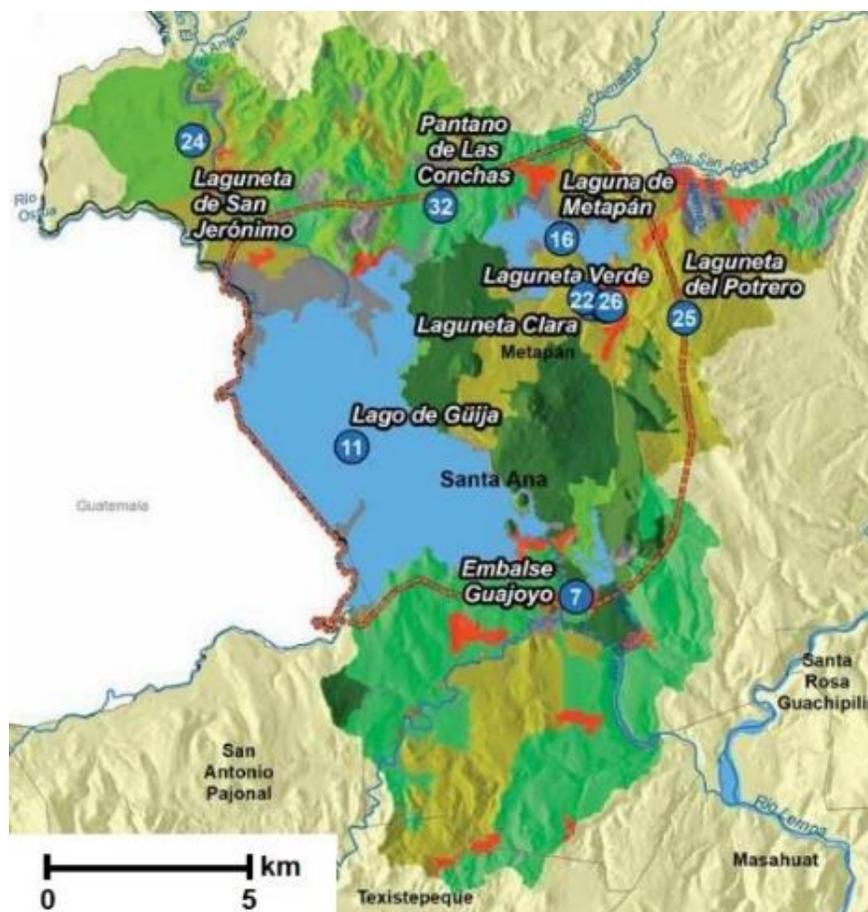


Figura 1-39. Cuenca del complejo de humedales Güija, sección perteneciente a El Salvador. Los cuerpos de agua que lo componen son mostrados en el mapa. El color en el mapa indica el tipo de uso que se da al suelo, en su mayoría son tierras cultivables. Fuente: Inventario Nacional de Humedales de El Salvador, 2018.

La Laguna de Metapán ha sido objeto de estudio debido a los múltiples problemas que afectan tanto a la laguna como a las comunidades aledañas. Se citan a continuación algunos de estos, recopilados por ClimaPesca.org (OSPESCA, 2017):

1. Las comunidades en los cantones Tecomapa y Las Piedras tienen acceso únicamente a electricidad y a una escuela pública, carecen de agua potable, carretera asfaltada y unidades de salud en la zona.
2. El ingreso promedio para el 80% de los habitantes de la Laguna de Metapán está por debajo de los \$100 mensuales. El resto, aproximadamente un 20%, percibe ingresos entre \$101 y \$300.
3. La principal actividad económica en la laguna es la pesca artesanal, para lo cual los pescadores se han agrupado en torno a cinco comunidades. Ninguna de estas tiene la infraestructura necesaria para ejercer la pesca (fábricas de hielo, agua potable, área de proceso y área de deposición de restos); las pequeñas embarcaciones son amarradas a las riberas de la laguna cuando no se usan.
4. Al no existir una adecuada red de drenaje para las aguas negras, tanto lo que se produce en las comunidades como los desperdicios de proceso de la fábrica de cemento Holcim van a parar a la laguna, contaminándola hasta volverla insalubre y, como se mencionó en las secciones anteriores, la presencia de agentes contaminantes favorece la reproducción del Jacinto de Agua.

Se han planteado en años recientes soluciones al problema de contaminación de la Laguna de Metapán, siendo la construcción de una planta de tratamiento la más popular de estas entre los lugareños y para la cual se hicieron incluso estudios. Sin embargo, de este proyecto únicamente se ha construido una rampa de concreto en la que será instalada una banda transportadora para evacuar los ejemplares de Jacinto de Agua que una lancha pantanera va a retirar.

La construcción de esta planta de tratamiento, cuyo costo estimado en el año 2014 era de \$2.5 millones, se detuvo porque el principal financista del proyecto (BID) se retiró alegando que este era inviable (SICA, 2014).

A partir de este momento, el problema del Jacinto de Agua ocupa el primer plano, pues las dificultades que viven las comunidades aledañas a la Laguna de Metapán se ven incrementadas por la presencia de *E. crassipes* en cantidades que no son capaces de remover simplemente con sus manos.

Resumen del capítulo 1

En este capítulo introductorio se presenta un panorama general sobre los efectos que el Jacinto de Agua causa sobre el ecosistema acuático, cuál ha sido su origen, sus medios de propagación y además, se hace un análisis partiendo de estudios previos sobre la caracterización de esta planta y las aplicaciones existentes o futuras que se le pueden dar a la misma, considerando la problemática social, económica y medioambiental de la Laguna de Metapán, humedal elegido para el desarrollo de esta investigación.

2. Procesamiento de la biomasa para la obtención de biocombustibles sólidos

La biomasa con sus diferentes orígenes y presentaciones debe ser tratada, procesada y finalmente almacenada a través de procesos que difieren dependiendo su finalidad, lo que significa para la obtención de biocombustible debe haber una metodología de etapas consecutivas y también diferentes medios por los cuales se hace posible la transformación de la biomasa.

2.1. Uso de la biomasa para la generación energética en El Salvador

El Salvador es un país que se caracteriza, en términos energéticos, por tener una tendencia creciente en la capacidad instalada de generación a partir de la biomasa, siendo la principal materia prima el bagazo de caña (El Salvador Perspectives, 2018). Los ingenios azucareros han adoptado el modelo de cogeneración, usando el bagazo de caña como combustible de procesos durante la temporada de zafra (entre noviembre y abril). El excedente de energía eléctrica producida es comercializado en el mercado eléctrico local. Es precisamente por esta razón que este sector ha experimentado un incremento en su capacidad instalada de 135.9 MW a 305.3 MW entre los años 2013 y 2018, tomando en cuenta además que el sistema eléctrico nacional prioriza a la energía generada por fuentes renovables en el mercado mayorista (Hernández, 2019).

Actualmente, hay cinco ingenios que se posicionan como grandes generadores de energía con el bagazo de la caña de azúcar: Chaparrastique, El Ángel, La Cabaña, Izalco y Jiboa. Existe además una empresa dedicada al rubro textil, HanesBrands, que aprovecha la biomasa del King Grass (*Pennisetum purpureum*), una planta originaria de África que

se caracteriza por su gran potencial energético, así como su gran productividad al usarse como forraje.

Se presenta en la figura 2-1 un mapa con los ingenios azucareros de El Salvador y en la figura 2-2 el aprovechamiento del bagazo de caña como combustible biomásico en los ingenios.



Figura 2-1. Ingenios Azucareros de El Salvador, donde se procesa la caña de azúcar y se obtienen azúcares, melaza y energía eléctrica como subproducto del sistema de cogeneración. 1) La Magdalena. 2) Central Izalco. 3) La Cabaña. 4) El Ángel. 5) Jiboa 6) Chaparrastique. Fuente: azucarnatural.com.



Figura 2-2. Aplicación de maquinaria pesada para poder manipular adecuadamente los grandes volúmenes del bagazo de caña, material utilizado como combustible en las calderas para impulsar turbogeneradores que producen energía eléctrica. Fuente: elsalvador.com.

2.2. Presentaciones de la biomasa

La presentación de los combustibles biomásicos es diversa, cada una de estas posee características y propiedades específicas, que en muchos casos son regidas por la aplicación final de estas, sin embargo, solo se mencionaran las dos más utilizadas en la categoría de biomasa solida densificada, las cuales son de interés en el presente estudio.

2.2.1. Briquetas.

Las briquetas de biomasa pueden estar compuestas de biomasa forestal silvícola, de residuos procedentes de fábricas de madera, biomasa residual industrial y urbana, así como también carbón vegetal o simplemente una mezcla de ellas, se caracterizan por poseer una alta densidad y por tener comúnmente formas cilíndricas, las cuales se adoptan posteriormente a un proceso de compactación, además como ha sido mencionado en el capítulo anterior su intención de uso es el mismo de la leña, por lo que no posee limitaciones en cuanto a formas o tamaños. Se presentan en la figura 2-3 algunos ejemplos de briquetas de biomasa.



Figura 2-3. Diversas presentaciones para briquetas de biomasa, variando en geometría y dimensiones. Fuente: biodiesel-machine.com.

2.2.2. Pellets

Los pellets son de tamaño inferior al de las briquetas (diámetro entre 8 y 12 mm y longitudes entre los 30 y 50 mm), su forma y tamaño están enfocados en una mejor manipulación por volúmenes como ha sido mencionado antes. Se presentan en la figura 2-4 ejemplos de pellets de biomasa y sus fuentes de origen.



Figura 2-4. Ejemplos de pellets de biomasa y sus fuentes de origen. De izquierda a derecha: Paja de arroz, bambú, recortes de madera, aserrín, papel reciclado. Fuente: biodiesel-machine.com.

2.2.3. Normas reguladoras de pellets y briquetas.

La existencia de las normativas es de gran importancia ya que garantiza una calidad común en todo el país o región de los pellets o briquetas, los sistemas de almacenamiento, transporte y combustión, define los indicadores de calidad y los valores límites además que informa al consumidor de las distintas características de calidad de dichos productos.

En el caso de las normativas nacionales, se vuelve difícil encontrar aquellas que se encuentren directamente ligadas a procesos de calidad o estandarización de pellets y/o

briquetas de biomasa. Debido a esto se listarán algunas mayormente conocidas y que poseen aplicaciones internacionales en la tabla 2-1.

Tabla 2-1. Normativas aplicables a los biocombustibles sólidos según región o país.

País/Región	Norma / Estándar	Descripción
España	UNE-EN ISO 17225-3:2014	Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 3: Clases de briquetas de madera. (ISO 17225-3:2014).
	UNE-EN ISO 17831-1:2016	Biocombustibles sólidos. Determinación de la durabilidad mecánica de pellets y briquetas. Parte 1: Pellets. (ISO 17831-1:2015).
	UNE-EN ISO 17831-2:2016	Biocombustibles sólidos. Determinación de la durabilidad mecánica de pellets y briquetas. Parte 2: Briquetas. (ISO 17831-2:2015).
	UNE-EN ISO 20023:2020	Biocombustibles sólidos. Seguridad de pellets de biocombustibles sólidos. Manipulación y almacenamiento seguros de pellets de madera en aplicaciones residenciales y otras aplicaciones a pequeña escala (ISO 20023:2018)
	UNE-EN ISO 18125:2018	Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico. (ISO 18125:2017).
	UNE-EN ISO 18134-2:2017	Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 2: Humedad total. Método simplificado. (ISO 18134-2:2017).
	UNE-EN ISO 18847:2017	Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad de partícula de pellets y briquetas. (ISO 18847:2016).
Alemania	DIN 51731 (2000): Standard of wood pellets	Define los requerimientos de calidad de los pellets de madera. Sus dimensiones se clasifican en 5 grupos diferentes.
	DIN Plus	Específica de pellets de gran calidad para calderas que sólo trabajan con pellets. Combina ÖNORM M7135 con DIN 51731
Suecia	SS 187120 (1998): Solid biofuels and peat – Pellets – Classification	Clasifica los pellets en tres grupos (grupo 1, 2 y 3) en función del tamaño y de la cantidad de cenizas que generan
	SS 187123 (1998): Solid biofuels and peat – Briquettes - Classification	Clasifica las briquetas
Italia	CTI R04/05 (2004): Caratterizzazione del pellet a fini energetici	Establece los parámetros de calidad de pellets de biomasa con fines energéticos en varias categorías en función de su origen (A.1, A.2, etc.)

Tabla 2-1 (continuación). Normativas aplicables a los biocombustibles sólidos según el país o región.

País/Región	Norma/Estándar	Descripción
Dinamarca	Wood pellets of “HP” quality	Describe los requisitos de los pellets de alta calidad
	Quality classes for fuel wood chips	Clasifica 4 tipos diferentes de astillas de madera convenientes para diferentes unidades de combustión
Finlandia	Quality guidelines for solid wood fuels in Finland (1998)	Define los métodos para establecer la calidad y la energía de astillas, serrín y corteza: definiciones, diferentes calidades, muestreo, tratamiento y determinación de propiedades
Holanda	Number-NTA 8200 (2002): Best practice list for biomass fuel and ash analysis	Recomendaciones sobre: métodos disponibles de muestreo, preparación de muestra y análisis, campos de aplicación (tipos de biomásas), estándares internacionales relevantes, etc.
Europa	prEN 14961	Especificaciones y clases de biocombustibles
	CEN/TR 15569	Guía para el aseguramiento de la calidad
	CEN/TS 15234	Aseguramiento de la calidad del biocombustible
	CEN/TC 335	Biocombustibles solidos
Internacional	ISO17225-2	Normas de calidad aplicadas a Pellets
	ISO-17225-4	Normas de calidad aplicadas a Briquetas
	ISO-17225-6	Normas de calidad aplicadas a Pellets no leñosos
	ISO-17225-7	Normas de calidad aplicadas a Briquetas no leñosas

Fuente: Adaptado de “Calidad de los biocombustibles” por Dra. Ruth Barro.

Las normativas anteriormente listadas buscan regular criterios de calidad en cuanto a algunas de las propiedades físicas y químicas de los biocombustibles sólidos, dichos parámetros varían según los estándares adoptados en cada región, y se describen algunos de estos y el efecto que estos tienen en el producto final en las tablas 2-2 y 2-3.

Tabla 2-2. *Propiedades químicas y de composición de pellets o briquetas.*

Parámetro	Variables sobre las que tiene incidencia y su efecto
Cl	HCl, emisiones de dioxinas y furanos, corrosión en calentadores.
N	Emisiones de NO _x , HCN y NO ₂ .
S	Emisiones de SO _x .
K	Corrosión en calentadores, reducción del punto de fusión de las cenizas
Mg, Ca, P	Aumento del punto de fusión de las cenizas, efectos en la retención de contaminantes en las cenizas y uso o eliminación de las cenizas.
Metales pesados	Emisiones contaminantes, uso o eliminación de las cenizas
Contenido de cenizas	Emisiones de partículas, costes en el uso o eliminación de las cenizas.
Fusibilidades cenizas	Seguridad en las operaciones, nivel de emisiones contaminantes.
Esporas hongos	Riesgos de salud durante el manejo del combustible

Fuente: Adaptado de “Normalización y estandarización de los pélets”, por Giraldo, G. A.

Tabla 2-3. *Propiedades físicas de los pellets o briquetas.*

Parámetro	Variables sobre las que tiene incidencia y su efecto
Contenido de agua	Almacenamiento, poder calorífico, pérdidas, autoignición.
Poder calorífico	Utilización del combustible, diseño de planta.
Densidad aparente	Gastos en almacenamiento y transporte, planes de logística.
Densidad real	Propiedades de combustión (conductividad térmica específica, rendimiento en gasificación)
Distribución del tamaño de partícula	Porosidad, formación de bóvedas, seguridad de operaciones durante el transporte, propiedades de secado, formación de polvo.
Formación de finos	Densidad aparente, pérdidas en el transporte, formación de polvo.
Durabilidad	Cambios en la calidad durante el transporte, desintegración, pérdidas de combustible.

Fuente: Adaptado de “Normalización y estandarización de los pélets”, por Giraldo, G. A.

Las normativas más utilizadas internacionalmente son las alemanas DIN 51731 y DIN Plus, Se presenta en la tabla 2-4 la información relevante a estas dos normas.

Tabla 2-4. Características de los pellets según requerimiento de las Normas DIN 51731 y DIN Plus.

Propiedad	DIN 51731	DIN Plus
Diámetro (mm)	4 – 10	Indicar
Longitud (mm)	<5	<5*diámetro
Densidad (kg/m ³)	1-1.4	>1.12
Humedad (% masa)	<12	<10
Cenizas (%masa)	<1.5	<0.5
Poder calorífico (MJ/kg)	17.5-19.5	>18
Azufre (%masa)	<0.08%	<0.04
Nitrógeno (%masa)	<0.3%	<0.3
Cloro (%masa)	<0.03%	<0.02%
Arsénico (mg/kg)	<0.8	<0.8
Cadmio (mg/kg)	<0.5	<0.5
Cromo (mg/kg)	<8	<8
Cobre (mg/kg)	<5	<5
Mercurio (mg/kg)	<0.05	<0.05
Plomo (mg/kg)	<10	<10
Zinc (mg/kg)	<100	<100
Densidad aparente	-	Indicar
Durabilidad	-	<2.3%
Aditivos	-	<2%

Fuente: Adaptado de “Normalización y estandarización de los pèlets”, por Giraldo, G. A.

2.2.4. Caracterización de una máquina briquetadora.

La densificación de la biomasa es una forma de aprovechamiento para la conversión de la biomasa en un combustible. Para esto se utilizan máquinas, la más conocida de estas es la briquetadora. Una máquina briquetadora está constituida

básicamente por los siguientes sistemas o elementos: sistema de alimentación, cámara de compresión, émbolos y motor; algunas cuentan con sistemas electrónicos de control.

Existe una gran diversidad de máquinas para hacer briquetas con cualidades y características diferentes, dichas características inciden en la capacidad y calidad del producto final, cada una de estas basadas en diferentes métodos de fabricación, los cuales listaremos a continuación:

Las tecnologías de briquetado se divide de la siguiente manera:

- Compactación de alta presión.
- Compactación a presión media utilizando dispositivos calefactores.
- Compactación a presión baja usando aglutinantes.

En los procesos de compactación de alta presión (presión mayor a 100MPa) raramente se usa aglutinante externo, en medias presiones (entre 5 y 100 MPa) depende del material y su compactación, en la compresión a bajas presiones (hasta 5 MPa), siempre es necesario añadir aglutinante (Fabio Cruz, 2020). Sin embargo, las briquetas formadas por la compactación de biomasa lignocelulósica, como será el caso de las fabricadas a partir del Jacinto de Agua, no necesitan la adición de aglomerantes para su elaboración ya que la lignina contenida en dicha planta es suficiente para cumplir esta función (consulte la sección 1.1.3 de este documento para más información).

Briquetadoras manuales: Por lo general son utilizadas para producir briquetas de forma artesanal. Usualmente se componen de un mecanismo de palanca a través de la que se ejerce presión sobre la biomasa, dicha materia es compactada contra el material en el interior de un tubo que sirve como molde, este tubo contiene orificios donde se evacua el

agua generada en el momento de la compresión. No se recomiendan para producir en gran escala, no están diseñadas para ejercer una compresión grande y no son máquinas robustas, pues dependen del accionamiento humano y las características del producto final no son las mejores. Se presenta en la figura 2-5 un ejemplo de briquetadora manual.



Figura 2-5. Briquetadora manual. La compactación ocurre por la aplicación de una fuerza procedente del usuario, para lo cual se aplica el concepto de ventaja mecánica empleando una palanca. Fuente: Capilladelmonte2.wordpress.com

Briquetadoras mecánicas: Su diseño de funcionamiento es mediante un proceso de presión y empuje, este proceso conocido como extrusión. Existen varios principios de funcionamiento, siendo las dos formas más usuales el uso de un tornillo sinfín-compresor, y otro a través de un mecanismo biela-manivela acoplado a un pistón. Su diseño es capaz de producir briquetas a gran escala. Para darle las dimensiones finales a las briquetas es necesario otro proceso adicional, comúnmente un dado de extrusión. Se muestra en la figura 2-6 una máquina briquetadora por tornillo sinfín, accionada por un motor eléctrico.

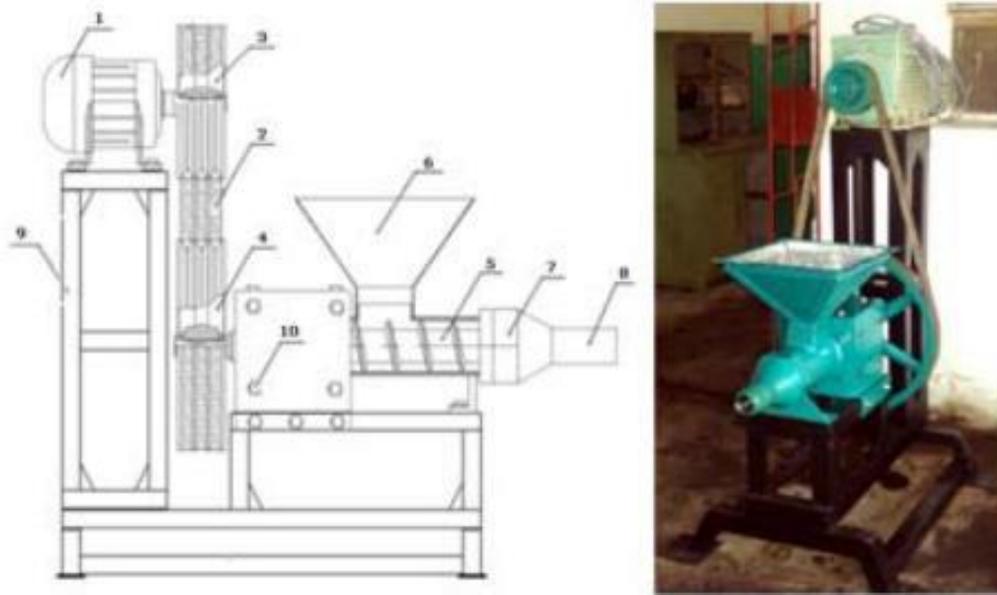


Figura 2-6. Esquema de la máquina briquetadora experimental por extrusión. Fuente: “Impacto medioambiental en la construcción de una máquina briquetadora experimental por extrusión”.

2.2.5. Tipos de máquinas briquetadoras

Existe una gran variedad de diferentes tipos de máquinas con diversos mecanismos y diferentes principios de funcionamiento, todas ellas con una misma función: densificar el material en forma de briqueta, dichas máquinas se listan a continuación:

Briquetadora de impacto o prensas de pistón: En las prensas de pistón, la presión es aplicada de manera discontinua mediante la acción de un pistón reciprocante sobre el material comprimido en un cilindro. Pueden tener un acople mecánico y volante o utilizar acción hidráulica en el pistón. La materia prima entrante es prensada contra el material previamente comprimido dentro del tubo de prensado y sale del troquel al ritmo de la acción del pistón. Mediante la presión y la fuerza de fricción en el interior del tubo de presión, el material es calentado intensamente y puede ser enfriado considerando mecanismos externos o enfriado naturalmente al aire. Para producir briquetas con alta

densidad (hasta 1.25 g/cm^3) la materia prima debe ser eventualmente triturada (menos de 10 mm) y secada ($<15\%$ del contenido de agua) antes del briqueteado. La capacidad de las prensas de pistón o briquetadoras de impacto depende tanto del diámetro del troquel como del pretratamiento de la materia prima (Energypedia, 2018). Se presenta un modelo de máquina briquetadora con acción de pistón recíprocante en la figura 2-7.

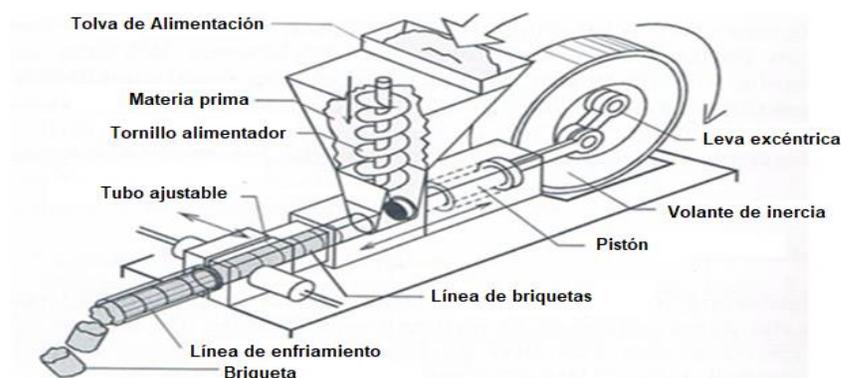


Figura 2-7. Briquetadora de impacto por pistón recíprocante. Fuente: Adaptado de energypedia.info.

Briquetadora por compactación de tornillo o extrusión: La finalidad de la compactación usando un extrusor es juntar partículas más pequeñas para que las fuerzas que actúan entre ellas se vuelvan más fuertes, proporcionando mayor resistencia a la mayor parte del material densificado. Durante la extrusión, el material se mueve desde el puerto de alimentación con la ayuda de un tornillo giratorio a través del cilindro y contra un troquel a través de un cono ahusado, lo que genera un gradiente de presión y fricción contra las paredes internas de la máquina. Este efecto combinado hace que la temperatura de la biomasa se eleve a medida es extruida por unos dados con la geometría deseada. Si el calor generado durante la compresión no es suficiente para alcanzar el estado de deformación plástica para facilitar la extrusión, se puede agregar calor externo, bien a la materia prima, bien al dado de extrusión. En general, estas briquetadoras permiten

alcanzar presiones mayores si se les compara con las briquetadoras de pistón antes mencionadas, aunque el volumen producido por hora es menor. Se presenta en la figura 2-8 un modelo de briquetadora de tornillo sinfín, y en la tabla 2-5 un resumen comparativo entre las dos tecnologías de briquetado estudiadas.

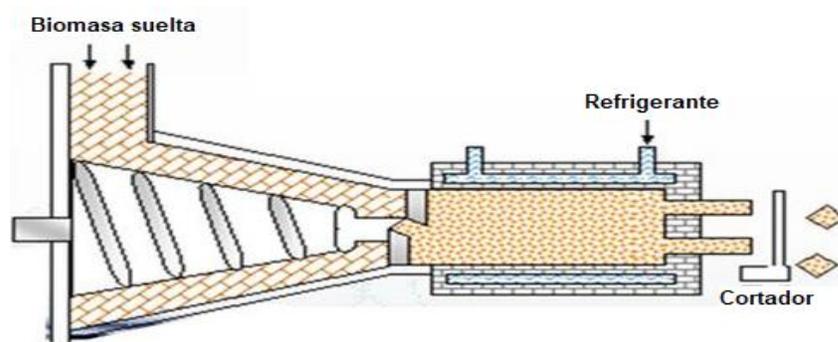


Figura 2-8. Briquetadora de tornillo. Puede verse cómo la biomasa es compactada a medida recorre la máquina. Fuente: Adaptado de energypedia.info.

Tabla 2-5. Comparativa entre briquetadoras de pistón y de tornillo.

Variable de estudio	Tecnología de elaboración de briquetas	
	Briquetadora de pistón	Briquetadora de tornillo
Contenido óptimo de humedad de la materia prima	10-15%	8-9%
Desgaste de las partes en contacto	Bajo en pistón y dado	Alto en tornillo
Salida de la máquina	Por impulsos	Continua
Consumo de energía estimado	50kWh/ton	60 kWh/ton
Densidad de la briqueta	1-1.2 g/cm ³	1-1.4 g/cm ³
Mantenimiento	Alto	Bajo
Desempeño en combustión de las briquetas	No muy bueno	Muy bueno
Homogeneidad de las briquetas	No homogéneas	Homogéneas
Carbonización de la briqueta	No es posible	Produce buen carbón
Aplicación en gasificadores	No apta	Apta

Fuente: Adaptado de "Biomass Briquetting: Technology and Practices", por Grover y Mishra.

2.2.6. Variables de operación

Para que las briquetas tengan una calidad aceptable, debe prepararse adecuadamente la materia prima a densificar. Se presentan a continuación los parámetros más importantes que debe cumplir la materia prima para el buen funcionamiento de una máquina briquetadora. Todos los puntos mencionados a continuación fueron extraídos de *Biomass Briquetting: Technology and Practices*, por P. D. Grover y S. K. Mishra.

- **Efectos del tamaño de la partícula:** El tamaño de la partícula juega un rol importante en la densificación. Se ha admitido que el material biomásico con tamaños de partícula oscilando entre 6-8 mm con un contenido de polvo del 10-20% que atraviesan una malla menor a la #4 (4 aberturas por pulgada) proporciona buenos resultados. No se recomiendan tamaños mayores a los citados pues, en las prensas de extrusión por tornillo sinfín podrían causarse atascos, y de igual forma, si solo hubiera partículas menores a 1 mm de tamaño la formación de la briqueta no tendría resultados exitosos ya que las partículas pequeñas se cohesionan entre sí y la materia deja de comportarse como un fluido.
- **Efectos de la humedad:** El contenido de humedad es un factor crítico en una máquina de tornillo. Cuando la materia prima tiene entre un 8-10% de humedad, la briqueta resultante tendrá una humedad del 6-8%. En este punto, las briquetas son resistentes, no muestran grietas y la extrusión es suave y continua. Si la humedad excede el 10%, las briquetas serán débiles, se genera un exceso de vapor a alta presión y esto bloquea la libre circulación de materia hacia el tornillo, al tiempo que expulsa por trozos el material densificado. La materia vegetal con alto

contenido lignocelulósico sometida a temperatura y presión elevadas permite desarrollar enlaces fuertes debido a sus propiedades autoadherentes. Es importante establecer un valor de humedad en la materia prima para que las briquetas producidas tengan un contenido de humedad superior al punto de equilibrio, de otra forma, las briquetas absorberán la humedad ambiente, se hincharán y desintegrarán.

- **Efectos de la temperatura en la biomasa:** Relacionado con el punto anterior, la temperatura influye en la formación de vapor de agua y en la plastificación de la biomasa cuando se somete a elevadas presiones. La hemicelulosa y la lignina presente en la biomasa se descomponen en carbohidratos de menor orden, los cuales actúan como adherentes. Sin embargo, la temperatura en la biomasa no debe exceder los 300°C, pues este es el límite de descomposición de la biomasa.
- **Efectos de la temperatura en el dado de extrusión:** En briquetadoras de tornillo sinfín, puede reducirse la potencia mecánica de accionamiento al implementar una etapa de calentamiento al final del proceso, en el dado de extrusión. Esto tiene como segunda ventaja que la fricción disminuye y la vida del dado se prolonga (consultar la tabla 2-5). La temperatura a la que se calienta el dado oscila entre los 280-290°C, esta temperatura garantiza que no se alcanzan los 300°C definidos en el punto anterior y, además, genera una corteza parcialmente carbonizada que hace que la briqueta soporte de mejor manera los efectos de la humedad ambiente durante su almacenamiento. Temperaturas mayores ocasionan una disminución en la resistencia de la briqueta, resultando en un producto con poca resistencia; temperaturas menores hacen que se requieran mayores presiones y, por ende, un

mayor consumo de potencia para una menor productividad. En cuanto a los datos de una briquetadora de pistón, se recomienda mantenerlos refrigerados en lugar de calentarlos.

- **Efecto de los aditivos externos:** El proceso de briquetado no aumenta el poder calorífico de la biomasa base. Para mejorar las propiedades de un determinado tipo de biomasa puede añadirse entre un 10 y un 20% de carbón mineral o vegetal pulverizado. La diferencia entre las briquetas producidas por tornillo sinfín y las producidas con pistón es que las primeras carbonizan la superficie (ver tabla 2-5), y este efecto incrementa notablemente el rendimiento de la briqueta con aditivos añadidos.

2.2.7. Etapas de proceso de elaboración de briquetas

En cuanto al procesamiento de la biomasa, existen tres rutas que esta puede seguir dependiendo su origen: residuos de serrería, residuos de molienda y residuos agroforestales. Algunos procesos son comunes para las tres rutas señaladas, por lo que algunas etapas serán definidas solo una vez si aparecen repetidas.

- A) La elaboración de briquetas utilizando residuos de aserradero sigue estos pasos:
- (1) Tamizado: Consiste en la separación mecánica de las partículas de acuerdo con su tamaño, haciéndolas atravesar por un tamiz (colador) con un tamaño determinado; las partículas más pequeñas que el agujero del tamiz pasan y las de mayor tamaño son retenidas. Según la tecnología a utilizar (tornillo o pistón), el tamaño recomendado de la partícula de biomasa cambia (refiérase a la sección 2.3.1).

- (2) Secado: Esta etapa pretende la reducción en el contenido de humedad de la biomasa. Para lograrlo se pueden aplicar diversas técnicas, siendo la más básica el secado al aire libre bajo la acción directa del Sol. Este proceso puede acelerarse utilizando secadores de contacto directo, secadores *flash*, entre otros.
 - (3) Pre calentamiento: En el caso de la compresión con tornillo sinfín, calentar la biomasa antes de introducirla en la briquetadora reduce significativamente la demanda de potencia de la máquina y provoca la activación de los adhesivos inherentes a la materia prima, principalmente la celulosa y la lignina (refiérase a la sección 2.3.2).
 - (4) Densificación: Es la etapa donde se incrementa la densidad de la materia prima, sea por tornillo sinfín o por pistón, previamente definidas en este documento.
 - (5) Enfriamiento: Si se elige una briquetadora basada en un tornillo sinfín, la temperatura de la briqueta estará por encima de los 200°C, por tanto, su manipulación tan pronto la briqueta abandona la máquina no es recomendable. Antes se debe dejar que la briqueta se enfríe para su posterior tratamiento.
 - (6) Empaquetamiento: Una vez la briqueta se ha enfriado y se le ha dado la longitud adecuada se puede proceder a su almacenamiento. En Europa se acostumbra a armar una pequeña tarima con entre 6 y 10 briquetas para su venta al público (Grover & Mishra, 1996). Mientras no se prepare el paquete para su distribución, se deben almacenar las briquetas en un ambiente donde no se expongan al agua e idealmente bajo techo.
- B) El proceso de briquetado para residuos de molienda como la cáscara de café, cáscara de arroz, de maní, etc., sigue los pasos descritos a continuación:

- (1) Tamizado.
 - (2) Triturado: Los restos de biomasa son sometidos a un proceso de reducción de tamaño utilizando molinos de martillo. Se deben alcanzar tamaños de partícula óptimos como los descritos en las secciones precedentes.
 - (3) Pre calentamiento.
 - (4) Densificación.
 - (5) Enfriamiento.
 - (6) Empaquetamiento.
- C) Y para elaborar briquetas a partir de residuos agroforestales (bagazo de caña, estopa de coco, tallos de plantas, etc.), el proceso a seguir es el siguiente:
- (1) Secado.
 - (2) Triturado.
 - (3) Pre calentamiento.
 - (4) Densificación.
 - (5) Enfriamiento.
 - (6) Empaquetamiento.

Para el caso de producción de briquetas a partir de la biomasa del Jacinto de Agua se utilizará el proceso C). Se presentan en las figuras 2-9 a la 2-14 fotografías que ilustran este proceso paso a paso, haciendo énfasis en la naturaleza de los equipos utilizados para una producción a gran escala.



Figura 2-9. Utilización de secadores solares para remover la humedad de los tallos del Jacinto de Agua en Filipinas. Este proceso tomaría normalmente una semana si se expusieran los tallos frescos al Sol, pero con este dispositivo, ese tiempo se reduce a tan solo una hora. Fuente: Department of Science and Technology – Science and Technology Information Institute.



Figura 2-10. Picadora de martillos accionada por un motor de combustión. Fuente: Canal de YouTube “MAQUINARIA AGRÍCOLA S.A. DE C.V.”.

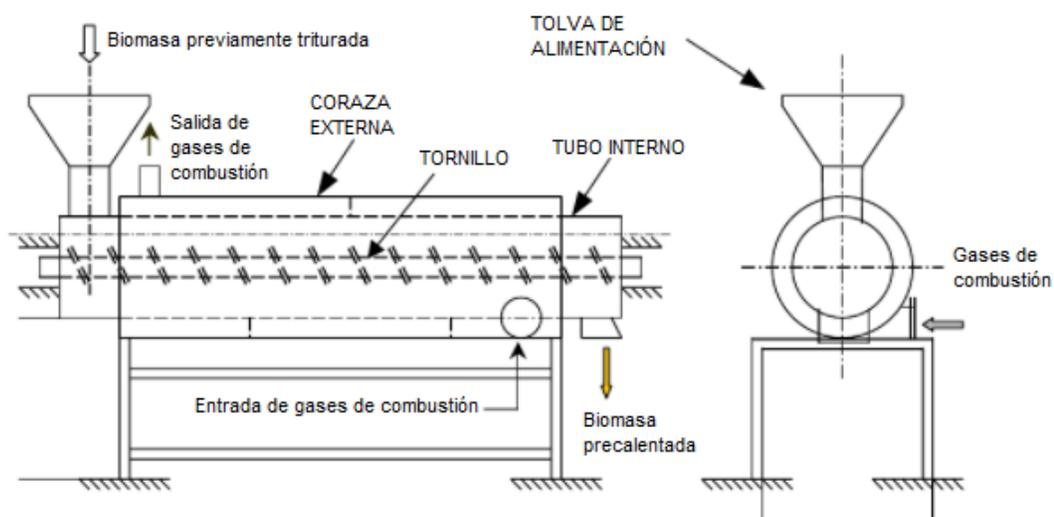


Figura 2-11. Intercambiador de calor de tubo y coraza con un tornillo de Arquímedes en su interior, utilizado para forzar la circulación interna de la biomasa y así precalentarla. Fuente: Adaptado de “A Study of Improved Biomass Briquetting”, por Bhattacharya, Leon y Rahman.



Figura 2-12. Densificación de la biomasa usando una briquetadora de tornillo marca GEMCO. Produce briquetas con sección hexagonal y un hueco al centro. Fuente: biofuelmachines.com.

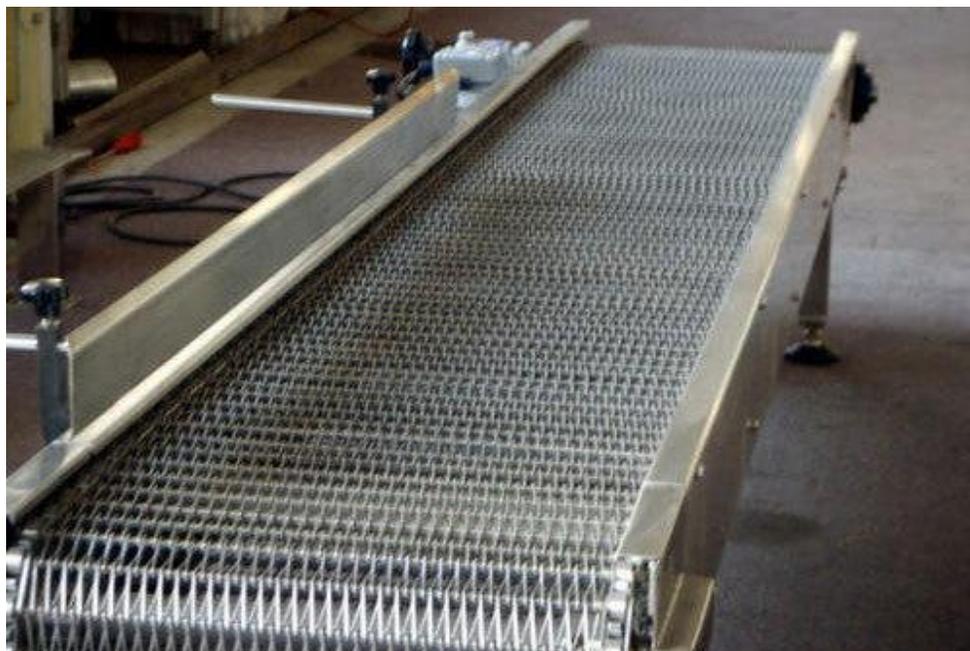


Figura 2-13. Banda transportadora metálica utilizada para el enfriamiento de las briquetas al aire. Fuente: Indiamart.



Figura 2-14. Una tarima con briquetas de biomasa, valorada en £339.99 (aproximadamente \$472 dólares estadounidenses). Se recomienda envolver con plástico la pila de briquetas para evitar que durante el transporte estas se muevan, y para impedir que la humedad las deteriore. Fuente: The Real Firewood Company.

2.2.8. Flujo de materia y energía en una planta briquetadora

La interacción entre materia y energía existente entre los componentes de un sistema de producción de briquetas idealizado utilizando el proceso de densificación por briquetadora de tornillo sinfín (refiérase a la sección 2.3.1) se presenta en la figura 2-15. En este esquema se contemplan los siguientes subsistemas (que pueden involucrar cada uno más de una de las etapas anteriormente descritas): Procesamiento de la materia prima, precalentamiento, briquetado y enfriamiento y, finalmente, el horno. Las flechas con color sólido son variables de diseño, en tanto que las flechas punteadas son determinadas por la materia prima o por el proceso.

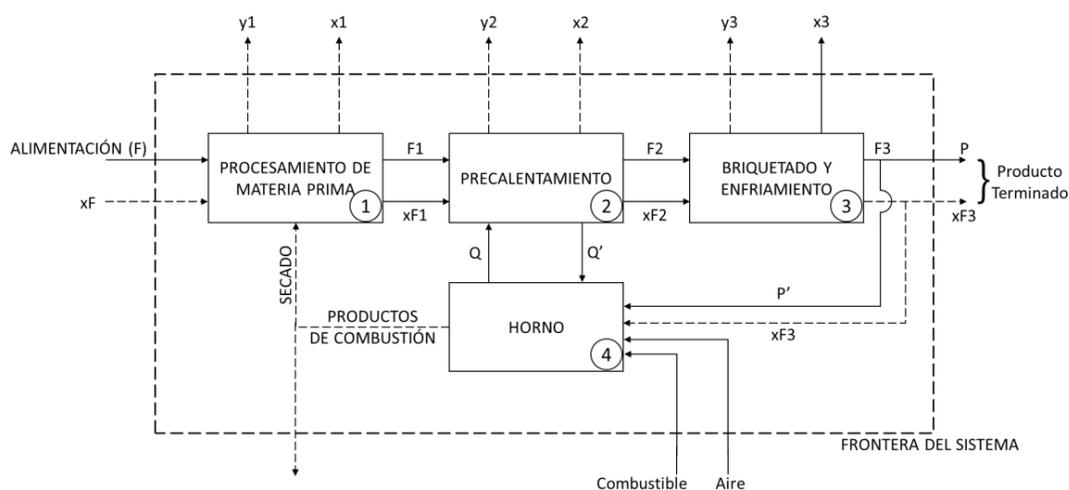


Figura 2-15. Esquema de una planta de producción de briquetas idealizada, utilizando una briquetadora de tornillo sinfín para producir briquetas con el exterior carbonizado. Fuente: Adaptado de "Biomass Briquetting: Technology and Practices", por P. D. Grover y S. K. Mishra.

Donde:

F	Tasa de ingreso de materia prima al sistema con una humedad x_F .
F1, F2, F3	Tasa de salida de materia prima de cada subsistema.
x_{F1} , x_{F2} , x_{F3}	Humedad de la materia prima a la salida de cada subsistema.
x_1 , x_2 , x_3	Pérdidas de humedad en cada subsistema.
y_1 , y_2 , y_3	Pérdidas de materia prima en cada subsistema.
Q, Q'	Flujos de intercambio de calor.
P, P'	Producción neta de briquetas (P) y cantidad de briquetas usadas en el horno (P')

1. **Procesamiento de la materia prima:** La función de este subsistema es recibir la materia prima y procesarla de tal forma que sea apta para la siguiente etapa del proceso. El procesamiento incluye el triturado y secado de la materia prima, almacenamiento de la biomasa procesada y transporte hacia el precalentamiento (subsistema 2). Es importante en este punto definir los límites de operación del subsistema, como sigue:
 - a. La materia prima saldrá de este subsistema con un 10% de humedad.
 - b. Las pérdidas de materia prima deben ser como máximo del 1%.

Refiérase a las figuras 2-9 y 2-10 de la sección precedente.

2. **Precalentamiento:** Como su nombre lo indica, este subsistema está encargado de precalentar la biomasa procesada para facilitar su densificación en la etapa de briquetado y enfriamiento (subsistema 3). En esta etapa puede haber una reducción en el contenido de humedad y no se debería perder materia prima. Refiérase a la figura 2-11 de la sección precedente.
3. **Briquetado y enfriamiento:** En esta etapa se realiza la densificación y enfriado al aire de las briquetas. Al existir carbonización en la superficie, es admisible una pérdida de material en el producto terminado, así como una reducción significativa de la humedad. Para garantizar el óptimo funcionamiento de este sistema idealizado, se requiere que una cantidad de las briquetas producidas sea utilizada para alimentar el horno (subsistema 4), esto para proveer la energía térmica requerida por los subsistemas 1 y 2.
4. **Horno:** Algunas de las briquetas rechazadas, junto con parte de la biomasa fresca cuyo tamaño excede el del tamiz, son quemadas en el horno para producir el calor

requerido en el precalentamiento, y los gases producto de la combustión son usados para secar la biomasa en la etapa de procesamiento.

Resumen del capítulo 2

En este capítulo se consolida el uso o aplicación para el cual se pretende utilizar el Jacinto de Agua, se mencionan y describen algunas normativas reguladoras para la fabricación de pellets y briquetas, además de presentar la caracterización de las máquinas comúnmente utilizadas para el procesamiento de biomasa para la obtención de briquetas y la mención de las variables de operación y sus efectos, los cuales condicionan el proceso de fabricación; finalmente se plantea el posible flujo de materia y energía en una hipotética planta de producción de briquetas.

3. Diseño de sistemas y componentes para una planta productora de biocombustibles

En los primeros dos capítulos se hace una caracterización del Jacinto de Agua y se dan a conocer los múltiples problemas que ocasiona y, con tal de dar una solución a esta problemática medioambiental, se identifica su potencial como materia prima para la obtención de biocombustibles haciendo énfasis en las briquetas, un combustible sólido que puede sustituir directamente a la leña o al carbón convencional en algunas aplicaciones. En las secciones siguientes se desarrollan los conceptos necesarios para la obtención de las briquetas de biomasa, utilizando como materia prima al Jacinto de Agua.

3.1. Selección del emplazamiento de la planta

Para efectos prácticos, se recomienda que una planta de producción de biocombustibles basada en el Jacinto de Agua se encuentre lo más cerca posible de un cuerpo de agua que contenga a esta planta. Esto quedará regulado por la normativa medioambiental vigente a través de un estudio de impacto ambiental, procurando mantener un equilibrio entre el beneficio para los asentamientos humanos en las proximidades, así como la preservación del ecosistema circundante.

Como se establece en secciones anteriores, el cuerpo de agua elegido para el estudio es la Laguna de Metapán, definido en el capítulo 1.4. En torno a esta laguna, la mayor parte de la población vive en condiciones rurales, la tierra tiene un uso principalmente agrícola y en las ocasiones en las que se ha visitado la Laguna de Metapán, una representación de las organizaciones comunales nos ha llevado al terreno comunitario, el cual puede utilizarse para cualquier propósito de beneficio para dichas comunidades.

Actualmente, dicho terreno se usa como vertedero para el exceso de Jacinto de Agua extraído de la laguna, el cual es llevado hasta dicho lugar utilizando un camión y maquinaria pesada administrada por la Alcaldía (ver figura 1.34).

Puede aprovecharse la disponibilidad de las comunidades para aprovechar el espacio disponible en el mencionado terreno y tomarlo como base para el diseño de la planta de producción: está próximo a la laguna, a una elevación tal que la posibilidad de inundación de dicho terreno tras el considerable incremento en la superficie del espejo de agua es nula, además, hay una calle de tierra que da acceso al mismo, a escasos metros de la zona de descarga en la que está prevista la instalación de una rampa transportadora para cargar directamente en un camión de volteo todo el Jacinto de Agua extraído por una barcaza recolectora. El sistema propuesto es similar al mostrado en la figura 3-1.



Figura 1-34 (repetida): Calle de tierra que da acceso al terreno comunitario de la Laguna de Metapán, el cual es usado como botadero para el Jacinto de Agua extraído. El Jacinto de Agua es transportado en un camión de volteo y transportado hacia este terreno, y este es el único uso que se da a este predio. Fotografía tomada por los autores.



Figura 3-1. Uso de una barcaza cosechadora en conjunto con una banda transportadora para cargar directamente un camión de volteo con Jacinto de Agua y otras malezas acuáticas en la central hidroeléctrica “5 de noviembre”. Fuente: Perfil oficial de Facebook de la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa.

El área en cuestión comprende una superficie estimada de 2,500 m², y se encuentra a unos 100 metros de la calle principal, lo que facilitaría el acceso a la misma. Como puede verse en la captura del mapa de Google mostrada en la figura 3-2, este emplazamiento es idóneo pues se encuentra muy cerca de la laguna, la cual se encuentra cubierta en un 60% de su espejo de agua por Jacinto de Agua, es decir, hay abundancia de recursos para la operación de una planta productora de energía basada en la biomasa de esta especie, y durante la época lluviosa, cuando los dos cuerpos de agua de la Laguna de Metapán se conectan, queda lo suficientemente elevado por encima del nivel de espejo de agua, con lo cual, todas las instalaciones estarían protegidas de la subida del nivel en la superficie de la laguna.



Figura 3-2. Esquema que muestra la ubicación del terreno comunal administrado por las ADESCO de la Laguna de Metapán. Puede verse que hay una gran cantidad de ejemplares de Jacinto de Agua que cubren el espejo de agua oriental (recuerde que, en verano, esta laguna se parte en dos y que en invierno se conecta). Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del sistema de mapas de Google.

Con base al esquema presentado en la figura 2-15 para una planta productora de briquetas, se listan a continuación las condiciones operativas necesarias que hacen viable un proyecto de esta naturaleza:

- **Se debe extraer el Jacinto de Agua de tal forma que no se agote el recurso:**

Para esto debe conocerse el tiempo de reproducción de esta planta. Las estimaciones del Capítulo 1 se usarán como primera aproximación – por cada hectárea de cuerpo de agua se producen entre 28.8 y 32.2 toneladas de Jacinto de Agua en base seca al año (Akinwande, Mako, & Babayemii, 2013). La figura 3.2 presenta a la mitad derecha de la Laguna de Metapán cubierta casi en su totalidad

por el Jacinto de Agua, siendo esta superficie de aproximadamente 126 hectáreas. El escenario menos favorable otorgaría una producción anual de 3,100 toneladas de Jacinto de Agua en base seca, aproximadamente. En junio de 2021, el Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales en conjunto con voluntarios de las zonas aledañas a la Laguna de Metapán y otras organizaciones, participaron de un proyecto de extracción de Jacinto de Agua de la referida laguna, removiendo aproximadamente 35 a 40 toneladas de plantas acuáticas al día (MARN, 2021) usando maquinaria pesada, ver figura 3-3. Debe tomarse en cuenta que el contenido de humedad del Jacinto de Agua suele rondar entre el 84 y el 88% (ver tabla 1.2), por lo que de esas 40 toneladas diarias podría utilizarse una fracción reducida con fines energéticos.



Figura 3-3. Extracción de Jacinto de Agua en la Laguna de Metapán. Fuente: marn.gob.sv.

- **El Jacinto de Agua extraído debe procesarse y almacenarse adecuadamente:**
Si lo que se pretende es que la planta opere en ciclos continuos, la materia prima

debe procesarse y almacenarse en un lugar apropiado, de tal forma que tanto la materia prima como las briquetas ya producidas no se humedezcan, pues ambas situaciones impactarán negativamente en las cualidades combustibles del producto final. De igual forma, su despacho o consumo debe seguir un orden de primeras entradas, primeras salidas (PEPS), esto con el fin de garantizar que no quedan lotes de producción de briquetas rezagados sin usarse debido a que se va consumiendo lo que se produce en el momento y la existencia más antigua queda almacenada. Una forma apropiada de almacenar briquetas se presenta en la figura 3-4.



Figura 3-4. Almacenamiento de briquetas en pilas formando arreglos por los que puede fluir el aire, en un recinto bajo techo y despegadas del piso para evitar los efectos nocivos de la humedad. Fuente: briquettemachine.com.

- **La alimentación del combustible debe ser uniforme:** Al tratarse de un combustible sólido y voluminoso, el sistema de alimentación debe ser capaz de transportar a una tasa controlada la cantidad de briquetas que la planta requiera,

tomando en consideración el tiempo necesario para que un combustible de esta naturaleza pueda liberar su energía almacenada. Si se suministran demasiadas briquetas, estas pueden impedir que se siga desarrollando la combustión además de afectar la rentabilidad de toda la planta, y si, por el contrario, se alimenta pobremente, acabará agotándose la materia que puede arder y la combustión cesará, impidiendo que se alcancen los efectos de precalentamiento o secado deseados en la materia prima, afectando a las etapas del proceso que requieren calor.

- **La producción debe entregar resultados predecibles y repetitivos:** El éxito de una planta productora de briquetas recae en su capacidad de poder operar a diferentes ritmos de trabajo sin que esto afecte la calidad del producto final. Esto puede asegurarse al trabajar por lotes. Disponer de materia prima lista para procesar, con características homogéneas y en una cantidad suficiente que permita operar la planta sin agotar las últimas reservas es fundamental, pues existe una relación estrecha entre la tasa de transformación de materia prima (biomasa) en briquetas y la obtención de dicha materia prima.
- **Deben aprovecharse al máximo las interacciones energéticas:** El ciclo propuesto en la figura 2-15 incluye diversas formas de aprovechamiento de energía residual, esto para aumentar la eficiencia global de la planta – el más representativo es el intercambio de calor debido a la combustión de algunas de las briquetas en un horno (en general, las que se rechacen por no cumplir los parámetros comerciales); este calor se aprovecha para el secado y precalentamiento de la materia prima, lo cual facilita su densificación al hacer que se requiera menos

energía para alcanzar mayores grados de compresión; la relación entre la temperatura de la materia prima y la densificación se presentó en la sección 2.1.4: a mayor temperatura, mejor fluidez tendrá la materia prima dentro de la briquetadora, siempre y cuando no se exceda el límite teórico de 300°C.

3.2. Clasificación de la materia prima útil

En esta etapa son separadas las raíces del tallo y hoja de la planta, este proceso se puede realizar inmediatamente después de la extracción de la planta de los cuerpos de agua, como se muestra en la figura 3-5, esto se hace debido a que las raíces contienen generalmente las mayores concentraciones de metales pesados (se realiza un análisis más detallado en la sección 4.1.2), el Jacinto de Agua dada su naturales absorbe dichos metales, además, el porcentaje más significativo de celulosa se encuentra en los tallos y las hojas (Tejada-Tovar, 2017), por lo que se deben retirar las raíces ya que no son de interés para esta aplicación.

Las raíces pueden ser utilizadas en otras aplicaciones diferentes, las cuales merecen un debido estudio, con base a las observaciones realizadas por el equipo de trabajo podemos sugerir su uso como aislante térmico ya que su estructura es fibrosa y no es un buen conductor térmico, también puede utilizarse como un agente absorbente de lodos originados por derramamiento de hidrocarburos y sus derivados, también se puede aprovechar su fibra en mezclas para la fabricación de ecobloques en construcciones de viviendas. Habiendo separado la raíz de los tallos y hojas, la materia prima debe ser trasladada a un espacio de almacenamiento donde se realizará el siguiente proceso para la fabricación de briquetas



Figura 3-5. Corte raíz de Eichhornia Crassipes. Fuente: Fotografía tomada por los autores en el lago de Suchitoto, El Salvador (2021).

3.3. Picado o triturado del Jacinto de Agua

Una vez se ha clasificado la materia útil, lo siguiente es picar o triturar las hojas y tallos del Jacinto de Agua, esto para que haya una mayor superficie expuesta para alcanzar un secado óptimo en el menor tiempo posible, y es por esta razón que se recomienda realizar este proceso antes del secado, tomando en cuenta además que resulta mucho más fácil cortar el material biomásico de dicha planta cuando está verde que una vez este se ha secado. Este proceso se puede realizar de inmediato luego de la clasificación de la materia prima con el propósito de hacer más óptimo el proceso de molido; las formas en que este molido se lleva a cabo pueden variar en función de la capacidad técnica y económica del proyecto de aprovechamiento: lo mejor sería disponer de maquinaria especializada la cual

puede adaptarse para triturar a un tamaño próximo a los 10 mm como se mencionó en la sección 2.3.1, sin embargo pueden utilizarse otras opciones incluyendo un proceso manual con las herramientas agrícolas que se dispongan: machete o cuchillo. Se muestra en la figura 3.6 el proceso de separación de la raíz del Jacinto de Agua,



Figura 3-6. Picado de Jacinto de Agua, Laguna de Metapán, El Salvador Fuente: Fotografía tomada por los autores.

3.4. Secado del Jacinto de Agua

Cuando el Jacinto de Agua ya ha sido triturado, se deberá pasar a la etapa de secado, en la cual mediante un proceso de adición de calor se extraerá la humedad remanente en la planta, este proceso puede ser mediante la exposición al sol durante un tiempo moderado hasta validar que la humedad sea la menor posible, puede obtenerse el mismo resultado con una estufa o mediante otros medios que puedan aportar el calor suficiente para el proceso de secado y alcanzar el estado óptimo de la materia prima en un menor tiempo; en nuestro caso se ha optado por un secado mediante la exposición al sol, por lo que será requerido un espacio de almacenamiento temporal con exposición al sol

durante un tiempo aproximado de 8 días (según los resultados de las pruebas realizadas). Como es de esperarse, el Jacinto se deberá trasladar por las noches a un espacio cerrado donde el rocío producido por la noche no afecte el proceso de secado durante el día. Esta etapa del procesamiento puede facilitarse si debajo de los ejemplares de Jacinto de Agua se coloca alguna superficie absorbente del calor que actúe como cuerpo negro: lo más básico que puede utilizarse es un plástico negro, el cual puede al mismo tiempo ser usado como concentrador solar y como medio de transporte para las plantas. Ver la figura 3-7, en la que se presenta la etapa final del secado de las muestras de Jacinto de Agua extraídas para experimentación.



Figura 3-7. Proceso de secado al sol del Jacinto de Agua, aprovechando un plástico negro para maximizar los efectos de la radiación solar. Fuente: Fotografía tomada por los autores (El Salvador, 2021).

3.5. Molido del Jacinto de Agua

Una vez que la materia prima se ha secado (esto ocurre cuando su humedad sea menor al 10%), se debe realizar el traslado del lugar de almacenamiento y pasar a la siguiente etapa, la cual consiste en un molido para reducir el tamaño de los trozos a partículas granulares las cuales serán mezcladas posteriormente; este proceso es muy

importante ya que la conformación de la briqueta depende de factores como la superficie de contacto entre las partículas: al reducir el tamaño de la materia prima se garantiza que existe una mejor adherencia entre partículas, lo cual vuelve más efectivo el proceso posterior de mezclado con agua. Se presenta en la figura 3-8 el efecto de una pasada del Jacinto de Agua triturado en un molino manual para granos.



Figura 3-8. Molido del Jacinto de Agua, previamente secado, usando un molino manual. Fuente: Fotografía tomada por los autores (El Salvador, 2021).

3.6. Mezclado con agua

Debido a que el Jacinto de Agua es una fuente orgánica alta en celulosa y lignina no requiere la adición de algún tipo de aglutinante, aunque el uso de uno podría incrementar las características del producto terminado, también es cierto que esto tendría el efecto desventajoso de aumentar el costo y posibilita un porcentaje mayor de ceniza, por tanto solo es necesario que se realice un proceso de mezclado con agua la cual

contribuye en el esparcimiento de la lignina, provocando que exista un incremento en los enlaces en el interior del pellet o briqueta (Solís & Vásquez, 2019), mejorando la adhesión de las partículas de biomasa entre sí al ser densificadas siguiendo la relación siguiente: por cada libra de Jacinto de Agua seco y molido se debe agregar 1.2 litros de agua con un atomizador (ver figura 3-9), esto para humedecer la materia prima de forma homogénea; no se recomienda la adición de la totalidad del agua de una vez porque se dificulta su mezclado debido a la formación de grumos. Este proceso es muy importante ya que le confiere maleabilidad a la materia prima y mejora la densidad y la apariencia superficial de la briqueta terminada- El tiempo de mezcla para una cantidad cercana a 0.25 libras fue de 6 minutos en pruebas realizadas por el equipo de trabajo, por lo que se estima un tiempo máximo de 10 minutos de forma manual para conseguir un mezclado uniforme que garantice una óptima adhesión de las partículas.



Figura 3-9. Mezclado de Eichhornia Crassipes con agua para mejorar su adherencia. Fuente: Fotografía tomada por los autores (El Salvador, 2021).

La razón por la que es necesario mezclar con agua la biomasa después que ya ha sido sometida a un proceso de secado es que al no contar con la maquinaria adecuada se vuelve indispensable realizar el proceso de secado con anticipación para facilitar y mejorar el proceso de molido, posterior a eso al requerir una mayor adherencia al momento de densificar se vuelve necesario mezclar con una pequeña cantidad de agua, los procesos de secado, y molido podrían omitirse al contar con equipos más sofisticados capaces de producir en el proceso de triturado, un tamaño de partículas que cumplan con el requerido para proceder de inmediato al densificado y posterior secado.

3.7. Diseño de la briqueta y su proceso de fabricación.

Según lo estudiado en la sección 2.2.4 de este documento, existe una gran diversidad de máquinas briquetadoras con características y limitaciones que se apegan al proceso para el cual son construidas. El objeto de esta investigación es modelar un prototipo con elementos básicos funcionales y, por lo tanto, se ha seleccionado por un diseño de briquetadora hidráulica con accionamiento manual que opere en el rango de medianas presiones.

3.8. Alimentación de materia prima.

Una vez preparada la mezcla de agua y Jacinto de Agua molido, basándose en la proporción descrita en la sección 3.1.6, se debe disponer de los medios para que la mezcla ingrese al molde en que será densificada. Para esta experiencia se utilizarán herramientas manuales simples, como una cuchara y un embudo. En aplicaciones de mayor escala, se recomienda el uso de tornillos alimentadores. En la sección 3.12 se presenta un panorama general de una planta procesadora de briquetas.

3.9. Selección de la geometría de la briqueta.

Las briquetas producidas deben cumplir los parámetros establecidos bajo la norma DIN Plus:

- Diámetro: Tamaño preliminar de $2" = 50.8$ mm, (según normativa, simplemente se indica el diámetro) sin embargo, se optó por un diámetro de 50.0 mm.
- Longitud: La máxima longitud debe ser menor a cinco veces el diámetro, de tal modo que, la longitud máxima de la briqueta es: $5*(50.0) = 250$ mm, evitando así efectos de pandeos sobre briquetas y como no existe un mínimo de longitud según norma. La longitud seleccionada para la fabricación de las briquetas es de 100mm.

3.10. Compactación de la briqueta.

Se ha elegido una briquetadora de accionamiento manual basada en un cilindro hidráulico para la densificación de la materia prima. Con base en las fuentes consultadas, un dispositivo como el mostrado en la sección 2.2.4 permite alcanzar presiones entre 5 y 100 MPa, sin embargo, es altamente recomendable que, una vez aplicada la fuerza requerida para compactar la briqueta, se deje aplicada la carga durante 10 minutos antes de retirarla del molde, esto con fin de contrarrestar los efectos de expansión volumétrica luego de retirar la presión aplicada en el proceso de densificación (Barranco, Ortega, Mendoza, González, & Gómez, 2016).

3.11. Secado y manipulación del producto final.

En la sección 2.2.7 se presentaron las operaciones requeridas para el proceso de fabricación de briquetas, una de estas operaciones es el secado, el cual se puede realizar

mediante la utilización de un horno o estufa, un secador solar o incluso con la exposición al aire libre, este último proceso es el más económico ya que las briquetas son expuestas a la radiación solar directa y a condiciones ambientales, las cuales permiten extraer la humedad restante. Para el secado al aire libre, el tiempo de exposición al sol es de 3 días (Rivera, y otros, 2016). Sin embargo, la opción más rápida para el secado consiste en el uso de una estufa, empleando aquellas briquetas que por errores en su proceso de fabricación no cumplan los parámetros establecidos en las normas: sea por no cumplir con el tamaño o consistencia deseada.

3.12. Elementos de una planta briquetadora a gran escala.

Basándose en el diagrama presentado en la sección 2.2.8 (el cual se repite a continuación para conveniencia del lector en la página siguiente), una planta productora de briquetas requiere el uso de una serie de dispositivos para que exista un flujo de procesos continuo que aproveche al máximo las interacciones energéticas para que esta tarea sea eficiente y rentable. En la entrada del sistema se tiene la alimentación (F), y antes de llegar a esta etapa se requiere una adicional, no descrita en este esquema: la recolección de la materia prima.

Se ha definido como lugar de operación de la planta a la Laguna de Metapán, estableciendo la capacidad de extracción de Jacinto de Agua a partir de la selección de un equipo apropiado. Se muestran en la tabla 3-1 las generalidades de este cuerpo de agua, a partir de las cuales será estimada la producción y extracción de Jacinto de Agua.

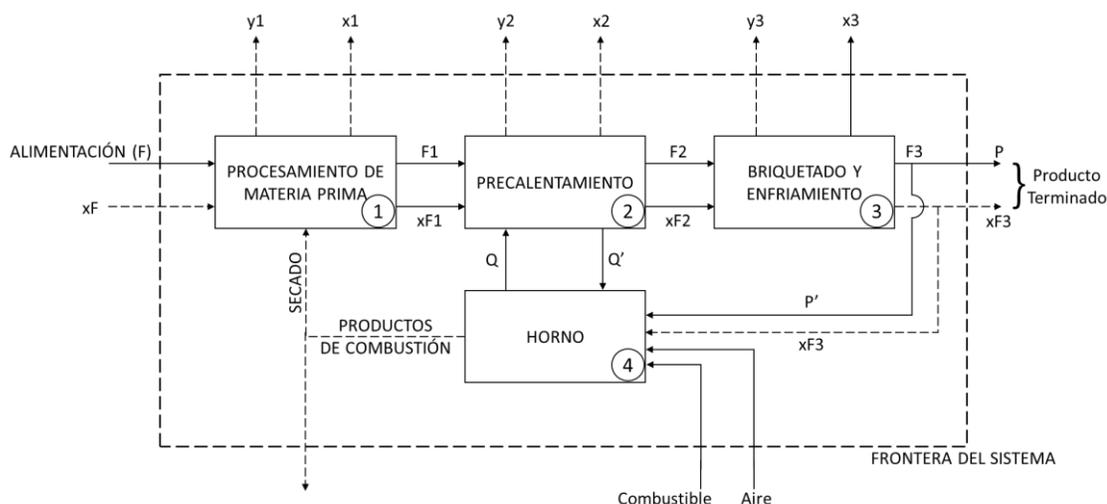


Figura 3-16 (repetida). Esquema de una planta de producción de briquetas idealizada, utilizando una briquetadora de tornillo sinfín para producir briquetas con el exterior carbonizado. Fuente: Adaptado de "Biomass Briquetting: Technology and Practices", por P. D. Grover y S. K. Mishra.

Donde:

- F Tasa de ingreso de materia prima al sistema con una humedad x_F .
- F1, F2, F3 Tasa de salida de materia prima de cada subsistema.
- x_{F1} , x_{F2} , x_{F3} Humedad de la materia prima a la salida de cada subsistema.
- x_1 , x_2 , x_3 Pérdidas de humedad en cada subsistema.
- y_1 , y_2 , y_3 Pérdidas de materia prima en cada subsistema.
- Q , Q' Flujos de intercambio de calor.
- P , P' Producción neta de briquetas (P) y cantidad de briquetas usadas en el horno (P')

Tabla 3-1. Información geográfica sobre la Laguna de Metapán.

Coordenadas	14.308919 N, 89.465232 E
Elevación	450 msnm
Superficie	525 hectáreas en época lluviosa 85.4 hectáreas en época seca

Fuente: Adaptado de "Inventario Nacional de Humedales 2017", MARN.

Analizando las imágenes captadas por satélite de la Laguna de Metapán, puede notarse que existe un serio problema de infestación del Jacinto de Agua, cubriendo entre el 90% - 95% de su superficie, como se muestra en la figura 3-10. Se recomienda comparar

esta fotografía con la mostrada en la figura 3-2. Ambas figuras se realizaron tomando la información disponible en Google Maps en momentos distintos del año 2021.



Figura 3-10. Vista satelital de la Laguna de Metapán en octubre de 2021. Aproximadamente el 90% de su espejo de agua está cubierto por el Jacinto de Agua. Fuente. Google Maps.

Dymond (1949) reportó en su estudio que una hectárea de espejo de agua en la que concurren afluentes contaminados puede producir entre 4.3 y 6.7 toneladas de biomasa de Jacinto de Agua en base seca por acre por mes (equivalente a 10.6255 y 16.5560 ton/hectárea al mes, respectivamente). Considerando el escenario menos favorable, en el que la época seca hace que la superficie de la laguna se reduzca hasta medir tan solo 85 hectáreas, la disponibilidad de Jacinto de Agua suponiendo que cubre por completo su espejo de agua es de 903 toneladas al mes, en base seca. Para poder extraer esta planta se recomienda el uso de una barcaza recolectora como la mostrada en la figura 3-11, y cuyas principales características se presentan en la tabla 3-2.



Figura 3-11. Barcaza recolectora de malezas acuáticas, del fabricante Fine Dredge. Fuente: finedredge.en.alibaba.com.

Con una barcaza recolectora de malezas acuáticas como la propuesta se pueden limpiar aproximadamente 0.48 hectáreas cada hora. Si se ejecutan labores de limpieza siguiendo un horario regular de 44 horas semanales, esto se traduciría en la limpieza de 84.48 hectáreas al mes, casi la totalidad de la extensión de la Laguna de Metapán en la época seca.

Tabla 3-2. Principales características de la barcaza recolectora de Jacinto de Agua recomendada.

Característica	Valor o descripción
Ancho de corte	2.00 m
Profundidad de corte	0.8 m
Calado	0.5 m
Altura de descarga	2.5 m
Capacidad de recolección	4,800 m ² /h (0.48 ha)
Potencia del motor de combustión	90 kW (121 hp)
Tipo de desplazamiento	Ruedas de paletas
Velocidad de desplazamiento	7 km/h
Capacidad de almacenamiento	15-20 m ³
Consumo específico de combustible	6-8 L/h (1.6 – 2.1 gal/h)

Fuente: Adaptada de finedredge.en.alibaba.com

Con un equipo como el sugerido, pueden extraerse aproximadamente 51 toneladas de Jacinto de Agua por hora. Este valor es importante, pues de la tasa de extracción depende el dimensionamiento del resto de equipos de la planta. Esta máquina para remover el Jacinto de Agua está dotada de una banda transportadora para descargar todo lo que ha recogido a una altura de hasta 2.5 m respecto al nivel de espejo de agua, dicha característica puede aprovecharse para vaciar los contenidos almacenados en la barcaza directamente en la playa o en un camión pequeño, sin embargo, la recomendación para proyectos de esta envergadura consiste en el uso de una banda transportadora especial que permita llenar el cajón de un camión de volteo grande. Este sistema fue mostrado previamente en la figura 3-1 y se presenta un esquema banda transportadora – camión en la figura 3-12.



Figura 3-12. Acoplamiento entre banda transportadora y camión de volteo sugerido. Fuente: Mavideniz.com.tr.

Para la selección de la banda transportadora se deben considerar los siguientes elementos: peso del Jacinto de Agua verde (en general, de lo que va a transportar), agua o

lodos que pudieran estar presentes, altura del cajón del camión de volteo a rellenar y ángulo de descarga. El camión que se requiere para el traslado del Jacinto de Agua (y otras malezas o basura que pudiera ser recogido por la barcaza) debe ser exclusivamente de volteo. Su capacidad de carga no está condicionada directamente con la tasa de recolección de la barcaza, pudiendo ser dejado a la consideración de los administradores del proyecto su selección. Claramente, entre mayor capacidad tenga este, la cantidad de viajes requeridos entre la estación de procesamiento y la zona de carga disminuye, sin embargo, el costo del camión aumenta significativamente.

El conjunto barcaza recolectora – banda transportadora – camión se encarga de la primera etapa del aprovechamiento del Jacinto de Agua, la recolección. A esta le sigue una preselección de la materia prima: como el lector podrá suponer, en el espejo de agua no solo se encontrará Jacinto de Agua; basura, troncos, plantas de otras especies también suelen ser recogidos al emplear una barcaza. Por tanto, es importante que exista un patio donde el camión descargue sus contenidos y se realice una selección manual de la materia prima, separando la basura que pudiera haberse recogido y cortando las raíces del Jacinto de Agua, pues esta parte de la planta carece de aplicaciones para proyectos como el descrito.

Cuando ya se tiene el Jacinto de Agua separado y se han cortado sus raíces, conviene lavarlo con agua limpia para remover cualquier sustancia que pudiera estar adherida a la planta: lodo, pequeños animales, entre otros. Es entonces cuando se puede proceder a la siguiente etapa: preprocesamiento. Refiérase a la figura 2-16, la cual se repite en esta sección para conveniencia del lector.

El preprocesamiento incluye el triturado y el secado, y según lo presentado en la sección 2.2.7, estas etapas pueden realizarse en cualquier orden. Para el manejo de grandes volúmenes de Jacinto de Agua se recomienda primero un picado fino con un molino de martillos para reducir el tamaño de las partículas, y posteriormente, ingresar toda esa biomasa húmeda a un secador para retirar su humedad.

El triturado del Jacinto de Agua debe ser capaz de producir partículas con un tamaño de entre 6 y 8 mm, según lo expuesto en la sección 2.2.6. El equipo recomendado para poder procesar toda la biomasa en verde es un molino de martillos como el mostrado en la figura 3-13.



Figura 3-13. Molino de martillos de tres ejes, del fabricante Liyang Rongda Machinery, con capacidad de triturar hasta 10 toneladas de materia prima por hora. Fuente: ly-rd.en.alibaba.com.

El molino de martillos tritura la biomasa a razón de 10 toneladas por hora y, posteriormente, esta biomasa triturada enviada por un tornillo alimentador hacia el secador. Se presenta en la tabla 3-3 la información más relevante del molino de martillos.

Tabla 3-3. Principales características del molino de martillos propuesto para el proyecto.

Característica	Valor o Descripción
Modelo	SFSP 65X100
Diámetro del rotor	600 mm
Ancho de la cámara de trituración	800 mm
Velocidad del rotor	1480 rpm
Consumo de potencia	132-160 kW
Capacidad de procesamiento	8-10 ton/h

Fuente: Adaptada ly-rd.en.alibaba.com

El tornillo transportador se coloca directamente a la salida del molino de martillos y este mueve la biomasa triturada hacia un secador centrífugo. Se muestra el tornillo transportador en la figura 3-14 y la información técnica de este producto en la tabla 3-3.



Figura 3-14. Transportadora de tornillo sinfín para partículas de tamaño reducido, del fabricante Xinxiang Gaofu Machinery. Fuente: sieve.en.alibaba.com.

Tabla 3-4. Características principales de la transportadora de tornillos sugerida.

Característica	Valor o Descripción
Modelo	LX219
Ángulo de transporte	Entre 0° y 45°
Distancia de transporte	Entre 4 y 15 m
Tasa de transporte	15 ton/h
Consumo de potencia	5.5 – 15 kW

Fuente: Adaptado de sieve.en.alibaba.com

El secador rotativo aprovecha los gases calientes para realizar un intercambio de calor sin contacto con la biomasa húmeda que ingresa por uno de los extremos de la coraza interna. Al final del intercambiador de calor hay una trampa para cenizas y polvo, y entre la coraza exterior y la interior se tiene la circulación de la biomasa. En la salida del secador se instala otro tornillo transportador que es el que conduce la biomasa seca hacia la briquetadora. Se muestra en la figura 3-15 el secador de biomasa y sus partes. La capacidad de secado de este equipo es de entre 9.0 y 13.6 toneladas/hora.



Figura 3-15. Secador de tambor rotativo para biomasa, del proveedor Henan Baichy Machinery. Fuente: baichy.en.alibaba.com.

Si la biomasa que recién ha sido secada tiene la temperatura apropiada y el equipo para procesarla se encuentra disponible, es momento para someterla a la etapa de densificación, para lo cual se utiliza una briquetadora de tornillo sinfín para producir briquetas en el rango de altas presiones (mayores a 100 MPa). Se elige este tipo de

máquina por sobre los otros expuestos a lo largo de este documento debido a que el producto terminado tiene mejores propiedades.

Si se utilizara una única máquina briquetadora, no podría procesarse todo el volumen de materia prima que hay disponible, por lo que se requiere la puesta en marcha de varias briquetadoras en paralelo, alimentadas por un colector común. Se selecciona la máquina briquetadora con mayor capacidad del mercado, la cual se presenta en la figura 3-16. Sus características de operación se listan en la tabla 3-5.



Figura 3-16. Briquetadora de extrusión por tornillo sinfín, del fabricante Zhangsheng. Fuente: hnzsmachine.en.alibaba.com.

Tabla 3-5. Principales características de la máquina briquetadora recomendada.

Característica	Valor o Descripción
Modelo	ZS-80
Humedad de materia prima	8-12%
Tamaño de partícula	3-5 mm
Consumo de potencia	18.5 kW
Productividad	300 kg/h

Fuente: Adaptado de hnzsmachine.en.alibaba.com.

Por último, se requiere la instalación de un gasificador de biomasa, el cual servirá como generador de calor para el secado y el precalentamiento de la materia prima. Originalmente, la planta de producción de briquetas fue concebida usando una estufa, sin embargo, se prefiere el gasificador por permitir alcanzar temperaturas más elevadas en los productos de combustión. Se muestra el gasificador recomendado para el proyecto en la figura 3-17, y sus principales características se resumen en la tabla 3-6.



Figura 3-17. Gasificador para biomasa, del fabricante Green Vinci. Fuente: greenvinci.en.alibaba.com.

Tabla 3-6. Principales características del gasificador recomendado para el proyecto.

<i>Característica</i>	<i>Valor o Descripción</i>
<i>Modelo</i>	<i>GV-480-P</i>
<i>Tipo de gasificador</i>	<i>Lecho fijo</i>
<i>Potencia generada</i>	<i>20 x10⁹ J</i>
<i>Oxidante utilizado</i>	<i>Aire forzado</i>
<i>Consumo específico de combustible</i>	<i>1.2 ton/h</i>
<i>Consumo energético</i>	<i>21.5 kW</i>
<i>Temperatura de gasificación</i>	<i>900 °C</i>
<i>Temperatura de llama</i>	<i>1,100 °C</i>

Fuente: Adaptado de greenvinci.en.alibaba.com.

Para concluir esta sección, se presenta en la figura 3-18 un modelo de cómo es una planta de procesamiento de biomasa para la elaboración de briquetas, empleando todos los elementos antes descritos.



Figura 3-18. Elementos de una planta productora de briquetas de biomasa. Fuente: hnzsmachine.en.alibaba.com.

El detalle de la numeración en la figura 3-18 es el siguiente:

1. Triturador (molino).
2. Tornillo transportador.
3. Secador rotativo.
4. Gasificador de lecho fijo.
5. Unidades de briquetado.
6. Unidades de carbonización. No son parte de este proyecto.

En la figura 3-18 no se muestran ni la barcaza ni la banda transportadora de carga, pues la planta de procesamiento no necesariamente debe estar adyacente al cuerpo de agua del que se extrae el Jacinto de Agua.

Resumen del capítulo 3

En este capítulo se hace énfasis en las operaciones de una planta para la producción de briquetas a partir del Jacinto de Agua, definiéndose las variables del proceso y la selección de los equipos requeridos para la implementación de un proyecto de aprovechamiento de la biomasa contenida en esta planta. También, se sientan las bases para la creación de briquetas de forma experimental.

4. Fabricación de briquetas a partir del procesamiento del Jacinto de Agua

Conociendo todas las etapas y procesos necesarios para poder obtener las briquetas de biomasa, es necesario realizar un análisis, diseño y construcción de un prototipo de máquina briquetadora, esto con el objetivo de adecuar todos los procesos antes descritos para el uso de Jacinto de Agua como materia prima en el proceso productivo de fabricación de briquetas de biomasa.

4.1. Extracción y procesamiento de ejemplares de Jacinto de Agua

La ubicación de estudio de la planta piloto estará en las cercanías de la Laguna de Metapán, donde se realizan trabajos periódicos de extracción de Jacinto de Agua, siendo la última realizada en junio de 2021 (ver figura 4-1). En esta actividad se extrajeron aproximadamente de 35 a 40 toneladas diarias, 4500 toneladas extraídas a la fecha de la publicación de este documento (MARN, 2021).



Figura 4-1. Extracción del Jacinto de Agua en Laguna de Metapán. Fuente: MARN, El Salvador (2021).

Para los fines de experimentación en esta investigación se extrajeron dos cantidades diferentes de Jacinto de Agua de diferentes cuerpos de agua y en diferentes temporadas: la primera recolección de muestras se realizó en la Laguna de Metapán en marzo del 2020 y la otra en el lago de Suchitoto (Embalse del Cerrón Grande) en agosto del 2021; cada uno de estos sitios presenta diferentes condiciones medioambientales y socioeconómicas. Se realizó la extracción de muestras en dos diferentes fechas, debido a la pandemia ocasionada por la COVID-19 que hizo imposible que se continuara trabajando durante el resto del año 2020, y al momento de retomar el trabajo, las primeras muestras habían perdido gran parte de sus propiedades, por lo que, se hizo necesario recolectar nuevas muestras y poder obtener datos más certeros. La segunda extracción se realizó en el lago de Suchitoto por su cercanía con la capital. Se muestra en la figura 4-2 el proceso de extracción de Jacinto de Agua por parte del grupo de investigadores.



Figura 4-2. Extracción de muestras de Jacinto de Agua en lago de Suchitoto. Fuente: Fotografía tomada por los autores (El Salvador, 2021).

4.2. Análisis de las variables para el aprovechamiento del Jacinto de Agua como materia prima para la elaboración de briquetas

Para la fabricación de las briquetas se deben tomar en cuenta consideraciones iniciales, tales como: el volumen inicial y volumen final de la materia prima ya densificada, presión de densificación o, en su defecto, la fuerza aplicada sobre el volumen de materia prima contenido dentro del molde para briquetas. Un estudio realizado en Colombia en el año 2017 presenta los resultados de la producción de briquetas con 0.5 cm de alto y 4.7 cm de diámetro, a las que se les aplicó una fuerza de 20 toneladas con la ayuda de una prensa hidráulica; y para establecer su potencial como combustible se compara el Jacinto de Agua con otros combustibles sólidos, siendo el poder calorífico del Jacinto de Agua de 3362.9 kcal/kg, el poder calorífico del carbón mineral es de 6562.0 +/- 4,73 kcal/kg y el poder calorífico de la leña es de 4166.67 +/- 4.33 kcal/kg (Rodríguez, Colmenares, Barragán, & Mayorga, 2017). Pese a que su poder calorífico es menor que el carbón mineral y la leña, los resultados confirman la posibilidad de utilizar briquetas fabricadas a partir del Jacinto de Agua. Conociendo estos datos podemos considerar el uso de un cilindro hidráulico que nos permita aplicar una presión de 7 MPa o una fuerza máxima de 20 toneladas y la elaboración del molde para la briqueta con las dimensiones especificadas en la sección 3.4.2.

Para hacer una estimación de la cantidad de energía que se podría obtener del Jacinto de Agua en una jornada de extracción en la Laguna de Metapán, se toma como referencia la cantidad de 4500 toneladas en base húmeda, última cifra oficial publicada (MARN, 2021).

Según observaciones del grupo de investigadores durante la primer extracción de muestras realizada en la Laguna de Metapán, inicialmente al momento de la extracción el peso de las muestras fue de 16.18 libras, luego de 15 días secando las muestras al sol, se volvió a tomar el peso de las muestras, en esta ocasión su peso fue de 1.7 libras, lo que nos da un porcentaje de reducción en peso del 89.5%, valor muy cercano al 90% de contenido de agua (Rodríguez, Colmenares, Barragán, & Mayorga, 2017). En dicho estudio también se determinó una reducción del 50% en volumen luego del secado y procesamiento de la materia, valor comparable con los resultados de esta investigación, ya que la reducción de volumen que experimentó el Jacinto de Agua fue del 40% hasta la etapa de secado, por lo que se estima una pérdida de volumen del 10% en las etapas posteriores de trituración, molido y densificado.

Partiendo de los parámetros ya mencionados se puede realizar el siguiente análisis:

$$m = 4,500 \text{ t} = 4,500,000 \text{ kg}$$

Considerando una reducción de peso del 90% debido a la humedad, se calcula la materia disponible en base seca:

$$m = 4,500,000 \text{ kg} * (1 - 0.9) = 450,000 \text{ kg}$$

Y, teniendo presente que el poder calorífico del Jacinto de Agua según lo reportado por diversos autores es:

$$Pc = 3,362.9 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} = 14,079.8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tomando en cuenta la masa de Jacinto de Agua utilizable por extracción y el poder calorífico mencionado anteriormente, podemos realizar un cálculo estimado de la cantidad de energía producida por las briquetas:

$$E = m * Pc$$

$$E = 450,000 \text{ kg} * 14,0798 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$E = 6,335,910 \text{ kJ} = 6,335.91 \text{ MJ}$$

La cantidad de energía que se podría producir es de 6,335.91 MJ en el año 2021 según la estimación anterior, lo que se traduce en una gran oportunidad de aprovechamiento energético, mismo que podría volver sostenibles las tareas de extracción de Jacinto de Agua para mitigar los efectos negativos de la invasión de dicha planta al emplearla como combustible, lo cual genera un impacto positivo en los bosques ya que su uso desplazaría a la leña, con lo que disminuiría la deforestación. Todo esto se puede unificar en la idea de una mejora en las condiciones de las comunidades que actualmente son afectadas por la presencia de esta planta en la Laguna de Metapán.

Otros parámetros para considerar el aprovechamiento del Jacinto de Agua como combustible son el poder calorífico de su biomasa y la composición de las partes de la planta: no tiene una estructura homogénea y existen indicios de que la energía que pudiera obtenerse está ligada a la composición de la planta, dicha composición juega un rol muy importante ya que se sabe que esta planta es capaz de realizar un proceso de absorción y asimilación de metales pesados a través de sus raíces debido a la formación de complejos

entre el metal pesado y los aminoácidos presentes dentro de la célula vegetal (Benítez Pacheco, 2008), por tal motivo no es recomendable el uso de las raíces en el proceso de combustión ya que esto puede exponer a las personas a problemas de salud durante la manipulación o la quema de esta planta.

El poder calorífico que poseen los tallos y las hojas difieren uno de otro y al realizar la combinación de ambos, cambia dicho parámetro dependiendo la cantidad de cada uno en la mezcla, como se presenta en la tabla 4-1.

Tabla 4-1. Poder calorífico de pellets de Jacinto de Agua con variación en su composición

<i>Diámetro (mm)</i>	<i>Composición Eichhornia Crassipes (% peso)</i>	<i>Masa (g)</i>	<i>Poder calorífico (MJ/kg)</i>
6	100 T	0.6672	11.899
	100 H	1.0672	15.867
	75 H – 25 T	0.5005	13.528
	25 H – 75 T	0.5809	12.649
	50 H – 50 T	0.6752	13.05

Fuente: Adaptado de “Evaluación del potencial energético de la Eichhornia crassipes para su aplicación como biocombustible”, por Solís y Vásquez, 2019.

Nota: “T” hace alusión a los tallos de la planta, en tanto que “H” se refiere a las hojas.

De la tabla 4-1 se desprende que el poder calorífico en las dos partes del Jacinto de Agua bajo estudio (hojas y tallos) cambia significativamente, obteniéndose mayor energía por la combustión de las hojas, y el poder calorífico de la mezcla tallos-hojas disminuye a medida aumenta la cantidad de tallos en la mezcla.

Conforme a la información mostrada en la tabla 4-1, el caso ideal implicaría utilizar únicamente las hojas del Jacinto de Agua. Sin embargo, esto no es posible ya que se debe aprovechar al máximo toda la materia útil a excepción de las raíces por lo antes mencionado en esta sección, lo que significa que al explotar dicho recurso, una forma de

aprovechar una mezcla de hojas y tallos sin sacrificar el poder calorífico de manera drástica consiste en utilizar la composición (75H-25T), con esto se obtiene un resultado de 13.528 kJ/kg por lo que es muy recomendable trabajar con estas cantidades de peso en la composición de la mezcla.

4.3. Diseño y construcción de prototipo de máquina briquetadora.

Una vez definido el tipo de máquina briquetadora a fabricar (consultar la sección 3.7 de este documento), se debe elegir el resto de los sistemas y componentes asociados. Al ser una briquetadora hidráulica con accionamiento manual, lo primero es diseñar el sistema hidráulico. En el caso particular de esta investigación se optó por la adquisición de un equipo ya existente, una prensa hidráulica, la cual se muestra en la figura 4-3.



Figura 4-3. Prensa hidráulica de 20 toneladas de fuerza, marca Truper. Fotografía tomada por los autores.

Debido a los requerimientos como presión, desplazamiento e incorporación de manómetro necesarios para realizar el briquetado, sumados a la disponibilidad y coste del equipo, se seleccionó una prensa hidráulica del fabricante TRUPER, modelo PREH-20, para realizar el proceso de densificado ya que cumple con todos los criterios antes mencionados. Se presentan en la tabla 4-2 algunas de sus características más importantes.

Tabla 4-2. Características principales de la prensa hidráulica seleccionada.

<i>Característica de la Prensa Hidráulica</i>	<i>Unidad de medida</i>
<i>Diámetro del pistón</i>	<i>48 mm</i>
<i>Capacidad de fuerza</i>	<i>20 toneladas</i>
<i>Rango de trabajo</i>	<i>1035 mm</i>
<i>Carrera de vástago</i>	<i>160 mm</i>
<i>Peso del equipo</i>	<i>85 kg</i>

Fuente: Ficha técnica de la prensa hidráulica tipo "H" modelo PREH-20 de Truper.

4.3.1. Diseño del molde para la compactación de las briquetas.

Los criterios para el diseño del molde se fundamentan en las dimensiones seleccionadas para la briqueta en la sección 3.2.7, sumados a esos criterios se sugiere que el diámetro interior del molde debe ser lo más cercano al diámetro del pistón de la prensa hidráulica, esto con el objetivo de minimizar los costes y material aprovechando un empuje directo del vástago del cilindro hidráulico.

Si bien, esto último no es recomendable, se justifica el uso de la varilla del cilindro como elemento de aplicación de fuerzas para la fabricación de las briquetas debido a que el uso que se hará del mismo no excederá las 25 repeticiones.

Lo correcto si se quiere utilizar una prensa hidráulica existente como fuente de potencia para la densificación es el uso de un elemento adicional que cumpla la función

de émbolo, ya que el uso directo del vástago del cilindro hidráulico puede ocasionar daños o rayaduras en su superficie ocasionados por contacto con las paredes del molde o con restos de la biomasa triturada, pudiendo provocar pérdidas de fluido hidráulico.

El diámetro interno del molde para briquetas fue elegido tomando como consideración inicial la disponibilidad en el mercado del material, siendo una medida común en las barras perforadas un diámetro interno de 2 pulgadas ó 50.8 mm. El diámetro exterior será seleccionado con base al cálculo del espesor necesario para soportar la presión aplicada, la altura del molde será de 200 mm, este molde estará sujetado de forma paralela a la bancada de la prensa hidráulica, y su diseño se desarrollará en la sección siguiente.

Partiendo de la información disponible en las fuentes consultadas, se establece como requisito que las briquetas sean sometidas a una fuerza de 15 toneladas para asegurar una cohesión suficiente entre las partículas de la materia prima previamente picada sin necesidad de agregar aglutinantes. El otro parámetro de diseño está dado por la geometría del cilindro hidráulico ya que se quiere utilizar el pistón mismo para comprimir la briqueta: si el diámetro del pistón es de 48 mm, la briqueta debe tener 50 mm de diámetro, siendo este el diámetro interno del cilindro a utilizar como molde.

Para calcular la presión interna que deberá soportar el molde, se parte de las siguientes asunciones:

- Se utilizará el acero AISI 1020CD como material para el molde debido a su disponibilidad en el mercado, su resistencia y considerando un uso esporádico

del mismo, ya que la aplicación es puramente académica y no para producción en masa.

- Se tomará el cilindro como uno de pared delgada, siendo esta suposición sujeta a verificación.

Para generar los cálculos y determinar finalmente el espesor del cilindro que hará de molde, se propone un sistema como el mostrado en la figura 4-4:

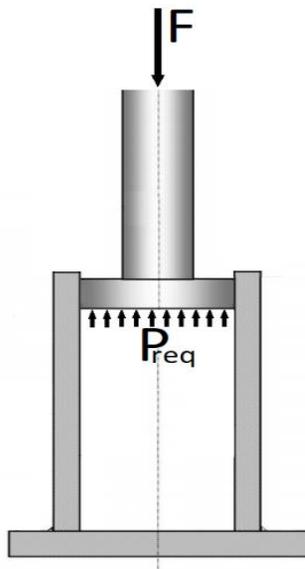


Figura 4-4. Esquema básico del sistema de compresión para la elaboración de briquetas. Fuente: Elaboración propia.

Calculando la presión interna en el cilindro:

$$A = \pi r^2 = \pi(0.9842)^2 = 3.04 \text{ pulg}^2 = 1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Sustituyendo:

$$P_{req} = \frac{F}{A}, \text{ despejando } F \text{ se tiene que } F = P_{req} \cdot A$$

$$F = 15 \text{ ton} = 147.1 \text{ kN}$$

$$P_{req} = \frac{147.1 \text{ kN}}{1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 75.05 \text{ MPa}$$

Calculando el espesor del cilindro a utilizar para la compactación.

- Se establece previamente que se usará una barra sólida del acero AISI 1020 CD, su esfuerzo de cedencia según tablas de materiales es $S_y = 390 \text{ MPa}$. No se tuvo éxito buscando barra perforada con un diámetro interno de 2 pulgadas.
- Aplicando las ecuaciones para cilindros sometidos a presión de pared delgada y por la configuración del elemento de frontera móvil, el cual estará apoyado en uno de sus extremos sobre la prensa hidráulica, dejando libre el otro extremo, se garantiza que el cilindro solo estará sometido únicamente a esfuerzos tangenciales y radiales, en tanto que los esfuerzos los longitudinales serán nulos:

$$\sigma_t = \frac{P_{req} \cdot r}{t} = \frac{(75.05 \times 10^6)(25 \times 10^{-3})}{t} = \frac{1.876 \times 10^6}{t}$$

$$\sigma_l = \frac{P_{req} \cdot r}{2t} = 0$$

- Aplicando la teoría del esfuerzo cortante máximo y considerando un factor de seguridad de 2.0, se tiene:

$$\frac{S_y}{2n} = \frac{\sigma_t - \sigma_l}{2}$$

$$\frac{390 \times 10^6}{2(2)} = \frac{\frac{1.876 \times 10^6}{t} - 0}{2} = \frac{1.876 \times 10^6}{2t}, \quad \text{despejando el espesor } t$$

$$t = 2 \left(\frac{1.876 \times 10^6}{390 \times 10^6} \right) = 9.62 \times 10^{-3} \text{ m} \cong 9.6 \text{ mm}$$

Dado el resultado anterior, se comprueba si es válida la suposición inicial sobre si es un cilindro de pared delgada, para ello se calcula la relación del radio interior con respecto al grosor de la pared: un cilindro de pared delgada tendrá un valor r/t mayor o igual a diez ($r/t \geq 10$).

Para este caso se tiene que $r=25\text{mm}$ y $t=9.6\text{mm}$, por lo que la relación $r/t = 2.60$. En vista de que esta relación r/t es menor a 10, los resultados obtenidos aplicando la teoría para recipientes de pared delgada quizá no produzcan resultados fiables, por lo que se procede a diseñar el molde basándose en la teoría de recipientes de pared gruesa. Se presenta la distribución de esfuerzos al interior del cilindro en la figura 4-5.

Ecuaciones para cilindros de pared gruesa sometidos a presiones internas:

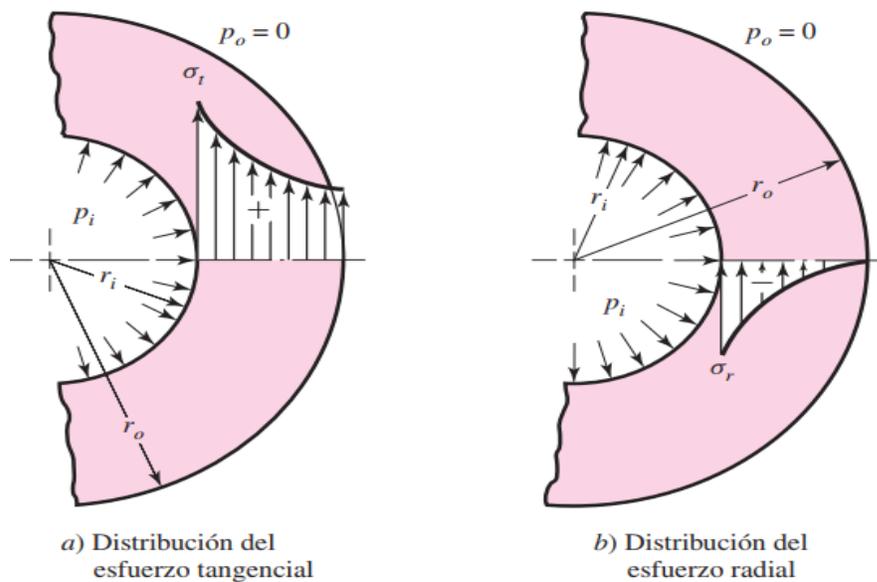


Figura 4-5. Distribución de esfuerzos en un cilindro de pared gruesa sin rotación, sometido a presión interna. Fuente: Diseño en ingeniería mecánica de Shigley.

Esfuerzos tangenciales:

$$\sigma_t = \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r^2} \right)$$

Cuando $r = r_i$,

$$\sigma_t = p_i \left(\frac{r_o^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \right)$$

Cuando $r = r_o$,

$$\sigma_t = 2 \left(\frac{p_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \right)$$

Esfuerzos radiales:

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r^2} \right)$$

Cuando $r = r_i$,

$$\sigma_r = -p_i$$

Cuando $r = r_o$

$$\sigma_r = 0$$

Como se pudo observar en las ecuaciones anteriormente desarrolladas, ambas tensiones (radial y tangencial) son máximas en la superficie interior, donde r tiene el valor mínimo; σ_r siempre es un esfuerzo de compresión y menor que σ_t , mientras que σ_t siempre es un esfuerzo de tracción y cuyo valor máximo que será usado para efectos de cálculo es igual a:

$$\sigma_{t_{max}} = p_i \left(\frac{r_o^2 + r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \right)$$

Dejando de lado por un momento los cálculos, el diseño se centra ahora en los materiales disponibles para la fabricación del molde. En El Salvador, es común encontrar materiales como la barra sólida de acero AISI 1020 en diámetros que incrementan a razón de ¼ de pulgada. Si se ha definido previamente que el diámetro del pistón que comprime la materia prima es de 48 mm, la medida más próxima a esta cifra es de 50 mm (diámetro interno). Por tanto, se incluyen en el análisis las opciones de diámetros de barra sólida presentados en la tabla 4-2, considerando que dan cumplimiento a la relación $r/t \geq 10$ y un factor de seguridad como mínimo de 1.5:

Tabla 4-3. Selección del diámetro de la barra sólida con base a la disponibilidad de materiales en El Salvador.

<i>Diámetro comercial, pulgadas</i>	<i>Espesor de la pared t, pulgadas</i>	<i>Factor de Seguridad resultante</i>
2 ¼	1/8	0.69
2 ½	¼	1.22
2 ¾	3/8	1.68
3	½	2.07

Fuente: Elaboración propia con base a los resultados obtenidos de los cálculos para la selección del material.

Con base en los resultados para el molde se debe de utilizar un tubo con una pared de 3/8" (9.53mm) y un diámetro interno de 50 mm. Este no se encuentra comercialmente disponible y al no existir en nuestro medio barras de acero perforadas con medias cercanas a las requeridas es necesario fabricar a partir de una barra sólida, como la mostrada en la figura 4-6.



Figura 4-6. Barra de acero AISI 1020 CD de 2 $\frac{3}{4}$ pulgadas Fuente: Fotografía tomada por los autores.

Debido a la dificultad para encontrar un material (barra de acero perforada) que cumpla con las dimensiones y propiedades requeridas para la elaboración del molde, se optó por materiales que cumplieran con las propiedades y dimensiones más próximas a lo calculado, tal es el caso de la barra en la figura 4.6, dicha barra sólida posee una longitud de 205 mm, un diámetro de 2 $\frac{3}{4}$ de pulgadas y, por tanto, es necesario un proceso de maquinado para darle sus dimensiones definitivas, para lo cual solo se maquinará el diámetro interno, rectificando su diámetro interno a 50 mm; el diámetro externo se conservará para dar cumplimiento a los cálculos previos pues con las medidas que tiene se logra un factor de seguridad de 1.68. Elegir el material de 2 $\frac{1}{2}$ era más económico, sin embargo, su resistencia a las solicitaciones a las que será expuesto es muy próxima a la de cedencia y no es seguro utilizarlo. Se presenta el caso contrario al elegir materiales con diámetros externos superiores a la medida comercial de 2 $\frac{3}{4}$: el exceso de material representa un aumento en la fiabilidad del molde, sin embargo, el costo de dicho exceso de material no es justificable.

Se adquirió una pieza redonda de acero AISI 1020CD sólida, se perforó y luego se le dieron las dimensiones finales al diámetro con un rectificado. Se presenta el cilindro maquinado en la figura 4-7.



Figura 4-7. Barra de acero AISI 1020 CD luego del maquinado Fuente: fotografía tomada por los autores.

4.3.2. Diseño y construcción de sistemas acoplados

Lo siguiente en el proceso constructivo del prototipo de la briquetadora es realizar el diseño y acople de las sujeciones del molde con la prensa hidráulica, para esto fueron tomados como base diseños previos realizados en el programa de dibujo asistido por computadora SolidWorks, como los mostrados en la figura 4-8. Dicho diseño posee un principio de funcionamiento simple: el molde se encuentra sujeto a la bancada, la cual está alineada para que al bajar el pistón del mecanismo hidráulico, este transmita una fuerza hacia abajo de forma directa para comprimir la materia prima contenida dentro del molde hasta alcanzar la presión y altura de la briqueta deseados; estas sujeciones deben restringir el movimiento del molde en tres direcciones, ya que al transferir la fuerza de compactación

al material dentro del molde, por reacción este tendrá una tendencia a levantarse ya que el material buscare una salida en la parte inferior del molde provocando que este suba, conociendo este posible fenómeno se debe restringir el movimiento del molde hacia arriba.

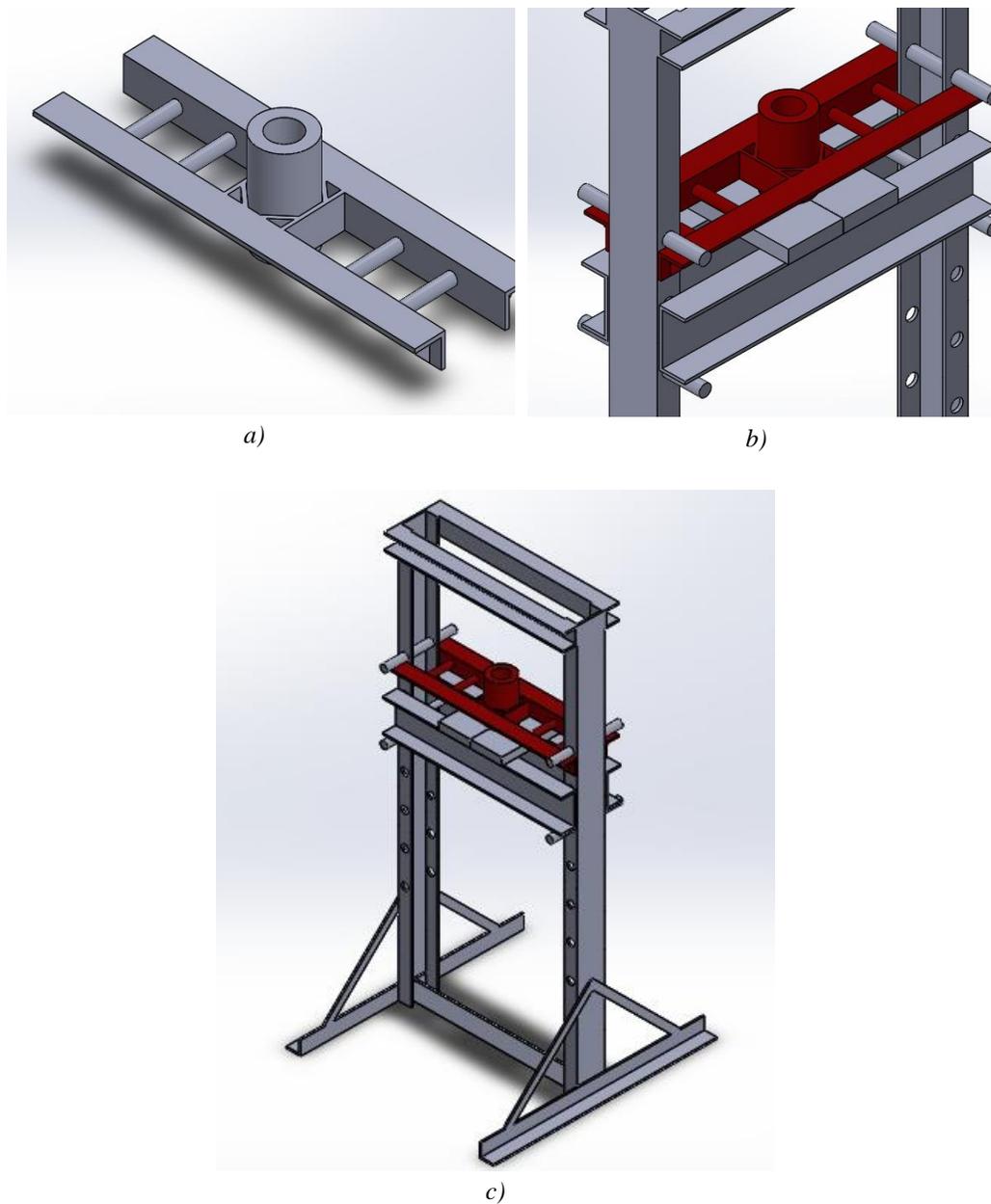


Figura 4-8. Ensamble removible entre la prensa hidráulica y el molde para briquetas. a) Se muestra el conjunto del molde, b) Conexión entre el molde y la prensa hidráulica, revelando los detalles principales sobre su montaje y sus apoyos, c) Montaje del molde en la prensa hidráulica desde una perspectiva general. Fuente: Elaboración propia.

El diseño propuesto sufrió modificaciones en su ejecución real, principalmente porque se optó por el uso de materiales reciclados. Esto no afecta en lo absoluto al diseño, la única diferencia consiste en que el montaje requiere que las dos placas de acero incluidas en la prensa hidráulica (ver las figuras 4-8 b y c) deben instalarse una sobre la otra y no de lado a lado.

Para unir el molde con el bastidor que lo une a la prensa hidráulica y lo mantiene alineado respecto al cilindro hidráulico se utilizó soldadura de electrodo revestido. El diseño de la soldadura no es crucial para el funcionamiento del dispositivo, tomando en cuenta que la única parte del molde sometida a esfuerzos de compresión es el cilindro, el cual tiene un factor de seguridad de 1.68 (refiérase a los cálculos en la sección 4.3.1) y no está sometido ni a esfuerzos de tracción ni de rotación o flexión. La soldadura se convierte únicamente en un medio de sujeción, y se muestra en la figura 4-9 una de las etapas del proceso de fabricación del molde.



Figura 4-9. Fabricación de conjunto del molde para la máquina briquetadora. Fuente: fotografía tomada por los autores (El Salvador, septiembre 2021).

La simplicidad de este diseño permite que las sujeciones del molde se fabricaran en su mayoría de forma empírica, limitándose únicamente a dimensionar los componentes basándose principalmente en las características de la prensa hidráulica debido a que el propósito de este diseño está limitado a una cantidad mínima de usos, la mayoría de los procesos se realizaron con herramientas manuales. Se presenta en la figura 4-10 el molde ya ensamblado y pintado, montado en la prensa hidráulica. Anteriormente fue establecido que el pistón mismo sería el elemento que compactara a la materia prima, esto para efectos de reducción de costos ya que no se requiere invertir mano de obra o recursos para formar otro émbolo.



Figura 4-10. Prototipo de máquina briquetadora, realizado a partir de una prensa hidráulica. Fuente: Fotografía tomada por los autores.

4.4. Fabricación de briquetas

Para la fabricación de briquetas utilizando este dispositivo se debe iniciar una secuencia de operaciones manuales muy sencillas, la cuales comienzan con la colocación del molde en la prensa hidráulica. Posteriormente, se debe realizar una medición de la cantidad de materia requerida para fabricar una briqueta, con ese propósito se preparó una libra del material y llenando el molde hasta su borde superior, compactándolo con la presión ejercida con los dedos hasta que ya no puede comprimirse más, luego se pesó nuevamente el material sobrante y dando un valor de 0.75 libras, lo que quiere decir que se requieren 0.25 libras para fabricar una briqueta. Se presentan en las figuras 4-11 y 4-12 los procesos anteriormente descritos.



Figura 4-11. Llenado del molde con Jacinto de Agua molido. Este material fue comprimido usando únicamente las yemas de los dedos y se decidió no agregar más cuando alcanzó el borde superior. Fuente: Fotografía tomada por los autores.



Figura 4-12. Medición del peso de la materia prima restante, determinándose que se requieren 0.25 libras de Jacinto de Agua molido finamente para fabricar una briqueta. Fuente: Fotografía tomada por los autores.

Una vez lleno el molde, se acciona el mecanismo para realizar el empuje sobre la materia prima con el cilindro hidráulico, la mezcla se densifica a medida se reduce su volumen, causando que el agua contenida en la mezcla salga del molde y la mezcla se comprima hasta alcanzar una presión aproximada de 75 MPa; debido a que el manómetro de la prensa hidráulica no registra presión, sino fuerza aplicada (en toneladas), se comprime la briqueta hasta alcanzar una presión máxima de 15 toneladas (como se muestra en la figura 4-13), luego se sostiene dicha fuerza aplicada sobre la materia prima durante diez minutos, esto para asegurarse que exista una cohesión adecuada entre sus finas partículas y para contrarrestar los efectos de expansión volumétrica.

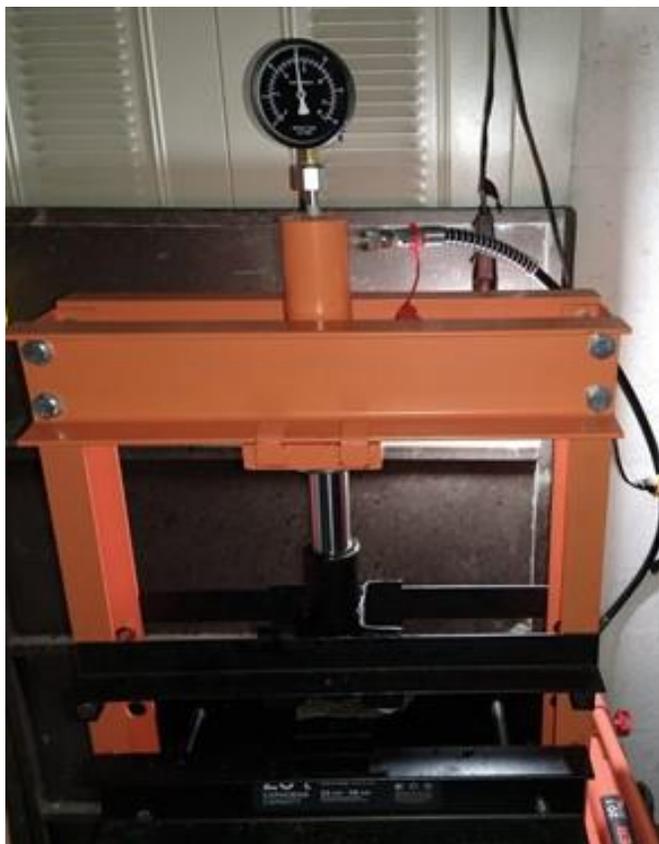


Figura 4-13. Compresión de Jacinto de Agua en progreso, aplicando 15 toneladas fuerza a la materia prima. Fuente: fotografía tomada por los autores (El Salvador, 2021).

Una vez finalizado el tiempo de mantenimiento de la presión, se procede a desmoldar las briquetas y exponerlas a una fuente de calor para secarlas, pudiendo ser la exposición directa al sol durante un periodo de 8 días, sin embargo, debido a limitaciones de tiempo se optó por el secado mediante estufa convencional usando carbón, esto con el fin de poder conseguir resultados más rápidos en nuestro trabajo de investigación. Se muestra en la figura 4-14 el resultado de someter dos de las briquetas fabricadas con el dispositivo fabricado secadas en una estufa a carbón, exhibiendo una superficie parcialmente carbonizada la cual es altamente deseable pues favorece el inicio de la combustión.



Figura 4-14. Briquetas de Jacinto de Agua fabricadas con el prototipo de briquetadora construido y puestas a secar en una estufa funcionando con las primeras briquetas fabricadas y que fueron rechazadas por no ser lo suficientemente resistentes. Fuente: Fotografía tomada por los autores (El Salvador, 2021).

4.5. Pruebas de combustión

Se realizaron inicialmente 3 pruebas de combustión para conocer el comportamiento de las briquetas de biomasa:

- 1) Quema de tres briquetas fabricadas bajo diferentes presiones (5, 10 y 15 toneladas-fuerza aplicadas) en una estufa, iniciando el fuego con carbón vegetal y una vez se formó una brasa en la briqueta, se removió el carbón y se mantuvo encendido hasta agotarse, quedando únicamente las cenizas. El comportamiento de la briqueta asemeja a la combustión del carbón vegetal, con la única diferencia de que no se tiene desprendimiento de llama.
- 2) Se realizó además una prueba de combustión a la materia prima en estado bruto habiendo únicamente secado la planta al sol. El Jacinto de Agua al

quemarse presentó un buen comportamiento ya que su ignición asemeja a la combustión de un trozo de papel de periódico.

- 3) Se fabricó una briqueta pequeña a bajas presiones y se quemó directamente bajo una llama producida por un encendedor, mostrando resultados pobres ya que, al remover la llama, se apaga la brasa y únicamente desprendió humo, el cual era particularmente molesto para los ojos y la nariz.

Se muestran en las figuras 4-15 a la 4-17 los resultados de dichas pruebas.



Figura 4-15. Ignición de briquetas de Jacinto de Agua utilizando carbón vegetal como iniciador del fuego. Una vez se alcanzó a formar una brasa en la briqueta, se removió el carbón y la combustión continuó hasta agotarse la materia combustible. Fuente: Fotografía tomada por los autores.



Figura 4-16. Combustión del Jacinto de Agua únicamente secado. A diferencia del Jacinto de Agua densificado, así si se desprenden llamas, sin embargo, se consume muy velozmente la materia. Fuente: Fotografía tomada por los autores (El Salvador, 2021).



Figura 4-17. Ignición de una briqueta fabricada a bajas presiones bajo la influencia directa de una llama. No se recomienda la aplicación de las briquetas de Jacinto de Agua para cocinar debido a que el humo que desprende causa mucha incomodidad en las mucosas nasales y en los ojos. Fuente: Fotografía tomada por los autores.

Retomando la prueba de la figura 4-15, en la que se utilizaron tres briquetas cuyo peso era de 0.25 lb cada una, fueron densificadas según el procedimiento descrito en la sección 3.1.4 (mezclado con agua) y sometidas previamente a un secado con una estufa. La temperatura máxima alcanzada por la superficie de la briqueta fue de 510°C al suministrarle aire en circulación forzada, como si de carbón vegetal se tratara. Aprovechando que las briquetas ya podían sostener la combustión sin necesidad de un aporte de aire forzado, se las dejó ardiendo y, tras cambiar las condiciones de la combustión, la temperatura descendió hasta un valor de 215 °C y esta se mantuvo estable durante 20 min. Finalmente, el tiempo que tardó en consumirse la masa de las briquetas sometida a una circulación de aire forzado fue de 1 hora. Una observación interesante, es que difícilmente se genera una llama de estas briquetas al compararlas directamente contra

el carbón vegetal, además del ya mencionado mal olor que produce su humo, el cual puede resultar perjudicial en caso de una exposición prolongada, por lo que se recomienda la realización de estudios sobre la caracterización de los productos de combustión generados por la quema de esta planta.

4.6. Discusión de resultados

Las briquetas obtenidas con base a la composición de 0.25 lb de Jacinto de Agua picado y 300 mL de agua muestran resultados prometedores en las pruebas que se realizaron, por lo que puede considerarse su uso como combustible regular en aplicaciones de calefacción y generación de calor de procesos. Sus aplicaciones domésticas en la cocina merecen ser analizadas con mayor detenimiento, pues al no haberse podido determinar la composición elemental de esta planta, no se conocen cuáles son los productos de combustión que esta genera al arder. Considerando la perspectiva medioambiental, el aprovechamiento del Jacinto de Agua permite mantener a raya las poblaciones de esta, por lo que, en cierta forma, la menor capacidad calorífica de este combustible se puede compensar con la relativa facilidad de procesamiento y la abundancia del recurso, el cual no compite con otros usos o mercados (a diferencia de la leña, los derivados del petróleo y otras formas de energías renovables).

El tiempo de producción de las briquetas es relativamente corto, lo que representa una ventaja frente a los otros métodos de aprovechamiento energético con origen en fuentes tradicionales o renovables, pero tienen la desventaja que al caracterizarse por una elevada humedad estas pueden presentar condensación a la salida de la combustión. Deben diseñarse dispositivos de Ingeniería capaces de lidiar con la generación de excesiva

humedad durante la combustión, de tal forma que los vapores producidos no se interpongan con el propósito principal de dicho dispositivo.

Existen varios factores que influyeron en las pruebas de combustión, los cuales están detallados en el capítulo 2 del presente documento. La aplicación de los principios bajo los que una planta de producción y aprovechamiento de briquetas opera en condiciones óptimas pueden incrementar notablemente las características del producto final.

El humo generado (el cual genera irritación en los ojos y la nariz por su mal olor) disminuye al aumentar la presión de densificación de la briqueta, esto se pudo notar al ir aumentando la carga aplicada para la densificación, desde ½ tonelada hasta la máxima alcanzada de 15 toneladas durante las pruebas de combustión.

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas se puede mencionar que el tiempo que pasa desde el momento que se extrae y se procesa el Jacinto (*E. crassipes*) influye en las características térmicas de las briquetas obtenidas: como equipo de trabajo, fuimos obligados a suspender el proceso de investigación lo que duró el confinamiento obligatorio en nuestro país El Salvador. Cuando se retomaron las labores utilizando las primeras muestras de Jacinto de Agua obtenidas, se pudo notar que las propiedades de esta planta habían sufrido cambios significativos, ya que al ser una sustancia orgánica siempre estuvo propensa a descomponerse.

Se demuestra la viabilidad en la preparación del Jacinto de Agua (*E. crassipes*) como biocombustible sólido aplicando el concepto de densificación. Se observa también que en el proceso de briquetado usando el dispositivo fabricado no fueron necesarios ni el

calentamiento de la materia prima ni el uso de aglutinantes para que la materia prima se cohesione.

Resumen del capítulo 4

En el capítulo se especifica el procesamiento del Jacinto de Agua que se obtuvo de dos cuerpos de agua seleccionados; se extrajeron dos cantidades diferentes de esta planta de diferentes ambientes, debido a la pandemia que generó inconvenientes a la hora de ensayar las muestras recolectadas inicialmente, se detalló un análisis de variables junto al diseño para la elaboración de briquetas de biomasa haciendo algunas consideraciones importantes como el peso y la cantidad de agua a mezclar, se estableció una estimación de la cantidad de energía que se podría obtener del Jacinto de Agua extraído regularmente y que actualmente no es utilizado para ningún propósito práctico y, por último, se diseñó y fabricó un prototipo de máquina briquetadora capaz de elaborar briquetas a partir del Jacinto de Agua, dichas briquetas se sometieron a pruebas de combustión las cuales nos arrojaron valiosos parámetros, encontrándose que tiene potencial como combustible y sugiriéndose la realización de más investigaciones que aborden esta materia.

Conclusiones generales

El Jacinto de Agua (*E. crassipes*) es una planta de carácter invasivo que se encuentra presente en la mayoría de los cuerpos de agua de nuestro país, con excepción de aquellos cuyo origen es volcánico. La presencia de esta planta causa impactos negativos en los ecosistemas acuáticos y, aunque se ha probado con diferentes estudios que puede ser usada como materia prima para distintos fines productivos, en El Salvador no existen avances significativos que impulsen su uso más allá de la decoración de estanques o acuarios. Al existir una invasión descontrolada de esta planta debe controlarse el crecimiento de la población con diferentes mecanismos para evitar que se generen daños irreversibles en el ecosistema, no solo para la flora y fauna, sino para toda la actividad humana que se centre en los cuerpos de agua; de optarse por su extracción mecánica es conveniente procesar el vegetal para la obtención de productos con valor agregado, de tal forma que se pueda volver sostenible el proceso ya que, en la actualidad, se extrae esta planta y no se obtiene ningún rédito por esta labor.

El Jacinto de Agua (*E. crassipes*) reúne las características de una biomasa aprovechable con fines energéticos. Es importante recalcar que esta planta invasiva no se emplea como alimento humano por lo que no existen problemas para su empleo ya que no supone ningún riesgo para la seguridad alimentaria a diferencia de otras formas de biocombustibles.

Lo presentado en este documento con relación a las briquetas, es un sistema sencillo, real y fácil de aplicar con el que se pretende demostrar el principio de funcionamiento. Puede tomarse para un posterior estudio sin olvidar que en cada cuerpo

de agua el Jacinto de Agua (*E. crassipes*) tiene sus propias características dependiendo de dónde se extraiga.

En la investigación de campo realizada sobre el Jacinto (*E. crassipes*) de diferentes cuerpos de agua, se pudo notar que las plantas poseen mayor tamaño o se ven más saludables dependiendo del lugar de extracción, se puede identificar el momento óptimo de su extracción dependiendo de la estación del año, esto ya sea con el propósito de reducir las poblaciones cuando más vulnerables esta la planta o para maximizar la cantidad de biomasa que puede recolectarse cuando esta se encuentre en su punto más alto de reproducción.

Las briquetas de biomasa son una fuente energética con mucha aceptación en Europa, utilizadas comúnmente para estufas de salón y pequeñas calderas, cuyo propósito en su mayoría es como fuente de calor en viviendas, por tanto, puede potenciarse el uso de briquetas de Jacinto de Agua durante el invierno, esto con la doble finalidad de reducir los gastos de calefacción y utilizar fuentes de energía renovables, considerando además el valor agregado de controlar el crecimiento de la planta en los cuerpos de agua en los que reside.

Referencias

ADEL - FIAES. (2014). *Investigación de la caracterización del Jacinto de Agua Eichhornia crassipes del humedal Cerrón Grande, para determinar su aprovechamiento como materia prima para la elaboración de productos agroindustriales, industriales o artesanales*. Chalatenango: MARN.

Akinwande, V., Mako, A., & Babayemii, O. (2013). Biomass yield, chemical composition and the feed potential of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*, Mart. Solms-Laubach) in Nigeria. *International Journal of Agriscience*, 3(8), 659-666.

Amores-Sánchez, I., Coto-Pérez, O., & Marrero-Coto, J. (2012). Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. *Sobre los derivados de la caña de azúcar*, 46(3), 52-61. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223124988007.pdf>

Anyang General International Corporation. (s.f.). *Application And Superiorities Of Biomass Fuel Briquette*. Obtenido de <http://www.biodiesel-machine.com/news/biomass-fuel-briquette.html>

ASME. (2013). *Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), Section VIII – Division I - Rules for Construction of Pressure Vessels - Class I*. New York: THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.

Asociación Salvadoreña de Energías Renovables. (2017). *ASER: PANORAMA ENERGETICO NACIONAL*. Obtenido de NOTICIAS:

<http://aser.org.sv/index.php/noticias/65-aser-panorama-energetico-nacional-el-salvador>

Azúcar Natural. (2019). *Mapa de Ingenios*. Obtenido de Ubicación de Ingenios en El Salvador: <https://azucarnatural.com/mapa-de-ingenios/>

Banco Mundial. (2020). *Explorar. Crear. Compartir: Datos sobre desarrollo*. Obtenido de Banco de datos: <https://databank.bancomundial.org/home.aspx>

Barbero-Barrera, M. d., & Salas-Ruiz, A. (2019). Performance assessment of water hyacinth–cement composite. En M. C. Forde (Ed.), *Construction and Building Materials*. Madrid: Elsevier.

Barranco, C., Ortega, J., Mendoza, J., González, Y., & Gómez, R. (18 de 04 de 2016). *www.scielo.conicyt.cl*. (Ingeniare, Editor, & R. c. ingeniería, Productor) Recuperado el 20 de 08 de 2021, de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ingeniare/v25n4/0718-3305-ingeniare-25-04-00643.pdf>

Barrientos, L. (2 de Enero de 2020). *Embalse Cerrón Grande: ¿Un proyecto sin historia?* Obtenido de La Gaceta Suchitoto: <https://gacetasuchitoto.com/index.php/2020/01/02/embalse-cerron-grande-un-proyecto-sin-historia/>

Barro, R. (2008). CALIDAD DE LOS BIOCOMBUSTIBLES. Sevilla: CIEMAT.

Benítez Pacheco, I. L. (08 de 2008). <https://core.ac.uk/>. Recuperado el 02 de 11 de 2021, de <https://core.ac.uk/download/pdf/94669393.pdf>

- Bhattacharya, S. C., Leon, M. A., & Rahman, M. M. (2000). *A Study of Improved Biomass Briquetting*. Pune, India. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/274509761_A_Study_on_Improved_Biomass_Briquetting
- Business News Americas (BNAmericas). (15 de Junio de 2020). *El Salvador prepara reglas para almacenamiento energético*. Obtenido de bnamericas.com/es/noticias/el-salvador-prepara-reglas-para-almacenamiento-energetico
- CABI. (7 de Julio de 2013). *Eichhornia crassipes*. (J. Rojas-Sandoval, & P. Acevedo-Rodriguez, Edits.) Obtenido de <https://www.cabi.org/isc/datasheet/20544>
- Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., & Castro Gil, M.-A. (2009). *Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables*. (M. Martín-Romo, Ed.) Madrid: Pearson Educación.
- Chanana, & Tanushree. (s.f.). *Technical Textile*. Obtenido de Water Hyacinth: A Promising Textile Fibre Source: <https://www.technicaltextile.net/articles/water-hyacinth-a-promising-textile-fibre-source-7619>
- Cock, M. (2001). *Problems Caused by Water Hyacinth as an Invasive*. Wallingford: CABI.
- Collins Dictionary. (2020). *Definition of 'renewable energy'*. Obtenido de <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/renewable-energy>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2012). *CENTROAMÉRICA: ESTADÍSTICAS DE PRODUCCIÓN DEL SUBSECTOR ELÉCTRICO, 2011* . México D.F.: CEPAL.

Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa. (6 de Abril de 2021). Obtenido de <https://www.facebook.com/178074335694135/posts/1897601937074691/>

Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa. (s.f.). *Central Hidroeléctrica del Cerrón Grande*. Obtenido de CEL: <https://www.cel.gob.sv/central-hidroelectrica-cerron-grande/>

Consejo Nacional de Energía. (2010). *Política Energética Nacional de El Salvador 2010-2024*. San Salvador: CNE.

Consejo Nacional de Energía. (2014). *El camino del cambio de la matriz energética de El Salvador*. Obtenido de <http://estadisticas.cne.gob.sv/wp-content/uploads/2017/09/documento-camino-del-cambio-cne-dic2013-ene2014.pdf>

Consejo Nacional de Energía. (2019). *Plan Indicativo de la Expansión de la Generación Eléctrica de El Salvador 2019-2028*. Obtenido de Estadísticas Energéticas: <http://estadisticas.cne.gob.sv/wp-content/uploads/2019/03/Plan-indicativo-de-la-generaci%C3%B3n-de-la-expansi%C3%B3n-2019-2028.pdf>

Consejo Nacional de Energía. (s.f.). *Avance de la Diversificación de la Matriz Energética y las Energías Renovables*. Obtenido de Plataforma de Información para Proyectos

con Energías Renovables:

http://energiasrenovables.cne.gob.sv/index.php?option=com_content

Consejo Nacional de Energía. (s.f.). *Planta de Capella Solar estará lista a finales de 2019.*

Obtenido de Portal para Proyectos con Energías Renovables:

http://energiasrenovables.cne.gob.sv/index.php?option=com_content&view=article&id=80:2019-09-06-15-36-43&catid=7:noticias

Construpedia. (s.f.). *Diccionario de Construcción.* Obtenido de Fibrocemento:

<https://www.construmatica.com/construpedia/Fibrocemento>

Corporation, A. G. (s.f.). *Biomass Pellet Mill.* Obtenido de <http://www.biodieselmachine.com/biomass-pellet-mill.html>

Crafter, S. A., & Matiza, T. (1994). *Wetlands ecology and priorities for conservation in Zimbabwe.* Harare: IUCN.

D.R. Bayne, E. C. (s.f.). <http://www.fao.org/>. Recuperado el 26 de 10 de 2020, de

<http://www.fao.org/3/ac866s/AC866S07.htm#:~:text=El%20jacinto%20de%20agua%20crece,extensas%20ra%C3%ADces%20cuelgan%20por%20debajo.&text=Esta%20zona%20espesa%20formada%20por,cocodrilos%20y%20nidos%20de%20aves.>

Diamandis, P. (02 de Septiembre de 2014). *Solar Energy Revolution: A Massive*

Opportunity. Obtenido de Forbes:

<https://www.forbes.com/sites/peterdiamandis/2014/09/02/solar-energy-revolution-a-massive-opportunity>

DOST - STII. (12 de Julio de 2015). *DOST-Science and Technology Information Institute*.

Obtenido de <https://www.facebook.com/dost.stii/posts/from-pest-to-pesos-thanks-to-dostaustrian-scientists-have-called-the-water-hya/1157704230910173/>

Dymond, G. C. (1949). *The Water-Hyacinth - A Cinderella of the Plant World*. Obtenido

de Its use in sewage effluents, as a trapper of salts and a water purifier:
http://journeytoforever.org/farm_library/dymond.html

El Salvador Perspectives. (13 de Mayo de 2018). *Renewable energy in El Salvador*.

Obtenido de <http://www.elsalvadorperspectives.com/2018/05/renewable-energy-in-el-salvador.html>

El-Gendy, A. S., Biswas, N., & Bewtra, J. K. (2004). Growth of Water Hyacinth in

Municipal Landfill Leachate with Different pH. *Environmental Technology*, 25(7),
833-840. Obtenido de

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09593330.2004.9619375>

Ellis, A. T. (2011). *Invasive Species Profile - Eichhornia crassipes*. Washington:

University of Washington.

Energypedia. (30 de 04 de 2018). *Biomass Briquettes - Production*. Recuperado el 13 de

02 de 2021, de GIZ HERA Cooking Energy Compendium.:
https://energypedia.info/wiki/Biomass_Briquettes_-_Production

Fabio Cruz, J. V. (2020). DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA LA FABRICACIÓN DE

BRIQUETAS DE. Bogota,DC, Colombia. Recuperado el 28 de 01 de 2021, de

<http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7902/1/4141787-2020-1-IM.pdf>

FAO. (1983). *Métodos simples para fabricar carbón vegetal* . Obtenido de Capítulo 4 - Procesos de Carbonización: <http://www.fao.org/3/X5328s/X5328S05.htm>

Faure, G. (12 de Enero de 2018). *The Observers*. Obtenido de Indian villagers turn invasive water hyacinths into sustainable livelihoods: <https://observers.france24.com/en/20180112-india-villagers-water-hyacinths-eco-crafts>

Fernández-Puratich, Oliver-Villanueva, Valiente, M., Verdú, S., & Albert, N. (2014). Desarrollo de pellets a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas. *Madera y Bosques*, 20(3), 97-111.

Florida, U. o. (18 de Septiembre de 2015). *Water Hyacinth - School of Forest Resources and Conservation (SFRC)*. Obtenido de http://sfrc.ufl.edu/extension/4h/plants/Water_hyacinth/index.html

Frank. (22 de Noviembre de 2018). *Maxton Engineering*. Obtenido de How moisture affects the biomass briquetting process: <http://briquettemachine.com/how-moisture-affects-the-biomass-briquetting-process/>

Gaber, M., Handlos, M., & Metschina, C. (2014). *Manual de la biomasa - Sistemas de garantía de calidad y medidas de control de calidad*. Estiria.

García Alama, M. E. (2014). <https://alicia.concytec.gob.pe/>. Recuperado el 28 de 08 de 2021, de

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UDEP_5418c08be8217c471441893c237419f1

García-Galindo, Nogués, & Rezeazu. (2010). *Energía de la Biomasa* (Vol. I). Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.

Giraldo, D. G. (2006). NORMALIZACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN DE LOS PELETS. Recuperado el 15 de 01 de 2021

Grover, P. D., & Mishra, S. K. (1996). *Biomass Briquetting: Technology and Practices*. Bangkok: e FAO Regional Wood Energy Development Programme. Obtenido de <http://www.fao.org/3/ad579e/ad579e00.pdf>

Guzmán, C. R. (2011). *Country Report - El Salvador*. Institute of Energy Economics, Japan. Obtenido de <https://eneken.ieej.or.jp/data/3958.pdf>

Hernández, G. (30 de Septiembre de 2019). *El Salvador duplicó la generación de energía con biomasa en últimos 5 años*. Obtenido de [elsalvador.com: https://www.elsalvador.com/eldiariodehoy/el-salvador-duplico-la-generacion-de-energia-con-biomasa-en-ultimos-5-anos/644717/2019/](https://www.elsalvador.com/eldiariodehoy/el-salvador-duplico-la-generacion-de-energia-con-biomasa-en-ultimos-5-anos/644717/2019/)

Herrera, N., & Rivera, R. (2010). *Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR)*. San Salvador. Obtenido de <http://cidoc.marn.gob.sv/documentos/ficha-informativa-complejo-guija/>

Herrero, J. M. (2019). *Biodigestores tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*. Ecuador: Red BioLAC.

- Indulekha, V. P., Thomas, C. G., & Anil, K. S. (19 de Febrero de 2019). Utilization of water hyacinth as livestock feed by ensiling with additives. *Indian Journal of Weed Science*(51), 67-71. doi:10.5958/0974-8164.2019.00014.5
- Instituto Nacional de Normalización. (2015). Norma Chilena NCh2880:2015. *Compost - Requisitos de calidad y clasificación*. INN.
- Intermediate Technology Development Group. (1997). *Water Hyacinth - Control and Possible Uses*. Washington: CABI.
- Kriticos, D. J., & Brunel, S. (2016). *Assesing and managing the current and future pest risk from Water Hyacint (Eichhornia crassipes), an invasive aquatic plant threatening the environment and water security*. PLOS One. Obtenido de <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120054>
- Kumar, R. M., & Anand, R. (2019). Production of biofuel from biomass downdraft gasification and its applications. En A. K. Azad, & M. Rasul, *Advanced Biofuels - Applications, Technologies and Environmental Sustainability*. Elsevier.
- Labrada, R., & Fornasari, L. (2002). *Management of problematic aquatic weeds in Africa*. Roma: FAO.
- Lan, Y. (10 de Noviembre de 2015). *ECNS.CN*. Obtenido de Water hyacinth clogs river dam in C China: <http://www.ecns.cn/hd/2015-11-10/detail-ifytxtex5118375.shtml#>

- Maquinaria Agrícola S.A. de C.V. (7 de Octubre de 2014). *YouTube.com*. Obtenido de
PICADORA ENSILADORA JF-40 MAXXIUM DE 4 TON/HORA CON
MOTOR DIESEL DE 8 HP: <https://www.youtube.com/watch?v=l-OrjuFiFEw>
- MARN. (11 de Diciembre de 2016). *EMBALSE CERRÓN GRANDE*. Obtenido de
<https://www.marn.gob.sv/sitio-ramsar-embalse-cerron-grande/>
- MARN. (06 de 02 de 2017). <https://www.marn.gob.sv/>. Recuperado el 17 de 08 de 2020,
de <https://www.marn.gob.sv/comienza-la-construccion-de-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-de-metapan/>
- MARN. (2018). *Inventario Nacional de Humedales El Salvador*. San Salvador: MARN.
- MARN. (6 de Junio de 2021). *Avanzan labores de extracción de jacinto de agua en laguna de Metapán*. Obtenido de <https://marn.gob.sv/avanzan-labores-de-extraccion-de-jacinto-de-agua-en-laguna-de-metapan/>
- Martín., F. M. (s.f.). <http://infomadera.net>. Recuperado el 21 de 12 de 2020, de
http://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2293_9990.pdf
- Martínez, M., Román, P., & Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del Agricultor - Experiencias en América Latina*. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- MELLA, C. A. (2005). <http://www.eula.cl/>. Recuperado el 27 de 10 de 2021, de
<http://www.eula.cl/giba/wp-content/uploads/2017/09/tesis-cesar-lagos-2005.pdf>

- Morgan, S. (15 de Octubre de 2015). *Euractiv*. Obtenido de Environmental emergency' in Spanish river: <https://www.euractiv.com/section/climate-environment/news/environmental-emergency-in-spanish-river/>
- Muoma, J. (2016). *Production of Organic Compost from Water Hyacinth (Eichhornia crassipes [Mart.] Solms) in the Lake Victoria Basin: A Lake Victoria Research Initiative (VicRes)*. Masinde Muliro University of Science and Technology, Department of Biological Sciences. Kakamega, Kenia: Journal of Agriculture and Allied Sciences.
- Navarro, L., & Phiri, G. (2001). *Water Hyacinth in Africa and the Middle East: A Survey of Problems and Solutions*. Ottawa: INTERNATIONAL DEVELOPMENT RESEARCH CENTRE.
- Nunez, C. (30 de Enero de 2019). *Renewable energy, explained*. Obtenido de National Geographic: <https://www.nationalgeographic.com/environment/energy/reference/renewable-energy/>
- Okewo, E. (11 de Junio de 2012). *Business Daily*. Obtenido de Artisan turns hyacinth, waste paper into cash machine: <https://www.businessdailyafrica.com/magazines/Artisan-turns-hyacinth-waste-paper-into-cash-machine-/1248928-1425398-nkgqibz/index.html>
- Organismo Promotor de Exportaciones e Inversiones de El Salvador, Consejo Nacional de Energía. (2016). *Sector Eléctrico de El Salvador*. San Salvador: CNE.

OSPESCA. (26 de Junio de 2017). *Laguna de Metapán*. Obtenido de <https://climapesca.org/2017/06/laguna-de-metapan/>

Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (15 de Septiembre de 2016). Obtenido de Professors from RMUTT's Department of Textiles and Garments Develops Natural Fibers from Water Hyacinth: <http://www.eng.rmutt.ac.th/professors-from-rmutts-department-of-textiles-and-garments-develops-natural-fibers-from-water-hyacinth/>

Rivera, J., Cajina, C., Ramírez, J., Reyes, E., Olivas, N., & Molina, L. (2016). Evaluación de los parámetros físicos y químicos de las briquetas. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 3-14. Recuperado el 20 de 08 de 2021

Rodrigues, A. J., Omondi-Odero, H. P., Akuno, W., Kerich, D., & Maobe, I. (2014). Converting Water Hyacinth to Briquettes: A Beach Community Based Approach. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research*, 15(1), 358-378.

Rodríguez, A., Colmenares, F., Barragán, J., & Mayorga, M. (02 de 2017). Aprovechamiento energético integral de la *Echhornia crassipes*. *Ingenium*, vol. 18. n.º 35, 134-151. Recuperado el 28 de 08 de 2021, de <https://www.semanticscholar.org/paper/Aprovechamiento-energ%C3%A9tico-integral-de-la-crassipes-Mel%C3%A9ndez-Mestizo/b3410903c9e94853c0b221fe0a32f70c229002c6>

Salvador, M. E. (14 de 06 de 2021). <https://marn.gob.sv/>. Recuperado el 28 de 08 de 2021, de <https://marn.gob.sv/avanzan-labores-de-extraccion-de-jacinto-de-agua-en-laguna-de-metapan/>

- Sarkar, D. K. (2015). Chapter 3 - Fuels and Combustion. En D. K. Sarkar, *Thermal Power Plant - Design and Operation*. Elsevier.
- SICA. (10 de Agosto de 2014). *Agonizan peces en la Laguna de Metapán*. Obtenido de <https://www.sica.int/consulta/noticia.aspx?idn=90327&idm=1&ident=916>
- Solís, E., & Vásquez, G. (09 de 2019). *Evaluación del potencial energético de la eichhornia crassipes para su aplicación como biocombustible*. Recuperado el 28 de 10 de 2021, de Repositorio Universidad de Guayaquil: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/45656>
- Sukarni, S., Zakaria, Y., Sumarli, S., Wulandari, R., Permanasari, A. A., & Suhermanto, M. (2018). *Physical and Chemical Properties of Water Hyacinth (Eichhornia crassipes) as a Sustainable Biofuel Feedstock*. Malang: IOP (Institute Of Physics). doi:10.1088/1757-899X/515/1/012070
- Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones. (2014). *Boletín de Estadísticas Eléctricas N°15*. San Salvador: SIGET.
- Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones. (s.f.). *Boletín de Estadísticas Eléctricas*. Obtenido de Estadísticas de Electricidad: Estadísticas de Electricidad
- Tejada-Tovar, M. C. (04 de diciembre de 2017). <http://scielo.sld.cu/>. Recuperado el 27 de Junio de 2021, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212018000200003

- Truper. (2021). *Prensas hidráulicas tipo "H", con pistón*. Obtenido de https://www.truper.com/ficha_tecnica/views/ficha-print.php?id=254262
- TV, N. N. (20 de octubre de 2019). *Herds of common carp carp eat water hyacinth*. Obtenido de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=roHly8-p0cQ>
- U.S. Energy Information Administration. (22 de Junio de 2020). *Renewable energy explained*. Obtenido de <https://www.eia.gov/energyexplained/renewable-sources/>
- UCA, H. (2012). *Informe de estudios sobre humedales en metapan*. San Salvador. Recuperado el 17 de 08 de 2020, de https://www.holcim.com.sv/sites/elsalvador/files/documents/Informe_de_estudios_sobre_humedales_en_Metapan__17_Ago_12_.pdf
- Velasco, S. (28 de Diciembre de 2019). *Dinero.com.sv*. Obtenido de CEL realizó extracción de Jacinto acuático en embalse 'Cerrón Grande': <https://www.dinero.com.sv/es/actualidad/cel-extrae-jacinto-acuatico-en-embalse-cerron-grande.html>
- Venegas Martínez, I. A. (20 de Enero de 2017). Diseño y selección de componentes de una máquina briquetadora de mediana capacidad. Chile.
- Weiping, S., Qingpin, S., Meisheng, X., Zhengshung, W., & Zhitong, Y. (2018). *The resource Utilization of Water Hyacinth (Eichhornia crassipes [Mart.] Solms) and its challenges*. Hangzhou: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. doi:doi:10.3390

- Wilson, J., Rees, M., Holst, N., Thomas, M., & Hil, G. (2001). <https://citeseerx.ist.psu.edu/>. Recuperado el 27 de 10 de 2021, de <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.513.2771&rep=rep1&type=pdf>
- Yang, H., Fang, Y., & Chen, Z. (2004). Sistemas integrados de cultivo de peces en pastizales en China. En FAO/ICLARM/IIRR, *Agro-acuicultura integrada - Manual Básico* (págs. 21-24). Roma: FAO. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-y1187s.pdf>
- Yuwei, W. (17 de Abril de 2019). *Eichhornia crassipes - Water hyacinth*. Obtenido de <https://wiki.nus.edu.sg/x/eQCbDg>
- Zumma Ratings. (2016). *Informe del Sector Eléctrico de El Salvador*. Obtenido de <http://www.zummaratings.com/SectorElectricoSV.pdf>