

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL ZACATE  
“KING GRASS” (*Pennisetum purpureum*), EN EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

**RODRÍGUEZ MARTÍNEZ, BYRON RENI  
ROMERO PÉREZ, JERSON NEFTALÍ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO 2017

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIA GENERAL :

**M.Sc. CRISTOBAL HERNAN RIOS BENITEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

SECRETARIO :

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

DIRECTORA :

**INGA. TANIA TORRES RIVERA**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Título :

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL ZACATE  
“KING GRASS” (Pennisetum purpureum), EN EL SALVADOR**

Presentado por :

**RODRÍGUEZ MARTÍNEZ, BYRON RENI  
ROMERO PÉREZ, JERSON NEFTALÍ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesora :

**INGA. DELMY DEL CARMEN RICO PEÑA**

San Salvador, Mayo 2017

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesora :

**INGA. DELMY DEL CARMEN RICO PEÑA**

## AGRADECIMIENTOS

Manifestamos nuestros más sinceros agradecimientos a:

MSc. Inga. Delmy del Carmen Rico Peña, por trazar las directrices, impulsar la ejecución y monitorear el desarrollo del presente trabajo de graduación, además de todo el apoyo y tiempo prestado en esta hermosa carrera.

Ing. Pedro Garza, por compartir sus conocimientos técnicos acerca del cultivo del King Grass.

A todo el personal docente de la Escuela de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos de la Universidad de El Salvador, por todos estos años de aprendizaje. Un tiempo que quedará por siempre grabado en nuestra memoria, como un periodo de crecimiento personal y profesional.

El Personal del Ministerio de Agricultura y Ganadería de El Salvador, especialmente al Ing. William Rivas por su apoyo.

Al Laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador.

A todos nuestros amigos y colegas que se involucraron en este trabajo de alguna manera, directa o indirectamente, siendo su ayuda en forma de opiniones, críticas o palabras de ánimo.

## **DEDICATORIA**

**A DIOS**, por haberme dado vida, salud, paciencia y fe para lograr mis objetivos.

**MI ESPOSA E HIJO**, Celina Margarita y Byron Reni; por ser la fuente de inspiración en la culminación de mi carrera profesional.

**A MIS PADRES**, Fidel Rodríguez y Esmeralda de Rodríguez; por su amor, consejos y apoyo en todo momento de mi vida.

**A MIS HERMANOS**, Norman, Fischer, Verónica y Arturo; por estar siempre cuando los necesitaba, los quiero mucho.

**A MIS SOBRINOS**, Byron, Karlita, Brooklyn y Carlitos; “luchen por vivir a cada instante, caminen siempre adelante”.

**A MI CUÑADO**, Carlos Godoy; gracias por aceptarme como tu hermano.

**A MI COMPAÑERO DE TESIS**, Jerson Romero; por su paciencia y dedicación en este triunfo.

**A MI MEDICO Y AMIGO**, Dr. José Roberto Duran, por otra oportunidad de vida.

**A MIS AMIGOS DE LA CARRERA**, Juan Méndez, Héctor Guerra, Manuel Gallo, Daniel Mejía, Francisco Soto, Juan Pérez, Michael Carpio, Albert Salmerón y Sara Orellana; por compartir los buenos y malos momentos.

**A MIS CATEDRICOS**, Inga. Delmy Rico Peña, Ing. Juan Ramírez, Inga. Tania Torres, Ing. Fernando Ramírez e Inga. Eugenia Gamero; por todos sus conocimientos adquiridos en cada etapa de esta travesía universitaria.

**A MIS FAMILIARES Y AMIGOS**, quienes de una u otra manera me estuvieron apoyando.

*Byron Reni Rodríguez Martínez*

## DEDICATORIA

Si pudiese definir todo lo que he aprendido en dos palabras a lo largo de estos años... bueno creo que sí puedo, diría Ingeniero Químico, y pesar de que el tiempo que me tomó finalizar esta hermosa carrera universitaria fue un poco más largo de lo acordado con mi yo adolescente y mis padres, puedo decir que estoy satisfecho de haber logrado concluir con este paso y proseguir con lo siguiente que Dios me ponga en el camino.

Por todo esto agradezco y dedico este trabajo de graduación que significa la culminación de una serie de tropiezos y caídas, angustias y desánimos, como también de momentos de alegría y euforia a:

Dios en cualquiera que sea su forma y presentación, por la oportunidad de ser una persona mejor a la que nací o pudiera llegar a ser, de no ser por su ayuda.

A mi amada madre Ángela que es mi modelo de alguien que nunca se rinde para lograr sus objetivos, porque que no me bastaría una vida para compensarle por todo el amor, dedicación y por todos y cada uno de los sacrificios que ha hecho por mí durante todos estos años. Por amarme como lo hace todo el tiempo y por estar orgulloso de mí incluso en mis momentos más bajos.

A mi padre Fredy del cual, y pesar de las circunstancias, no podría esperar más de un padre que apoya a sus hijos, por haber mantenido su fe en mí y siempre estar ahí aun en la distancia.

A mis hermanos Adonái y Annette, David, Natalia, Luis, por todo su tiempo, apoyo y todas las vivencias que a pesar de ser experiencias tanto positivas y negativas, son experiencias al fin que me ayudaron a crecer.

A mí querida hermanita Sofi por mantenerme cuerdo estos años, siendo la voz de la razón aunque no te correspondía ese papel.

A los Focolarinos y Focolarinas que han sido gran parte de mi formación personal.

A mis queridos amigos de los Flácidos, amigos de infancia y mis amigos de la Universidad Fidel, Jonathan, Ramón, Jorge, Miguel, Carlos, Luis; y todos los demás con los que compartí algún tiempo en la universidad y tuve el honor de trabajar junto, mis colegas.

Un agradecimiento especial a mi querida prima Marlin, que aunque no nos conocimos durante mucho tiempo, en los últimos años ha sido un gran apoyo y ciertamente una gran influencia para mí.

A todos y todas que no están hoy cerca de mí pero con los cuales conviví, porque soy un cumulo de experiencias esparcidas en un mar de personas.

*Jerson.*

## RESUMEN

Se evaluó el potencial energético del Zacate King Grass (*Pennisetum purpureum*) en El Salvador, para estimar parámetros de funcionamiento en plantas generadoras de electricidad a partir de vapor mediante la quema de biomasa; de éste se tiene un área cultivo disponible en la actualidad de 524.59 hectáreas y un estimado de producción de 52,459 TM/año.

Se realizaron análisis físicos, químicos y fisicoquímicos; tomando muestras del cultivo de plantas de 4 y 6 meses de Zacate King Grass, de dos fincas que ya contaban con terreno cultivado con la biomasa para su uso en la generación eléctrica. Las fincas evaluadas fueron las haciendas San José en Armenia, Sonsonate y La Colina en El Porvenir, Santa Ana.

La caracterización del Zacate King Grass cultivado en El Salvador dió como resultado un poder calorífico para el *Pennisetum purpureum* de 5,263.29 kcal/kg en base seca, para plantas de 6 meses de edad y de 4,411.72 kcal/kg para plantas de 4 meses de edad.

Para el área cultivada, se estimó un rendimiento de materia seca de 100 TM/ha en plantas de 6 meses, lo que resultaría en un potencial térmico de 72.02 MW.

Se calculó la potencia que podría suministrar una planta de generación eléctrica simple a partir de la biomasa, para ello se realizó un análisis termodinámico de la planta de generación, con un consumo de 13 TM/h de King Grass, lo cual resultó en una instalación estimada de 16 MW y una generación eléctrica neta de 128 GWh.

## INDICE

<b>CONTENIDO</b>	<b>PAG</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1. CARACTERIZACIÓN DEL CULTIVO DEL ZACATE “KING GRASS”</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1</b> Taxonomía del Zacate “King Grass” .....	<b>4</b>
1.1.1. Características típicas del cultivo.....	<b>5</b>
<b>1.2</b> El Zacate King Grass como Cultivo Energético en El Salvador. ....	<b>6</b>
<b>1.3</b> Manejo del Zacate King Grass como Cultivo Energético .....	<b>7</b>
1.3.1. Requerimientos de cultivo. ....	<b>7</b>
1.3.2. Proceso de siembra. ....	<b>8</b>
1.3.3. Preparación del suelo .....	<b>8</b>
1.3.4. Semilla de King Grass .....	<b>10</b>
1.3.5. Fertilización del King Grass .....	<b>11</b>
<b>1.4</b> Cultivo y Obtención de “King Grass” en el campo.....	<b>13</b>
<b>1.5</b> Tratamiento Granulométrico. ....	<b>14</b>
<b>2. CONTEXTO ENERGÉTICO DE EL SALVADOR</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b> El Salvador en el contexto del panorama Energético de Centroamérica.....	<b>17</b>
<b>2.2</b> Perfil del sistema Energético de El Salvador. ....	<b>22</b>
2.2.1. Demanda Energética de El Salvador.....	<b>22</b>
2.2.2. Mercado Energético en El salvador. ....	<b>23</b>
2.2.3. Transmisión de Energía eléctrica en El Salvador .....	<b>26</b>

2.2.4. Fuentes de generación de Energía eléctrica en El Salvador .....	27
<b>2.3</b> Cambio climático y Energía. ....	36
2.3.1. Contaminación del aire. Emisiones de gases del el efecto invernadero: implicaciones del sector energético. ....	36
2.3.2. Cambio Climático, proyecciones energéticas y renovables. ....	39
<b>2.4</b> Biomasa y Biocombustibles en la actualidad. ....	42
2.4.1. Fuentes de biomasa .....	42
2.4.2. Características de la biomasa .....	45
2.4.3. Biomasa en El Salvador .....	47
2.4.4. Procesos de conversión de la biomasa .....	48
<b>2.5</b> Biocombustibles .....	52
2.5.1. Bioetanol .....	52
2.5.2. Biodiesel .....	55
2.5.3. Biogás .....	57
2.5.4. Aplicaciones Energéticas de la conversión termoquímica de la biomasa .....	60
<b>2.6</b> Proceso de generación de energía del King Grass. ....	64
2.6.1. Planta de Generación Eléctrica a partir de biomasa. ....	64
2.6.2. Funcionamiento de una planta de generación eléctrica por biomasa. ....	65

<b>3. RECOLECCIÓN DE DATOS PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL ZACATE “KING GRASS” .....</b>	<b>72</b>
<b>3.1 Fincas energéticas estudiadas .....</b>	<b>72</b>
3.1.1. Descripción de las fincas. ....	73
<b>3.2 Selección, preparación de muestras y número de análisis realizados .....</b>	<b>77</b>
3.2.1. Recolección de muestras.....	77
<b>3.3 Análisis Físico realizado a las muestra de Zacate King Grass .....</b>	<b>80</b>
<b>3.4 Análisis Químico aplicado a las muestras de Zacate King Grass .....</b>	<b>81</b>
<b>3.5 Análisis Fisicoquímico realizado a las muestras de Zacate King Grass .....</b>	<b>84</b>
3.5.1. Cálculo del poder calorífico de muestras de Zacate King Grass. ....	84
3.5.2. Comparación de poder calorífico con otras biomásas. ....	86
<b>4. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE EL ZACATE KING GRASS EN EL SALVADOR.....</b>	<b>88</b>
<b>4.1 Análisis de planta de generación eléctrica simple a partir de vapor.....</b>	<b>89</b>
4.1.1. Análisis termodinámico de una central simple de generación eléctrica a partir de vapor.....	90
4.1.2. Ciclo simple de generación de vapor .....	91
4.1.3. Estudio energético del ciclo simple de generación de vapor. ....	93

<b>CONTENIDO</b>	<b>PAG</b>
<b>5. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>95</b>
<b>OBSERVACIONES.....</b>	<b>97</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>99</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>101</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>106</b>
ANEXO A	
CONTRIBUCIONES A LAS EMISIONES DE CO2 POR CONSUMO	
ENERGETICO.....	107
ANEXO B	
USO POTENCIAL DEL SUELO EN EL SALVADOR .....	112
ANEXO C	
MARCHAS DE LABORATORIO: ANÁLISIS BROMATOLÓGICO	
PROXIMAL.....	114
ANEXO D	
RESULTADOS DEL ANÁLISIS BROMATÓLOGICO PROXIMAL.....	122
ANEXO E	
PRUEBAS CON BOMBA CALORIMETRICA, PROCEDIMIENTO,	
CÁLCULOS Y CORRECCIONES .....	124

**INDICE DE FIGURAS..... PAG**

Figura 1.1. Zacate King Grass de 3 metros, finca La Colina, Santa Ana. ....4

Figura 1.2. Zacate King Grass en El Salvador finca San José, Sonsonate.....6

Figura 1.3. Preparación del terreno: Subsolado y rotulación del suelo.....9

Figura 1.4. Preparación del terreno: Afinado del suelo .....9

Figura 1.5. Preparación del terreno: Surcado del suelo ..... 10

Figura 1.6. Semilla de King Grass ..... 10

Figura 1.7. Diferentes etapas de crecimiento del King Grass en la finca San José,  
Departamento de Sonsonate..... 13

Figura 1.8. Astillado de Biomasa..... 14

Figura 2.1. Centroamérica: Capacidad de generación eléctrica instalada efectiva y  
demanda máxima, 2014 (en MW). .... 18

Figura 2.2. Centroamérica: Capacidad de generación eléctrica instalada en MW  
oferta y suministro de energía eléctrica 2014 .....20

Figura 2.3 Centroamérica: Generación eléctrica neta en GWh 2015. ....20

Figura 2.4. Centroamérica: Evolución capacidad de generación eléctrica instalada  
en MW, 2009-2015. ....21

Figura 2.5. Centroamérica: Evolución de la generación eléctrica neta en GWh,  
2009-2015. ....21

Figura 2.6. Sistema de transmisión regional SIEPAC. ....23

**INDICE DE FIGURAS..... PAG**

Figura 2.7. El Salvador: Capacidad de generación eléctrica instalada en MW 2014 .....25

Figura 2.8. El Salvador: Generación Eléctrica Neta en GWh 2014.....25

Figura 2.9. Sistema de transmisión de energía Eléctrica de El Salvador. ....26

Figura 2.10. Ruta del petróleo y sus derivados en El Salvador. ....28

Figura 2.11. Histórico de la aportación de emisiones de CO<sub>2</sub> de El Salvador.....38

Figura 2.12. Tecnologías para la conversión de biomasa rica en aceites, azúcares y  
almidones .....52

Figura 2.13. Estructura química del Bioetanol .....52

Figura 2.14. Proceso de transformación de Materias Primas diversas en bioetanol.....53

Figura 2.15. Generación de Biodiesel a partir de Aceite Vegetal.....55

Figura 2.16. Estructura química del Biodiesel .....56

Figura 2.17. Digestión Anaeróbica para la producción del Biogás. ....58

Figura 2.18. Caminos para la conversión de Biomasa .....61

Figura 2.19. Planta de generación Eléctrica por biomasa .....65

Figura 2.20. Caldera de Biomasa. ....67

Figura 2.21. Caldera de Biomasa con sus diferentes partes. ....68

Figura 2.22. Arreglo Turbina-Alternador. ....69

Figura 2.23. Turbina de vapor.....69

Figura 2.24. Condensador de Vapor. ....70

**INDICE DE FIGURAS..... PAG**

Figura 3.1. Finca La Colina en Santa Ana ..... 73

Figura 3.2. Finca La Colina, Ubicada en el municipio del porvenir, Santa Ana ..... 74

Figura 3.3. Finca San José en Armenia, Sonsonate. .... 75

Figura 3.4. Finca San José, ubicada en el municipio de Armenia, Sonsonate..... 76

Figura 3.5. Recolección de muestras finca La Colina, corte del King Grass..... 77

Figura 3.6. Recolección de muestras de finca San José. Plantas recortadas y listas  
para ser transportadas..... 78

Figura 3.7. Reducción de tamaño de muestras para pruebas físicas de Zacate King  
Grass en laboratorio. .... 79

Figura 4.1. Ciclo Termodinámico para una planta de generación eléctrica simple ..... 90

Figura 4.2. Diagrama TS del agua, con la ruta termodinámica del Ciclo simple de  
Generación de Vapor ..... 92

Figura A- 1: Histórico de Emisiones de CO<sub>2</sub> mundial por región. .... 106

Figura A- 2: Histórico de las Emisiones de CO<sub>2</sub> de los países de Centroamérica. .... 107

Figura A- 3: Emisiones de CO<sub>2</sub> por sectores económicos de las regiones según su  
pertenencia a la OECD. .... 108

Figura A-4: Emisiones de CO<sub>2</sub> por sectores económicos de los países de  
Centroamérica. .... 109

Figura B- 1: Mapa de uso potencial del suelo en El Salvador ..... 111

Figura E- 1: Calorímetro 1341 ..... 123

**INDICE DE CUADROS..... PAG**

Cuadro 1.1 Fincas Energéticas, matriculadas en el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.....7

Cuadro 2.1. El Salvador: Oferta-Demanda de Potencia y suministro de Energía Eléctrica, 2013-2015.....24

Cuadro 2.2. Capacidad de generación instalada y generación eléctrica neta de empresas y centrales termoeléctricas .....27

Cuadro 2.3. Capacidad de generación instalada y generación neta de electricidad por medio de biogás en El Salvador. ....29

Cuadro 2.4. Capacidad de generación instalada y generación neta de electricidad por geotermia en El Salvador.....31

Cuadro 2.5. Capacidad de generación instalada y generación neta de electricidad por centrales hidroeléctricas mayoristas en El Salvador.....32

Cuadro 2.6. Capacidad de generación instalada y generación neta de electricidad por centrales hidroeléctricas minoristas en El Salvador. La información del mercado minorista es estimada.....33

Cuadro 2.7. Capacidad de generación instalada y generación neta de electricidad por cogeneración en El Salvador. ....34

Cuadro 2.8. Capacidad de generación instalada y generación neta de electricidad de los sectores público y privado en El Salvador. ....35

Cuadro 2.9. Capacidad de generación instalada y generación neta de electricidad por sector en El Salvador. ....35

Cuadro 2.10. Generación energética y adiciones a la capacidad de potencia por fuente de generación eléctrica a nivel mundial. 2004-2014.....41

Cuadro 2.11. Estados Típicos de la Biomasa.....45

<b>INDICE DE CUADROS.....</b>	<b>PAG</b>
Cuadro 2.12. Empresas involucradas en la producción de Biodiésel en El Salvador.....	56
Cuadro 2.13. Generadores de Biogás en El Salvador. ....	59
Cuadro 2.14. Resumen de las diferentes formas de conversión de la biomasa.....	63
Cuadro 3.1. Datos Humedad y Cenizas para 3 muestras de zacate King Grass recolectadas de dos diferentes fincas energéticas .....	80
Cuadro 3.2. Resultados de laboratorio, análisis químico de las muestras de Zacate King Grass recolectadas en las fincas La Colina y San José. ....	82
Cuadro 3.3. Composición nutricional del pasto Pennisetum purpureum, King Grass a diferentes edades .....	83
Cuadro 3.4. Resumen de resultados análisis de poder calorífico a partir de ensayos con bomba calorimétrica.....	85
Cuadro 3.5. Poder calorífico de residuos agrícolas y agroindustriales de cultivos tradicionales en El Salvador.....	86
Cuadro 3.6. Poder Calorífico de algunos combustibles de uso convencional en El Salvador .....	87
Cuadro 3.7. Valores de poder calorífico de especies creciendo en tierra salada BSRS-II, en Pacca Anna cerca de Faisalabad (Pakistan) .....	87
Cuadro 4.1. Resumen de parámetros termodinámicos para el ciclo de vapor simple de generación de vapor .....	92
Cuadro 4.2. Trabajo de turbina y de bomba, isotrópicos y reales.....	93

<b>CUADROS DE ANEXOS .....</b>	<b>PAG</b>
Cuadro E- 1. Tabulación de datos de temperatura y tiempo.....	130
Cuadro E- 2. Datos para ejemplo de cálculo del porcentaje de azufre de una muestra de fertilizante.....	134

## INTRODUCCIÓN

Actualmente vivimos y nos desarrollamos en un mundo que cambia a razón de segundos, cada persona en nuestro planeta vive y muere con la necesidad de suplir su propia demanda energética, eso multiplicado por los miles de millones de personas que habitan nuestra tierra hace que la demanda energética sea gigantesca, se hacen esfuerzos en todos los campos para cubrir esa demanda, y surgen cada vez más, nuevas formas de generación de energía, se retoman intentos anteriores para producir energía, porque la producción de energía está inevitablemente ligada al desarrollo económico y social.

A medida que se globalizan todas las interacciones humanas como las transacciones financieras, lo que ocurre en cualquier lugar del mundo afecta de diversas formas cada rincón del planeta, estamos en un escenario en el cual una catástrofe en un país causa un caos a nivel mundial, y los daños al ambiente no son la excepción.

Gran parte de estos daños al ambiente recaen en el mercado energético, pues los gases residuales de la producción de energía para transporte, calefacción, aire acondicionado, producción de bienes de consumo, acarrear problemas graves de salud y contaminación.

La tendencia es cada vez más a la producción de energías renovables que de cierta forma son más limpias, pues al ser renovables gran porcentaje de la energía creada de esta forma regresa al ciclo natural de la tierra sin sacar productos contaminantes.

Una de estas formas de generación de energía es el procesamiento de biomasa, ya sea por combustión o su descomposición en biodigestores.

Existen diferentes tipos de biomasa, cada cual presenta una alternativa para la generación de energía, muchas de ellas son de amplio uso en la actualidad, sin embargo existen otros tipos de biomasa que aún no son tan conocidas, y que requieren de un estudio certificado para demostrar que tienen ventajas frente a otras, y de esta forma generar confianza para su uso a los productores de energía y sus inversionistas.

El tema sobre el calentamiento global y la búsqueda de nuevas formas de energías alternas para minimizar el impacto ambiental es una temática muy discutida en la actualidad, y no es para menos, datos demográficos mundiales muestran una estimación en la cual para 2030 la población llegará a los 8300 millones de personas, con un aumento exponencial de demanda

de energía. La pequeña contribución energética que hace El Salvador comparado al consumo de energía global, representa una mínima parte del parque energético total, sin embargo esto da lugar a una gran ventaja, pues al no manejar cantidades gigantescas de consumo y generación energética, se puede contemplar realizar el experimento de intentar sustituir las fuentes de energías a partir de combustibles fósiles en su totalidad por fuentes de energía renovables.

La investigación que se llevó a cabo trata de exponer y plasmar en papel los beneficios o desventajas de la utilización de Zacate de la variedad “King Grass”, para ello se evaluó su potencial energético, realizando diversas pruebas físicas, químicas y fisicoquímicas.

## 1. CARACTERIZACIÓN DEL CULTIVO DEL ZACATE “KING GRASS”

El Zacate King Grass, conocido en el medio salvadoreño como “Zacate Elefante”, es una planta de crecimiento Rápido, alta e híbrida que no es ni modificada genéticamente ni invasiva, es una planta perenne y se puede cosechar varias veces al año

El *Pennisetum purpureum* o King Grass es una planta de la especie gramínea perenne del género *Pennisetum*. Similar a la caña de azúcar. Es un híbrido entre *Pennisetum purpureum* schum y *P. americanum* (L.) K schum = *P. typhoides* (bum), conocido como pasto híbrido Napier; pasto híbrido elefante o pasto híbrido pennistum. La hibridación de estos pastos probablemente ocurrió naturalmente; la primer hibridación hecha por el hombre fue en 1941 en la india usando el *P. americanum* como materia femenino.

El pasto fue encontrado en África del sur por la compañía Westfalia Fruit Estates, llevado a la estación experimental de Tifton, Georgia, EEUU. Introducido a Panamá por la compañía de alimento (NESTLE) bajo el nombre de pasto Elefante Panamá o King Grass (PI 300-086), donde ha presentado buen comportamiento y gran aceptabilidad, investigaciones en cuba indican muy buenos rendimientos durante la estación seca y con irrigación.

El interés energético en esta gramínea fue despertado recientemente, por su alta productividad tanto en forraje para alimento de ganado, como para su uso en biocombustibles, debido en gran parte a su corto periodo de crecimiento, su ciclo de corte para alimento ganadero dura alrededor de 60 días. Su corto periodo de crecimiento implica que a lo largo del año tenga varios cortes, así como necesidades hídricas diferenciadas de acuerdo con la edad dentro del corte y con la época del año. Es muy susceptible a las bajas temperaturas y en condiciones extremas de frío perece. Se cosecha usualmente en invierno, luego de las heladas, para quemarlas en plantas de energía. Ha sido propuesta como testigo de la plaga barrenador del tallo en Norteamérica, debido a que atrae a este insecto.

Los rendimientos del King Grass como alimento ganadero, son muy variables y dependen de las condiciones climáticas como temperatura, duración e intensidad de luz, cantidad y distribución de las lluvias y humedad; fertilidad de suelos, manejo y nivel de fertilización utilizada. La fertilización nitrogenada incrementa la producción, el contenido de proteína cruda e incrementa la digestibilidad de la planta; pero esta tiende a bajar conforme aumenta la Edad de la planta por el incremento de tallo y disminución de hojas.

Los rangos de producción van 20 a 43 TM de Materia Seca (MS)/ha/año con fertilizaciones desde los 140 kg N/ha/año con un manejo de cortes entre las 4 y 8 semanas de edad (Funes, 1984).

Cabe mencionar que se han llevado a cabo numerosas investigaciones sobre la composición química del zacate “King Grass” como alimento ganadero, pero los resultados varían dependiendo de diversos factores como lo son el clima, el tipo de terreno donde se siembra, espacio entre cultivo, por mencionar algunos.

### 1.1 Taxonomía del zacate “King Grass”

#### a. Nombre científico:

*Pennisetum purpureum*

#### b. Taxonomía

- Reino: plantae
- División: Magnoliophyta
- Clase: Liliopsida
- Orden: Poales
- Familia: Poaceae
- Subfamilia: Panicoideae
- Tribu: Paniceae
- Género: *Pennisetum*
- Especie: *P. purpureum*
- Nombre binomial: *Pennisetum purpureum*

#### c. Nombres comunes

- King Grass,
- Pasto elefante



Figura 1.1. Zacate King Grass de 3 metros, finca La Colina, Santa Ana.

### 1.1.1. Características típicas del cultivo.

King Grass es una gramínea forrajera con vocación de corte adaptada a condiciones tropicales, adaptada de los 0 a los 2,500 msnm, con un rango amplio de distribución de lluvias y de fertilidad de suelos, incluyendo suelos ácidos de baja fertilidad natural. La especie es perenne y de crecimiento erecto, y puede alcanzar hasta 3 m de altura. El tallo es similar al de la caña de azúcar, puede alcanzar de 3 a 5 cm de diámetro. Las hojas son anchas y largas con vellosidades suaves y no muy largas, verdes claro cuando son jóvenes y verde oscuro cuando están maduras. El King Grass ha tenido acogida en tierras altas y bajas, con suelos pobres y moderadamente ácidos, y con periodos secos prolongados (Ramírez *et al.*, 2008).

*El Pennisetum purpureum* se adapta bien a temperaturas entre 18° y 30° C, con su óptimo crecimiento a 24°C. Presenta buen comportamiento desde suelos moderadamente ácidos a neutros con un pH de 4.5 a 6.2, y con mejor desarrollo en suelos francos profundos, friables y bien drenados, humedad alta y una precipitación entre 1,200 y 4,000 mm anuales.

Para forraje se conoce que hay rendimientos desde 40 toneladas métricas de materia verde (MV)/ha/corte hasta más de 120 TM MV/ha/año (Espinoza *et al.*, 2001). Pueden realizarse cortes del pasto entre 40 y 75 días, sus valores de proteína pueden ser de 9% y contenido de fibra en detergente neutro (FDN) de 72%. El contenido mineral adecuado de un pasto King Grass en el tejido vegetal es de 2.2% de K en hoja, (% de MS). Otros rangos muestran al calcio, fósforo y magnesio como 0.38, 0.30, 0.28 % como los valores adecuados respectivamente (Ramírez, Verdecia, & Leonard, 2008). Los requerimientos nutricionales del pasto van desde 200-400 kg N/ha/año y 350-400 kg K ha/año (Rodríguez, 1985).

El King Grass puede producir hasta 26,3 TM de materia seca (MS) con cortes cada 75 días sin fertilizar, y hasta 37,7 TM de MS fertilizado con 200 kg/ha de Nitrógeno (Escobar M. y Ronquillo Molina, 2012). En Cuba se han obtenido rendimientos de 47,3 a 52,8 TM MS/Ha con cortes cada 60 días a una altura de 10 a 25 cm del suelo. Si el crecimiento del pasto no es interrumpido por bajas temperaturas y si el N y el agua no son limitantes, se obtienen altas producciones cortando el pasto a una altura de 0 a 15 cm del suelo cada 150- 180 Días.

Al ser el King Grass un cultivo de rápido crecimiento con un ciclo corto, puede ser cosechado el primer año después de la siembra. Una vez se planta el King Grass, se puede cosechar a los

después de 40 días para la producción de biogás, y las cosechas siguiente con ese fin pueden ser cada 25 a 30 días.

La alta tasa de crecimiento del King Grass puede proporcionar un suministro continuo de biomasa durante todo el año. El contenido de energía del King Grass es de 7,900 BTU por libra seca (18,375 KJ/kg seco)

## 1.2 El Zacate King Grass como Cultivo Energético en El Salvador.

Según el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, actualmente existen tres proyectos de generación eléctrica y aprovechamiento térmico que contemplan al King Grass como materia prima, e incluso tienen ya los terrenos destinados para el cultivo (MARN, 2016).

Varias de estas fincas ya poseen terreno cultivado con Zacate King Grass, la figura 1.2 es una fotografía tomada de la finca San José, ubicada en el municipio de Armenia, en el departamento de Sonsonate, El Salvador.



*Figura 1.2. Zacate King Grass en El Salvador finca San José. Departamento de Sonsonate*

El Cuadro 1.1 muestra las fincas destinadas al cultivo de King Grass en El Salvador (MARN, 2016). Actualmente están matriculadas en el ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales siete fincas cuyo terreno cultivable está destinado para King Grass como fuente de biomasa para alimentación de calderas para la generación de calor y electricidad, con un total de 750 manzanas equivalentes a 524 hectáreas, se estima un rendimiento de producción de 100 toneladas de materia seca por hectárea.

Cuadro 1.1 Fincas Energéticas, matriculadas en el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Fincas destinadas al cultivo de King Grass	Ubicación	Extensión (Mz)	Producción materia seca TM/año
Hacienda La Colina.	El Porvenir, Santa Ana	150	10,491.0
Hacienda Empalizada.	Santa Ana	120	8,392.8
Hacienda San José.	Armenia, Sonsonate	90	6,294.6
Hacienda La Atalaya.	Acajutla, Sonsonate	200	13,987.9
Hacienda Los Limones.	Cantón El Sauce, Santiago Nonualco, La Paz	71.43	4,995.8
San Cayetano.	Cantón El Golfo, caserío El Pital, San Juan Nonualco, La Paz	73.13	5,114.7
Hacienda San Carlos	Primera Porción la Longaniza, caserío El Pital, San Juan Nonualco La Paz	45.5	3,182.3
<b>Total.</b>		<b>750.06</b>	<b>52,459.0</b>

Fuente: (MARN, 2016)

### 1.3 Manejo del Zacate King Grass como Cultivo Energético

Es conveniente realizar Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), para obtener una materia prima de Biomasa a partir de Zacate King Grass que ofrezca un rendimiento óptimo para la generación energética.

#### 1.3.1. Requerimientos de cultivo.

El King Grass es poco exigente en suelos, tolera bien y se ha cultivado económicamente tanto en suelos muy pesados o ligeros arenosos. Su exigencia es la profundidad, la necesaria para desarrollar su sistema radicular (raíces fasciculadas profundas) de alrededor de un metro de profundidad, requiere aeración suficiente, por lo cual se debe evitar problemas de drenaje tanto interno como superficial, el manejo debe adecuarse a las condiciones requeridas por el cultivo y las características físicas, químicas y biológicas que cada suelo presenta. El manejo debe orientarse a la producción y productividad del cultivo, conservación y posible mejora de las

propiedades del suelo ( $N_2$ , P, pH requerido, etc.), se debe evitar la degradación por erosión, salinidad y alcalinidad. No tolera toxicidad del manganeso, pH de 5.5 a 7.

Se debe monitorear la fertilidad del suelo por lo menos una vez al año, y establecer un referente con el primer análisis, con el fin de detectar un empobrecimiento del suelo, por la alta tasa de extracción que tienen los pastos de corte, que de no repararse producirá una merma gradual en los rendimientos de producción de forraje/ $m^2$ , y pondrá en riesgo la sostenibilidad del confinamiento.

### 1.3.2. Proceso de siembra.

Es importante en función de la textura del suelo tomar correctas decisiones vinculables con la labranza de un terreno, tipo de implemento, número de pasadas, dirección de labranza.

Se inicia con un control de malezas y luego se procede a surcar, en lo posible con labranza mínima, a profundidades que varían entre 15 y 25 centímetros. Se procura la labranza mínima como una BPA que causa poca perturbación en el suelo, buscando el mínimo daño tanto a su estructura como a su biodiversidad microbiana (FAO, 2006).

### 1.3.3. Preparación del suelo:

#### a. El subsolado.

Es la práctica convencional para eliminar la compactación del suelo, generando una fragmentación del suelo por debajo de la capa arable, sin necesidad de voltear, los pases por lo general se realizan en sentidos opuestos a los de siembra (Figura 1.3) (Díaz y Portocarrero, 2002).

#### b. Rotulación.

Esta operación rotura suelos compactos abriendo grietas y aflojando los terrones (Figura 1.3) (Díaz y Portocarrero, 2002).



Figura 1.3. Preparación del terreno: Subsulado y rotulación del suelo <http://www.sugarcane crops.com>

#### c. Afinado.

Esta operación se usa para desmenuzar terrones y grumos y para formar un horizonte de gránulos finos, o sea, es la preparación de la cama de semilla (Figura 1.4).



Figura 1.4. Preparación del terreno: Afinado del suelo <http://www.sugarcane crops.com>

#### d. Surcado más Inyectado de manguera.

Para la colocación de la semilla en el suelo, se abren surcos donde se depositan las semillas de King Grass (Figura 1.5) (Díaz y Portocarrero, 2002).



Figura 1.5. Preparación del terreno: Surcado del suelo <http://www.sugarcane crops.com>

#### 1.3.4. Semilla de King Grass

La semilla botánica de King Grass tiene de 10 a 15% de germinación, aunque se prefiere propagarlo vegetativamente por estacas, las estacas deben proceder de tallos de 90 a 120 días de edad Figura 1.6. Se recomienda usar cañas enteras que luego se cortan en pedazos en el mismo surco para ser tapados con una capa de 10 a 15 cm de suelo, el distanciamiento apropiado es de 1 m a 1.5 m entre surcos. El primer corte se realiza entre 4 y 6 meses.



Figura 1.6. Semilla de King Grass <https://www.maralfalfa2.com/>

La siembra se puede hacer en hileras dobles, se colocan los tallos o semillas en el surco y luego se pica con machete en trozos de 15 a 20 cm de longitud, sembrando entre 7 y 9 toneladas por hectárea o 12,500 plantas por hectárea, o se puede sembrar haciendo paquetes, en el semillero se hacen paquetes de 40 tallos con una longitud de 15 a 20 cm, se siembra entre 4 y 5 TM por hectáreas.

La siembra es una de las operaciones más importantes del cultivo, pues el carácter semipermanente del King Grass, determina que cualquier falla cometida en la ejecución de esta labor, afectara la germinación y en consecuencia, la producción y la rentabilidad de la explotación durante todo el periodo de varios años, que transcurre entre una siembra y otra en el mismo terreno. No se deben escatimar gastos y/o esfuerzos necesarios para el logro de una buena siembra y en consecuencia, de una buena germinación

Para el uso como biocombustible se recomienda un distanciamiento de 1 a 1.5 m entre surcos ya que se necesita un porcentaje mayor de materia leñosa, porque en los tallos la humedad es menor, y con una distancia mayor entre surcos se favorece el engrosamiento de los tallos de la planta.

#### 1.3.5. Fertilización del King Grass

La fertilización del King Grass debe de realizarse a través de un programa balanceado con los nutrientes que requiere la planta. Los nutrientes principales son el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), magnesio (Mg), azufre (S) y calcio (Ca). El Potasio (K) desempeña un papel clave en el crecimiento, en el desarrollo celular y calidad de quemado de la biomasa. El magnesio (Mg) tiene la asignación fotosintética de la planta y su eficiencia depende, en gran medida, de la concentración de magnesio en el cloroplasto. Se estima que con el azufre (S) sí se tiene las concentraciones adecuadas en la planta puede mejorar su eficiencia energética. La extracción y exportación de nutrientes en cada corte es total, haciendo insostenible el simple suplemento de nutrientes con las reservas del suelo.

Lo más importante en la producción de pasto de corte es el nitrógeno, y lo recomendado es hacer aplicaciones de abonos o fertilizantes que aporten este elemento; lo mejor es aplicarlo luego de cada dos cortes (FAO, 2006).

La fertilización del King Grass puede fraccionarse en dos aplicaciones, la primera se hace al momento de la siembra, aplicando la totalidad de la dosis de fosforo y en la segunda aplicación la dosis completa de nitrógeno y potasio. La segunda y última porción se aplica a los 2 meses y medio de edad de la planta aproximadamente, con un riego. La última aplicación puede hacerse en forma mecanizada con la operación de aporque. Inmediatamente después de la siembra, se aplica el primer riego o “riego de asiento”, cuyo objetivo es humedecer y poner el suelo en íntimo contacto con el esqueje, para que aproveche al máximo la humedad y temperatura de medio

En honduras se desarrolló un estudio sobre la fertilización orgánica con el uso del Biol y la potásica inorgánica en el King Grass (Escobar M. y Ronquillo Molina, 2012), según el cual:

- La producción de materia Seca del pasto King Grass aumenta significativamente con el aumento de la dosis de potasio hasta 165 kg/ha en la fertilización inorgánica, su producción es menor y con dosis mayores a los 80 días de edad de corte.
- La dosis de fertilización recomendada con la utilización de Biol como fuente nutritiva del pasto King grass es de 2,000 L/ha, utilizando agua residual. El aumento de la dosis de fertilización orgánica no aumenta significativamente la producción de materia seca (kg/ha).
- El aumento de la dosis de fertilización potásica inorgánica en el cultivo de King Grass aumenta la producción de materia seca (TM/ha) del cultivo pero es inverso al porcentaje de hemicelulosa que el cultivo acumula y por tanto mayor dificultad de degradación y mayor tiempo de retención hidráulica.
- Para la fertilización orgánica no existe un efecto de aumento en la acumulación de hemicelulosa del material King Grass con el aumento de la dosis de Biol (Escobar M. y Ronquillo Molina, 2012).

En general, una fertilización adecuada para el pasto elefante requiere de 75 kg/ha de nitrógeno, aplicado después de cada corte (163 kg de urea), y anualmente por lo menos 50 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O (o sea, 250 kilogramos de un fertilizante compuesto como el 10-20-20). Estos valores se ajustan de acuerdo con el análisis de suelo y los aportes de abonos orgánicos.

#### 1.4 Cultivo y Obtención de “King Grass” en el Campo

La Edad de corte del King Grass es de 6 meses, ya que en ese tiempo ha alcanzado la maduración necesaria para la obtención de mayor cantidad de tallo y materia seca necesaria para obtener una eficiencia térmica mayor; se puede realizar la cosecha también a partir de los 3 meses si es requerido, pero la eficiencia térmica disminuye.

Siendo el King Grass un pasto con alturas de mayores de 3 metros, es necesario que pase por un proceso de reducción de la granulometría, para obtener un tamaño ideal para la combustión o gasificación.

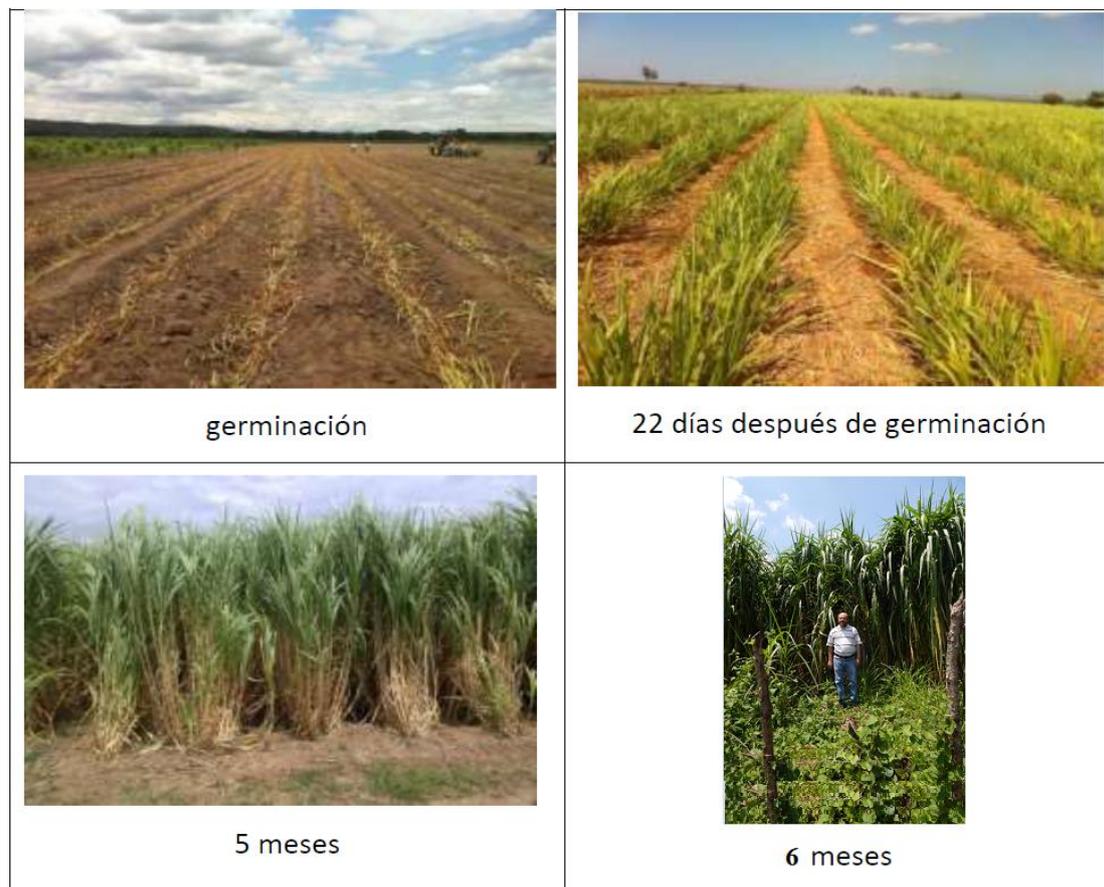


Figura 1.7. Diferentes etapas de crecimiento del King Grass en la finca San José, Departamento de Sonsonate.

Después de 4 meses de edad, debe iniciarse el periodo de preparación del cultivo para la cosecha, a fin de llevar a la planta generadora una materia prima de óptima calidad, sin detrimento del tonelaje del King Grass, lo cual es posible, controlando posibles inconvenientes como una sequía moderada o la deficiencia de nitrógeno, que obligan a la planta a restringir su proceso de crecimiento o de la formación de tejidos, de esta forma se favorece maduración

correcta de la planta y la producción de materia seca. Si se cosecha la planta a los 6 meses, Se estima una producción de 360 a 390 toneladas por hectárea de materia verde en base húmeda al 70%, 720 a 780 toneladas al año, Si la cosecha se efectúa con un equipo especializado de alta propulsión.

### 1.5 Tratamiento Granulométrico.

El Tratamiento de la biomasa es importante para el manejo y transporte de la misma, se requiere una reducción de tamaño y ciertas formas como pellets o tabletas ayudan a aumentar las eficiencias en calderas de plantas generadoras de electricidad.

#### a. Cortado y troceado

El objeto es poder lograr la mejor eficiencia posible, partículas de menor tamaño ayudan a una mejor combustión (El Baasam, 2010).

#### b. Astillado

Como el proceso anterior, consiste en una reducción granulométrica de la biomasa que con este paso puede llegar a un tamaño de 3-10 cm de largo en lo que se denominan astillas (El Baasam, 2010).



Figura 1.8. Astillado de Biomasa <http://www.sugarcane crops.com>

#### c. Molienda

Algunos procesos de conversión energética de la biomasa necesitan utilizar partículas de tamaño inferior al de una astilla lo que, a su vez, requiere un proceso previo de reducción

granulométrica denominado molienda para conseguir un tamaño de la biomasa inicial inferior a 2-3 cm, que constituye el producto final de este proceso. Los equipos más utilizados para efectuar esta operación son molinos de martillos y de tambor en grandes plantas. Estos últimos suponen un mayor coste de inversión pero tienen un gasto de electricidad no superior al 20% de los molinos de martillos. También se emplean molinos de cuchillas cuando la biomasa se encuentra más húmeda.

#### d. Secado

Este proceso consiste en extraer agua de la biomasa a fin de lograr un producto con menor contenido en humedad, de acuerdo a las especificaciones requeridas por los procesos de conversión energética. La reducción en el contenido en humedad de las biomásas lignocelulosas húmedas (contenido de un 40-50% de humedad sobre base húmeda) puede lograrse mediante secado natural, aprovechando los fenómenos de termogénesis que, fundamentalmente, por acción microbiana, se producen cuando estas biomásas se acumulan en montones. Sin embargo, en climas muy húmedos o cuando se hace precisa la obtención de unos productos con un bajo grado de humedad, el proceso de secado se efectúa mediante procedimientos forzados, utilizando aire caliente o vapor como agentes secantes.

#### e. Densificación

Consiste en una compactación de las partículas de biomasa sometidas a altas presiones, para dar lugar a los pellets y briquetas. Estos productos se diferencian entre sí por su tamaño, estando los pellets constituidos por piezas de tamaño homogéneo, generalmente cilíndricas, de 3 a 12 mm de diámetro y algunos centímetros de largo, y siendo las briquetas piezas de forma cilíndrica, de 5 a 15 cm de diámetro y 30-40 cm de largo.

Además de su forma regular, los pellets y briquetas de biomasa tienen una densidad específica que va de 1 a 1.3 kg/dm<sup>3</sup>, y una densidad aparente en torno a 0.6-0.7 kg/dm<sup>3</sup> lo que junto a su bajo grado de humedad (igual o inferior al 10%) los hace de fácil manejo y con costes inferiores de transporte y almacenaje en relación con la biomasa bruta. Los pellets son además aptos para su alimentación automática a calderas. Todo ello hace de estos productos unos combustibles de una calidad muy superior a la materia prima de la cual se extraen (El Baasam, 2010).

## 2. CONTEXTO ENERGÉTICO DE EL SALVADOR

La demanda mundial de energía es complejo y cambiante. La demanda total de energía incrementa proporcionalmente al incremento de la población y la actividad Económica, y la innovación inunda la tecnología y el comercio, lo que influye en el tipo de energía que se utiliza. Como resultado, la oferta y la demanda de energía varía por todo el mundo que depende de las tecnologías y de los recursos disponibles.

El crecimiento poblacional, el crecimiento de necesidades y el desarrollo de tecnologías son factores claves de la creciente demanda por energía.

Para 2030 se estima que la población mundial llegará a los 8300 millones lo que implica 1300 millones de personas más que necesitaran energía, se calcula que los ingresos mundiales para el 2030 con dificultad doblen los niveles de 2011 en términos reales, por lo que se requiere de fuentes de generación de energía limpias y baratas (*Davis,2014*).

El sector energético aporta la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través de la combustión de combustibles fósiles. Con el uso de combustibles fósiles se contamina el aire lo cual deriva en problemas de salud de las personas y causa daños en la economía afectando países de todos los niveles de desarrollo. Esto representa un gran desafío para la producción y el uso de energía, debido a que es un tema central para el crecimiento y el desarrollo económico.

Todas las sociedades necesitan de servicios energéticos para cubrir las necesidades humanas básicas (por ejemplo, de alumbrado, cocina, ambientación, movilidad y comunicación) y para los procesos productivos. Desde mediados del siglo XIX, aproximadamente, el uso de combustibles de origen fósil (carbón, petróleo y gas) en todo el mundo ha aumentado hasta convertirse en el suministro de energía predominante, situación que ha dado lugar a un rápido aumento de las emisiones del dióxido de carbono.

En general, el petróleo es la principal fuente de energía, representado el 33%, del consumo mundial, y es a partir de éste que se obtienen los productos energéticos de consumo diario: la gasolina, el diésel, el gas licuado de petróleo (GLP) y el diésel o bunker (*U.S. EIA, 2016*).

Los datos más recientes confirman que el consumo de combustibles de origen fósil representan la mayor parte de las emisiones mundiales de GEI de origen antropogénico. Las emisiones

siguen aumentando y, al término de 2010, las concentraciones de CO<sub>2</sub> eran ya superiores a 390 ppm, un 39% por encima de los niveles preindustriales (*Edenhofer et al.,2012*).

Hay diversas opciones para disminuir las emisiones de GEI del sistema energético, sin dejar por ello de cubrir la demanda mundial de servicios energéticos. Como las relativas a la conservación y eficiencia energéticas, el reemplazo de combustibles de origen fósil, las energías renovables, la energía nuclear, o la captura y el almacenamiento del dióxido de carbono. Para evaluar completamente una cartera de opciones de mitigación habría que evaluar sus respectivos potenciales de mitigación, su contribución al desarrollo sostenible y todos los riesgos y costos concomitantes (*Edenhofer et al.,2012*).

Adquirir conocimientos sobre los GEI, la captura de CO<sub>2</sub> y el impacto de las actividades del ser humano sobre el clima de la tierra, ya es un tema de actualidad, dado que los proyectos de energía renovable tienen el potencial de reducir la cantidad de emisiones de GEI liberadas a la atmósfera. Al utilizar fuentes renovables, como el agua, el sol, la biomasa o el viento, para producir energía, generalmente se incide en la reducción de la cantidad de combustibles fósiles.

Para poder evaluar el potencial de las diversas fuentes de energía renovables en El Salvador y específicamente para cogeneración de energía mediante biomasa, es necesario conocer la situación energética no solo del país, sino también de la región centroamericana. Por lo cual se requiere hacer una revisión del contexto energético al cual El Salvador se encuentra subyugado.

## 2.1 El Salvador en el contexto del panorama energético de Centroamérica.

Realizando un acercamiento a la realidad de la región, se puede elaborar un resumen de hechos importantes ocurridos hasta 2014, año en el cual se encuentran los datos oficiales más recientes.

La producción de electricidad en 2014 en los seis países centroamericanos ascendió a 46,755 GWh, cifra 2,1% superior a la registrada en 2013. Dicha energía se generó a partir de las siguientes fuentes: hidráulica (45,6%), combustibles fósiles (derivados del petróleo y carbón, 36,4%), geotermia (8,2%), bagazo de caña en ingenios azucareros (5,3%) y viento (4,4%). Lo anterior significa que el 63,6% de la energía eléctrica inyectada a las redes de alta y media tensión del servicio público fue producida a partir de los aportes de las fuentes renovables de energía (FRE), porcentaje similar al registrado el año 2013. Por países, las FRE registraron la siguiente participación: Costa Rica (89,7%); Guatemala (69,6%); **El Salvador (59,1%)**; Panamá (55,9%); Nicaragua (52,0%), y Honduras (40,6%). Se destaca el incremento de las

energías renovables en Nicaragua, Costa Rica y Guatemala, que registraron 1,6%, 1,5% y 1%, respectivamente, adicionales con relación a las participaciones de 2013 (CEPAL-ONU, 2014).

La capacidad instalada a diciembre de 2014 totalizó 13,667 MW, cifra que representa un crecimiento de 6,1% con respecto a 2013. Lo anterior constituye un incremento neto de la capacidad instalada de alrededor de 789 MW, en Centroamérica.

La capacidad instalada en energías renovables aumentó en poco más de un punto porcentual (59,1%) respecto al año pasado; sin embargo, la composición porcentual de la producción se mantuvo sin cambio (63,6%). Lo anterior fue resultado de una menor generación con recursos hidroeléctricos en casi todos los países (resultado de la sequía que afectó la región), compensado en parte por un incremento en la producción con energía eólica (Figura 2.1). Las importaciones de energía redujeron el nivel de los racionamientos (CEPAL-ONU, 2014).

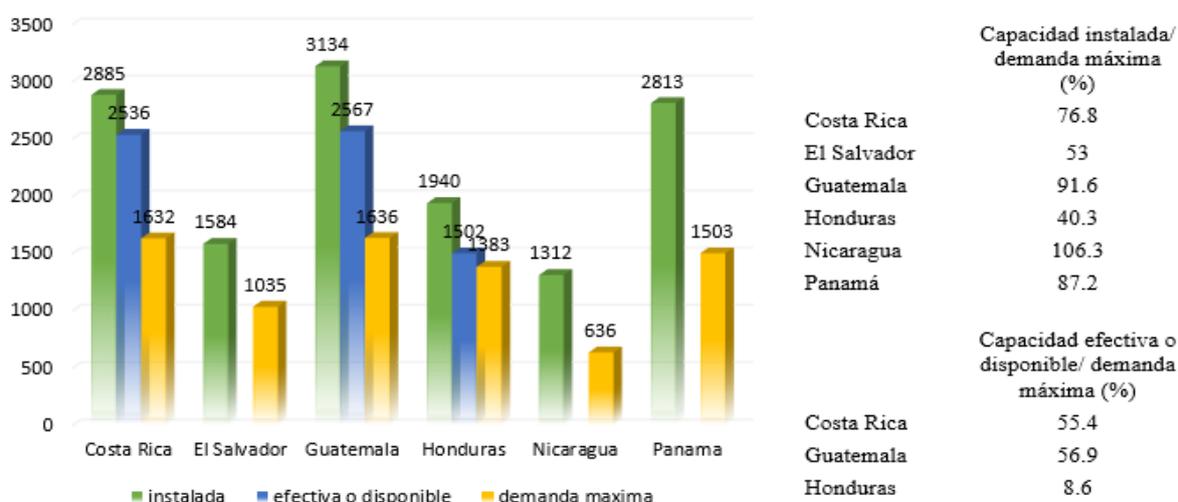


Figura 2.1. Centroamérica: capacidad de generación eléctrica instalada efectiva y demanda máxima, 2014 (en MW). Fuente: (CEPAL-ONU, 2014), sobre la base de cifras oficiales preliminares. Nota: La capacidad disponible de Honduras corresponde a diciembre

La región reportó un crecimiento anual en el consumo de energía eléctrica de 2,2%, menor al registrado en 2013 (3%). Por países, dicho aumento fue de 5,1% en Nicaragua; 3,8% en Guatemala; 2,3% en Panamá; 1,7% en Honduras; 1,4% en Costa Rica, y 0,1% en **El Salvador**.

Durante 2014 se mantuvo el impulso a las energías renovables, iniciaron operaciones centrales hidroeléctricas, eólicas y fotovoltaicas. Es conveniente mencionar el incremento de capacidad

con centrales solares conectadas a los sistemas nacionales (central SIBO en Guatemala por 5 MW y central Sarigua en Panamá por 2,4 MW). La capacidad instalada eólica subió 173 MW, alcanzando 590 MW. Para el año 2015 se esperaba un fuerte aumento de la tecnología solar, en especial en Guatemala y Honduras (*CEPAL-ONU, 2014*).

El país con mayor volumen de transacciones regionales fue Guatemala, que reportó en 2014 importaciones y exportaciones de 497 GWh y 986 GWh, respectivamente (esta cifra incluye las exportaciones de México a Guatemala). En segundo lugar se ubica Costa Rica (con importaciones y exportaciones de 555 GWh y 760 GWh, respectivamente). Ambos países fueron los responsables del 66% de las transacciones registradas en el mercado eléctrico regional.

Como en años anteriores, Guatemala continúa con la posición de exportador neto hacia los países vecinos de Centroamérica (490 GWh netos). En un lejano segundo lugar se ubicó Nicaragua con exportaciones netas de 27 GWh. Cuatro países registraron una posición importadora neta: **El Salvador** con 380 GWh; Honduras con casi 280 GWh; Costa Rica con poco más de 200 GWh, y Panamá con 90 GWh (*CEPAL-ONU, 2014*).

En Centroamérica para el 2015, la oferta y suministro de energía eléctrica (Figura 2.2) así como la generación eléctrica neta (Figura 2.3) proviene de forma substancial de fuentes de energía renovables, en gran medida energía hidroeléctrica, por lo que cabe mencionar que existe una enorme dependencia a la disponibilidad del recurso hídrico en los embalses y esto deriva en una gran vulnerabilidad a las condiciones climatológicas como las sequías, no obstante la energía proveniente del uso de combustibles fósiles representa un gran porcentaje de la energía utilizada en la región.

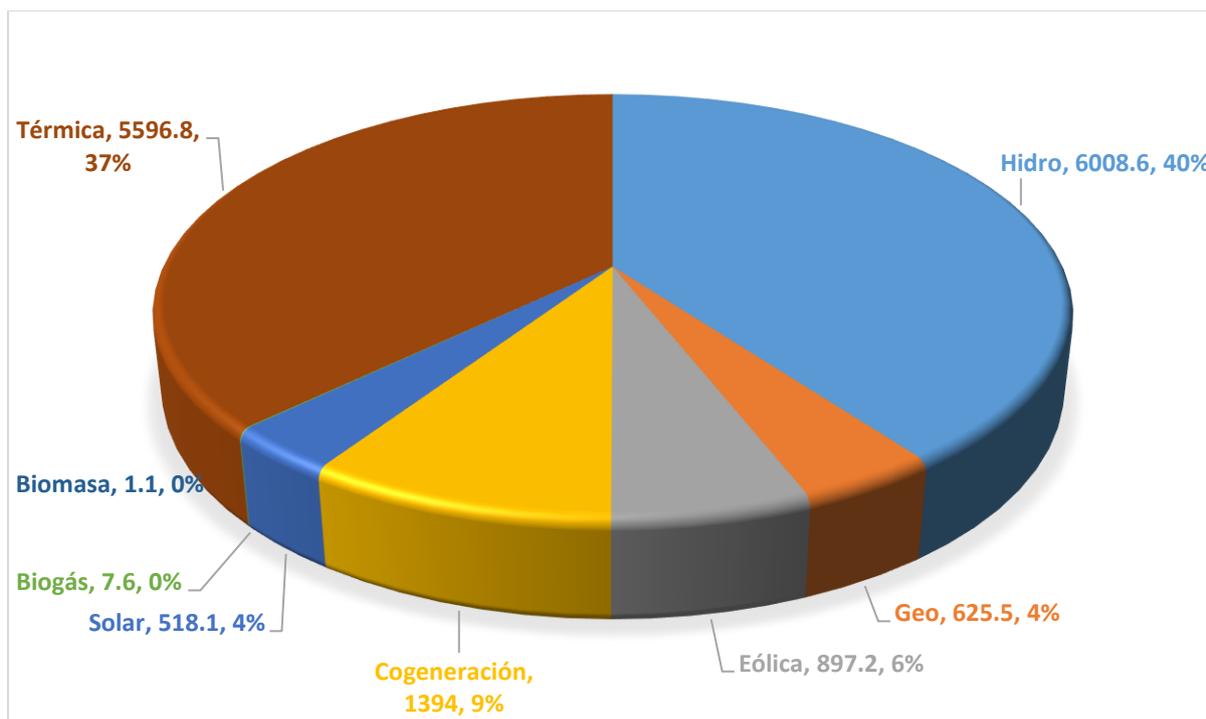


Figura 2.2 Centroamérica: Capacidad de generación eléctrica instalada en MW oferta y suministro de energía eléctrica 2014. Fuente: (CEPAL, 2015), sobre la base de cifras oficiales preliminares.

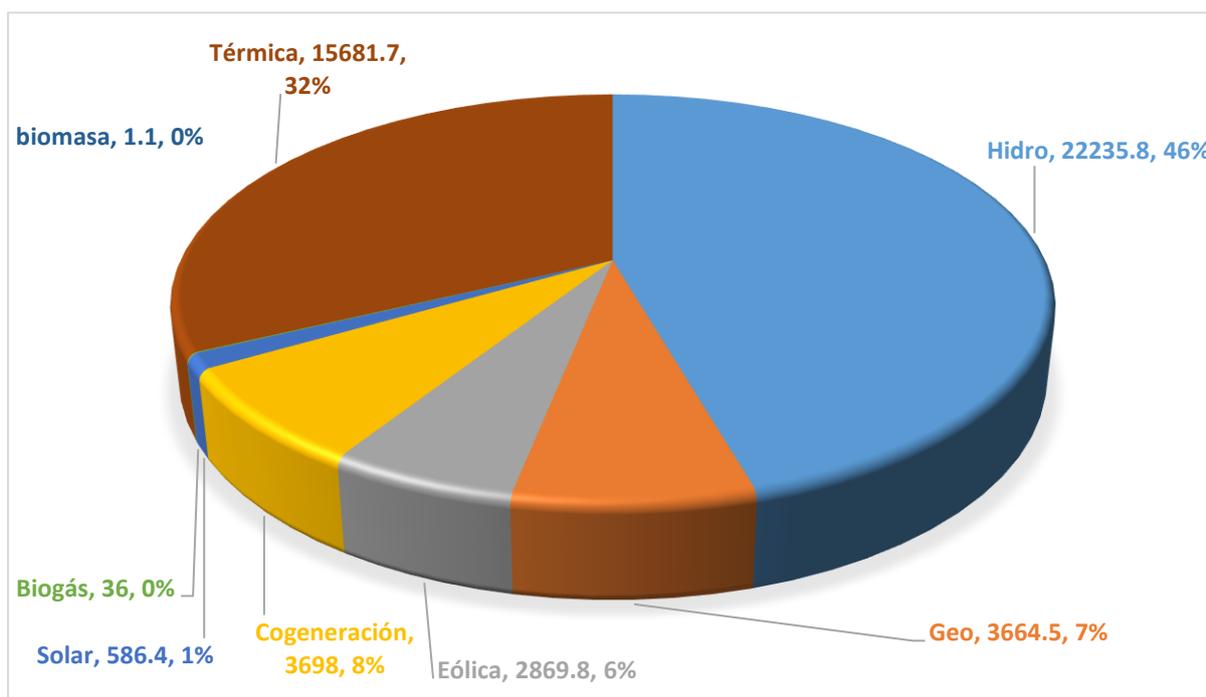


Figura 2.3 Centroamérica: Generación eléctrica neta en GWh 2015. Fuente: (CEPAL, 2015), sobre la base de cifras oficiales preliminares

Realizando un seguimiento de la evolución del sector de la producción de electricidad (Figura 2.4 y Figura 2.5) se puede resaltar que el uso de fuentes de energía renovables tiende a aumentar con el paso de los años, debido a la demanda energética de cada uno de los países de la región, sin embargo no se presenta una disminución substancial en el uso de combustibles fósiles. La explotación de fuentes de energía renovables como la solar y la eólica, no se realiza en algunos países, y en los restantes el porcentaje de energía generado por dichas fuentes, no las presenta como contendientes para sustituir a los combustibles fósiles.

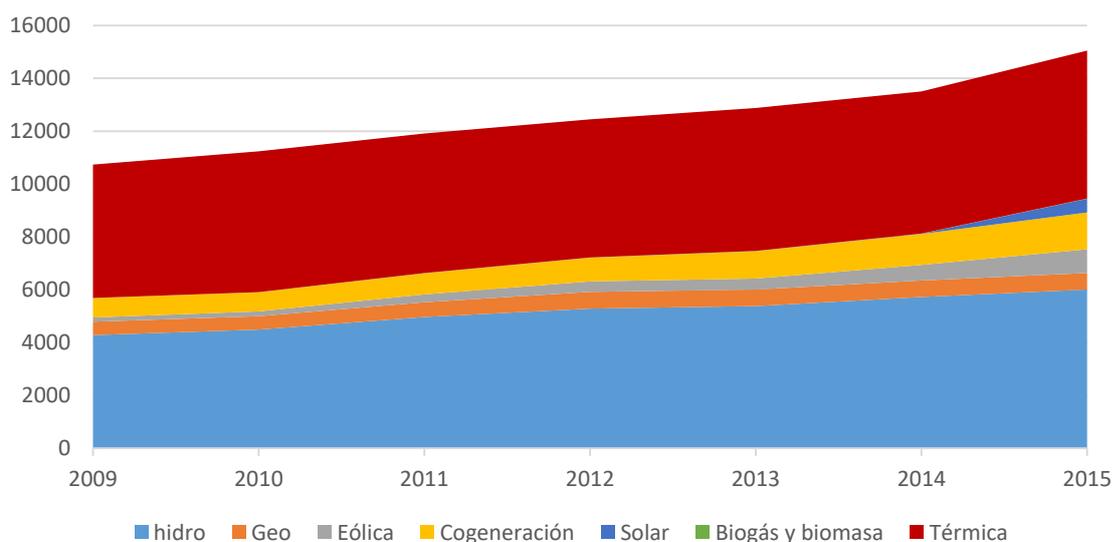


Figura 2.4. Centroamérica: Evolución Capacidad de generación eléctrica instalada en MW, 2009-2015. Fuente (CEPAL, 2015), sobre la base de cifras oficiales preliminares

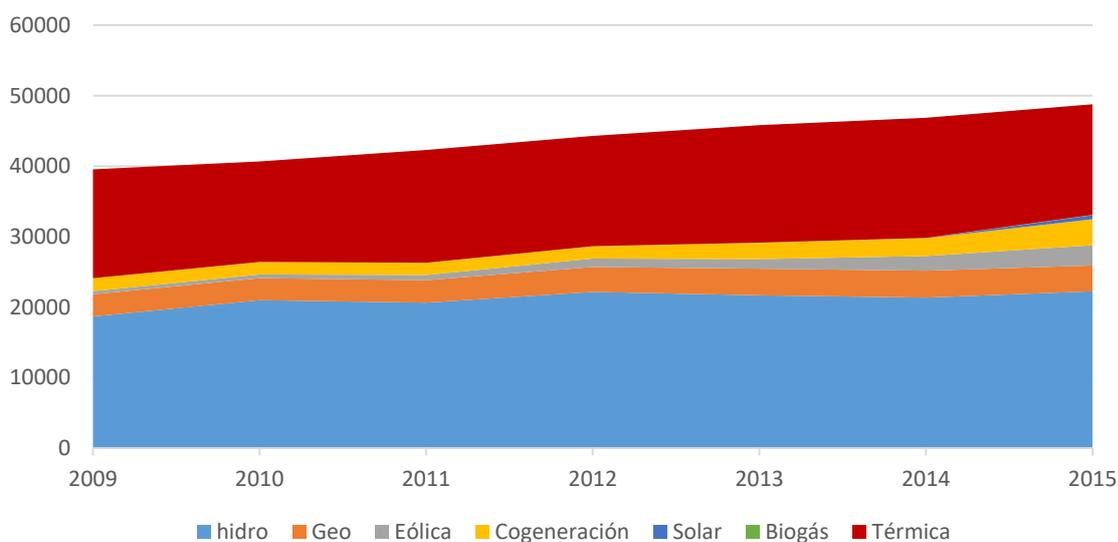


Figura 2.5 Centroamérica: Evolución de la generación eléctrica neta en GWh, 2009-2015. Fuente: (CEPAL, 2015). Nota: sobre la base de cifras oficiales.

## 2.2 Perfil del sistema energético de El Salvador.

El Salvador cuenta actualmente con políticas para el desarrollo de las energías renovables, las cual se resume en el documento **Plan Maestro para el Desarrollo de la Energía Renovable** en El salvador, el cual está enmarcado dentro del primer lineamiento estratégico de la política energética Nacional que plantea: “la Diversificación de la matriz energética y el fomento a las fuentes renovables de energía (CNE, 2011).

### 2.2.1. Demanda energética de El Salvador.

Según el último censo realizado en El Salvador por la Dirección General de Estadísticas y Censos (DIGESTYC) en 2007 el 88.4% de los hogares salvadoreños contaba con energía eléctrica (DIGESTYC, 2007) cuando la población total era de 5,744,113 habitantes, para ese entonces la demanda máxima de electricidad fue de 906 MW, al 2015 se ha dado un aumento de la demanda máxima a 1089 MW (CEPAL, 2015) un incremento que representa un 17% con respecto al 2007. Se debe tomar en cuenta otros factores, como el crecimiento de la industria en El Salvador, que si bien se ha mantenido en un moderado crecimiento de menos de dos puntos porcentuales en la última década, representa un aumento en el consumo energético, de ahí que El Salvador tenga entre sus importaciones la electricidad, con un gasto combinado con agua y gas para febrero de 2016 de \$8.9 millones, siendo importante mencionar que para febrero de 2016 hubo una reducción en la importación de electricidad de \$3.8 millones (BCR, 2016).

Se realizó una proyección de demanda de energía eléctrica que se espera tener en el periodo 2013-2026, dicha proyección se encuentra basada en el crecimiento anual que se ha tenido durante los últimos años, en este caso no se toma como variable dependiente el producto interno bruto (PIB) y su proyección, pues dicha variable se trabajó en el plan indicativo original y de la cual ya se tienen resultados, lo que más bien se pretende es proyectar el crecimiento de la demanda en base a los crecimientos que históricamente se han tenido durante los últimos años. (BCR, 2016).

### 2.2.2. Mercado Energético en El Salvador.

El sistema de electricidad de El Salvador está conectado a varios de los otros países centroamericanos (más México) a través de la línea de transmisión SIEPAC (sistema de interconexión eléctrica de los países de América Central) construida recientemente de 230mV 300MW (Moeller & poeller Engineering, 2014).



Figura 2.6. Sistema de transmisión regional SIEPAC. Fuente: <http://www.proyectomesoamerica.org>

Para el año 2012 se estimó un crecimiento del 2.1% que es igual al crecimiento medio de los primeros meses del año 2012. Para los años 2013 al 2014 se estimó un crecimiento de 3.6% sostenido en el tiempo, este valor equivale al promedio en crecimiento de energía que El Salvador ha tenido desde el año 2000 (CNE, 2013).

El Cuadro 2.1 muestra la oferta y demanda de energía eléctrica en El Salvador para los años 2013 a 2015, así como la capacidad de generación instalada, la generación neta pública y la privada, además de los aportes de importaciones como exportaciones.

Cuadro 2.1. El Salvador: Oferta-Demanda de Potencia y suministro de Energía Eléctrica, 2013-2015.

Año	Unidades	2013	2014	2015
Capacidad instalada	MW	1,583.5	1,583.5	1,633.1
Demanda máxima	MW	1,784.9	1,035.0	1,089.0
Publica	GWh	1,784.9	1,713.0	1,348.8
Privada	GWh	4,182.8	4,163.7	4,276.5
Exportación	GWh	90.8	207.8	64.2
Importación	GWh	373.8	588.5	963.4
Disponible	GWh	6,250.7	6,257.4	6,524.5
Autoproducción	GWh	173.7	n.d.	Nd
Energía no servida	GWh	4.2	4.0	3.2
Ventas	GWh	5,491.8	n.d.	nd
Pérdidas	%	12.1	n.d.	nd
Factor de carga	%	71.1	69.0	68.4

Fuente: (CEPAL, 2015)

Se entiende por **energía primaria** a las distintas fuentes de energía tal como se obtienen en la naturaleza, ya sea en forma directa o después de un proceso de extracción, y **energía secundaria** son los diferentes productos energéticos que provienen de los distintos centros de transformación, cuyo destino son los diversos sectores de consumo y/u otros centros de transformación (CNE, 2012). En general pueden mencionarse muchas formas para generar energía de consumo final, ya sea eléctrica o energía calorífica.

La energía primaria y secundaria utilizada en El Salvador al igual que en el resto de la región centroamericana para el logro del crecimiento y el desarrollo alcanzado, es producto de la combinación de fuentes y abarca la generación de energía eléctrica a partir de las centrales hidroeléctricas, termoeléctricas y geotérmicas, hasta la generación de energía calorífica del carbón vegetal, leña, residuos o subproductos agroindustriales, residuos vegetales agrícolas y

de los derivados de hidrocarburos. La Figura 2.7 muestra la capacidad instalada con la contribución de cada fuente de energía renovable o no renovable y Figura 2.8 muestra la generación eléctrica neta para el 2015.

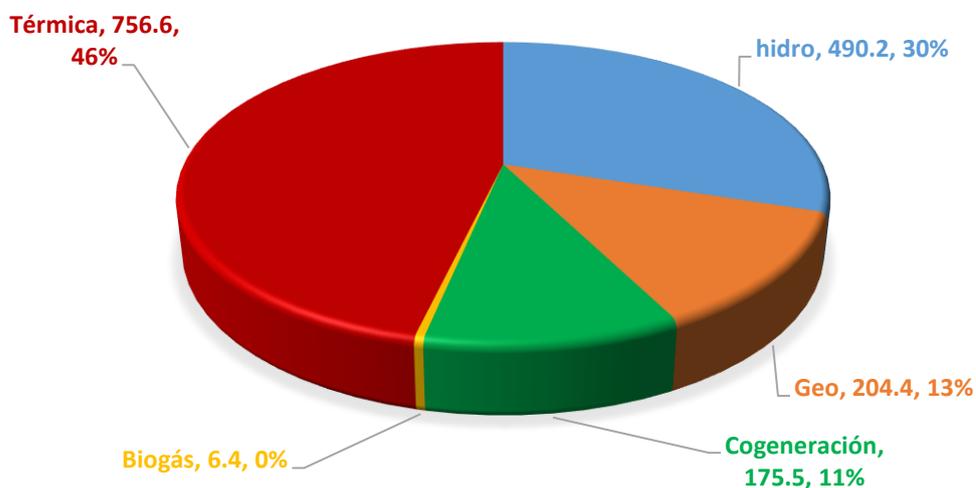


Figura 2.7. El Salvador: Capacidad de generación eléctrica instalada en MW 2014. Fuente: (CEPAL, 2015)

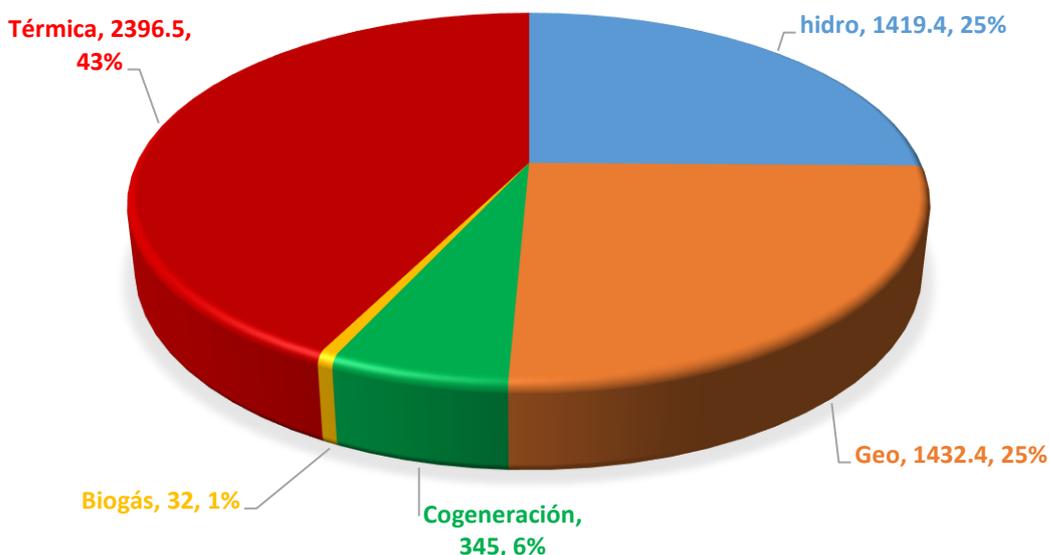


Figura 2.8. El Salvador: Generación Eléctrica Neta en GWh 2014. Fuente: (CEPAL, 2015)

El sector eléctrico de El Salvador cuenta con un plan de reducir la dependencia en combustibles fósiles. Hasta 2016, estaba planeada la instalación de 195 MW adicionales por fuentes renovables de energía, entre los cuales 100MW serán de las llamadas energías renovables no convencionales (NCRE por sus siglas en inglés, eólicas y fotovoltaicas) como la generación eléctrica a partir de King Grass (Moeller & poeller Engineering, 2014).



## 2.2.4. Fuentes de generación de Energía eléctrica en El Salvador

### a. Energía térmica

El Salvador es un país importador neto de petróleo y sus derivados, debido a esto, es incapaz de influir en los precios del mismo pero estando inmerso en la economía mundial.

Cuadro 2.2. Capacidad de generación instalada y generación eléctrica neta de Empresas y centrales termoeléctricas

Térmica	Capacidad instalada KW	Generación neta (MWh)
Borealis	13,600	4,900
Acajutla Fiat-U4	27,000	
Acajutla gas	82,100	
Acajutla motores	150,000	777,900
Acajutla vapor	63,000	
Soyapango	16,200	28,300
GECSA	11,600	6,800
Holcim	25,900	
Inm Apopa Hilcasa	6,800	4,400
Inversiones Energéticas	100,200	560,400
Nejapa Power	143,100	376,500
Termopuerto	73,700	473,600
Textufile	42,500	171,300
<b>Total</b>	<b>755,700</b>	<b>2,404,100</b>

Fuente: (CEPAL, 2014).

La Generación termoeléctrica es el 43% de la generación eléctrica del país (Figura 2.8), y su participación es netamente de capital privado, empresas como Borealis, DUKE ENERGY y

grupo GECSA, son responsables de la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles (Cuadro 2.2), con 12 plantas generadoras de electricidad en total.

El petróleo crudo es utilizado en el proceso de refinación y la estructura de la oferta total de combustibles fósiles es aproximadamente: 70% importación y 30% refinado, estos porcentajes aplican solo a el petróleo que entra para combustibles, para la generación eléctrica depende de cada central termoeléctrica. El petróleo ingresa únicamente por vía marítima (por el puerto de Acajutla) y es almacenado en los tanques de la única planta de refinación de petróleo (que también está ubicada en Acajutla); los demás productos derivados de petróleo (gasolinas, GLP, asfaltos, etc.) pueden ingresar al país vía marítima o vía terrestre por cualquiera de las 7 fronteras aduanales de El Salvador (CNE, 2011).

El GLP se almacena en tanques a presión y luego se traslada a diferentes plantas para ser envasado en cilindros portátiles en diferentes presentaciones de venta del GLP; en total existen 14 plantas envasadoras que están funcionando en El Salvador (Figura 2.10).

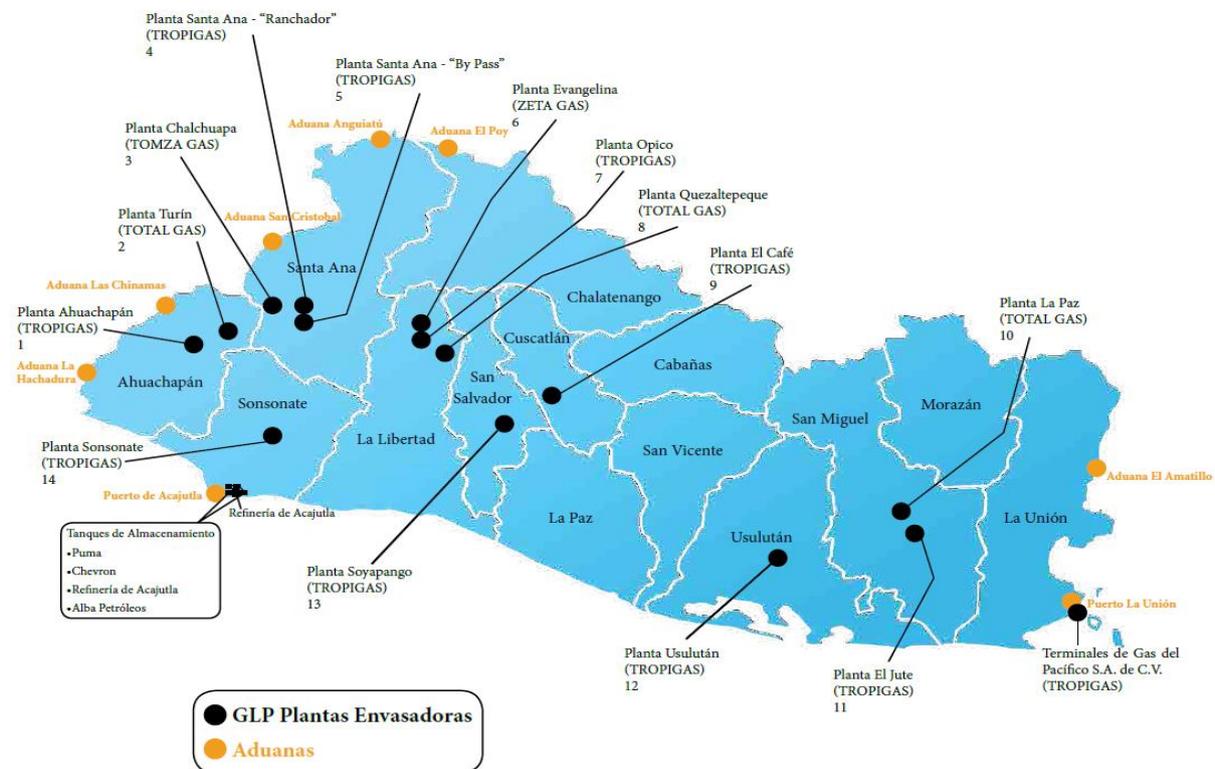


Figura 2.10. Ruta del petróleo y sus derivados en El Salvador. Fuente: (CNE, 2011)

Las gasolinas y el diésel (importado o refinado) son distribuidos entre aproximadamente 400 estaciones de servicio a nivel nacional (CNE, 2011).

Las estaciones termoeléctricas queman carbón, gasolina o gas natural para generar electricidad.

Las plantas a carbón gasolina o gas natural producen electricidad a partir de la combustión de estos combustibles fósiles, en una planta de generación por carbón por ejemplo, el carbón se apila en montones fuera de la estación y es alimentado a la planta por medio de bandas sin fin hacia pulverizadores que trituran el carbón hasta convertirlo en un polvo fino, luego grandes ventiladores impulsan el polvo de carbón en hornos gigantes donde se quema produciendo enormes cantidades de calor (Ontario Power Generation, 2014).

La temperatura de los hornos puede sobrepasar los 3000 °C, el calor alimenta al generador de vapor que transforma el agua en vapor de alta presión y alta temperatura. La gasolina y el gas natural se queman para generar calor y alimentar los generadores de vapor (Flury & Frischknecht, 2012).

El vapor circula por una serie de turbinas de vapor que impulsan un generador eléctrico para producir electricidad. El vapor de escape de las turbinas se refrigera, por condensación se convierte en agua y finalmente se devuelve al generador de vapor para recomenzar el proceso.

La disposición de desechos sólidos biodegradables es cada vez más un problema mayor en el mundo. Millones de toneladas de desperdicios sólidos biodegradables son llevados a rellenos sanitarios o quemados. Debido a las peligrosas emisiones de los procesos de combustión, la disminución de espacio en los rellenos sanitarios disponibles y otros problemas asociados a ambas formas de tratar los desechos, se ha incrementado el interés en la disposición final de desechos sólidos biodegradables. AES es una empresa que se dedica a la generación eléctrica en El Salvador y posee una central de tratamientos de desechos de 6 MW de capacidad instalada produciendo al año 28 GWh, a través de la producción de Biogás (Cuadro 2.3). Se cuenta además con otras plantas para la producción de biogás en El Salvador, ver sección 2.5.3.1.

*Cuadro 2.3. Capacidad de generación instalada y generación neta de electricidad por medio de biogás en El Salvador.*

<b>Térmica</b>	<b>Capacidad instalada KW</b>	<b>Generación neta (MWh)</b>
<b>Biogás</b>	6,400	28,000
<b>AES Nejapa</b>	6,400	28,000

Fuente: (CEPAL, 2014).

## b. Energía Geotérmica

La energía geotérmica posee muchas cualidades atractivas que provienen de su naturaleza renovable y exenta de combustibles fósiles, así como la habilidad de proporcionar energía de carga base y fiable a un costo relativamente bajo. Una vez una central geotérmica inicia operaciones, la misma genera una producción estable sin interrupción, usualmente durante varias décadas, a costos competitivos con otras opciones de generación de carga base, tales como el carbón vegetal. Los riesgos tecnológicos implicados son relativamente bajos; la generación de energía geotérmica a partir de recursos hidrotérmicos -fuentes subterráneas de vapor o fluidos calientes extraíbles- es una tecnología 100% establecida. Para plantas de tamaño mediano (cerca de 50 MW), los costos nivelados de generación están por lo regular entre USD 0.04 y 0.10 por cada kWh, lo que ofrece el potencial de un negocio de energía económicamente atractivo. El desarrollo de un recurso local de energía renovable brinda la oportunidad de diversificar fuentes de suministro de electricidad, así como de reducir el riesgo de futuras alzas a los precios debido al constante aumento en los costos de los combustibles (Gehringer & Loksha, 2012).

Respecto al recurso geotérmico, este es de utilización exclusiva para la generación de energía eléctrica, y aunque no es la principal fuente de energía, su participación abarca aproximadamente un cuarto de la generación de El Salvador (Figura 2.8), no obstante que las tecnologías de aprovechamiento de este recurso son de baja eficiencia a pesar de ser modernas (CNE, 2012).

Se produce electricidad proveniente de energía geotérmica en 24 países. Estados Unidos y Filipinas tienen la mayor capacidad instalada de energía geotérmica: aproximadamente 3,000 y 1,900 MW, respectivamente. Islandia y El Salvador generan hasta 25% de su energía eléctrica mediante recursos geotérmicos (Gehringer y Loksha, 2012).

La geotermia es una forma de energía renovable comercialmente comprobada que puede suministrar electricidad y calor de carga base que sean relativamente baratos y de baja huella de carbono, lo que reduce la dependencia de un país en los combustibles fósiles y sus emisiones de CO<sub>2</sub> (Gehringer y Loksha, 2012).

Existen diversos tipos de sistemas de generación de energía geotérmica, se puede enlistar las plantas energéticas tipo: Single Flash Steam, Double Flash Steam, Dry Steam y Binary Cycle (DiPippo, 2012).

Las plantas de vapor Single-flash son el pilar en la industria de energía geotérmica. La capacidad de una unidad puede ir desde 3 a 117 MW. Para tener una idea de la generación geotérmica una breve descripción del proceso puede darse de la siguiente forma:

Cuando los pozos geotérmicos producen una mezcla de vapor y líquido, una planta Single-flash es la forma relativamente más simple de convertir energía geotérmica en electricidad. Primero la mezcla es separada en las fases líquida y vapor con una pérdida mínima de presión. Esto se lleva a cabo en una vasija cilíndrica de presión tipo ciclónica, usualmente orientada con su eje en vertical, donde las dos fases se separan debido a la gran diferencia de densidad inherente a cada fase, el vapor pasa a un generador y este produce la electricidad. Una planta single-flash típica de 30MW necesita de 5 a 6 pozos de producción y de 2 a 3 pozos de inyección (DiPippo, 2012).

La Geo es la empresa responsable por la generación de electricidad mediante centrales geotérmicas, hoy en día cuenta con dos plantas generadoras, una en Ahuachapán y otra en Berlín en alegría, en el departamento de Usulután (Cuadro 2.4).

*Cuadro 2.4. . Capacidad de generación instalada y generación neta de electricidad por geotermia en El Salvador.*

<b>Geotérmica</b>	<b>Capacidad instalada KW</b>	<b>Generación neta (MWh)</b>
<b>Ahuachapán</b>	95,000	622,500
<b>Berlín</b>	109,400	821,400
<b>Total</b>	204,400	1,443,900

Fuente: (CEPAL, 2014).

Los sistemas que maneja son plantas de Doble flash y Ciclo Binario. También posee los derechos de concesión de los campos geotérmicos de San Vicente y de Chinameca, que actualmente se encuentran en fase de exploración y evaluación (LaGeo, 2016).

### c. Energía hidroeléctrica.

En los cursos naturales de agua, la energía hidráulica se disipa ya sea en remolinos, por erosión de las riberas y causes, por el choque y arranque de material de las rocas sueltas y en los ruidos del torrente entre otros. Para extraer esta energía y convertirla en energía mecánica utilizable, se precisa eliminar las pérdidas naturales creando un cauce artificial donde el agua fluya con pérdidas mínimas y finalmente, convertir la energía potencial disponible en energía mecánica por medio de máquinas apropiadas como turbinas o ruedas hidráulicas (Flury & Frischknecht, 2012).

El sector de generación eléctrica de El Salvador percibe su segunda mayor contribución de la hidroeléctrica; son las centrales hidroeléctricas las que generan el 30% de la energía que se produce (Figura 2.8), la entidad responsable por la generación de este tipo de energía renovable es la CEL, que para el 2014 y actualmente aun cuenta con las centrales 15 de septiembre, 5 de noviembre, Cerrón Grande y Guajoyo (Cuadro 2.5), además cabe mencionar la contribución minorista en este sector es por parte de CECSA que cuenta con varias pequeñas centrales (Cuadro 2.6).

*Cuadro 2.5. . Capacidad de generación instalada y generación neta de electricidad por centrales hidroeléctricas mayoristas en El Salvador.*

Central	Capacidad instalada KW	Generación neta (MWh)
15 de septiembre	180,000	587,700
5 de noviembre	100,000	524,800
Cerrón Grande	172,000	530,000
Guajoyo	19,800	70,200
<b>Total</b>	<b>472,600</b>	<b>1,713,000</b>

Fuente: (CEPAL, 2014).

Cuadro 2.6. Capacidad de generación instalada y generación neta de electricidad por centrales hidroeléctricas minoristas en El Salvador. La información del mercado minorista es estimada.

Central	Capacidad instalada KW	Generación neta (MWh)
Buhulú	700	3,800
Cucumacayán	2,300	13,000
Cutumay Camones	400	390
Milingo	800	3,200
Rio sucio	2,800	8,000
San Luis I	600	2,300
San Luis II	800	4,000
Sonsonate	200	1,000
De Matheu La Calera	1,500	5,000
Papalote	2,000	
Sensunapán Nahuizalco	2,800	15,000
<b>Total CECSA</b>	<b>8,600</b>	<b>35,690</b>

Fuente: (CEPAL, 2014).

#### d. Energía por Cogeneración eléctrica.

En términos generales la cogeneración es la producción combinada de calor y electricidad. En las plantas eléctricas por biomasa, la electricidad es producida casi con una eficiencia total, esto es, la relación entre la energía producida y el combustible alimentado, en las plantas eléctricas convencionales el rendimiento es generalmente muy bajo, debido a la gran cantidad de calor descargado a la atmósfera mediante torres de enfriamiento, lagos o ríos, que no se puede recuperar (Pew Center on Global Climate Change, 2011).

En El Salvador grupo CASSA es la compañía azucarera compuesta por los ingenios azucareros Chaparrastique y Central Izalco, además el ingenio el Ángel y el Ingenio La Cabaña por separado se dedican a la cogeneración, debido en su mayor parte a que el rubro al que se dedican tiene como subproducto calor remanente de los procesos de producción. Con un substancial 6% de la generación eléctrica (Figura 2.8) y con una capacidad de generación eléctrica instalada que representa el 11% (Figura 2.7) del total de El Salvador, esta forma de generar electricidad se

presenta también como una alternativa para disminuir la factura energética que se paga a nombre de los combustibles fósiles.

*Cuadro 2.7. Capacidad de generación instalada y generación neta de electricidad por cogeneración en El Salvador.*

Central	Capacidad instalada KW 2014	Generación neta (MWh) 2014	Capacidad instalada KW 2015	Generación neta (MWh) 2015
Ingenio Chaparrastique (CASSA)	16,000	5,000	107,000	262,700
Central Izalco (CASSA)	45,000	131,000		
Ingenio El Ángel	47,500	78,500	47,500	70,500
Ingenio la Cabaña	21,000	17,500	21,000	11,800
<b>Total</b>	<b>129,500</b>	<b>232,000</b>	<b>175,500</b>	<b>345,000</b>

Fuente: (CEPAL, 2015).

Una de las limitaciones de la cogeneración en la industria azucarera es que la producción de electricidad no es constante en el tiempo, sino que depende de la temporada de zafra. Lo que significa pérdidas si las calderas utilizadas para la cogeneración, no son alimentadas con otra fuente de biomasa que no sea el bagazo de caña. Es por ello que se utilizan otras fuentes de biomasa como leña o desechos orgánicos, por ejemplo en el Cuadro 2.7 se puede observar un incremento de un 30% en la generación de electricidad para 2015 con respecto a la producción del año 2014. El King Grass es otra alternativa para la alimentación de las calderas de estos ingenios, al ser una materia prima que se puede destinar solo para la generación de electricidad y calor, su rendimiento es mejor pues no es residuo como el bagazo de la caña, u otros desechos orgánicos, además de que se puede garantizar un flujo continuo durante el año de biomasa a la caldera.

En El Salvador el proceso de modernización, el crecimiento económico. La urbanización, el crecimiento demográfico y el acceso cada vez amplios de la población a los servicios públicos aumentaron el consumo de energía eléctrica y de los derivados del petróleo

La relación entre el uso de la energía y el Producto Interno Bruto (PIB) muestran una fuerte correlación, lo cual indica que la evolución de la economía, medida por el PIB, en el tiempo es muy similar al de la energía.

Por otro lado, El Salvador se ubica en el grupo de países con Índice de Desarrollo Humano (IDH) medio, según la categorización de las Naciones Unidas (*PNUD, 2007*), con una esperanza media de vida al nacer de 71.3 años en 2007, una tasa de alfabetización de adultos de 80.6% y un PIB per cápita de US\$3,336 (en 2007, banco mundial) (CNE, 2012).

Si se compara el PIB, el consumo per cápita de energía primaria y los índices de desarrollo humano (IDH) se encuentra que hay una correlación entre ellos, y está ampliamente reconocido que la energía es un elemento vital en la calidad de vida del ser humano y que tiene un papel central en los procesos de desarrollo de las naciones.

El Cuadro 2.8 muestra el aporte a la capacidad de generación eléctrica instalada y la generación eléctrica neta por sectores público y privado.

*Cuadro 2.8. Capacidad de generación instalada y generación neta de electricidad de los sectores público y privado en El Salvador.*

Sector	Capacidad instalada KW	Generación neta (MWh)
<b>Público</b>	472,600	1,713,000
<b>Privado</b>	1,089,600	4,080,000
<b>Total</b>	1,562,200	5,793,000

Fuente (CEPAL, 2014).

El Cuadro 2.9 muestra el aporte a la capacidad de generación eléctrica y la generación eléctrica neta de las empresas productoras mayoristas y minoristas.

*Cuadro 2.9. Capacidad de generación instalada y generación neta de electricidad por sector en El Salvador.*

Contribución	Capacidad instalada KW	Generación neta (MWh)
<b>Mayorista</b>	1,562,200	5,793,000
<b>Minorista</b>	21,300	83,690
<b>Total</b>	1,583,500	5,876,690

Fuente: (CEPAL, 2014).

La aportación del sector privado a la capacidad de generación eléctrica es del 70% del mercado mientras que el aporte de las empresas minoristas de generación eléctrica es del 1.34%. La generación a partir de Biogás es del 0.48%, la generación eléctrica a partir de las tecnologías de cogeneración representa un 4% del total de la oferta energética producida en El Salvador.

### 2.3 Cambio climático y energía.

Se entiende por clima la síntesis de las condiciones meteorológicas de una zona geográfica durante un período de tiempo dado, o dicho de otra manera, es una representación del tiempo atmosférico medio (*Méndez de Vigo y Torrego, 2000*).

Un estado climático es independiente de cualquier estado meteorológico instantáneo, las condiciones meteorológicas varían continuamente, sin embargo a escala de tiempo de la vida humana, el clima en un lugar determinado, permanece prácticamente constante.

Los cambios experimentados por el clima a lo largo del tiempo, como resultado de procesos naturales se denominan variabilidad del clima.

La principal causa natural de estos cambios son las modificaciones en el balance entre la energía solar absorbida y emitida por la Tierra (forzamiento radiativo), factor responsable de la temperatura media del planeta.

Las variaciones en el clima afectan a estos sistemas provocando una serie de cambios en los mismos, que a su vez, influyen en el clima. Esto se conoce como procesos de retroalimentación, que pueden ser positivos (amplificando la perturbación inicial) o negativos (atenuando o anulando dicha perturbación) (*Méndez de Vigo y Torrego, 2000*).

#### 2.3.1. Contaminación del aire. Emisiones de gases del efecto invernadero: implicaciones del sector energético.

A la Tierra llega una cantidad de radiación solar, de la cual parte es reflejada al espacio (aproximadamente 1/3) y el resto es absorbida por los componentes del sistema climático.

Parte de las radiaciones absorbidas y emitidas por la Tierra quedan retenidas de forma similar a como sucedería en un invernadero, cuyo funcionamiento se basa en que el cristal que recubre las plantas deja pasar la radiación del Sol, y en cambio retiene la radiación emitida por el suelo y las plantas, creando un ambiente más cálido en el interior que en el exterior.

La atmosfera es prácticamente transparente para la radiación procedente del sol, sin embargo la radiación de onda larga es absorbida por los **gases de efecto invernadero** (GEI).

Cambio climático y energía son dos caras de la misma moneda: buena parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provienen del sector energético en sus diversas formas. Es por ello que la solución al problema pasa por un cambio fundamental en el sistema energético, que en gran medida solo será posible con una mayor participación de las renovables en el mix de energías.

Según el colegio oficial de físicos de España, los Gases de Efecto Invernadero por orden de importancia son: 1. Vapor de agua, 2. Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), 3. Metano (CH<sub>4</sub>), 4. Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O), 5. Ozono (O<sub>3</sub>) troposférico, 6. Clorofluorocarbonos (CFC's), 7. Hidrofluorocarburos (HFC's), 8. Perfluoro-carburos (PFC's), 9. Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).

A partir de mediados del siglo XVIII, tras la Revolución Industrial, las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera han ido aumentando sin control debido fundamentalmente a la utilización de combustibles fósiles.

En la reacción química de combustión de estos compuestos además de energía en forma de calor y otros productos, se produce CO<sub>2</sub> que se emite a la atmósfera. El CO<sub>2</sub> puede no ser el más dañino de todos los GEI, sin embargo es el que posee mayor presencia en la atmosfera con respecto a los otros GEI, casi el 80%, por lo que su influencia en el cambio climático es muy importante.

La Figura 2.11 muestra como las emisiones de CO<sub>2</sub> de El Salvador a lo largo de los años, han ido en aumento, sin embargo es de notarse una leve disminución de emisiones a finales de la década pasada.

La Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) reporta la contribución de CO<sub>2</sub> de casi todos los países del mundo. **El Salvador** contribuye en casi 7 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmosfera (IEA, 2015), debido a ser un país pequeño y porque históricamente la energía primaria y secundaria que utiliza es mayormente de fuentes renovables, sumado a su carencia de fuentes de combustibles fósiles o una industria, además de las convencionales (transporte y electricidad), que demande su uso. Esto frente a los más de 32,000 millones de

toneladas de CO<sub>2</sub> que se producen por la quema de combustibles fósiles a nivel mundial representa un 0.021% del total emisiones de CO<sub>2</sub> (IEA, 2015).

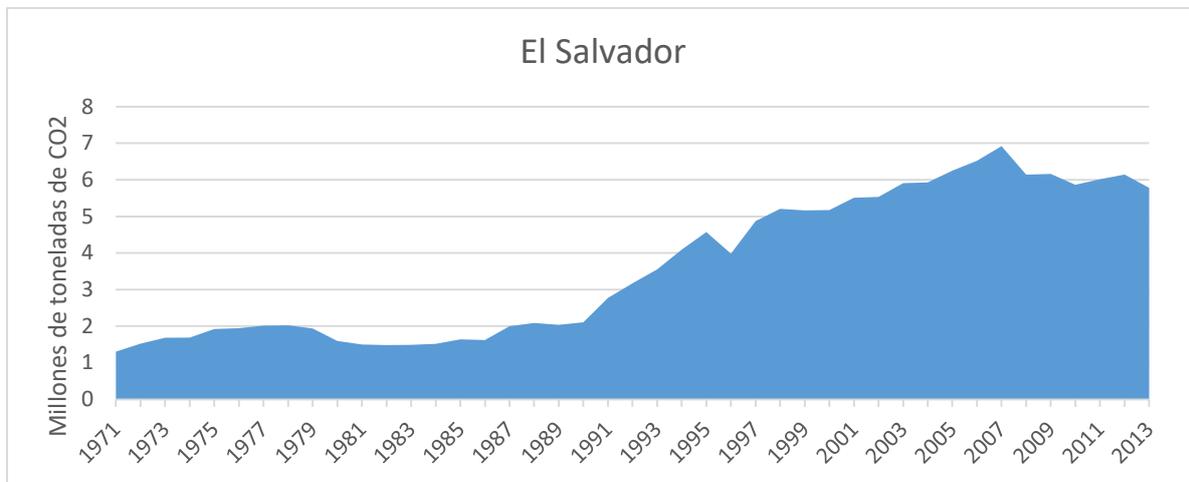


Figura 2.11. Histórico de la aportación de emisiones de CO<sub>2</sub> de El Salvador. Fuente: (IEA, 2015)

La figura A-1 anexo A, muestra un histórico de emisiones de CO<sub>2</sub> por regiones en el mundo, según su subscripción o no a la organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), se observa que la tendencia en la mayoría de regiones es al aumento de emisiones de CO<sub>2</sub>, siendo los mayores generadores de CO<sub>2</sub> en la actualidad, los países de la región OCDE de américa, china y los países europeos.

La figura A-2 anexo A, muestra un histórico de las emisiones de los países de Centroamérica, siendo Guatemala el que lidera la región con más de 12 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> que son enviadas a la atmósfera. Según la IEA la región no subscripta a la OCDE de américa a la cual pertenece El Salvador y el resto de Centroamérica emitió 1127.6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> por quema de combustibles para el 2013, una cifra que representa el 3.5% de las emisiones mundiales.

La figura A-3 anexo A, muestra las emisiones de CO<sub>2</sub> por sectores energéticos por regiones en el mundo, siendo la producción de electricidad la que mayor aporte genera en todo el mundo. La figura A-4 anexo A, muestra las emisiones de CO<sub>2</sub> por sector energético para Centroamérica, la gráfica muestra que la mayor contribución de CO<sub>2</sub> proviene del sector transporte en los países de la región, seguido por el sector de producción de electricidad y calor, esto puede ser explicado a que la mayor parte de la generación eléctrica del istmo proviene de las centrales hidroeléctricas, que contribuyen de forma mínima a las emisiones.

### 2.3.2. Cambio Climático, proyecciones energéticas y renovables.

Los dirigentes de empresas, legisladores y líderes del sector energético actuales necesitan poder acceder a fuentes de investigación sólidas que les permita desenvolverse en el mapa cambiante de la energía. Necesitan información e ideas para poder formular sus decisiones y conseguir aventajar a la competencia. Los estudios sobre energía contribuyen a guiar el desarrollo internacional de las ideas y fomentar acciones a nivel nacional para que la energía sostenible se haga realidad

Un futuro sostenible implica reforzar el ahorro energético y apoyar las tecnologías energéticas con bajas o nulas emisiones de CO<sub>2</sub>, sobre todo las renovables.

Las fuentes de energía renovables ofrecen muchos beneficios, como la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, reducción de importación de combustibles fósiles y la creación de nuevas fuentes de empleo, por mencionar algunos. Sin embargo también se presentan desafíos, técnicos y económicos para la generación de energía mediante fuentes renovables.

Diferentes organismos e instituciones internacionales han desarrollado escenarios energéticos sostenibles. Entre dichos organismos destacan la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2011), el Instituto de Prospectiva Tecnológica de la Comisión Europea (IPTS), el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y el consejo mundial de la Energía (CME) (WEC, 2016).

Están reescribiéndose muchos de los principios más arraigados del sector energético. Grandes importadores están convirtiéndose en exportadores, mientras países definidos desde hace tiempo como grandes exportadores de energía están liderando el crecimiento de la demanda mundial. Se está demostrando que una correcta combinación de políticas y tecnologías puede debilitar la conexión existente entre el crecimiento económico, la demanda de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía. El auge del petróleo y del gas de fuentes no convencionales, y de las energías renovables está transformando nuestra concepción de la distribución de los recursos energéticos mundiales (IEA, 2011).

Algunos hechos están moldeando el mundo energético como lo conocemos hoy en día:

- El centro de gravedad de la demanda de energía está trasladándose decididamente hacia las economías emergentes, en particular China, India y Oriente Medio, que llevan a aumentar un tercio la utilización mundial de la energía.
- Las abultadas diferencias del precio de la energía entre regiones han suscitado el debate sobre el papel de la energía en la promoción o frustración del crecimiento económico.
- Los países pueden amortiguar el impacto de los elevados precios promoviendo mercados de la energía más eficientes, competitivos e interconectados
- La capacidad de la tecnología para liberar nuevos tipos de recursos, como el petróleo ligero de formaciones compactas (PLFC) y los yacimientos de aguas ultra profundas, y para mejorar las tasas de recuperación de los yacimientos existentes está haciendo subir las estimaciones sobre la cantidad de petróleo que queda por producir.
- Las energías renovables representan casi la mitad del incremento de la generación eléctrica mundial en una proyección realizada hasta 2035, y las fuentes variables – eólica y solar fotovoltaica– constituyen hasta el 45% de la expansión en renovables (IEA, 2011).

Las fuentes de energías renovables, son casi el 30% de la capacidad energética mundial instalada, y más del 20% de la generación mundial (Cuadro 2.10). La energía renovable se ha convertido en un gran negocio, en 2015 un record de 286 mil millones de dólares ha sido invertido para aumentar la capacidad energética mundial instalada. La combinación de mejoras en la tecnología reduce los costos de instalación, operación y de mantenimiento (WEC, 2016).

Para 2015, alrededor del mundo, 164 países contaban con políticas que favorecen la generación energética a partir de Fuentes renovables, de los cuales 95 son países en vías de desarrollo, incluyendo a El salvador.

En el Cuadro 2.10 se observa además como en un periodo de 10 años 2004-2014 para la energía renovable se ha incrementado la capacidad instalada a nivel mundial en un 50% ( de 2,986 a 4,468 GW), de estos la capacidad instalada por biomasa incremento en un 139 % (39 a 93 GW).

Cuadro 2.10. Generación energética y adiciones a la capacidad de potencia por fuente de generación eléctrica a nivel mundial. 2004-2014.

Fuente	Capacidad Instalada 2004 (GW)	Capacidad Instalada 2004 (%)	Capacidad Instalada 2014 (GW)	Capacidad Instalada 2014 (%)	Crecimiento Promedio Anual (%)	Generación (TWh) 2014	Generación (%) 2014	Tiempo de Operación equivalente promedio (h)
<b>Hidro</b>	715	18.8	1,055	17.07	4	3,898	16.60	3,694
<b>Eólica</b>	48	1.3	370	5.99	23	728	3.10	1,967
<b>Biomasa</b>	39	1	93	1.50	9	423	1.80	4,545
<b>Solar</b>	3	0.1	181	2.93	51	211	0.90	1,168
<b>Geo</b>	9	0.2	13	0.21	4	94	0.40	7,225
<b>Total Renovable</b>	814	21.4	1,712	27.70	8	5,354	22.80	3,127
<b>Total no Renovable</b>	2,986	78.6	4,468	72.30	4	18,127	77.20	4,057
<b>Total</b>	3,800	100	6,180	100	5	23,481	100	3,799

Fuente: (U.S. EIA, 2016)

## 2.4 Biomasa y Biocombustibles en la actualidad.

La agricultura y la energía siempre han estado conectados muy de cerca, sin embargo la naturaleza de esa relación ha cambiado con el tiempo. La agricultura siempre ha sido una fuente de energía, y la energía es una entrada de gran importancia en la producción agrícola moderna. La demanda de materia prima agrícola para biocombustibles es un factor determinante en el mercado agrícola y para la agricultura mundial.

Biomasa es el término referido a la materia existente en todos los organismos biológicos, pero en el contexto energético se usa comúnmente para nombrar a la materia sólida que se puede cultivar o recolectar de organismos biológicos, esencialmente de plantas y desechos orgánicos. La mayoría de los componentes de la biomasa incluyen azúcar, almidón y aceites producidos por plantas o animales (Davis, 2014).

La biomasa puede entonces obtenerse de ya sea de cultivos dedicados para ese fin como los de cultivos de ciclo de vida corta, o de desechos orgánicos.

### 2.4.1. Fuentes de biomasa

Las fuentes de biomasa que pueden ser usadas para la producción de energía cubren un amplio rango de materiales y fuentes: los residuos de la industria forestal y la agricultura, los desechos urbanos y las plantaciones energéticas, se usan, generalmente, para procesos modernos de conversión que involucran la generación de energía a gran escala, enfocados hacia la sustitución de combustibles fósiles (FOCER, 2002).

#### a. Plantaciones energéticas

Estas son grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su período de cosecha varía entre los tres y los diez años. También se utilizan arbustos que pueden ser podados varias veces durante su crecimiento, para extender la capacidad de cosecha de la plantación.

Existen también muchos cultivos agrícolas que pueden ser utilizados para la generación de energía: caña de azúcar, maíz, sorgo y trigo. Igualmente, se pueden usar plantas oleaginosas

como palma de aceite, girasol o soya y algunas plantas acuáticas como Jacinto de agua o las algas, para producir combustibles líquidos como el etanol y el biodiesel.

Adicionalmente, este tipo de cultivos sirve para controlar la erosión y la degradación de los suelos; además puede proveer otros beneficios a los agricultores. Una granja típica, usualmente, sólo genera uno o dos productos de mayor valor comercial como maíz, café, leche o carne. El ingreso neto de ello es, a menudo, vulnerable a las fluctuaciones del mercado, al aumento del costo en los insumos, a las variaciones climáticas y a otros factores. Dado que las plantas de generación de energía requieren un suministro estable de combustible, los cultivos asociados a ellas pueden proveer un ingreso permanente a los granjeros que decidan diversificar su producción.

La principal limitante para este tipo de plantaciones está en la escala, pues se requieren grandes extensiones de tierra para lograr una producción de energía rentable. Por esta razón, son factibles cuando se desarrollan con algún tipo de producción agrícola paralela, como por ejemplo, el maíz, la caña de azúcar y la palma de aceite (FOCER, 2002).

#### b. Residuos forestales

Los residuos de procesos forestales son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco explotada en el área centroamericana. Se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20%. Se estima que un 40% es dejado en el campo, en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho mayor, y otro 40% en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín.

La mayoría de los desechos de aserrío son aprovechados para generación de calor, en sistemas de combustión directa; en algunas industrias se utilizan para la generación de vapor. Los desechos de campo, en algunos casos, son usados como fuente de energía por comunidades aledañas, pero la mayor parte no es aprovechada por el alto costo del transporte.

#### c. Desechos industriales

La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía, los provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpa) cuyo tratamiento como desechos representan un costo

considerable para la industria. Estos residuos son sólidos y líquidos con un alto contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos (FOCER, 2002).

#### d. Desechos urbanos

Los centros urbanos generan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo: residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras. La mayoría de los países centroamericanos carecen de adecuados sistemas para su procesamiento, lo cual genera grandes problemas de contaminación de suelos y cuencas; sobre todo por la inadecuada disposición de la basura y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación. Por otro lado, la basura orgánica en descomposición produce compuestos volátiles (metano, dióxido de carbono, entre otros) que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Estos compuestos tienen un considerable valor energético que puede ser utilizado para la generación de energía “limpia”. En el corto y mediano plazo, la planificación urbana deberá incluir sistemas de tratamiento de desechos que disminuyan eficazmente las emanaciones nocivas de los desechos al ambiente, dándoles un valor de retorno por medio del aprovechamiento de su contenido energético, pues aproximadamente el 80% de toda la basura orgánica urbana puede ser convertida en energía.

#### e. Desechos agrícolas

La agricultura genera cantidades considerables de desechos (rastros): se estima que, en cuanto a desechos de campo, el porcentaje es más del 60%, y en desechos de proceso, entre 20% y 40%.

Al igual que en la industria forestal, muchos residuos de la agroindustria son dejados en el campo. Aunque es necesario reciclar un porcentaje de la biomasa para proteger el suelo de la erosión y mantener el nivel de nutrientes orgánicos, una cantidad importante puede ser recolectada para la producción de energía. Ejemplos comunes de este tipo de residuos son el arroz, el café y la caña de azúcar. Los campos agrícolas también son una fuente importante de leña para uso doméstico: más del 50% del volumen total consumido.

Por otro lado, las granjas producen un elevado volumen de “residuos húmedos” en forma de estiércol de animales. La forma común de tratar estos residuos es esparciéndolos en los campos

de cultivo, con el doble interés de disponer de ellos y obtener beneficio de su valor nutritivo. Esta práctica puede provocar una sobre fertilización de los suelos y la contaminación de las cuencas hidrográficas.

## 2.4.2. Características de la biomasa

La forma en cómo se procesará la biomasa para determinar el proceso de conversión más adecuado depende de ciertas características físicas y químicas que posee la biomasa, desde el tipo de biomasa que se tiene, hasta su composición y propiedades inherentes de la biomasa.

### 2.4.2.1. Tipo de biomasa

Los recursos biomásicos se presentan en diferentes estados físicos que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular. Por ejemplo, los desechos forestales indican el uso de los procesos de combustión directa o procesos termo-químicos; los residuos animales indican el uso de procesos anaeróbicos (bioquímicos), etc.

Cuadro 2.11. Estados Típicos de la Biomasa. Fuente (FOCER, 2002).

Tipo de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos forestales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Restos de aserrado: corteza, aserrín, astillas</li> <li>• Restos de ebanistería, aserrín, trozos, astillas</li> <li>• Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polvo sólido, Humedad (H) &gt; 50%</li> <li>• Polvo sólido H 30-40%</li> <li>• Polvo sólido H &gt;55%</li> </ul>
Residuos Agropecuarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cáscara y pulpa de frutas y vegetales</li> <li>• Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café)</li> <li>• Estiércol</li> <li>• Residuos de cosechas: tallos y hojas, cáscaras, maleza y pastura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sólido alto contenido de humedad H &lt; 25%</li> <li>• Sólidos, alto contenido de humedad H &gt;55%</li> </ul>
Residuos industriales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulpa y cáscara de frutas y vegetales</li> <li>• Residuos de procesamiento de carnes</li> <li>• Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales</li> <li>• Grasas y aceites vegetales</li> <li>• Bagazo de caña</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sólido con contenido de humedad moderada</li> <li>• Sólido, alto contenido de humedad</li> <li>• Líquido con alto contenido de sólidos suspendidos</li> <li>• Líquido, grasoso</li> <li>• Sólido, 12 % H a 55 % H</li> </ul>
Residuos Urbanos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aguas negras</li> <li>• Desechos orgánicos (cáscara de vegetales)</li> <li>• Basura orgánica (madera)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Líquido</li> <li>• Sólido alto contenido de humedad</li> <li>• Sólido alto contenido de humedad.</li> </ul>

#### 2.4.2.2. Composición química y física

Las características químicas y físicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar; por ejemplo, los desechos animales producen altas cantidades de metano, mientras que la madera puede producir el denominado “gas pobre”, que es una mezcla rica en monóxido de carbono (CO). Por otro lado, las características físicas influyen en el tratamiento previo que sea necesario aplicar.

#### 2.4.2.3. Contenido de humedad (H.)

El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. Para la mayoría de los procesos de conversión energética es imprescindible que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30%. Muchas veces, los residuos salen del proceso productivo con un contenido de humedad muy superior, que obliga a implementar operaciones de acondicionamiento, antes de ingresar al proceso de conversión de energía.

#### 2.4.2.4. Porcentaje de cenizas

El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza y su composición, pues, en algunos casos, ésta puede ser utilizada; por ejemplo, la ceniza de la cascarilla de arroz es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado (FOCER, 2002).

#### 2.4.2.5. Poder calórico

El contenido calórico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa. Su poder calórico está relacionado directamente con su contenido de humedad. Un elevado porcentaje de humedad reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado se usa para evaporar el agua y no se aprovecha en la reducción química del material.

#### 2.4.2.6. Densidad aparente

Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, bajo condiciones dadas. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas. Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión, y eleva los costos del proceso.

#### 2.4.2.7. Recolección, transporte y manejo

Las condiciones para la recolección, el transporte y el manejo en planta de la biomasa son factores determinantes en la estructura de costos de inversión y operación en todo proceso de conversión energética. La ubicación del material con respecto a la planta de procesamiento y la distancia hasta el punto de utilización de la energía convertida, deben analizarse detalladamente para lograr un nivel de operación del sistema por encima del punto de equilibrio, con relación al proceso convencional (FOCER, 2002).

#### 2.4.3. Biomasa en El Salvador

Se han realizado diversos estudios sobre el aprovechamiento energético de la biomasa en El Salvador. Entre los desechos utilizados como biomasa en El Salvador, se pueden mencionar los residuos agroindustriales (Berríos y Castro, 1997), residuos agrícolas (Dominguez et al., 2000), estiércol de animal (Ortez y Zelada, 2010), residuos forestales, residuos de las industrias de papel y alimenticia, desechos sólidos municipales, lodos de aguas residuales y biogás producto de la digestión de desechos agrícolas o desechos sólidos biodegradables municipales (AES Nejapa), entre otros. Todos estos materiales pueden ser convertidos en formas de energía útil (Bioenergía) para calentamiento, electricidad y combustible para transporte.

Los **biocombustibles** contienen componentes derivados a partir de biomasa, es decir, organismos recientemente vivos o sus desechos metabólicos. Los biocomponentes actuales proceden habitualmente del azúcar, trigo, maíz o semillas oleaginosas entre otros.

La **Bioenergía** es la energía que se puede extraer de cualquier fuente de biomasa. Existen diferentes formas de procesar la biomasa para obtener biocombustibles y bioenergía (El Baasam, 2010).

#### 2.4.4. Procesos de conversión de la biomasa

Antes de que la biomasa pueda ser usada para fines energéticos, tiene que ser convertida en una forma más conveniente para su transporte y utilización. A menudo, la biomasa es convertida en formas derivadas tales como carbón vegetal, briquetas, gas, etanol, biodiésel y electricidad.

Las tecnologías de conversión incluyen desde procesos simples y tradicionales, como la producción de carbón vegetal en hogueras bajo tierra; hasta procesos de alta eficiencia como la dendro-energía y la cogeneración.

A continuación se presentan los procesos de conversión de biomasa más relevantes, los cuales se pueden clasificar en tres categorías:

- Procesos de combustión directa.
- Procesos termo-químicos.
- Procesos bio-químicos.

##### 2.4.4.1. Procesos de combustión directa

Esta es la forma más antigua y más común, hasta hoy, para extraer la energía de la biomasa. Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, como por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. Además, éste se puede aprovechar en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad.

La combustión directa es la tecnología establecida para convertir biomasa en calor a escala comercial. Los gases calientes de combustión producidos por la quema de biomasa sólida en condiciones controladas a veces son utilizados directamente para secar otros productos, pero normalmente son conducidos a un intercambiador de calor para producir aire caliente, agua caliente o vapor.

El tipo de quemador más implementado utiliza una parrilla que sostiene un lecho de combustibles, mientras lo mezcla con Aire que se utiliza para la combustión. Usualmente la parrilla se mueve de manera que la biomasa pueda ser añadida por un lado y progresivamente llegue hasta un sistema de remoción de cenizas. Diseños más sofisticados permiten que el

proceso total de combustión pueda ser dividido en tres etapas principales; el secado, el encendido y la combustión de los componentes volátiles y el agotamiento por carbonización, con condiciones controladas separadas para cada actividad (El Baasam, 2010).

Las parrillas utilizadas en hornos son muy confiables y pueden tolerar un gran rango de calidades de combustibles en lo referente a cantidad de humedad y tamaño de partícula. Esto además de ser controlables y eficientes, lo que hace que se logre una reducción en las emisiones.

Se han desarrollado tecnologías con lecho fluidizado, que es otra alternativa a los sistemas de parrilla. Un lecho fluidizado implica que el combustible es quemado en un lecho de materiales inertes, donde una corriente de aire atraviesa el lecho, suspende el material inerte y es usada para quemar parcialmente la biomasa. En este caso se adiciona una corriente secundaria de aire para permitir la combustión total, logrando de esta forma una rápida transferencia de calor y minimizando las variaciones debido a la calidad del combustible.

Los procesos tradicionales de este tipo, generalmente, son muy ineficientes porque mucha de la energía liberada se desperdicia y pueden causar contaminación cuando no se realizan bajo condiciones controladas. Estos resultados se podrían disminuir considerablemente con prácticas mejoradas de operación y un diseño adecuado del equipo. Por ejemplo, secar la biomasa antes de utilizarla reduce la cantidad de energía perdida por la evaporación del agua y para procesos industriales, usar pequeños pedazos de leña y atender continuamente el fuego supliendo pequeñas cantidades resulta en una combustión más completa y, en consecuencia, en mayor eficiencia. Asimismo, equipos como los hornos se pueden mejorar con la regulación de la entrada del aire para lograr una combustión más completa y con aislamiento para minimizar las pérdidas de calor.

**Densificación:** esta se refiere al proceso de compactar la biomasa en “briquetas”, para facilitar su utilización, almacenamiento y transporte. Las briquetas son para usos domésticos, comerciales e industriales. La materia prima puede ser aserrín, desechos agrícolas y partículas de carbón vegetal, el cual se compacta bajo presión alta.

#### 2.4.4.2. Procesos termo-químicos

Estos procesos transforman la biomasa en un producto de más alto valor, con una densidad y un valor calorífico mayor, los cuales hacen más conveniente su utilización y transporte.

Cuando la biomasa es quemada bajo condiciones controladas, sin hacerlo completamente, su estructura se rompe en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos que pueden ser usados como combustible para generar calor y electricidad. Dependiendo de la tecnología, el producto final es un combustible sólido, gaseoso, o combustible líquido. El proceso básico se llama pirólisis o carbonización.

##### a. Producción de carbón vegetal (pirólisis)

Este proceso es la forma más común de la conversión termo-química de temperatura mediana. La biomasa se quema con una disponibilidad restringida de aire, lo cual impide que la combustión sea completa. El residuo sólido se usa como carbón vegetal, el cual tiene mayor densidad energética que la biomasa original, no produce humo y es ideal para uso doméstico. Usualmente, este carbón es producido de la madera, pero también se usan otras fuentes como cáscara de coco y algunos residuos agrícolas (FOCER, 2002).

Pirólisis es la degradación térmica de material carbónico en la ausencia de aire u oxígeno a altas temperaturas. Una reacción de pirólisis siempre produce gas, líquidos y sólidos, pero la cantidad de dichos productos se puede influenciar controlando la temperatura y el tiempo de residencia. La salida de productos puede ser maximizada controlando cuidadosamente las condiciones de la reacción.

##### b. Gasificación

Es el proceso termoquímico en el cual la materia prima se oxida parcialmente calentándola a una temperatura de 1200 °C, produciendo gas combustible estable. Por medio de una reacción exotérmica con oxígeno, una porción del carbón se convierte en gas. La reacción química normal que produce gas ocurre cuando el biocombustible remanente se expone a la alta temperatura y a la atmósfera pobre en oxígeno. El gas combustible resultante es principalmente monóxido de carbono, hidrógeno y metano, con pequeñas cantidades de hidrocarburos como etano y etileno. Estos gases combustibles se ven reducidos en cantidad por dióxido de carbono y nitrógeno si la fuente de oxígeno es aire. Debido a que el dióxido de carbono y el nitrógeno

no tienen capacidad calorífica, el potencial energético de la mezcla resulta muy bajo. De 4-6 MJ/Nm<sup>3</sup>. Esto es equivalente a un 10% a lo mucho 40% del valor por gas natural, usualmente de 32 MJ/Nm<sup>3</sup>, valor para el cual fueron creadas las turbinas y motores.

La composición y el valor calorífico del gas dependen de la biomasa utilizada, como por ejemplo: madera, cascarilla de arroz, o cáscara de coco. Existen diferentes tecnologías de gasificación y su aplicación depende de la materia prima y de la escala del sistema (Miles, 2011).

La gasificación tiene ciertas ventajas con respecto a la biomasa original:

- i. El gas producido es más versátil y se puede usar para los mismos propósitos que el gas natural;
- ii. Puede quemarse para producir calor y vapor y puede alimentar motores de combustión interna y turbinas de gas para generar electricidad;
- iii. Produce un combustible relativamente libre de impurezas y causa menores problemas de contaminación al quemarse. Sin embargo, la operación de gasificación es más complicada. En principio, un gasificador simple puede ser construido en talleres metalmecánicos convencionales, pero se requiere experiencia y un prolongado período de ajuste para llevar el sistema a sus condiciones óptimas de operación

#### 2.4.4.3. Procesos bio-químicos

Estos procesos utilizan las características bio-químicas de la biomasa y la acción metabólica de organismos microbiales para producir Biocombustibles gaseosos y líquidos. Son más apropiados para la conversión de biomasa húmeda que los procesos termo-químicos. En la sección 2.5 se hace una descripción más extensa de los biocombustibles resultantes de esta tecnología de conversión.

## 2.5 Biocombustibles

Los biocombustibles son combustibles líquidos mayormente utilizados para transporte, producido mediante diversos procesos termoquímicos y bioquímicos. Las formas predominantes son el etanol, a partir de la fermentación de azúcares, el biodiesel a partir de la esterificación de aceites de plantas y de animales y biogás (Figura 2.12).

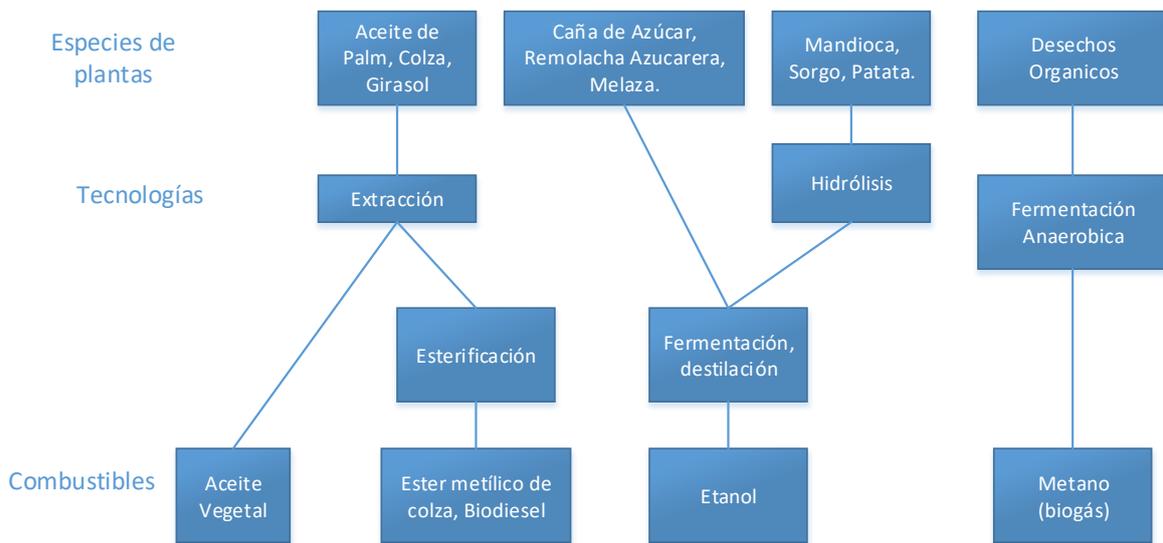


Figura 2.12. Tecnologías para la conversión de biomasa rica en aceites, azúcares y almidones (Davis, 2014)

### 2.5.1. Bioetanol

El Bioetanol o alcohol etílico es un líquido cuya forma química es  $C_2H_5OH$  (Figura 2.13), que se produce por la fermentación de cultivos agrícolas que contienen azúcares, almidones o celulosas.

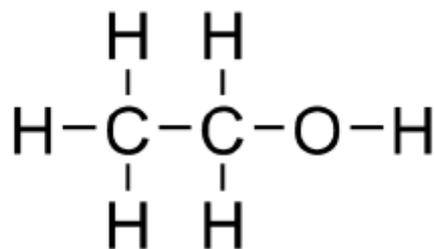


Figura 2.13. Estructura química del Bioetanol

Además de usarse con fines culinarios (bebida alcohólica), el bioetanol se utiliza ampliamente en muchos sectores industriales y en el sector farmacéutico, como excipiente de algunos medicamentos y cosméticos (es el caso del alcohol antiséptico 70° GL y en la elaboración de

ambientadores y perfumes). Es un buen disolvente, y puede utilizarse como anticongelante. También es un desinfectante (Fernández et al, 2015).

Su mayor potencial bactericida se obtiene a una concentración de aproximadamente el 70%. La industria química lo utiliza como compuesto de partida en la síntesis de diversos productos, como el acetato de etilo (un disolvente para pegamentos, pinturas, etc.), el éter dietílico, etc. También se aprovechan sus propiedades desinfectantes (Fernández et al, 2015).

El bioetanol se emplea como combustible industrial y doméstico. En el uso doméstico se emplea el alcohol de quemar. Éste, además, contiene compuestos como la pirovidos exclusivamente en alcohol. Esta última aplicación se extiende también cada vez más en otros países para cumplir con el protocolo de Kyoto.

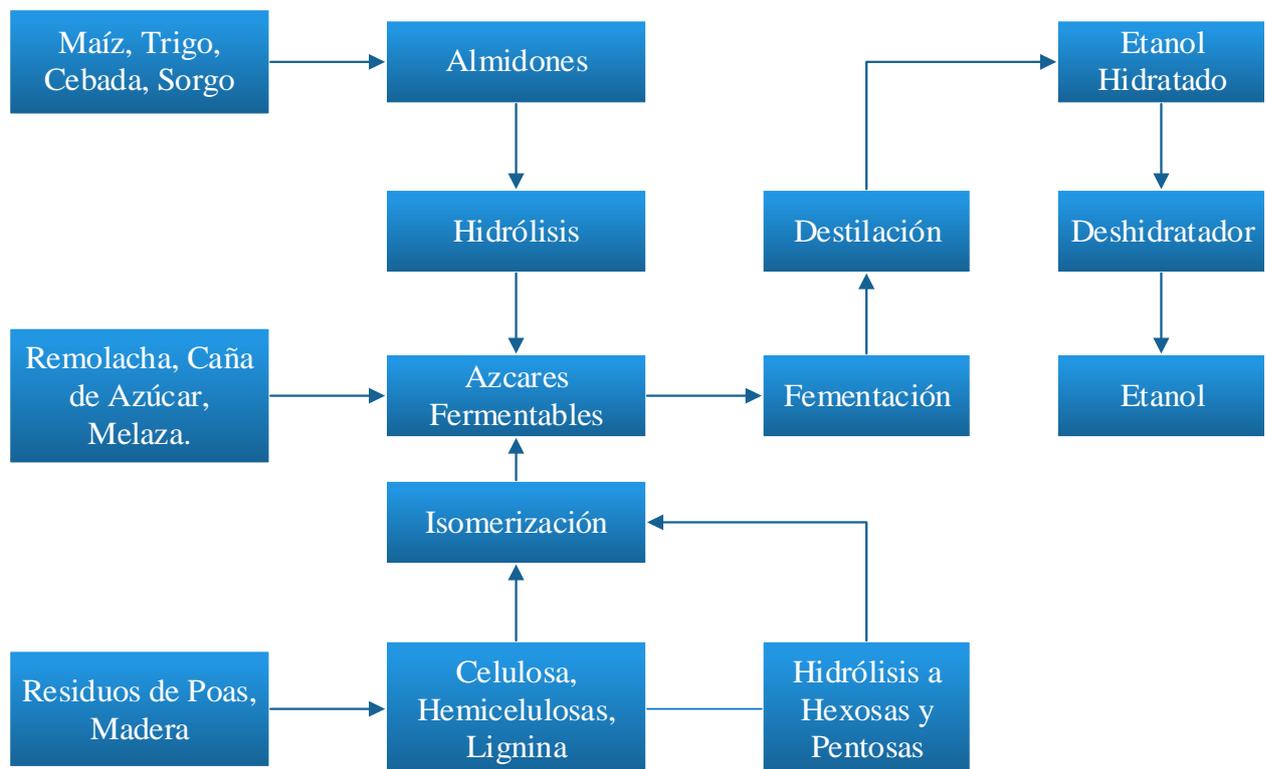


Figura 2.14 Proceso de transformación de Materias Primas diversas en bioetanol. Fuente: (Fernández et al, 2015)

#### 2.5.1.1. Materia prima para la producción de bioetanol

El Bioetanol puede obtenerse a partir de tres tipos de materias primas (Fernández et al, 2015).

- a) **Cultivos y materiales con alto contenido de sacarosa:** Como la caña de azúcar, la remolacha azucarera, el sorgo dulce y las melazas, entre otros.
- b) **Cultivos amiláceos con alto contenido de almidón:** Como los cereales (maíz, sorgo granífero, trigo y cebada) o raíces y tubérculos (mandioca, papa, batata, etc.), o de inulina (topinambur, agave, ñame, etc.).
- c) **Materias primas y cultivos con alto contenido de celulosa (lignocelulósicos):** Cuyos carbohidratos se encuentran en formas más complejas (madera, residuos agrícolas y forestales, cultivos lignocelulósicos, material herbáceo, etc.)

#### 2.5.1.2. Producción de Bioetanol en El Salvador

El Salvador tuvo una primera experiencia con la producción de etanol a partir de la caña de azúcar en los años 80. Se importaron cuatro destilerías de Venezuela; sin embargo, sólo dos de ellas fueron instaladas y operaron por un corto período. La experiencia fracasó por diversos motivos como la caída en los precios del petróleo.

En la actualidad, el único ingenio azucarero que se encuentra produciendo etanol es el ingenio La Cabaña, en el cual se reactivó una destilería de más de 19 años de antigüedad.

Tiene una capacidad de 120 mil litros diarios e inició sus operaciones en la zafra 2005-2006. La planta fabrica etanol a partir de mieles finales (melazas) propias y compradas a otros ingenios. Con la melaza procesada en el ingenio, sólo podría operar con una capacidad de 60,000 litros.

Dos plantas deshidratadoras de etanol American Renewable Fuel Suppliers (Suministros de Combustibles Renovables Americanos, ARFS) y gasohol, están funcionando en El Salvador. Estas empresas importan etanol hidratado (alcohol puro hidratado) de países productores como Brasil y China (entre otros) y realizan el proceso de deshidratación para luego vender el etanol anhidro a mercados como Estados Unidos y Europa, aprovechando las ventajas fiscales que se dan a El Salvador por medio de los tratados internacionales como el Acuerdo de América Central y República Dominicana de Libre Comercio (CAFTA) y el Programa Sistema General de Preferencias (SGP) de la Unión Europea (Fernández et al, 2015).

### 2.5.2. Biodiesel

El biodiésel es un biocombustible sintético líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales como aceites vegetales o aceites/grasas animales, así como de aceites reciclados, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación (Figura 2.15). Los aceites vegetales y grasas, en contraste a las simples cadenas de carbohidratos que componen la glucosa y la fructosa, exhiben muchas modificaciones en la estructura de sus moléculas y por lo tanto son también más valiosas en lo concerniente a energía (El Baasam, 2010).

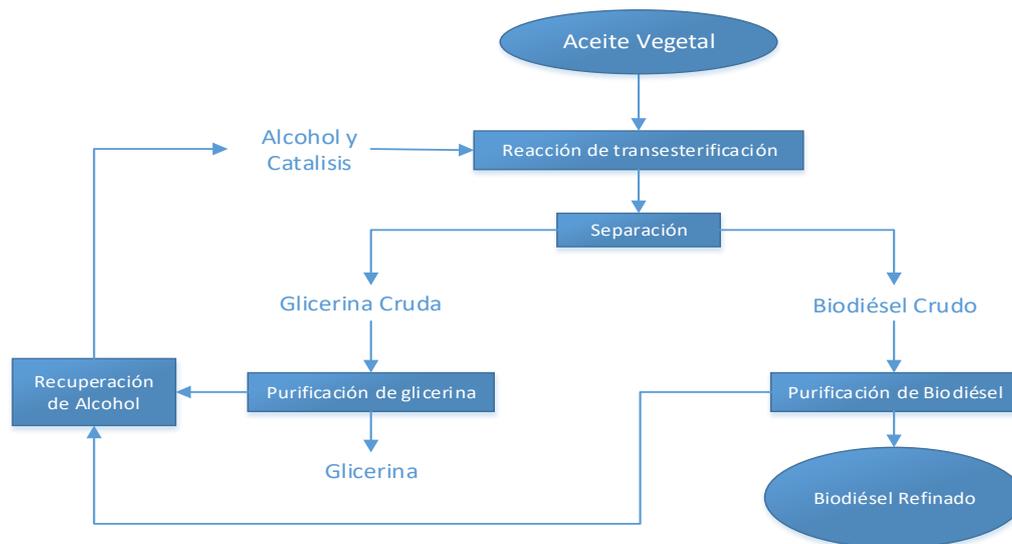


Figura 2.15 Generación de Biodiesel a partir de Aceite Vegetal. Fuente: (Fernandez Arenivar et al., 2015)

Presenta una ventaja ecológica, en comparación con el diésel de origen fósil, al reducir las emisiones de gases que provocan el efecto de invernadero. Así, por ejemplo, el uso de una tonelada de biodiesel, evita la producción de 2.5 toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y sobre todo elimina, si se usa el BD sólo en los motores, las emisiones de azufre (SO<sub>2</sub>) del diésel, evitando las lluvias ácidas; además es un combustible renovable y no finito como los hidrocarburos (Fernández et al, 2015).

Físicamente es un líquido que puede tener un color que puede ir desde un tono amarillo claro hasta uno oscuro, y que es prácticamente inmisible con el agua; además de tener una viscosidad similar a la del diésel que se obtiene del petróleo, se puede mezclar con éste con la finalidad de reducir las emisiones contaminantes de los vehículos automotores con motores de ciclo diésel. En la Figura 2.16 se muestra la estructura química del biodiesel, donde R son

cadenas carbonadas saturadas y R' representa una cadena de carbonos no saturada (Fernández et al, 2015).

## 3R-COOR'

Figura 2.16. Estructura química del Biodiesel

A nivel mundial, existen más de 280 especies de plantas con contenidos considerables de aceites en sus semillas, frutos, tallos y raíces. El aceite se puede extraer mediante la compresión mecánica de las semillas (El Baasam, 2010).

### 2.5.2.1. Producción de Biodiesel en El Salvador

Hasta el momento no se reporta producción comercial de biodiésel en El Salvador, aunque en mayo del 2007 se inauguró la primera planta industrial de biodiésel con base en aceite vegetal. La planta de la empresa Bio Energía S.A. trabaja con aceite de palma, soja, higuierillo, tempate y coco, y tiene una capacidad de producir 5,4 millones de litros anuales de biodiésel

Cuadro 2.12. Empresas involucradas en la producción de Biodiésel en El Salvador.

Productor de Biodiesel	Ubicación	materia prima
Guibar	Sonsonate	Aceites usados o grasas animales
Sun Energy	Santa Ana	Aceites usados o grasas animales
Inversiones Andrómeda	San Salvador	Aceites usados o grasas animales
QUINDECA	San Salvador	Aceites usados o grasas animales
ADEL Morazán	Morazán	Aceites Vírgenes de Higuierilla y Tempate
Sociedad Industrial de Aceite de Ricino	San Miguel	Aceites Vírgenes de Higuierilla y Tempate
Bioenergía	Sonsonate	Aceites de Palma
CENTA	La Libertad	Aceites Vírgenes de Higuierilla y Tempate

Fuente: (IICA, 2010)

En El Salvador a inicios del año 2006 arrancó el funcionamiento de la planta piloto productora de Biodiesel a partir de higuierillo. Esta planta posee una capacidad aproximada de 3000 litros/mes, por otra parte se llevó a cabo una etapa de investigación de cultivo de tempate para producción de biodiesel, apoyada por la empresa petrolera inglesa D1OIL y el Ministerio de Agricultura y Ganadería (Fernández et al, 2015).

### 2.5.3. Biogás

Se produce un gas combustible mediante la digestión anaeróbica de la biomasa (biometanización), la cual puede ser desechos animales y agrícolas. El biogás consiste en varios gases generados por la descomposición anaeróbica (vapor de agua, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y CH<sub>4</sub>), siendo los de mayor porcentaje el metano y el dióxido de carbono. El biogás es usado primordialmente para la generación de electricidad y calor.

En el proceso de digestión anaeróbica, se coloca la biomasa (generalmente desechos de animales) en un contenedor cerrado (el digester) y allí se deja fermentar; después de unos días, dependiendo de la temperatura del ambiente, se habrá producido un gas, que es una mezcla de metano y dióxido de carbono. La materia remanente dentro del digester es un buen fertilizante orgánico. El proceso Anaeróbico se presenta en la Figura 2.17.

Se puede producir un gas combustible de la fermentación de los desechos sólidos urbanos en los rellenos sanitarios. Este es una mezcla de metano y dióxido de carbono. La fermentación de los desechos y la producción de gas es un proceso natural y común en los rellenos sanitarios; sin embargo, generalmente este gas no es aprovechado. Además de producir energía, su exploración y utilización reduce la contaminación y el riesgo de explosiones en estos lugares y disminuye la cantidad de gases de efecto invernadero.

Realizar cultivos cuyo fin último sea la producción de biogás no es tan practicado, aunque existen muchas variedades de plantas que son adecuados cuando están frescas o cuando ya se han ensilado. A diferencia del uso de dichas plantas para combustión, en la biometanización se puede usar la planta con alto contenido de humedad. Sin embargo la producción de biogás utilizando especies de plantas que contienen lignocelulosa resulta muy complicado, porque el control del proceso de fermentación tiene altos costos resultando poco atractivo para la inversión.

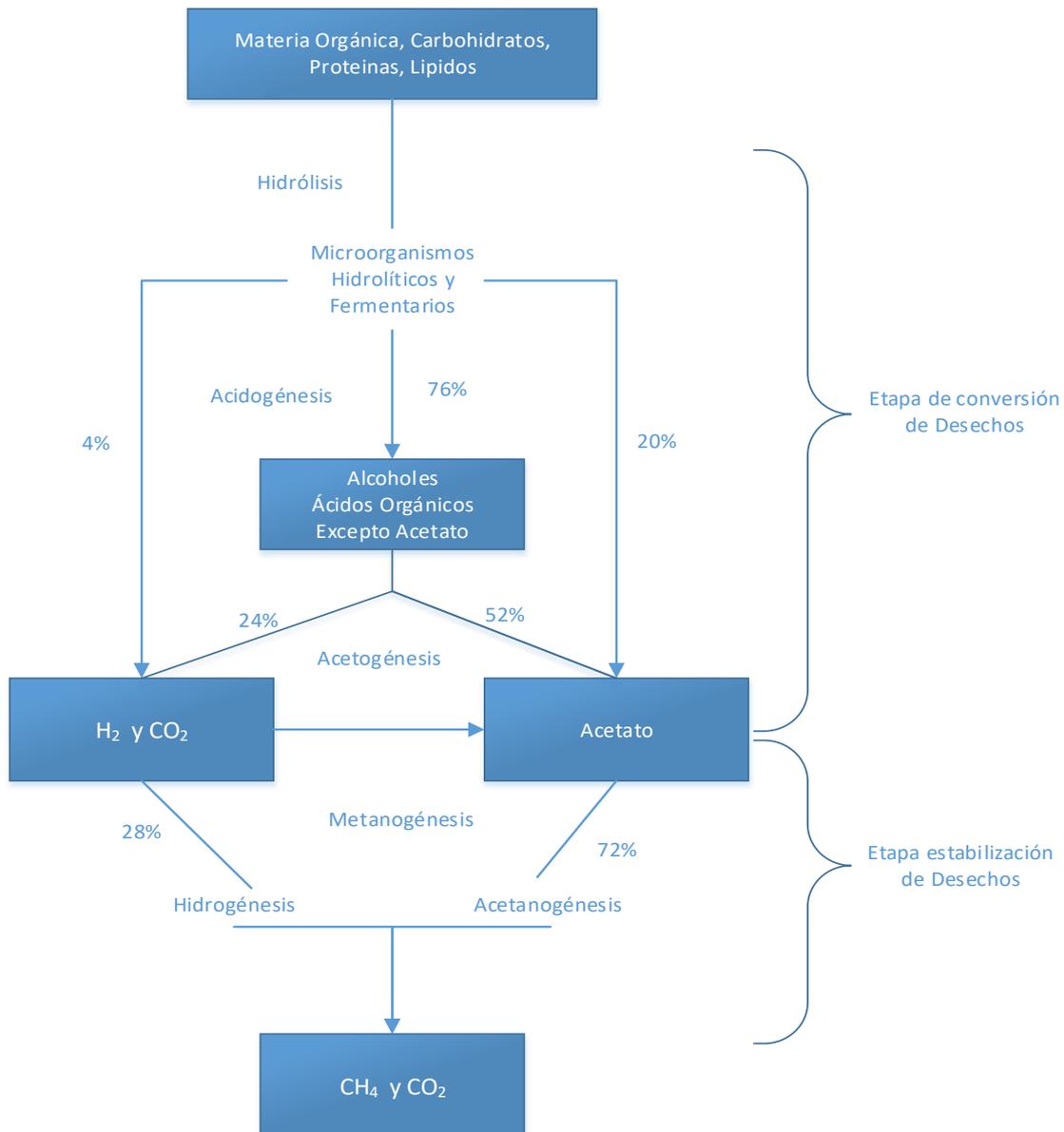


Figura 2.17. Digestión Anaeróbica para la producción del Biogás. Fuente: (Mudhoo, 2012)

### 2.5.3.1. Biogás en El Salvador.

La generación energética a partir del biogás, ha sido practicada en las últimas décadas ya sea para tratamiento de aguas residuales y generación de calor así como la generación de energía eléctrica a pequeña escala. En el Cuadro 2.13. Generadores de Biogás en El Salvador. Cuadro 2.13 se presenta una recopilación de instituciones que han desarrollado proyectos con biodigestores para la generación de Biogás en El Salvador.

Cuadro 2.13. Generadores de Biogás en El Salvador.

Generadores de Biogás en El Salvador	Ubicación	Descripción
Industrias la constancia	San Salvador.	La capacidad de producción de biogás que tiene el digestor es de 700 m <sup>3</sup> entre los tres tanques del mismo y se estima que existe una producción mensual de 15,000 m <sup>3</sup> de biogás. El biogás producido se utiliza en la planta como combustible de calderas, para generar vapor que sirve en procesos como pasteurización de la cerveza, cocimiento de ingredientes de la cerveza, esterilización de equipos, etc. Con el uso del biogás, se reduce el consumo de fuel oil como combustible en un 10% anual. En materia eléctrica, estos ahorros se han hecho tangibles al pasar de consumir 21.9 kilovatios de energía por cada 100 litros de cerveza, a 9.83 kilovatios por la misma cantidad de producto
Beneficio Atapasco	Ubicado en las afueras del municipio de Quezaltepeque, departamento de La Libertad.	En total, en el biodigestor del Beneficio Atapasco se producen en promedio entre 31,000 y 32,000 m <sup>3</sup> de biogás por año mediante el tratamiento de 11,000 a 13,000 m <sup>3</sup> de agua residual
Biodigestores Granja San José	Ubicada en el km 63 de la carretera que conduce a San Isidro y Sensuntepeque.	Consiste en un arreglo de tres biodigestores de iguales dimensiones que se utilizarían para el tratamiento de las excretas de los cerdos provenientes de la granja. Cada uno de los biodigestores están diseñados con 7 piletas de carga simétricamente distribuidas, un tanque de fermentación donde se da la metanogénesis y una piletta de descarga por donde sale el efluente, cada uno con capacidad para almacenar 239.20 m <sup>3</sup> de materia orgánica y con una capacidad de carga total de la planta (los tres biodigestores) de 717.60 m <sup>3</sup> . El volumen útil para la producción de biogás es de 160 m <sup>3</sup> . La cantidad total de biogás generado oscila entre 0.65 – 1.1 m <sup>3</sup> de biogás / m <sup>3</sup> de digestor diario. En toda la planta se genera un estimado de 240 m <sup>3</sup> de biogás.
Biodigestor Hacienda Miralvalle	Cantón El Rosario, Municipio de El Porvenir, Santa Ana	Capacidad proyectada de 15 kW, utilizando como materia prima estiércol de ganado bovino.
Biodigestor ACASA	Caserío Valle Nuevo, Cantón San Marcos Lempa, Usulután, con el nombre de ACASA	El biogás producido es transportado por tuberías de poliducto, este es utilizado para la cocción de alimentos, lo cual se realiza por medio de una hornilla elaborada de forma artesanal y especial para la aplicación de biogás.
Planta de Nejapa AES	Municipio de Nejapa.	Con capacidad de generación de 6 Megavatios de electricidad aprovechando el gas metano procedente del vertedero más grande de El Salvador, trabaja por medio de plantas Jenbacher de General Electric. El proceso de construcción inició en el año 1999 y desde entonces acumula más de 6 millones de toneladas de basura, que se espera crezcan hasta los 12.5 millones en 2024

Fuente: (Hidalgo et al., 2010)

#### 2.5.4. Aplicaciones Energéticas de la conversión termoquímica de la biomasa

La Conversión de biomasa en Calor ha sido la forma tradicional de Bioenergía desde el descubrimiento del fuego, en la cual la biomasa, como madera o pastos, se recolecta para quemarse y generar calor.

Actualmente el uso de biomasa está más orientado a la generación de calor y electricidad, especialmente con respecto a la eficiencia de generación energética de biomasa como desechos y residuos, y por biocombustibles, los principales mercados de bioenergía están en la Unión Europea, Norte América, Europa central y occidental, y el sudeste asiático (El Baasam, 2010).

Es posible obtener un desempeño competitivo de biomasa en lugares donde estén disponibles residuos a bajo costo, si se le compara con combustibles fósiles.

Existen diferentes formas de procesar la biomasa sección 2.5, así como formas finales de uso, para generar energía (Figura 2.18).

Con biomasa se puede generar energía térmica (agua caliente, vapor, etc.), energía eléctrica e incluso energía mecánica mediante el uso de biocarburantes en motores de combustión interna.

##### 2.5.4.1. Energía térmica.

Agua o aire caliente, vapor. Es la aplicación más extendida de la biomasa natural y residual. Los sistemas de combustión directa se pueden utilizar directamente para cocinar alimentos, para calefacción o secado. Además, es posible aprovechar el vapor que se desprende para producir electricidad o para procesos industriales. Por otra parte es posible quemar el biogás que se obtiene en la digestión anaerobia de un residuo líquido o el gas de síntesis procedente de la gasificación (Figura 2.18).

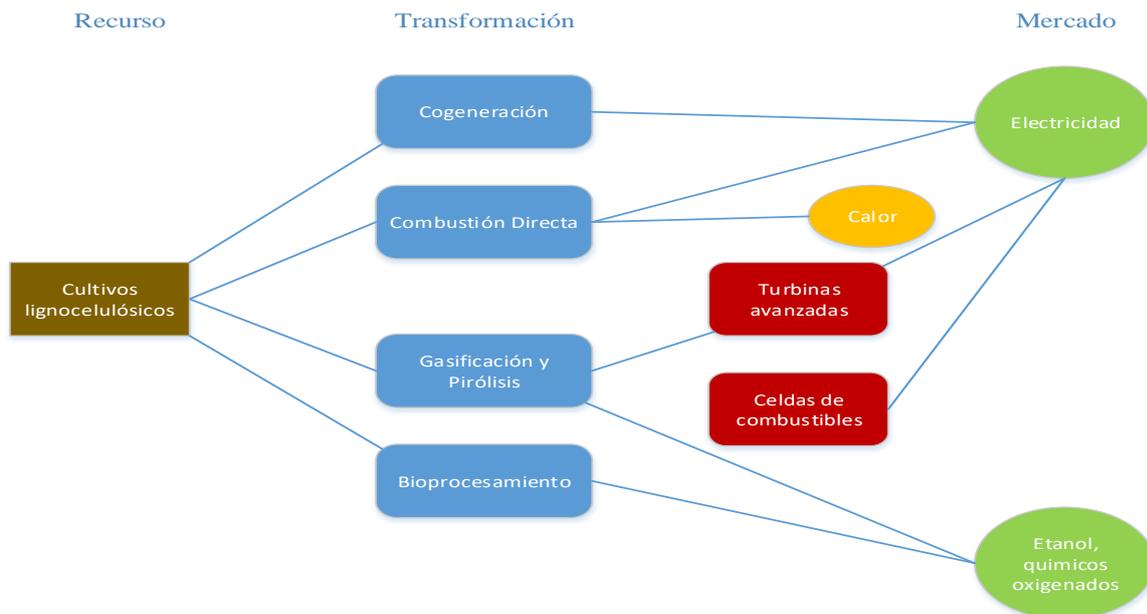


Figura 2.18. Caminos para la conversión de Biomasa

#### 2.5.4.2. Energía eléctrica.

Se obtiene, sobre todo, a partir de la transformación de biomasa procedente de cultivos energéticos, de la biomasa forestal primaria y de los residuos de las industrias. En determinados procesos, el biogás resultante de la fermentación de la biomasa también se puede utilizar para la producción de electricidad. La tecnología a utilizar para conseguir energía eléctrica depende del tipo y cantidad de biomasa. Así tenemos:

- a) **Ciclo de vapor:** Esta tecnología consiste en la combustión de biomasa para creación de una corriente de vapor que será expandido en turbinas para la generación de electricidad. Aunque la producción de vapor por medio de biomasa es un proceso eficiente, la producción de electricidad por medio de vapor no lo es tanto (de 15 a 30%). Para obtener mejores eficiencias es necesario aumentar la capacidad de la planta y aplicar tecnologías como la extracción de vapor directamente de la caldera, la extracción de vapor parcialmente expandido de una turbina diseñada para ese propósito, o haciendo un arreglo en el cual la turbina produzca vapor exhausto a la temperatura requerida. Con estas opciones se puede lograr teóricamente una eficiencia mucho más alta que rondaría los 50 a 80%.
- b) **Turbina de gas:** utiliza gas de síntesis procedente de la gasificación de un recurso sólido. Si los gases de escape de la turbina se aprovechan en un ciclo de vapor se habla de un ciclo combinado.

- c) **Motor alternativo:** utiliza gas procedente de la gasificación de un recurso sólido o biogás procedente de una digestión anaerobia.
- d) **Energía mecánica.** Los biocombustibles, pueden sustituir total o parcialmente a los combustibles fósiles, permitiendo alimentar motores de gasolina con bioalcoholes y motores diésel con bioaceites. En muchos países, este tipo de combustibles son ya una realidad, por ejemplo, en Brasil ya son millones los vehículos propulsados con alcohol casi puro obtenido de la caña de azúcar. La forma de transformar la biomasa en energía depende, fundamentalmente, del tipo de biomasa que se esté tratando y del uso que se quiera dar a esta energía. Los sistemas comerciales para utilizar biomasa residual seca se pueden clasificar en función de que estén basados en la combustión del recurso (hay gran número de calderas para biomasa en el mercado) o en su gasificación.

#### 2.5.4.3. La cogeneración

Consiste en la producción conjunta de energía térmica y eléctrica. Se basa en el aprovechamiento de los calores residuales de los sistemas de producción de electricidad. Es interesante en instalaciones en donde tanto el consumo térmico como el eléctrico son elevados, por ejemplo para empresas con un consumo de energía eléctrica de más de 5,000 h/año y donde sea posible utilizar la energía térmica a temperatura media (alrededor de 400-500 °C). Un sistema de cogeneración basado en la utilización de biomasa permite disminuir el coste de la factura eléctrica (existiendo la posibilidad de venta de los excedentes de electricidad) como la de los combustibles fósiles.

La instalación de sistemas de este tipo mejoran significativamente la eficiencia del uso de biocombustibles, las plantas de cogeneración energética tienen una eficiencia anual que generalmente ronda los 80 a 90%. Estos sistemas son los más rentables si además de producir energía con biomasa se requiere de calor, agua caliente o vapor. La eficiencia incrementada reduce la entrada de combustible y las emisiones de GEI (Davis, 2014).

Cuadro 2.14. Resumen de las diferentes formas de conversión de la biomasa.

Tecnología aplicada	Eficiencia	Estatus de Uso
Generación de biogás por digestión anaeróbica	10 a 15 % eléctrica (asumiendo que sea para uso de electricidad)	Tecnología bien establecida, aplicada ampliamente en corrientes de desperdicio orgánico y aguas residuales.
Producción de gas de relleno Sanitario	10 a 15 % eléctrica (asumiendo que sea para uso de electricidad)	Una opción muy atractiva para la mitigación de los gases de efecto invernadero, se aplica ampliamente y generalmente es parte de las políticas de tratamiento de residuos de varios países.
Combustión para calor	Bajo para chimeneas, hasta 70-90% en hornos modernos	El uso de leña para calentar hogares es ampliamente usado en la actualidad en zonas rurales, pero es una práctica estancada. En países de clima frío se ha reemplazado con sistemas de calefacción modernos que utilizan biomasa en forma de pellets o por gas).
Calor y energía combinados	Según la capacidad instalada 60-90% en general 80-100% en general	Motores Stirling, turbinas, máquinas de vapor entre otros utilizan esta tecnología.
Combustión para generación eléctrica	20-40% electricidad	Tecnología bien establecida, especialmente en regiones como Escandinavia y América del norte.
Combustión de biomasa y carbón combinados	30-40% eléctrica	Ampliamente utilizada en varios países, principalmente utilizando combustión directa en combinación con biomasa que es relativamente más limpios. La biomasa más contaminada o más difícil de cortar en trozos, puede ser procesada de manera conjunta con gasificación. Se ha incrementado el interés en acciones de combustión conjunta de biomasa y la utilización nuevas tecnologías.
Gasificación para generación de calor	80-90% en general	Disponible comercialmente, pero su contribución a la generación energética es limitada
Gasificación para uso de motores	15-30% eléctrico 60-80% en general	Existencia de varios sistemas en el mercado, sin embargo poco despliegue debido a lo relativamente altos costos, demanda crítica de operación y calidad de combustible
Gasificación usando ciclos combinados para electricidad	40-50% eléctrico (o más alto)	De rápido desarrollo en la década de 1990, pero actualmente estancado.
Pirolisis para producción de aceites vegetales	60-70% aceite vegetal/ materia prima y 85% para aceite + carbón	Tecnología disponible comercialmente, el aceite es usado para producción de electricidad en turbinas de gas, motores a gas, producción directa para combustibles para transporte.

Fuente: (El Baasam, 2010)

## 2.6 Proceso de generación de energía del King Grass.

En términos energéticos, la biomasa del King Grass es considerada como un recurso renovable, y a nivel técnico se puede decir que funciona como una batería eléctrica, donde mediante procesos de fotosíntesis, se fija la energía del sol y se produce materia orgánica. Cuando la misma es sometida a procesos de conversión de la biomasa se libera la energía almacenada en la planta como calor, y el proceso estará en la fase de conversión en energía eléctrica.

La forma de conversión de energía con Biomasa utilizada en plantas generadoras de electricidad es la combustión directa. La ecuación global de la reacción de combustión es la inversa de la fotosíntesis. El proceso se realiza a altas temperaturas (400-1000°C). Utilizando aire como agente oxidante.

La combustión de la biomasa transcurre con liberación de energía en forma de calor y los productos principales resultantes (CO<sub>2</sub>, vapor de agua, etc.). Las sales minerales contenidas en la biomasa, además de las cantidades relativamente pequeñas de óxidos de nitrógeno y azufre, así como de CO, partículas de carbono y otros productos resultantes de la reacción de combustión incompleta, se denominan “inquemados” y constituyen las cenizas. Las cenizas producto de esta reacción pueden luego ser usadas como fertilizantes, teniendo un porcentaje de aprovechamiento del recurso muy elevado.

### 2.6.1. Planta de Generación Eléctrica a partir de biomasa.

La obtención de energía eléctrica a través de la quema de biomasa sólida se realiza generalmente a gran escala (plantas mayores de 2MW). Esto es debido principalmente a que las instalaciones necesarias requieren una gran inversión económica. Además, los rendimientos globales obtenidos son mayor cuanto mayor sea la potencia generada.

El funcionamiento de una planta de biomasa para la generación de energía eléctrica consiste en la recepción de la biomasa, posteriormente se colocan automáticamente en una cinta transportadora, que las conduce hasta la caldera. Donde caen ya sea en una parrillas fijas, horizontales o inclinadas, como móviles o vibratoria, o en un lecho fluidizado según la tecnología utilizada.

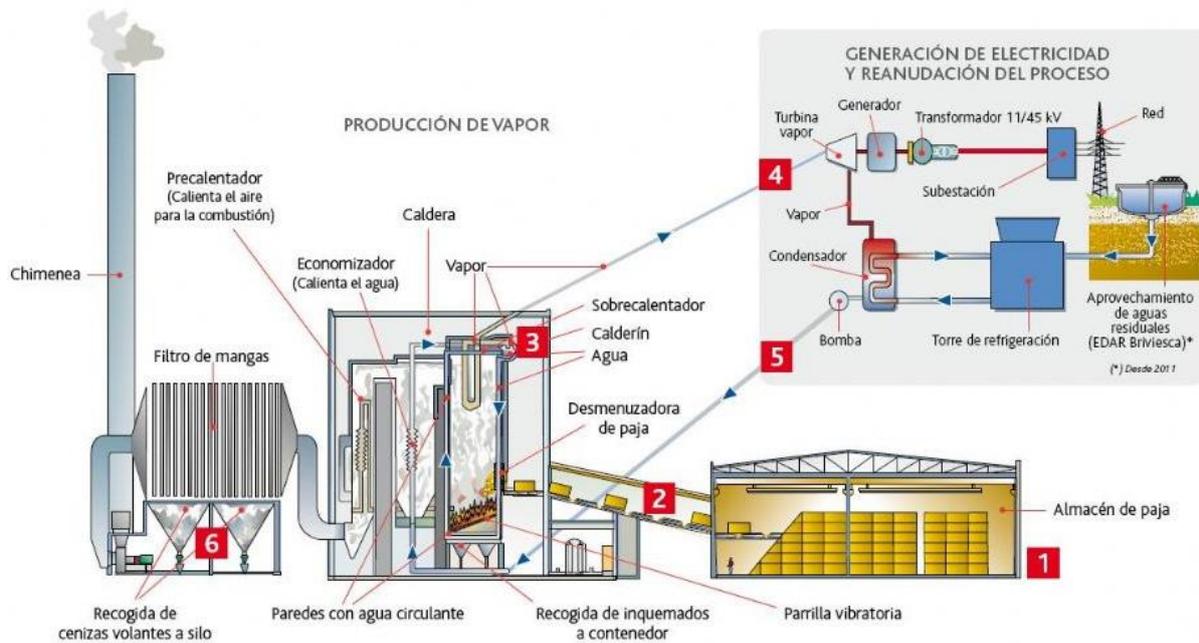


Figura 2.19. Planta de generación Eléctrica por biomasa. Fuente: <http://www.agenbur.com>

La combustión de la biomasa en la caldera, calienta el agua que circula por las tuberías de las paredes de la caldera y por haces de tubos en el interior de la misma convirtiéndola en vapor sobrecalentado. El vapor sobrecalentado es llevado a un arreglo turbina alternador que genera la energía que se transformará en energía eléctrica.

### 2.6.2. Funcionamiento de una planta de generación eléctrica por biomasa.

La generación a partir de biomasa es la alternativa con el mejor costo de operación, para la generación energética por combustión, con un monto razonable de inversión, además de minimizar la contaminación ambiental. La generación de energía a partir de biomasa no genera emisión neta de dióxido de carbono. Adicionalmente, mantener los cultivos de zacate King Grass en forma permanente, implica beneficios adicionales para el medio ambiente y reducciones de CO<sub>2</sub>. El recurso hídrico a utilizar es mínimo y con el único propósito de enfriar los equipos de generación, lo cual no genera aguas residuales con contaminante alguno.

La primera etapa es la siembra, fertilización y mantenimiento hasta la cosecha del King Grass y su transporte a la planta de generación de energía. El zacate una vez cortado, se deja al sol; posteriormente es recogido con un tractor recolector que empaca en fardos con un peso específico y estos son transportados al almacén de biomasa en la planta.

### 2.6.2.1. Sistema de manejo del biocombustible

La biomasa llegará a la planta en camiones. Después de ser cosechado el zacate será cortado y el secado al sol en la misma área donde estuvo cultivada con el objetivo de reducir su humedad estimando que a las 4 días se habrá reducido su contenido de humedad a menos de la mitad (aprox. 45%). Luego se apilará y se transportará a un almacén depósito adyacente, donde se guardará la reserva de biomasa a quemar. Dicho depósito deberá estar acondicionado para guardar paquetes de biomasa ya comprimida. El área debe estar diseñada para almacenar biomasa para operar al menos un mes.

El equipo de generación comprende principalmente de un horno, una caldera y una turbina, y todos vienen diseñados para operar un total de 8000 horas al año, lo que equivale a 11 meses de trabajo. Los equipos requieren de dos mantenimientos al año, es decir cada 6 meses.

La mejor forma de mantener la planta generadora operando la mayoría del año sin disminuir la eficiencia sería la instalación de un horno de parrilla móvil debido a que esta tecnología es capaz de procesar diferentes tipos de biomasa a diferentes niveles de humedad. Este permitiría la operación de planta a lo largo del año, pues en invierno se ha considerado un incremento en la humedad residual del combustible de biomasa, la tecnología del horno tiene capacidad de procesar esta humedad residual sin ningún problema.

La biomasa será quemada en la caldera, utilizando la energía térmica obtenida para generar vapor sobrecalentado.

### 2.6.2.2. Sistema de generación de vapor

El vapor generado llega a la turbina que aprovecha al máximo su entalpía. El vapor exhausto que sale de la turbina pasa a un condensador donde se pierde una parte importante de la energía que llevaba el vapor inicial, lo que condiciona el rendimiento del sistema. El líquido saturado es llevado a una bomba que trabaja elevando la presión, para alimentar nuevamente el fluido a la caldera.

La energía térmica absorbida por el vapor será transformada en energía mecánica mediante un ciclo termodinámico basado en el ciclo de Rankine de generación de vapor.

En este ciclo, el vapor a alta presión y sobrecalentado será expandido en una turbina, en la que se transformará la energía térmica que porta el vapor en energía mecánica, y esta, mediante un alternador acoplado a la turbina a través de un reductor, en energía eléctrica.

### 2.6.2.3. Descripción del equipo utilizado en plantas de biomasa:

Una planta de generación eléctrica por generación de vapor esencialmente está constituida por una caldera, una turbina acoplada a un alternador, un condensador y un sistema de bombeo para recircular el líquido de trabajo. A continuación una breve descripción de estos elementos.

#### a. Caldera.

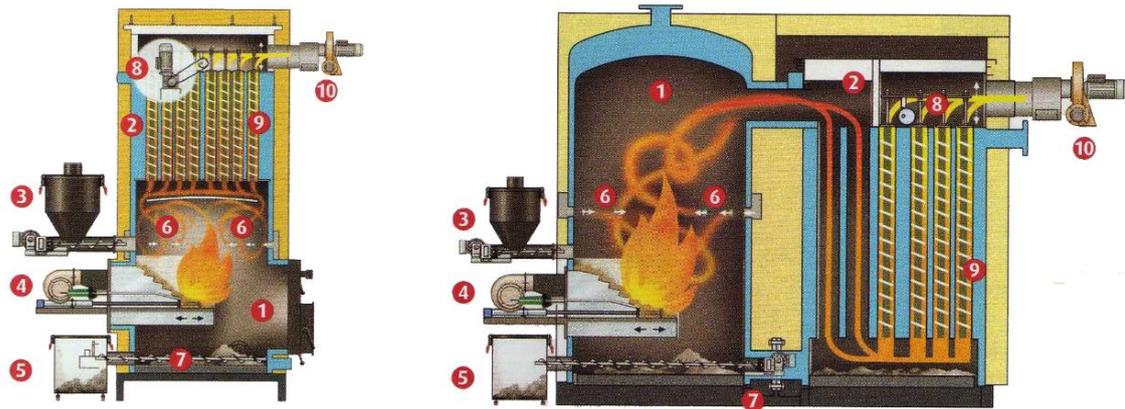
Una caldera de biomasa funciona exactamente igual que una caldera de combustibles fósiles, pero al utilizar biomasa consigue un importante ahorro económico en la compra de combustibles y una disminución de emisiones de carbono y azufre.

Sin embargo al tratarse de un combustible tan variable en término de tamaño y humedad, se debe tener un manejo adecuado del aire para obtener una combustión controlada. Esto se logra mediante difusores y ventiladores instalados y orientados estratégicamente consiguiendo dispersar el material en el interior de la caldera (Miles, 2011).



Figura 2.20. Caldera de Biomasa. Fuente: <http://www.gruponovaenergia.com>

Las calderas acuotubulares (el agua está dentro de los tubos) son usadas en centrales eléctricas y otras instalaciones industriales, logrando con un menor diámetro y dimensiones totales una presión de trabajo mayor (Miles, 2011).



Esquema de Funcionamiento y componentes BIOSELECT

1. Cámara de combustión. 2. Intercambiador tubos verticales. 3. Silo + Sinfin alimentación 4. Conjunto quemador: Aire primario Encendido automático Empujador de cenizas 5. Contenedor de cenizas. 6. Aire secundario. 7. Extractor de cenizas. 8. Sistema de limpieza intercambiador. 9. Retenedores. 10. Extractor de humos

Figura 2.21. Caldera de Biomasa con sus diferentes partes. Fuente: <http://www.ecoenergydirect.com>

En estas calderas, los tubos longitudinales interiores se emplean para aumentar la superficie de calefacción, y están inclinados para que el vapor a mayor temperatura al salir por la parte más alta, provoque un ingreso natural de agua.

#### a.1. Partes de la caldera

- Tambor de agua y vapor
- Hogar de paredes refrigeradas
- Haz vaporizador
- Sobrecalentador
- Atemperador
- Puertas, mirillas y sopladores
- Ventilador de tiro inducido
- Especificaciones de la caldera

#### b. Turbina-alternador

La turbina y el alternador son los mecanismos esenciales de la planta de generación eléctrica. Cuando el vapor llega a la máquina, actúa sobre los alabes de la turbina, el rodete de la turbina permanece unido al rotor del alternador, que al girar con los polos excitados por una corriente induce una corriente alterna en las bobinas del estator del alternador. Cuando el vapor ha cedido

su energía, es restituida nuevamente al circuito agua vapor mediante el condensador (Miles, 2011).

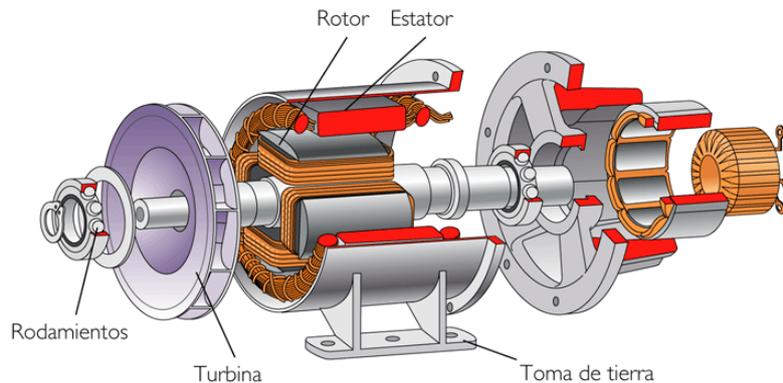


Figura 2.22. Arreglo Turbina-Alternador. Fuente: <http://www.otsa.es>

Unido al eje de la turbina y el alternador gira un generador de corriente empleado para excitar los polos del rotor del alternador. De esta manera, en los terminales del estator aparece una corriente alterna de media tensión y alta intensidad. Mediante un transformador esta corriente altera sus propiedades y pasa a ser alta tensión y baja intensidad, de esta manera se encuentra ya disponible para ser transportada mediante líneas de alta tensión hacia los centros de distribución y consumo (Miles, 2011).

### c. Turbina

La turbina de vapor es un motor térmico cíclico rotativo, de combustión externa, que movido por el vapor produce energía mecánica.

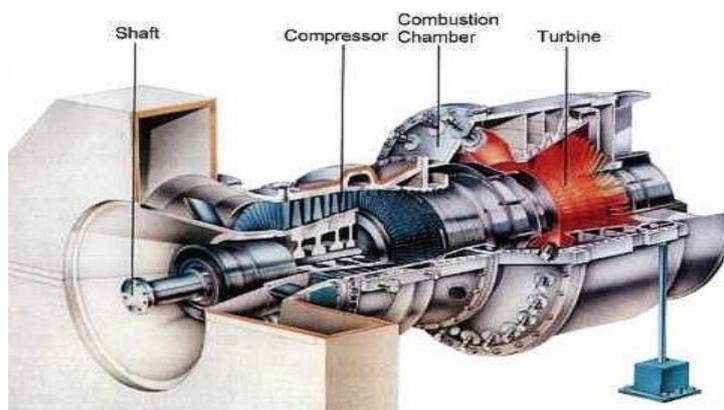


Figura 2.23. Turbina de vapor. Fuente: <http://www.otsa.es>

El tipo de turbina utilizadas en las plantas de potencia eléctrica se denominan turbinas condensadoras, estas turbinas expelen el vapor en estado parcialmente saturado, generalmente

con calidad mayor al 90%, a una presión bastante inferior a la atmosférica hacia un condensador (Miles, 2011).

#### d. Alternador

Las maquinas síncronas son máquinas cuya velocidad de rotación está vinculada rígidamente con la frecuencia de la red de corriente alterna. En la práctica de las instalaciones eléctricas el empleo de las maquinas síncronas es casi siempre como generadores de energía eléctrica (alternadores)

La máquina más utilizada en la generación es la máquina trifásica, que agrupa tres bobinas en el inducido en ángulos de  $120^\circ$ , por donde se producirán tres ondas de tensión, una en cada bobina, obteniendo así la onda trifásica (Miles, 2011).

#### e. Condensador

El condensador es un gran intercambiador de calor. En este intercambiador se utilizan grandes cantidades de agua de refrigeración para condensar el vapor, cantidad que depende del incremento de la temperatura permisible en el agua de refrigeración y del volumen de vapor que generamos en la planta. En otras palabras depende de la carga de la planta (Miles, 2011).

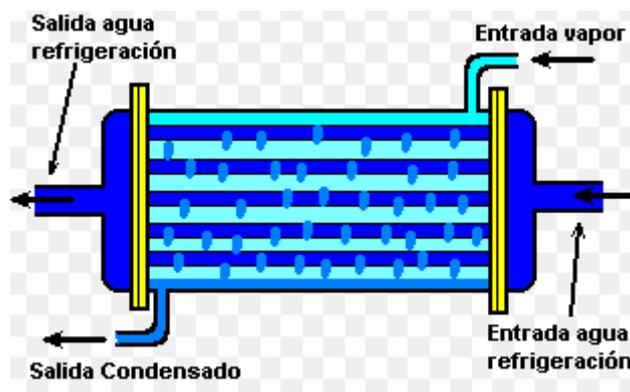


Figura 2.24. Condensador de Vapor. Fuente: <http://www.cec.uchile.cl>

Físicamente el condensador es un cilindro en el que se descarga el vapor, y por el que en su interior hay una gran cantidad de tubos por los que circula un líquido refrigerante, generalmente agua a una temperatura baja. El vapor al entrar en contacto con los tubos fríos se condensa en agua.

Las condiciones en las que trabajan los tubos de un condensador son especialmente duras, condiciones favorables para la corrosión, incrustación y la proliferación de especies biológicas (Miles, 2011).

f. Bombas de impulsión y tanque de alimentación de agua.

El agua del circuito, es repartida en el mismo a través de bombas de impulsión, que recogen el fluido de trabajo de un tanque de alimentación.

Estas bombas están instaladas a lo largo de la instalación en las que es preciso modificar las propiedades del fluido como el caudal y la presión entre otros (Miles, 2011).

g. Sistema de producción de energía.

Para producción de electricidad a partir de biomasa se pueden utilizar, en general todos los ciclos que se aplican a otros combustibles.

En ciclos termodinámicos simples con generación de vapor existen ciertas limitaciones en cuanto a la temperatura y presión a la que se quiera generar el vapor debido a que la mayoría de las biomazas solidas contienen una determinada fracción de cenizas que se pueden fundir dentro de las cámara de combustión y depositarse formando contra, sobre los tubos de vapor, fenómeno denominado sinterización. Este efecto, además de entorpecer el intercambio de calor entre la zona de fuego y la de vapor, para por producir daños irreparables en los tubos (Miles, 2011).

### 3. RECOLECCIÓN DE DATOS PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL ZACATE “KING GRASS”

El objetivo primordial de esta investigación, es el de evaluar el potencial energético del Zacate King Grass en El Salvador, como una alternativa que se suma a la empresa de la generación de energía eléctrica menos contaminante. El uso de esta gramínea forrajera de alto potencial energético por su capacidad de acumular mucha biomasa en relativamente poco tiempo, la convierte en una excelente oportunidad para proyectos de generación energética.

Para el aprovechamiento energético es importante obtener información cualitativa y cuantitativa acerca de la producción de Zacate King Grass en El Salvador.

Como se indicó en el capítulo 2 de este texto, actualmente se cuenta con 7 fincas cuya finalidad es el cultivo de Zacate King Grass para generación energética, con un total de 750 manzanas o 524 hectáreas terreno cultivable.

Para la recolección de información fue posible evaluar dos fincas, pertenecientes a empresas con proyectos de plantas bioenergéticas. Los resultados obtenidos experimentalmente en plantas en estas fincas se tomaron como referencia para el total del territorio cultivado con King Grass en El Salvador.

#### 3.1 Fincas energéticas estudiadas

El muestreo se llevó a cabo en las **Haciendas LA COLINA** y **SAN JOSÉ** ambas están ubicadas en la zona occidental de El Salvador y fueron asignadas por el ministerio de Agricultura y Ganadería. Estas fincas fueron seleccionadas ya que se encuentran en zonas accesibles donde la problemática social de El Salvador existe pero es menos sensible, por lo que son relativamente transitables para extraños al lugar, además de contar con cultivos de King Grass que poseen las condiciones óptimas para el desarrollo de la investigación.

Para la toma de muestras se requirió la presencia de personal del Ministerio de Agricultura y Ganadería.

### 3.1.1. Descripción de las fincas.

A continuación una breve descripción de los terrenos de las fincas donde se tomaron las muestras para realizar el análisis de la evaluación del potencial energético del Zacate King Grass.

#### a. Hacienda La Colina

Ubicada en el margen izquierdo del municipio del porvenir del departamento de Santa Ana. Sus coordenadas son: Latitud 14° 0'41.39"N longitud 89°39'47.51"W



Figura 3.1. Finca La Colina en Santa Ana. Fuente: Google Earth.

a.1. Área de terreno: 123 manzanas

a.2. Topografía.

La configuración topográfica es plana, cuya pendiente oscila de 2 a 3%.

a.3. Suelos.

Fisiografía, se encuentra en planicies son áreas con poca disección. Los suelos pertenecen al Gran grupo de Latosoles Arcillo Rojizos, son terrenos sin pedregocidad, color negro acromáticos, bien desarrollado, moderadamente profundo, los horizontes superficiales son franco arcilloso y arcilloso, friable de color café oscuro y de poco espesor.

Los subsuelos son arcillosos, también son bastante húmedos y de color café rojizo amarillentos, estructura en bloques medianos, las capas inferiores están formadas por rocas basálticas y andesíticas muy intemperizadas, llegando a formar un horizonte con material conocido comúnmente como talpuja, la permeabilidad de estos suelos es baja a moderada, la capacidad de producción es buena.

#### a.4. Uso potencial del terreno:

La clase de suelo predominante es la clase III, la topografía es suave, pendiente de 2 a 4%; moderadamente profundos; la textura es franca arcillosa en los primeros 30 cm, a mayor profundidad predomina la textura arcillosa; erosión ligera a moderada; drenaje natural imperfecto, en época no lluviosa es bastante húmedo; sin pedregosidad y/o rocosidad en la superficie y en el perfil del suelo, fertilidad de moderada a baja, apto para cultivos anuales, hortalizas, pastos mejorados, forestales o frutales. Para su conservación se puede construir bordas de tierra (Anexo B).



*Figura 3.2. Finca La Colina, Ubicada en el municipio El Porvenir, Santa Ana*

#### a.5. Hidrología

La propiedad se encuentra prácticamente bordeada en su costado poniente por el río trapiche. Al pertenecer a la clase agrológica III, el terreno es apto para una serie de cultivos de ciclo corto, semipermanente y permanente, incluyendo pastos mejorados.

#### a.6. Edad del cultivo: 4 meses

## b. Hacienda SAN JOSE

Se encuentra ubicada en el cantón Los Mangos del municipio de Armenia en el departamento de Sonsonate. Sus coordenadas son: Latitud 13°45'53.87"N Longitud 89°30'44.80"W

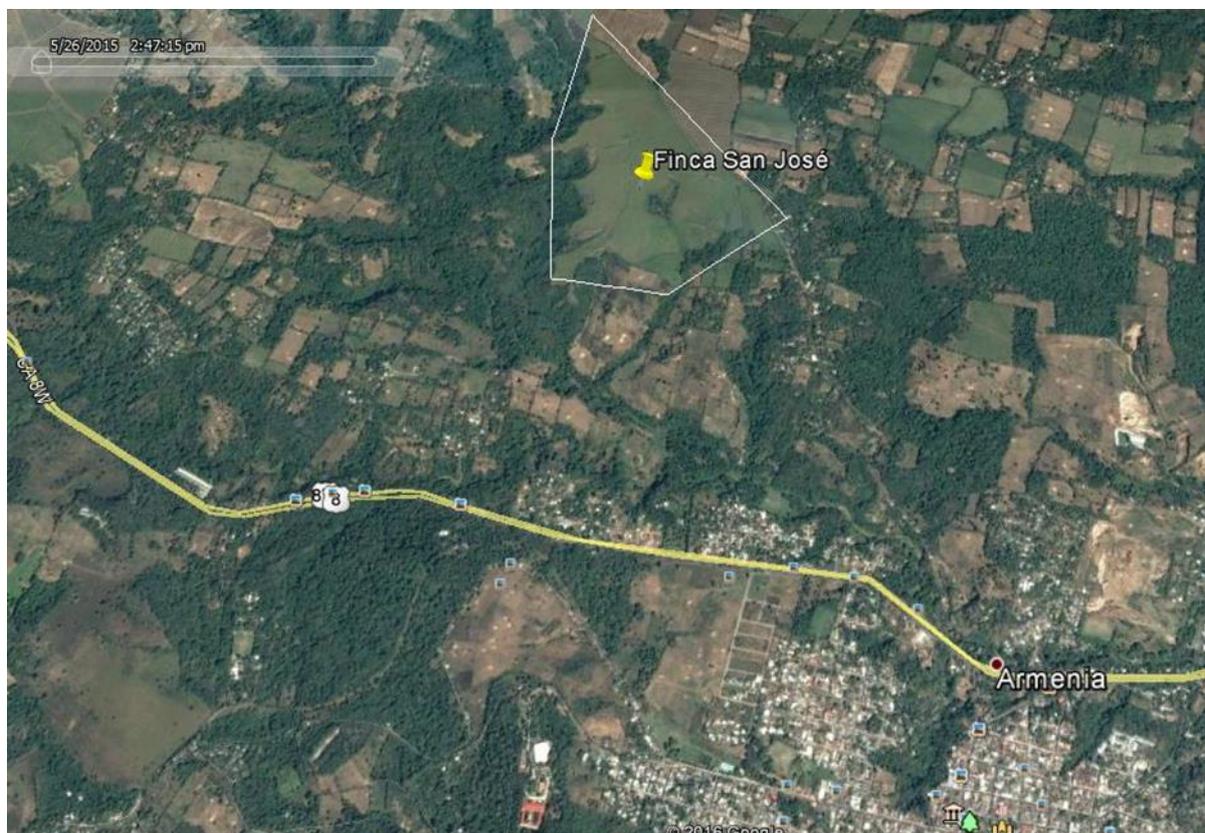


Figura 3.3. Finca San José en Armenia, Sonsonate. Fuente: Google Earth.

b.1. Área del terreno: 90 manzanas.

b.2. Topografía

La configuración topográfica es plana, cuya pendiente oscila de 1 a 4%

b.3. Suelos

Fisiografía, se encuentra en planicies del valle de zapotitan, son áreas con poca disección. Los suelos pertenecen al gran grupo de Latosoles Arcillo Rojizos, son terrenos sin pedregosidad, de color rojizo, acromáticos y bien desarrollados, moderadamente profundo, los horizontes superficiales son franco arcilloso y arcilloso, friable, de color café oscuro y de poco espesor.

#### b.4. Uso potencial del terreno

La clase de suelo predominante es la clase III, la topografía es suave con pendiente de 1 a 4%; moderadamente profundos, la textura es franca arcillosa en los primeros 30 cm, a mayor profundidad predomina la textura arcillosa; erosión ligera a moderada; drenaje natural imperfecto, en época lluviosa es bastante húmedo, sin pedregosidad y/o rocosidad en la superficie y en el perfil del suelo, fertilidad moderada a baja. Es apto para cultivos anuales, hortalizas, pastos mejorados, para su conservación se pueden construir bordas de tierra (Anexo B).



*Figura 3.4. Finca San José, ubicada en el municipio de Armenia, Sonsonate*

#### b.5. Hidrología:

La propiedad se encuentra prácticamente bordeada en su costado sur por el río sucio y una serie de quebradas de invierno.

Al pertenecer a la clase agrológica III, el terreno es apto para una serie de cultivos de ciclo corto, semipermanente y permanente, incluyendo pastos mejorados.

#### b.6. Edad del cultivo: 6 meses

## 3.2 Selección, preparación de muestras y número de análisis realizados

La selección de muestras se realizó en dos fincas, se escogieron al menos 6 plantas de cada finca, pero el análisis se realizó en tres plantas de cada finca.

### 3.2.1. Recolección de muestras

De cada finca se recolectaron tres muestras de forma aleatoria tomando en cuenta el tamaño del terreno. Para la finca La Colina se recolectaron las muestras que fueron denominadas LM como código, utilizado en este estudio, para definir su procedencia de El cantón Los Mangos por la zona donde se encuentra la finca La Colina, y de la finca San José se denominaron las muestras como AR como código para Armenia, municipio en el cual se encuentra la finca San José.

#### 3.2.1.1. Metodología.

La recolección de muestras se efectuó en el mes de agosto considerando varios factores, como el tiempo de madurez de las plantas, la accesibilidad del terreno y la coordinación con representantes del Ministerio de Agricultura y Ganadería.



*Figura 3.5. Recolección de muestras del King Grass, finca La Colina, departamento de Santa Ana*

La hacienda la colina no estaba uniformemente cultivada, teniendo esta la mitad con plantas de 2 meses de edad y la otra mitad con 4 meses de edad. Esta finca había tenido ya un primer corté y fue aproximadamente a los 6 meses de edad de la planta, tiempo considerado para el óptimo uso de la materia prima como biocombustible para generación energética. De esta finca se tomaron muestras de las plantas con 4 meses de edad.



*Figura 3.6. Recolección de muestras de zacate King Grass, finca San José. Plantas recortadas y listas para ser transportadas.*

Además se observó que la plantación en la hacienda La Colina estaba un poco descuidada. Con especímenes dañados y en estado de descomposición medio, esto hizo que la recolección de muestras se hiciera tomando en cuenta el estado de la planta, los requisitos del tipo de siembra y las características de las demás plantas que se encontraban en mejor estado.

En la hacienda San José poseía plantas con la edad óptima de 6 meses y estaba cultivada en su totalidad con Zacate King Grass. Se tomaron las muestras de 3 puntos en la periferia de la finca. Las plantas estaban en muy buen estado.

La diferencia entre el estado de ambas plantaciones es evidente, así también quedó demostrado en los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio ver sección 3.3., sección 3.4 y sección 3.5.

### 3.2.1.2. Pretratamiento de las muestras de Zacate King Grass

Cada espécimen de planta medía 3 metros de altura en promedio, después de la recolección, se cortó la planta y las hojas en trozos de menos de 10 centímetros y fueron colocados en bolsas de papel para su secado, el secado se realizó en una estufa de vacío a 105 °C.



*Figura 3.7. Reducción de tamaño de muestras para pruebas físicas de Zacate King Grass en laboratorio, a menos de 10 cm*

Se realizaron análisis, Físicos, Químicos y fisicoquímicos de plantas de Zacate King Grass, *Pennisetum purpureum*, para plantas completas omitiendo la separación por tallo y por hoja, como lo sugieren (Berrios y Castro 1997, Domínguez et. al 2000) dado que para el cálculo del poder calorífico, la separación por tallo y hoja no representa mayores fluctuaciones en los valores, aproximadamente 2-3%, además se consideró que al procesar la biomasa a granel para producir energía, no se requiere dicha separación.

### 3.3 Análisis Físico realizado a las muestra de Zacate King Grass

Debido al tamaño de las plantas y para un mejor manejo de las muestras, se dividió cada planta en dos bolsas membretadas A y B. Por ejemplo la muestra 1LM se dividió en las muestras 1LMA y 1LMB.

Para el cálculo del porcentaje de humedad y el porcentaje de cenizas así como para los análisis químicos, esta subdivisión no representó mayor dificultad, debido a que las pruebas se realizaron por triplicado en el laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, y se utilizaron los datos promedios, sin embargo esta nomenclatura si fue utilizada en los análisis fisicoquímicos ya que para cada submuestra se realizó un duplicado, por lo que para cada planta se realizaron cuatro ensayos en total.

Las pruebas físicas que llevadas a cabo fueron la determinación de cenizas y el contenido de humedad. El contenido de humedad presentado es la humedad total extraída de las plantas para lograr muestras secas.

*Cuadro 3.1. Datos Humedad y Cenizas para 3 muestras de zacate King Grass recolectadas de dos diferentes fincas energéticas*

Finca y edad de cultivo	ID muestra	Humedad %	Cenizas %
La Colina (4 meses)	1 LM	87.47	8.01
	2 LM	84.77	11.99
	3 LM	85.07	9.35
San José (6 meses)	1 AR	72.57	7.96
	2 AR	78	17.14
	3 AR	79.85	13.46

Las muestras fueron tomadas en el mes de agosto, mes que presento gran precipitación en las zonas de muestreo, este es un factor significativo para los valores de humedad obtenidos. Para el porcentaje de humedad como para el de cenizas se realizó un análisis estadístico descriptivo con la ayuda de una hoja de cálculo de Excel, de esta manera se encontró que para la humedad existe una desviación estándar de 5.54 y para el porcentaje de cenizas de un existe una

desviación estándar de 3.60, los valores que se muestran en el Cuadro 3.1. Se puede observar que los valores de humedad para las plantas de la finca la colina no presentan gran variabilidad sin embargo para el porcentaje de cenizas si existe variación con la muestra 2LM separándose substancialmente de los valores presentados por las otras dos muestras, esto es debido a que la planta de la cual se obtuvo la muestra 2LM poseía mayor cantidad de hojas, las cuales al incinerarse desprenden mayor cantidad de cenizas.

Las muestras LM se diferencian de las muestras AR en el contenido de humedad ya que las muestras de LM tienen un grado de maduración menor al de las AR, siendo las LM de 4 meses de edad y las AR de 6 meses.

El contenido de cenizas es mayor en las muestras AR con una excepción en la muestra 1AR, sin embargo esta mayor concentración de cenizas demuestra que las plantas con mayor edad de maduración poseen mayor cantidad de elementos no calcinables. Se puede entender entonces que a pesar de la mayor cantidad de cenizas en las plantas con mayor edad, el contenido de humedad se ve reducido por el incremento de la materia seca o material leñoso, el cual un factor decisivo para la quema de la biomasa.

### 3.4 Análisis Químico aplicado a las muestras de Zacate King Grass

Después de la identificación y tratamiento de la muestra, se llevó a cabo, la determinación de Nitrógeno Proteico por el método micro Kjeldahl, la determinación del extracto etéreo o porcentaje de grasas, la determinación de fibra cruda y la Determinación de Carbohidratos o extracto libre de Nitrógeno (E.L.N), todas estas pruebas en conjunto se denomina análisis bromatológico proximal y se realizó en el laboratorio de química agrícola de la facultad de Agronomía de la Universidad de El Salvador, las marchas de laboratorio se presentan en el anexo C, y los resultados se presentan en el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Resultados de laboratorio, análisis químico de las muestras de Zacate King Grass recolectadas en las fincas La Colina y San José.

Finca y edad de cultivo	ID muestra	Proteína %	Grasa %	Fibra Cruda %	ELN %	Nitrógeno %
La Colina (4 meses)	1 LM	6.58	1.3	38.02	46.09	1.0528
	2 LM	4.67	1.36	33.43	48.55	0.7472
	3 LM	6.85	1.39	33.2	49.21	1.096
San José (6 meses)	1 AR	5.04	2.53	39.6	44.87	0.8064
	2 AR	8.42	2.59	32.63	39.22	1.3472
	3 AR	5.73	1.82	36.77	42.21	0.9168

El porcentaje de proteínas y el porcentaje extracto libre de nitrógeno sirve para identificar la calidad alimenticia que presentan estas plantas, cabe mencionar que el propósito de este estudio no es la alimentación, sino la generación energética, sin embargo este parámetro así como el porcentaje de grasas también sirven para calcular el porcentaje de carbohidratos y de nitrógeno que contienen las muestras, siendo de vital importancia para calcular la eficiencia de la generación energética a partir de esta biomasa.

Puede observarse que la fibra cruda es relativamente constante para todas las muestras salvo algunas excepciones que se dispersan significativamente del promedio, la desviación estándar de este parámetro es de 2.91. Las muestras 1LM y 1AR poseen los valores más altos de porcentaje de fibra cruda. La muestra 1LM se obtuvo de la finca la Colina que se reportó anteriormente con menor grado de mantenimiento y se podía observar que este espécimen era el que presentaba signos de deterioro, sin embargo se procedió a tomar esta muestra con el fin de comparar si aun con relativo descuido, esta planta y plantas en similares condiciones poseen un potencial energético aceptable.

Por último el porcentaje de carbohidratos solubles o ELN, presenta datos que varían inclusive dentro de una misma finca, aun así se observa que los valores más altos son los de las plantas de la finca La Colina con edades de 4 meses.

Según Chacón y Vargas (2009) la calidad nutricional del King Grass varía de forma inversa a la edad de cosecha, lo que puede apreciarse en el Cuadro 3.3.

Sin embargo el contenido de materia seca aumenta al incrementarse la edad del forraje. Esto se refleja en el aumento de los componentes de la pared celular (FND y FAD) y reducción de los contenidos celulares (PC y EE) (Chacón y Vargas, 2009).

Cuadro 3.3. Composición nutricional del pasto *Pennisetum purpureum*, King Grass a diferentes edades

Componente	Edad de corte				
	60 días	75 días	90 días	120 días*	180 días**
MS, %	13.03	13.79	14.43	14.23	23.19
PC, %	9.56	8.7	8.42	6.03	6.40
EE, %	1.41	1.37	1.29	1.35	2.31
Cenizas %	14.47	13.86	13.61	9.35	12.85
FND, %	73.78	75.48	76.91	ND	ND
FAD, %	46.53	49.77	51.83	ND	ND
Celulosa, %	34.38	36.47	38.28	% ELN	
Hemicelulosa %	27.25	26.23	24.71	49.95	42.1
Lignina, %	12.15	13.3	13.59		
Relación H:T	1.34	1.33	1.31	ND	ND

Fuente: Los datos de edades de 60 a 90 días fueron obtenidos (Chacón y Vargas, 2009) de Cartago, Costa Rica. 2008. \*datos de hacienda La Colina, \*\*datos de hacienda San José. MS= Materia seca, PC=proteína Cruda, EE= Extracto Etéreo, FND=Fibra Neutro Detergente, FAD= Fibra Ácido Detergente, Relación H:T= Relación Hoja: Tallo.

En el Cuadro 3.3 los datos de 120 y 180 días representan a las plantas de 4 y 6 meses a las que se les realizaron las pruebas, como es de observarse las tendencias de aumento de materia seca, disminución de cenizas, disminución de proteína cruda y aumento carbohidratos se mantiene a pesar de la Edad de la planta.

La disminución en la proteína al aumentar la edad del pasto se puede atribuir a una reducción de la actividad metabólica de la planta de manera que conforme se cosecha el forraje a una edad mayor, la síntesis de compuestos proteicos en la planta es menor, haciendo que los valores de PC bajen. Las hojas contienen en promedio 27 % más materia seca que los tallos. A medida que avanza la edad del material y se reduce la relación hoja:tallo, la materia seca en ambos componentes sufre un incremento, pero el valor nutricional comienza a decrecer más drásticamente en las hojas que en los tallos, posiblemente porque el efecto de senescencia afecta más a las hojas debido a que su cubierta es más sensible y la pérdida de agua se acelera, mientras que los tallos sufren un endurecimiento (lignificado) en la cubierta exterior que les permite retener un poco más su humedad (Chacón y Vargas, 2009).

### 3.5 Análisis Fisicoquímico realizado a las muestras de Zacate King Grass

Luego de llevarse a cabo el análisis Bromatológico de las plantas se procedió a realizar la evaluación del Poder calorífico de las muestras en la bomba calorimétrica modelo 1341 de la marca Parr, con la que cuenta la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de El Salvador.

Con las muestras pulverizadas se elaboraron pastillas de forma cilíndrica con dimensiones de 2 cm de diámetro y 5 mm de altura en la prensa hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador, y con dichas pastillas se realizaron las pruebas.

#### 3.5.1. Cálculo del poder calorífico de muestras de Zacate King Grass.

Se practicaron seis ensayos con su duplicado para cada una de las plantas, con las muestras ya tratadas. El procedimiento para esta prueba de laboratorio se puede encontrar en el Anexo E. Además se realizó, en la Planta Piloto, la determinación del porcentaje de Azufre, un factor necesario para el cálculo del poder calorífico, dicha prueba se realizó por duplicado con dos diferentes muestras de cada finca y el valor promedio se utilizó para cada finca, los resultados se presentan en el Cuadro 3.4.

Las muestras han sido catalogadas para este ensayo con bomba calorimétrica en A y B siendo B el duplicado, como puede observarse el porcentaje de error obtenido es menor al 2% lo que implica un buen grado de repetitividad en el procedimiento, con datos experimentales aceptables.

Los valores de las muestras desde la 1LMA hasta la 3LMB son los datos de la finca la Colina, el promedio de los valores de Poder Calorífico en esta finca es de 4,411.72 kcal/kg y los datos de las muestras desde la 1ARA hasta la 3ARB son los datos de la finca San José con un valor promedio de Poder Calorífico de 5,263.59 kcal/kg.

Se puede observar una clara diferencia en los valores del Poder calorífico en las plantas de ambas fincas, las muestras de la finca La Colina presentan valores de poder calorífico menores a 5000 kcal/kg esto es claramente debido a la edad de las plantas de la finca la Colina en comparación con la plantas de la finca San José, existe una correlación importante entre el porcentaje de fibra cruda y el poder calorífico, esto se demuestra al observar que para la finca San José, la muestra 1AR posee un porcentaje de fibra cruda de 39.6 siendo el mayor de la distribución, y un poder calorífico promedio es de 5483.20205 kcal/kg también el mayor de

todos, luego le sigue la muestra 3AR cuyo porcentaje de fibra cruda es de 36.77 y poder calorífico promedio de 5293.9249 kcal/kg, y por último la muestra 2AR con un porcentaje de fibra cruda de 32.63 y poder calorífico promedio de 5013.6351 kcal/kg.

Cuadro 3.4. Resumen de resultados análisis de poder calorífico de muestras de zacate King Grass a partir de ensayos con bomba calorimétrica

Finca	Muestra	kcal/kg	BTU/kg	kJ/kg	% de desviación	%Azufre
La colina (4 meses)	1LMA	3,412.40	6,142.32	14,277.49	1.9837	0.07700
	1LMB	3,481.46	6,266.63	14,566.44		
	2LMA	4,957.77	8,923.99	20,743.33	1.1145	
	2LMB	4,903.13	8,825.63	20,514.69		
	3LMA	4,818.69	8,673.64	20,161.40	1.5963	
	3LMB	4,896.86	8,814.35	20,488.46		
San José (6 meses)	1ARA	5,455.34	9,819.62	22,825.16	1.0110	0.04527
	1ARB	5,511.06	9,919.91	23,058.28		
	2ARA	5,009.10	9,016.39	20,958.09	0.1806	
	2ARB	5,018.17	9,032.70	20,996.01		
	3ARA	5,331.70	9,597.06	22,307.84	1.4374	
	3ARB	5,256.15	9,461.07	21,991.73		

Lo dicho anteriormente aplica para la finca La Colina, con excepción de la muestra 1LM pero como se mencionó anteriormente la muestra 1LM mostraba signos de deterioro, lo que pudo influir en los resultados obtenidos en el análisis químico.

De esta manera para obtener valores de poder calorífico más altos un factor crítico es el porcentaje de fibra cruda.

Una planta con mayor edad, posee mayor cantidad de material leñoso o porcentaje de fibra cruda, lo que favorece su uso como combustible para generación de energía eléctrica.

### 3.5.2. Comparación de poder calorífico con otras biomásas.

El valor del poder Calorífico Promedio final del Zacate King Grass en la finca San José (6 meses) fue de 5,263.59 kcal/kg un valor que es consistente con el poder calorífico de biomásas estudiadas con anticipación en El Salvador. El Cuadro 3.5 muestra valores de poder calorífico de residuos agrícolas producidos y estudiados en El Salvador.

Cuadro 3.5. Poder calorífico de residuos agrícolas y agroindustriales de cultivos tradicionales en El Salvador.

Residuo vegetal	Poder Calorífico kcal/kg
Maíz*	3,721.57
Caña de Azúcar*	3,668.58
Arroz**	2,817.20
Fríjol**	4,122.80
Sorgo**	4,084.40
Bagazo de caña	4,050.00
Cascarilla de café	4,200.00
Leña	4,106 - 4,562
Zacate King Grass (4 meses)	4,411.72
Zacate King Grass (6 meses)	5,263.59

\*Residuos de maíz y caña de azúcar (Berríos & Castro, 1997), \*\*Residuos de arroz, frijol y sorgo (Dominguez et al., 2000).

El poder calorífico promedio en plantas de Zacate King Grass de cuatro meses de edad resultante fue de 4,411.72 Kcal/kg y comparado con los valores reportados en el Cuadro 3.5 dicho valor sobrepasa el valor de poder calorífico de casi todas las demás biomásas utilizadas y estudiadas en El Salvador. El Poder calorífico promedio de plantas de King Grass con seis meses de edad fue de 5,263.59 kcal/kg, un valor elevado para biomasa, pero justificable debido a que esta planta de rápido crecimiento ha llegado a su maduración y por lo tanto ha alcanzado la concentración substancial de material leñoso en su tallo.

En el cuadro 3.6 se compara con combustibles utilizados en El Salvador, siendo inferior solamente al Etanol y a derivados del petróleo.

Cuadro 3.6. Poder Calorífico de algunos combustibles de uso convencional en El Salvador (Dominguez et al., 2000)

Combustible	Poder Calorífico kcal/kg	Combustible	Poder Calorífico kcal/kg
<b>Carbón Común (lignita)</b>	6,700	<b>Leña de ciprés</b>	4,341
<b>Petróleo</b>	10,000	<b>leña de Pepeto</b>	4,022
<b>Gasolina</b>	11,000	<b>Leña de madrecaao</b>	3,811
<b>Etanol</b>	6,400	<b>Metano(liquido)</b>	13,105
<b>Metanol</b>	4,700	<b>Etano (liquido)</b>	12,404
<b>Madera</b>	2,524	<b>Propano (liquido)</b>	11,980
<b>Carbón Vegetal</b>	6,798	<b>Isobutano (liquido)</b>	11,520
<b>Leña de café</b>	4,131	<b>Butano</b>	11,769
<b>Cascarilla de café</b>	4,190	<b>Pentano (liquido)</b>	11,730
<b>Leña de manzano</b>	3,973	<b>Zacate King Grass</b>	<b>5,264</b>

En el cuadro 3.7 se hace la comparación del poder calorífico del King Grass con otras biomásas utilizadas en países con tierras desérticas o saladas, se observa que su poder calorífico está en el límite superior de estas biomásas de tierras saladas.

Cuadro 3.7. Valores de poder calorífico de especies creciendo en tierra salada BSRS-II, en Pacca Anna cerca de Faisalabad (Pakistan)

Especies de plantas	Poder Calorífico kcal/kg	Especies de plantas	Poder Calorífico kcal/kg
<b>Pastos</b>		<b>Arboles</b>	
Leptochloa fusca	4,753	Eucalyptus camaldelunsis	4,890
Sporobolus arabius	5,308	Acacia ampliceps	5,332
Cynodon dareylon	5,685	Prosopis juliflora	5,018
Desmostacha bipinnata	5,351	Acacia nilorica	5,040
Imperata cylindrica	5,009	Leucaena leucocephala	5,024
		Tamarix aphylla	4,196
<b>Arbustos</b>		Parkisonia articulata	5,611
Kochia indica	5,107	Pongamia glabra	2,992
Sueada fruticosa	4,815	Azadirachta indica (neem)	5,234
Atriplex lentiformis	4,331	Dalvergia sissoo	4,606
Capparis aphylla	5,922		
Calatropis procera	5,922	Pennisetum Purpureum	5,264

## 4. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE EL ZACATE KING GRASS EN EL SALVADOR

Según el Cuadro 1.1 de la sección 1.2 (el cultivo de Zacate King Grass en El Salvador) existen 7 fincas que por el momento están destinadas al cultivo del Zacate King Grass o Pennisetum Purpureum, esto representa un extensión total de 750.06 Mz ó 524.59 hectáreas.

El rendimiento del King Grass cortado a los 6 meses, en una zona tropical es de 375 toneladas métricas por hectárea de hierba fresca en aproximadamente 75% de humedad. Secado a una humedad de 45% el rendimiento es de 200 TM al año por Hectárea. El rendimiento materia seca es de 100 TM por Hectárea.

El valor de poder calorífico promedio para plantas con 6 meses calculado mediante los ensayos con la bomba calorimétrica fue de 5,263.59 kcal/kg o 22,022.85 kJ/kg

De esta forma el potencial térmico del zacate King Grass se puede obtener mediante la siguiente fórmula

$$PT = RMS * PC * Terreno$$

Donde

TM = Tonelada Métrica

PT = Potencial Térmico

RMS = Rendimiento de Materia seca

PCs = Poder calorífico superior

$$PT = 100 \frac{TM}{ha} * 22,022,849.51 \frac{kJ}{TM} * 524.59ha * \frac{1GJ}{10^9kJ} * 2 cosechas$$

$$PT = 2,310.56 GJ$$

El potencial térmico de las plantas cultivadas en la totalidad del terreno será de 2,310.56 GJ en todo un año, sin embargo este valor energético, no representa cuanta electricidad se puede generar a partir de una plantación de King Grass. Para tal objetivo se necesita de un análisis termodinámico, en el cual se considere la transformación de energía térmica en energía eléctrica.

Proponemos entonces un análisis termodinámico del funcionamiento de una planta de generación eléctrica simple a partir de vapor generado por una caldera alimentada con King Grass.

#### 4.1 Análisis de planta de generación eléctrica simple a partir de vapor.

Conociendo la producción de materia seca de biomasa por hectárea (100 TM/ha) y el terreno destinado para el cultivo de King Grass (524.59 ha) y asumiendo que todo el terreno es cultivado con King Grass durante todo el año se tiene que la Producción de Material seco disponible es de:

$$\text{Producción de Material seco disponible} = 100 \frac{\text{TM}}{\text{ha}} * 524.59 \text{ Ha} * 2 = 104,858 \frac{\text{TM}}{\text{año}}$$

Sin considerar pérdidas de biomasa por traslado y condiciones ambientales que puedan repercutir en la cantidad de biomasa recolectada y almacenada, la cantidad de materia seca de biomasa que se tendría disponible es de:

$$\text{Flujo de material seco disponible} = 104,858 \frac{\text{TM}}{\text{año}} = 13.081 \frac{\text{TM}}{\text{h}}$$

Para la operación de calderas se utiliza el Poder Calorífico Inferior (PCI), sin embargo no se cuenta con el valor exacto de PCI debido a que no se contó con el equipo necesario que se utiliza en las pruebas que conllevan el cálculo de dicho parámetro, sin embargo según Escobar y Ronquillo, 2012, la composición del King Grass es similar a la composición de residuos agrícolas tales como bagazo de caña y según Berrios y Castro, 1997 para estos residuos el PCI es de un 10 a 5 por ciento menor que el PCS. Debido a que esto es una estimación, se tomará como correcto decir que el PCI del King Grass es 10% menor que el PCS. Sin embargo para estudios posteriores se recomienda realizar las pruebas concernientes para la estimación de PCI. Dicho esto la Potencia Efectiva que se puede obtener a partir de un caudal de biomasa de 13.081 TM/h sería de:

$$PE = 13.081 \frac{\text{TM}}{\text{h}} * 22,022.51 \frac{\text{MJ}}{\text{TM}} * 0.90 * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 72.02 \frac{\text{MJ}}{\text{s}} = 72.02 \text{ MW}$$

Para la generación de 1 MW se necesita de una turbina alimentada con un caudal de 3.62 TM/h de vapor, y para la producción de ese caudal de vapor se requiere una caldera que trabaje con una potencia de 3 a 5 MW (Aldoma Peña, 2010).

Para el caso en estudio, debido a la potencia que puede generar la combustión de King Grass (72.02 MW) se estimó conveniente una instalación de 8.5 MW, considerando que si toda la biomasa es recogida y procesada sin ninguna pérdida se podría duplicar esa capacidad instalada hasta 16 MW, sin embargo se tiene que tomar en cuenta las pérdidas y la humedad con la que entra la biomasa a la caldera.

#### 4.1.1. Análisis termodinámico de una central simple de generación eléctrica a partir de vapor

Para la producción de 8.5 kW se requiere de una turbina de vapor industrial, este análisis se ha basado en turbinas existentes en el mercado. El vapor alimentado a la turbina entra a una presión de 65 bar y una temperatura de 480 °C y sale a una presión de 0.1 bar y la temperatura de saturación a esa presión.

Este análisis termodinámico esta basado en el ciclo simple de generación de vapor que es el ciclo que sigue el agua/vapor en cualquier planta de generación eléctrica a partir de vapor.

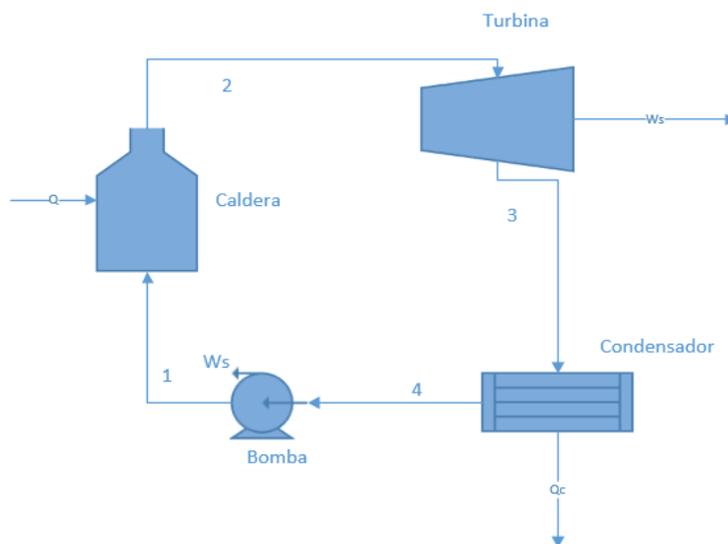


Figura 4.1. Ciclo Termodinámico para una planta de generación eléctrica simple (elaboración propia)

#### 4.1.2. Ciclo simple de Generación de Vapor

Como se observa en la figura 4.1, la planta contemplada es una planta simple, que estará compuesta por una caldera, una turbina, un condensador y una bomba.

##### a. Cálculos en los puntos de trabajo

**Punto 2. entrada en la entrada a la turbina:** las especificaciones de la turbina requieren que la presión de la caudal de vapor a la entrada de la turbina sea de 6,500 kPa a una temperatura de 480 °C, a estas condiciones la entalpia del vapor de agua es de  $H_2 = 3368.87$  kJ/kg y la entropía es  $S_2 = 6.77$  kJ/kgK

**Punto 3. Salida de turbina y entrada a condensador:** el vapor exhausto y agua líquida sale de la turbina y llega al condensador una presión  $P = 10$  kPa y a la temperatura de saturación a dicha presión  $T=45.81$  °C la entalpia del vapor de agua es  $H_3 = 2329.5511$  kJ/kg y la entropía es  $S_3 = 7.35$  kJ/kgK como esos parámetros están dentro de la zona de saturación, la calidad de ese vapor es de  $x = 0.89$  . Se consideró una eficiencia isoentrópica de turbina del 85% por lo que el trabajo de la turbina estimado fue de  $W_t = 1039.32$  kJ/kg (ver cuadro 4.2).

**Punto 4. Salida del condensador:** las condiciones a la salida del condensador son de líquido saturado a  $P = 10$  kPa y  $T = 45.81$  °C con una entalpía  $H_4 = 191.81$  kJ/kg y una entropía  $S_4 = 0.645$  kJ/kgK.

**Punto 1. Salida de bomba entrada a la caldera:** las bombas generalmente poseen una eficiencia del 85-90 %, en este cálculo toma el valor de 85% por lo que la bomba hace un trabajo  $W_b = 7.69$  kJ/kg (ver cuadro 4.2) aumentando la presión así hasta la presión de trabajo de la caldera  $P = 6500$  kPa y con un mínimo aumento de temperatura  $T = 46.30$  °C, la entalpía  $H_1 = 199.50$  kJ/kg y entropía  $S_1 = 0.653$  kJ/kgK.

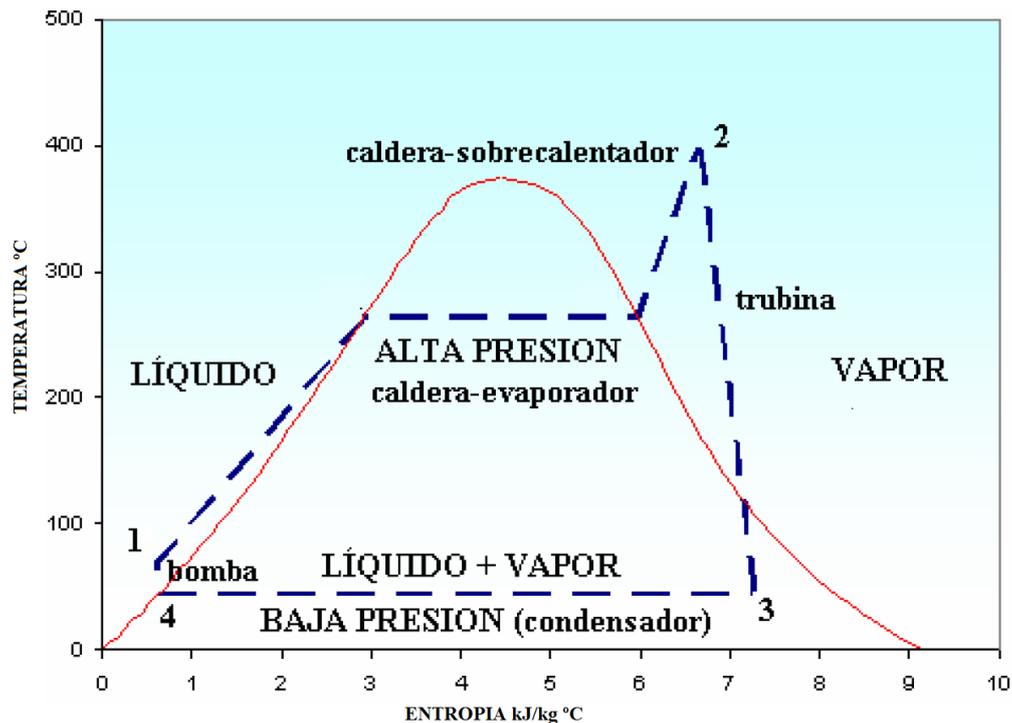


Figura 4.2. Diagrama TS del agua, con la ruta termodinámica del Ciclo simple de Generación de Vapor (Aldoma Peña, 2010)

La figura 4.2 muestra el diagrama Temperatura-Entropía en el que se basa el ciclo simple de generación de vapor para el proceso. El cuadro 4.1 muestra un resumen de los parámetros termodinámicos.

Cuadro 4.1. Resumen de parámetros termodinámicos para el ciclo de vapor simple de generación de vapor.

Cálculos en función de:	Estado	p, kPa	T, °C	x	h, kJ/kg	s, kJ/kgK
p, liq sat	1'	6500	280.85885		1,241.1691	3.075999
p, vap sat	1''	6500	280.85885		2,778.8288	5.8515107
p,T	2	6500	480		3,368.8732	6.7764654
p, S	3s	10	45.807548	0.8170017	2,146.1413	6.7764654
p, H	3	10	45.807548	0.8936756	2,329.5511	7.351495
p, liq sat	4	10	45.807548		191.8123	0.6492181
p, S	1s	6500	46.019199	0	198.34681	0.6492181
p, H	1	6500	46.299999		199.49996	0.652839

(1') y (1'') son los estados intermedios correspondientes a un economizador, calentador y evaporador que constituyen la caldera que se ha considerado; 3s es el estado al recorrer una línea isoentrópica dado para una turbina con una eficiencia isoentrópica

Cuadro 4.2. Trabajo de turbina y de bomba, isotrópicos y reales

Equipo	Trabajo Especifico $\dot{W}$ kJ/kg
Turbina isoentrópica	1,222.7319
Turbina real	1,039.3221
Bomba isoentrópica	6.5345187
Bomba real	7.6876691

#### 4.1.3. Estudio energético del Ciclo simple de generación de vapor.

La potencia generada por la turbina viene dada por la expresión

$$Pe = q * (h_2 - h_3)$$

Donde

$$Pe = \text{Potencia electrica en } \left[ \frac{kJ}{s} \right]$$

$$q = \text{caudal masivo de vapor } \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

$$h = \text{entalpía específica del vapor a la entrada y salida de la turbina } \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

$$8.5 * 10^3 \left[ \frac{kJ}{s} \right] = q * (3368.87 - 2329.55) \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

Despejando y desarrollando

$$q = 6.95 \frac{kg}{s} = 25.03 \frac{TM}{h}$$

Por lo que se debe alimentar a la turbina 25.03 toneladas de vapor por hora. Ese caudal será entregado por la caldera que deberá trabajar con una potencia térmica estimada mediante la siguiente ecuación

$$PC = q * (h_1 - h_2)$$

Donde

$$PC = \text{Potencia necesario para generar el caudal de vapor necesario } \left[ \frac{kJ}{s} \right]$$

$$q = \text{caudal masivo de vapor} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

$$h = \text{entalpía específica del vapor a la entrada y salida de la caldera} \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

$$PC = 6.95 \frac{kg}{s} * (3368.87 - 199.50) \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = 2,2032.36 \frac{kJ}{s} = 22.03 \text{ MW}$$

Generalmente el rendimiento de las calderas se encuentra entre un 80 a 90% , considerando un rendimiento de 80% de la caldera la potencia real será de 27.54 MW.

Con los 72 MW térmicos que tenemos disponibles de la biomasa, se puede duplicar la capacidad de generación eléctrica, podría ser de hasta 16 MW. Sin embargo es recomendable siempre y cuando se consideren varios factores, como la calidad del King Grass, ya que no todas las fincas son administradas por una sola institución y algunos cultivos pueden no alcanzar los parámetros adecuados, también se debe de considerar que al procesar la biomasa se puede presentar pérdidas por transporte, almacenamiento, y condiciones climáticas como vientos que dispersen las pequeñas partículas de materia seca.

Entonces si se tiene una capacidad de generación eléctrica de 16 MW, si se garantiza la alimentación constante e ininterrumpida de biomasa durante todo un año, considerando que la caldera puede trabajar 8000 horas al año:

$$\text{Generación} = 16 \text{ MW} * 8000 \text{ h} = 128,000 \text{ MWh/año}$$

$$\text{Generación} = 128 \text{ GWh/año}$$

Entonces el potencial de generación eléctrica que posee el cultivo de 524 hectáreas de terreno con un rendimiento de materia seca de 100 TM/ha de Zacate King Grass con una edad de maduración de 6 meses es de 128 GWh anuales.

## 5. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos de las pruebas de humedad extraída de las plantas de King Grass que se efectuados en las muestras de zacate King Grass (ver resultados cuadro 3.1), indican que el porcentaje de materia seca se encuentra en un rango del 20-26% y según Chacón y Vargas, 2009. El pasto King Grass tiene un porcentaje de materia seca de un 24%. Por lo que puede decirse que los resultados reflejan que las plantas poseen las características promedio de rendimiento de materia seca.

El porcentaje de cenizas que presentaron las plantas fue muy variable pero menor de un 20%, este es un factor importante a tomar en cuenta debido a que valores bajos de ceniza como los posee la muestra 1 AR de 7.96% favorecen los costos de operación y una más alta disponibilidad en los equipos.

El porcentaje de proteínas para las fincas en estudio no varió mucho de una a otra, el valor mayor 8.42% lo presentó la muestra 2AR de la finca San José, donde están las plantas con mayor edad y el menor valor de proteínas lo presentó la muestra 2LM de la finca la Colina que posee plantas con menor edad de maduración. El porcentaje de grasas incrementa al aumentar la edad de la plantas.

Los valores de porcentaje de fibra cruda son menores en la finca con plantas de menor edad, pero los resultados del porcentaje de extracto libre de nitrógeno es mayor para estas plantas.

Al extraer la humedad de las plantas estudiadas, el valor promedio del poder calorífico para la finca La Colina es 4,411.72 kcal/kg, con plantas de 4 meses, y el valor promedio de poder calorífico para la finca San José fue de 5,263.59 kcal /kg.

A partir del valor de poder calorífico de la finca San José, se obtuvo que de los terrenos (524.59 ha) actualmente cultivados o con planes de ser cultivados con Zacate King Grass el potencial energético térmico evaluado fue de 2,310.56 GJ.

A partir de un análisis para una planta de generación de electricidad simple se obtuvo que se puede producir 104,858 TM de materia seca al año, con lo cual se tendría disponible 13.081 TM/h para alimentar una caldera de biomasa durante un año. La potencia térmica sería de 72.02 MW.

El análisis termodinámico del ciclo de Rankine realizado arroja datos que indica que se necesita 25.03 TM/h de vapor para generar 8.5 MW de potencia eléctrica, y para generar ese caudal de vapor, la caldera debe trabajar con una potencia de 27.54 MW.

Sin embargo la potencia que podría generar la combustión de toda la biomasa sería suficiente para alimentar 2.5 calderas del tipo utilizado para generar 8.5 MW de potencia Eléctrica, trabajando a las condiciones especificadas en esta investigación.

Para un año y considerando las pérdidas que pueden presentarse en la manipulación de la biomasa, durante el cultivo, transporte desde las zonas de cultivo hasta las plantas generadoras de electricidad así como perdidas por volatilidad de partículas en aire por vientos, en el almacenaje de la biomasa, e inclusive por la humedad de entrada a la caldera. Podría llegarse a tener una capacidad instalada de 8.5 MW a 16 MW de generación eléctrica. Y la generación de hasta 16 MW de capacidad instalada para una planta que trabaja 8000 horas al año es de 128 GWh/año.

Según el informe energético para la región de CEPAL en 2015 la generación eléctrica a partir de combustibles fósiles abarcaba un 43% de la generación eléctrica neta de El Salvador, con un valor de 2396.5 GWh. La generación de 128 GWh por biomasa equivaldría a un 5% de la generación a partir de combustibles fósiles y un 2 % de la generación eléctrica neta de El salvador.

Las 524 hectáreas de terreno están destinadas al cultivo del King Grass para la generación energética, pero no todo está cultivado debido a la caída de los precios de los combustibles fósiles. De las fincas que están actualmente siendo cultivadas, una parte de la biomasa de King Grass obtenido se usa como combustible en las calderas de Textufil y otra parte se comercializa con CASSA.

Según el Cuadro 2.7 el total de energía eléctrica generado en El Salvador a partir de la cogeneración fue de 345 GWh en 2015, el producir 128 GWh a partir de King Grass significaría un aumento del 27% de la producción total a partir de la cogeneración.

## OBSERVACIONES

1. Existen siete fincas con plantaciones de Zacate King Grass para fines energéticos, se seleccionó la finca San José y La Colina por cuestiones de seguridad y accesibilidad y se realizó una comparación por edades de solo dos fincas entre plantas de cuatro meses correspondientes a la hacienda La Colina y plantas de 6 meses correspondientes a la hacienda San José.
2. Las fincas evaluadas cuentan con condiciones topográficas, tipo de suelo, clase agrológica similares, las condiciones hidrológicas indican que ambos terrenos poseen una adecuada fuente de irrigación durante periodos secos.
3. Durante la toma de muestras se comparó la altura de las plantas de 6 meses con las de 4 meses y se observó que existe una diferencia mínima en la altura entre estas dos plantas de diferentes edades, la diferencia se presenta en el grosor del tallo, así como una mayor cantidad de hojas.
4. Se observa una correlación entre la edad de la planta y el contenido de humedad, las plantas con mayor edad poseían menos humedad, este es un factor importante considerando que la biomasa se alimentará como combustible en calderas, por lo que mientras menos humedad posea, menos es la cantidad de agua que se debe de eliminar de las plantas.
5. Se observa una mayor cantidad de cenizas en plantas de 6 meses, por lo que se confirma una relación directa entre cantidad de hojas y porcentaje de cenizas.
6. En general se observa que el factor que más incide en el rendimiento calorífico, es el porcentaje de humedad y por lo tanto el contenido de materia seca.
7. El poder calorífico calculado es el poder calorífico superior, para la operación de calderas se necesita de conocer el poder calorífico inferior. Debido a que no se contaba con los datos se tomó una consideración sobre el poder calorífico superior, planteándose así un poder calorífico inferior al 90% del PCS, según una estimación encontrada en el trabajo de Berrios y Castro, 1997.

8. El poder calorífico calculado es para materia a la cual se le extrajo la mayoría de humedad, mediante secado en estufa, en la práctica en una planta generadora de energía eléctrica es más difícil conseguir un secado eficiente y se requiere de etapas de secado anteriores a la alimentación de la caldera, para lograr mejores rendimientos de caldera.
9. Los valores de poder calorífico obtenidos en este estudio, están dados en base seca. En la realidad es difícil de conseguir que la biomasa entre a la caldera totalmente seca, ya que se necesitan de ciertos equipos o etapas anteriores a la alimentación de caldera para acondicionar la biomasa a un estado sin humedad, un mayor porcentaje de humedad disminuye el rendimiento de la caldera, ya que una parte de la potencia energética necesaria para su funcionamiento derivaría en evaporar el agua que trae la biomasa alimentada, dando como resultado una disminución en la generación neta de una central eléctrica impulsada por biomasa.
10. Una planta de generación eléctrica a partir de vapor tiene un rendimiento muy bajo, la mayor parte de energía que le es transmitida al vapor en la caldera es disipada después de salir exhausto de la turbina. Una planta de este tipo es una opción a considerarse, sin embargo no es la única opción y gasificadores y otros tipos de conversión de biomasa también pueden considerarse, aun así la opción más viable económicamente es la instalación de un central generadora por vapor.

## CONCLUSIONES

1. De los resultados obtenidos en las pruebas colorimétricas para plantas de 4 meses se tiene un poder calorífico de 4,411.72 kcal/kg y 5,263.59 kcal/kg para plantas de 6 meses de edad, se puede concluir que existe una relación directa entre la edad de crecimiento del zacate King Grass y su poder calorífico, siendo que a mayor edad de la planta mayor el poder calorífico.
2. El tiempo de maduración óptimo del *Pennisetum purpureum* es de 6 meses para obtener el máximo potencial energético, aunque nada indica que una planta con mayor edad no posea un poder calorífico mayor, la alimentación anual de biomasa que podría ofrecer una plantación con mayor edad se vería disminuida por lo que afectaría también la generación neta.
3. El poder calorífico superior promedio de plantas de 6 meses de edad de zacate King Grass calculado de 5,263.59 kcal/kg un valor que supera a todas las biomásas estudiadas en El Salvador con anterioridad, por lo que proyectos de generación eléctrica a partir de esta especie forrajera de *Pennisetum* resultan en una muy buena opción como cultivo energético.
4. El potencial calórico o térmico de la plantación evaluada que consta de 524 ha de zacate King Grass es de 2310.56 GJ, ese terreno podría alimentar con biomasa durante un año una caldera que necesitaría 13.081 TM/h trabajando 8000 horas u 11 meses al año las 24 horas al día.
5. El análisis termodinámico realizado fue para una planta que genera electricidad por medio de turbina alimentada por vapor sobrecalentado, con una potencia de 8.5 MW pero dicha planta solo necesita menos de la mitad de la alimentación calculada de 13.081 TM/h, un arreglo alternativo serían dos plantas generadoras con la misma potencia de 8 MW, para una capacidad de generación de 16 MW, para de esta forma lograr una generación eléctrica neta de 128 GWh/año.

6. El poder calorífico superior promedio del zacate King Grass es 5,263.59 kcal/kg para plantas de 6 meses de edad este valor es en base seca y la generación eléctrica neta realizada a partir de estos valores es un estimado de la electricidad neta que se puede llegar a producir.

## RECOMENDACIONES

1. Por ser plantas con tres cuartas partes de humedad, es importante reforzar la investigación en el manejo de técnicas oportunas de extracción de humedad y secado, el paquete tecnológico de la cosecha debe ser pensado para que se pierda al menos la mitad de humedad desde el corte hasta la llegada a los patios del área industrial, y tratar de almacenar el material en condiciones de baja humedad relativa y con ventilación forzada para que se continúe con el proceso de extracción de humedad, ya que entre más seca ingresa la biomasa a la caldera más eficiente se vuelve el proceso de generación, porque se evita perder energía en el proceso de evaporación de humedades. Este trabajo no contempla el secado del material biomásico, y sobre el tipo de cosecha, antes de su uso en calderas. Se recomienda realizar trabajos a profundidad para mejorar los procesos de secado y aumentar las eficiencias de los procesos de generación.
2. De igual forma no se consideraron los aspectos de almacenamiento del King Grass, el cual es importante para el proceso de secado, se recomienda realizar trabajos de investigación en esta dirección.
3. A nivel de generación eléctrica, es posible combinar el King Grass con otros subproductos agrícolas, se recomienda una investigación de potencial energético de estas combinaciones, según el equipo para la transformación.
4. Se recomienda la continuación de este trabajo de investigación con un ingeniero electromecánico o similar, que analice las variantes a nivel de generación eléctrica: eficiencias de calderas, generadores, procesos de secado, técnicas de gasificación, combinación de King Grass con otros productos, y otros detalles. De esta forma se puede afinar de mejor forma el modelo técnico y se podría presentar un modelo financiero del proyecto.
5. El King Grass como biomasa puede también convertirse en energía en procesos de gasificación y pirólisis, entre otros, se recomienda un estudio comparativo para la generación energética por medio de estas tecnologías de conversión.

6. Esta investigación forma parte de un paquete de estudios realizados por estudiantes de la Universidad de El Salvador para la evaluación energética de diferentes tipos de biomasa, sin embargo existen muchas alternativas de biocombustibles que aún pueden ser estudiados, se recomienda la continuidad en la investigación de otros tipos de biomasa.

## REFERENCIAS

1. Aldoma Peña, G. (2010). Diseño de una central de biomasa de 1 MW ampliable a 2 MW. Tarragona: Universitat Rovira I Virgili.
2. BCR. (2016). Informe Economico a febrero 2016. San Salvador: Banco Central de Reserva de El Salvador.
3. Berríos, G. G., y Castro Fuentes, M. R. (Julio de 1997). Evaluación del Potencial Energético de Residuos Agrícolas Vegetales en El Salvador. Parte I: Residuos de caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*) y Maíz (*Zea mays*). San Salvador, El Salvador: Universidad de El Salvador.
4. CEPAL. (2014). Centroamerica: estadísticas de producción del subsector eléctrico. Ciudad de Mexico: Naciones Unidas.
5. CNE. (2011). Combustibles en El Salvador: Hidrocarburos y Biocombustibles. San Salvador: Consejo Nacional de energía.
6. CNE. (marzo de 2011). Plan Maestro para el Desarrollo de la energía Renovable en El salvador. San Salvador.
7. CNE. (2012). Política Energética Nacional. San Salvador: Consejo Nacional de Energía.
8. CNE. (2013). Primera Actualización al Plan indicativo de la Expansion de la generación electrica de El Salvador 2012-2026. San Salvador: Consejo Nacional de Energía.
9. Davis, S. H. (2014). Biomass in the Energy Industry an indroduction. London: BP Global.
10. Díaz Montejó, L. L., y Portocarrero Rivera, E. T. (2002). Manual de Producción de caña de Azúcar (*Saccharum officinarum* L.). Tegucigalpa: Universidad Zamorano.
11. DIGESTYC. (2007). Insicadores Socioeconomicos. San Salvador: DIGESTYC.
12. DiPippo, R. (2012). Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact. Oxford: Elsevier.
13. Dominguez Araujo, K. C., Henríquez Pérez, C. M., y Parras Centeno, S. (2000). Evaluación del Potencial Energético de Residuos Agrícolas y del Procesamiento de: Arroz (*Oriza sativa*), Frijol (*Phaseolus vulgaris*) y Sorgo (*Sorghum vulgaris*). San Salvador, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de El Salvador.
14. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., y Sokona, Y. (2012). Fuentes de Energía Renovables y Mitigación del cambio Climático. Potsdam: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

15. El Baasam, N. (2010). Handbook of Bioenergy Crops. London: Earthscan.
16. Escobar M., J. J., Y Ronquillo Molina, O. E. (Noviembre de 2012). Respuesta a la fertilización Organica con el uso de Biol y potásica inorgánica en King Grass (*Pennisetum purpureum*) para la estimación energetica de potencial productivo de biogás, Zamorano, Honduras.
17. Espinoza, F., Argenti, P., Gil, J., León, L., y Perdomo, E. (2001). Evaluación del pasto king grass (*pennisetum purpureun* cv. king grass) en asociación con leguminosas forrajeras. Cartago: Zootecnia Tropical.
18. FAO. (2006). Buenas Prácticas Agropecuarias (BPA) en Gramineas de Corte. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
19. Fernandez Arenivar, J. M., Magaña Nuñez, M. M., y Pineda Alfaro, K. M. (2015). Evaluación de Huella ecológica de la produccion de Bioetanol y Biodiesel en el Salvador. San Salvador. Universidad de El Salvador.
20. Flury, K., y Frischknecht, R. (2012). Life Cycle Inventories of Hydroelectric Power Generation. Uster: ESU-services Ltd.
21. FOCER. (2002). Manuales sobre Energía Renovable. Fortalecimiento de la capacidad en Energía renovable Para America Central. San José, Costa Rica : PNUD, GEF, BUN-CA.
22. Funes, R. A. (1984). Producción de Biomasa (*Erytrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook) y King Grass (*Pennisetum Purpureum* \* *P. Typhoides*) Intercalados, en funcion de la densidad de siembra y la frecuencia de poda del poro. Informe de problema. Turrialba, Costa Rica: Universida de Costa Rica, Sistema de Estudios de Posgrado.
23. Gehringer, M., y Loksha, V. (2012). Manual de Geotermia: Como planificar y financiar la generación de electricidad. Washington D.C: Banco Mundial.
24. Hidalgo Bonilla, J. A., Maravilla Carranza, V. A., y Ramírez Castro, W. O. (2010). Aprovechamiento del Biogás en El Salvador. San Salvador: Universidad Centroamerica "José Simeón Cañas" .
25. IEA. (2011). World Energy Outlook. Paris: Internacional Energy Agency.
26. IEA. (2015). CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion. París: International Energy Agency.
27. IICA. (2010). Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiésel. San José, C.R: Instituto Interamericano de Cooperación por la Agricultura.
28. LaGeo. (5 de Junio de 2016). lageo.com.sv. Obtenido de <http://www.lageo.com.sv/>

29. MARN. (11 de Julio de 2016). <http://www.marn.gob.sv/>. Obtenido de <http://www.marn.gob.sv/expedientes-de-estudios-de-impacto-ambiental-en-fase-de-consulta-publica/>
30. Méndez de Vigo, G. E., y Torrego Giralda, A. (2000). Cambio Climático: Hacia un nuevo modelo Energético. Madrid: Colegio Oficial de Físicos.
31. Miles, T. R. (2011). Energy and Power Generation Handbook. New York: ASME.
32. Moeller & poeller Engineering. (2014). Analysis of the Impact of the integration of 100MW of Non-Conventional Renewable Energy (PV/Wind) on the Spinning Reserve of the Electrical System of El Salvador. San Salvador: Cooperación alemana.
33. Mudhoo, A. (2012). Biogas Production: Pretreatment Methods in Anaerobic Digestion. New Jersey: Wiley.
34. Ontario Power Generation. (2014). How It Works: Electricity Generation. Ontario.
35. Ortez Sandoval, D. D., y Zelada Quan , Y.-L. M. (Octubre de 2010). Evaluación del Potencial Energetico de Desechos Solidos de Granjas de Engorde Avicolas en El Salvador. San Salvador, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de El Salvador.
36. Pew Center on Global Climate Change. (2011). Cogeneration: Combines Heat and Power. New Jersey: Climate TechBook.
37. Ramírez, J. L., Verdecia, D., y Leonard, I. (2008). Rendimiento y caracterización química del Pennisetum. REDVET, 2-8.
38. Rodríguez, R. (1985). Producción de biomasa de poró gigante (*Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F.Cook) y king grass (*Pennisetum purpureum* x *P. typhoides*) intercalados en función de la densidad de siembra y la frecuencia de poda del poró. Cartago: Turrialba.
39. U.S. EIA. (2016). International Energy Outlook 2016. Washington: U. S. Energy Information Administration.
40. Velasco, F. R. (2009). Estudio de viabilidad y diseño de una planta de cogeneracion para una industria Cárnica. Madrid: universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politecnica Superior.
41. WEC. (2016). World Energy Perspectives. New York: World Energy Council.

# ANEXOS

ANEXO A

CONTRIBUCIONES A LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> POR CONSUMO  
ENERGETICO

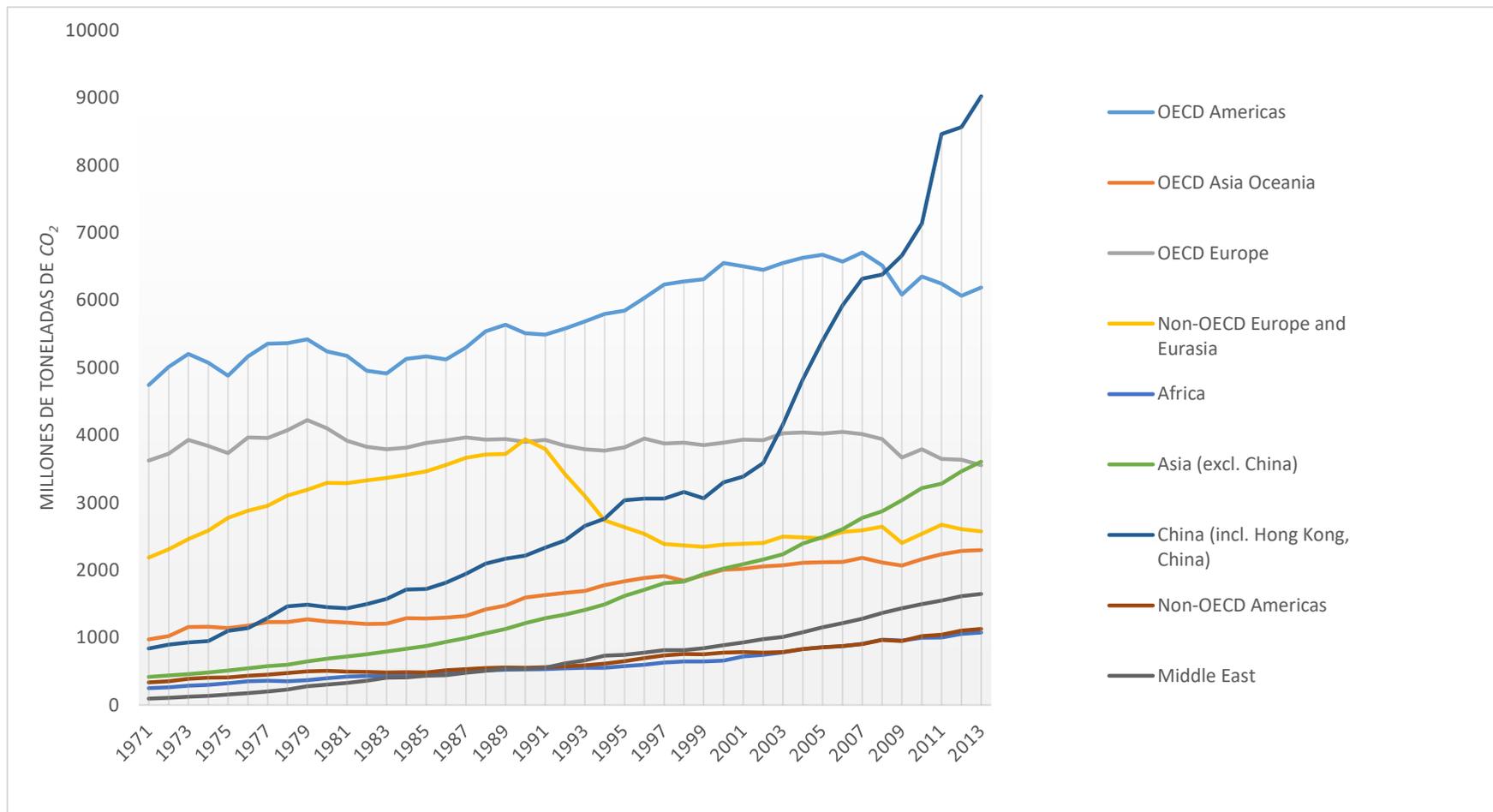


Figura A- 1: Histórico de emisiones de CO<sub>2</sub> mundial por región. Fuente: (IEA, 2015) nota: OECD es la organización para la cooperación y el desarrollo económico.

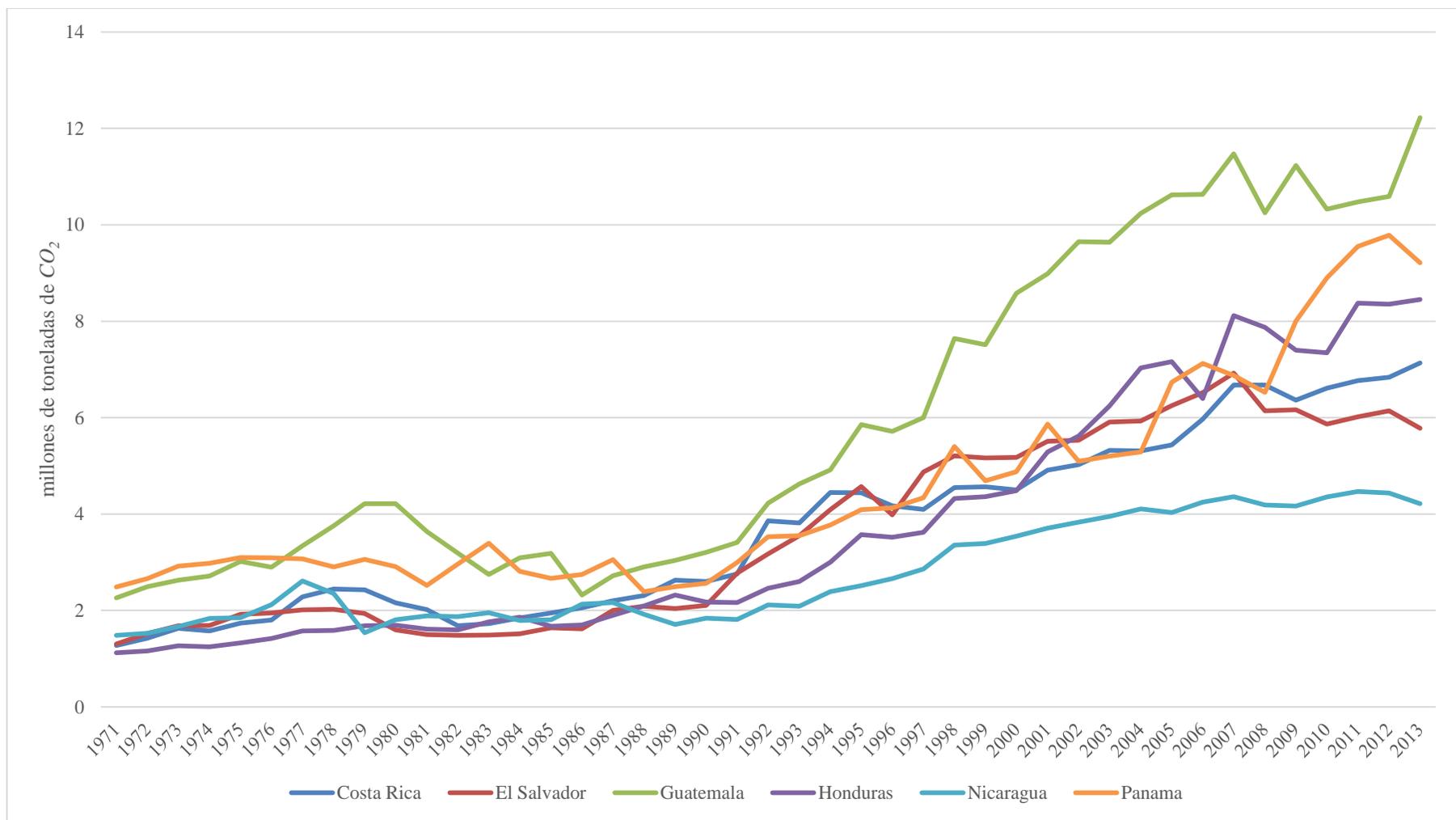


Figura A- 2: Histórico de las Emisiones de CO<sub>2</sub> de los países de Centroamérica. Fuente: (IEA, 2015). Nota: Centroamérica pertenece a la región de los países de América no suscritos a la OECD

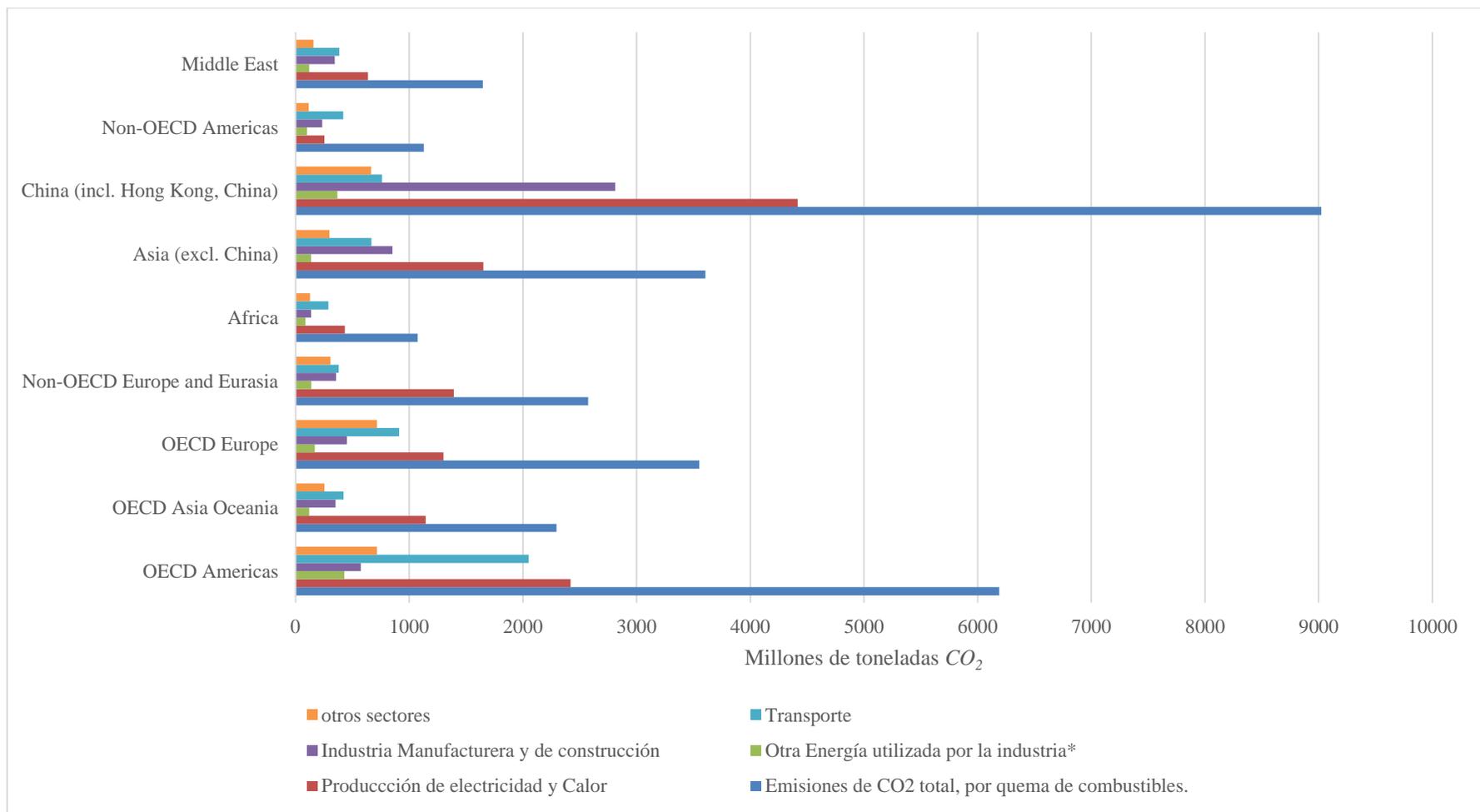


Figura A- 3: Emisiones de CO<sub>2</sub> por sectores económicos de las regiones según su pertenencia a la OECD. Fuente: (IEA, 2015)

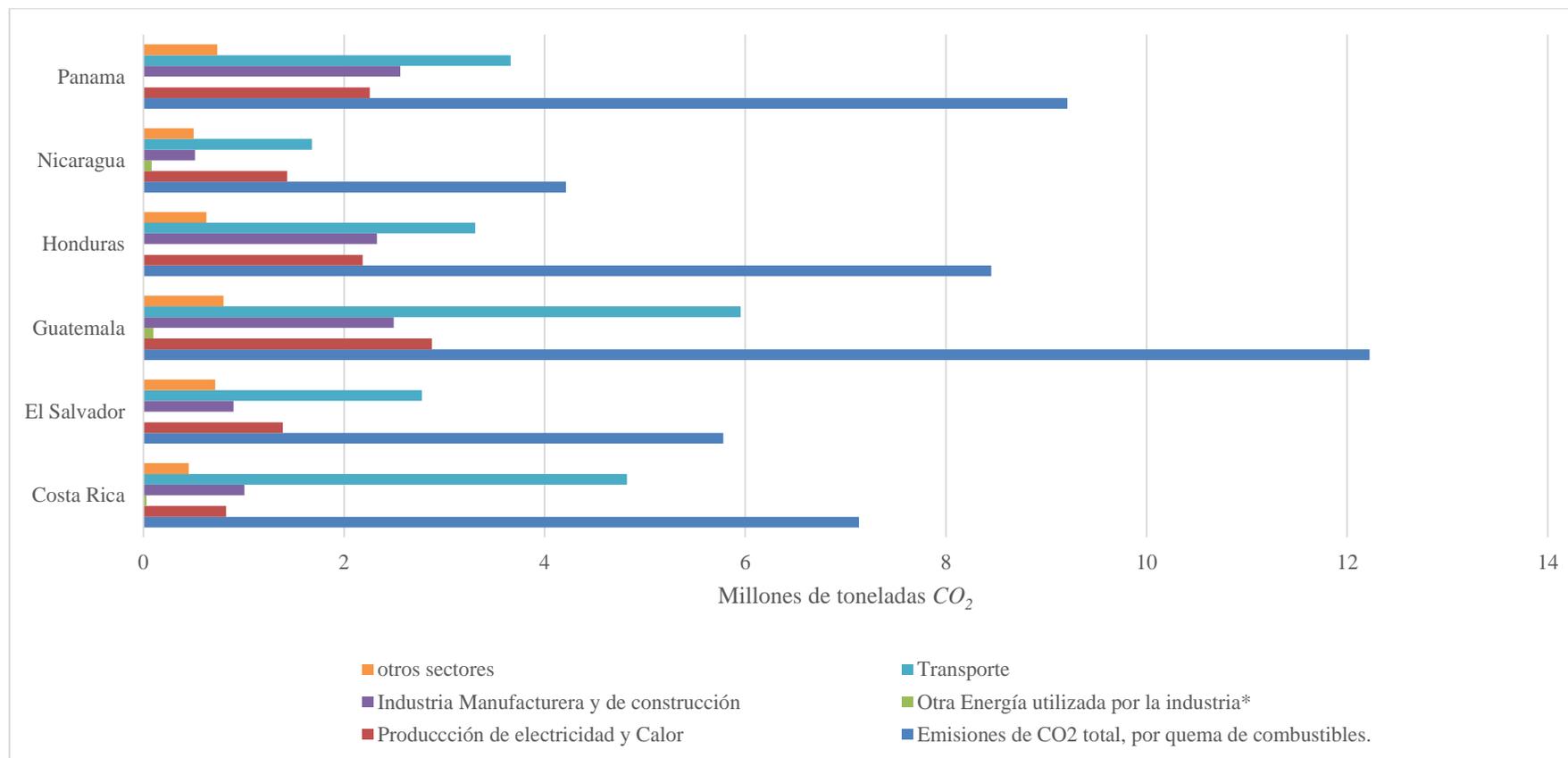


Figura A- 4: Emisiones de CO<sub>2</sub> por sectores económicos de los países de Centroamérica. Fuente: (IEA, 2015)

ANEXO B

USO POTENCIAL DEL SUELO EN EL SALVADOR

# USO POTENCIAL DE SUELO DE LA REPÚBLICA DE EL SALVADOR, C.A.

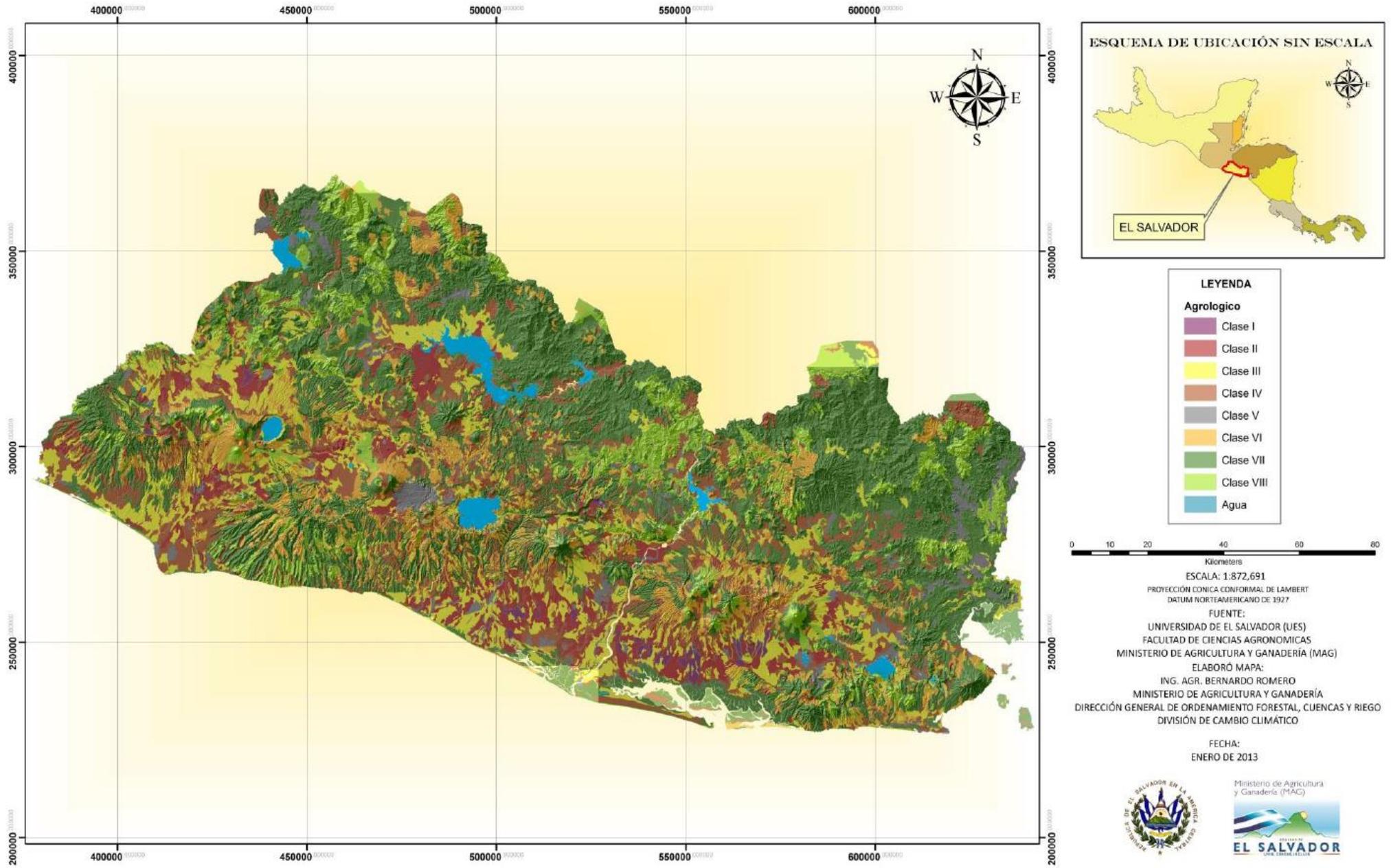


Figura B- 1: Mapa de uso potencial del suelo en El salvador

ANEXO C

MARCHAS DE LABORATORIO: ANALISIS BROMATOLOGICO  
PROXIMAL

## ANÁLISIS BROMATOLÓGICO PROXIMAL

### Determinación de Humedad

#### Fundamento

La cantidad de agua se elimina por calentamiento de la muestra en una estufa de vacío a temperatura de 105°C durante cinco horas y presión de 100 mm de Hg.

#### Procedimiento

- Calentar a 105°C en una estufa de vacío una caja de aluminio durante un período de 2 horas. Enfriar en desecador durante 30 minutos, pesar en balanza analítica (anotar el peso (g)).
- En la caja de aluminio tarada pesar dos gramos de muestra previamente homogeneizada (anotar el peso (g)).
- Colocar destapada la caja de aluminio más muestra en la estufa de vacío (previamente calentada a 105°C) durante 5 horas. Ajustar la presión del vacío.
- Retirar la caja de la estufa, tapar y poner en desecador para que enfríe durante 30 minutos.
- Pesar.
- Realizar el mismo procedimiento para las tres variedades por quintuplicado.

#### Cálculos

Peso de muestra = (Peso de caja con muestra – Peso de caja vacía).

Pérdida de peso = (Peso de caja más muestra antes de secar – Peso de caja más muestra después de secar).

$$\% \text{ de Humedad} = \frac{\text{Pérdida de peso (g)}}{\text{Peso de muestra (g)}} \times 100$$

## DETERMINACION DE CENIZAS

### Fundamento

La destrucción de la materia orgánica por incineración de cada muestra se lleva a cabo en un horno de mufla a temperatura de 550°C por un período de dos horas, quedando solo el material inorgánico llamado CENIZA que no se destruye a esta temperatura.

### Procedimiento

- Colocar el crisol limpio bien identificado en un horno de mufla, calentar a 550 °C por una hora.
- Sacar el crisol del horno mufla, colocar en un desecador y enfriar durante 30 minutos.
- Pesar el crisol vacío en una balanza analítica digital, anotar el peso.
- Pesar en una balanza analítica digital aproximadamente 2 gramos de muestra a la que ya se le ha determinado la humedad en el crisol de porcelana tarado.
- Colocar el crisol en el horno de mufla y mantener a temperatura de 550 °C durante 2 horas; controlar la temperatura.  
Retirar el crisol del horno de mufla, colocar en el desecador durante 30 minutos y pesar (anotar este peso).
- Guardar la muestra de ceniza para la solubilización y determinación de minerales.
- Realizar el mismo procedimiento para las tres variedades por quintuplicado.

### Cálculos

Peso de muestra = (Peso de crisol más muestra- Peso de crisol vacío).

Peso de la ceniza = (Peso de crisol con cenizas) - (Peso de crisol vacío).

$$\% \text{ de ceniza} = \frac{\text{Peso de ceniza (g)}}{\text{Peso de muestra (g)}} \times 100$$

## DETERMINACION DE NITRÓGENO PROTEICO

### Método micro kjeldahl

#### Fundamento

- Destrucción de la materia orgánica por acción del ácido sulfúrico concentrado y caliente. Este actúa sobre la materia orgánica deshidratándola y carbonizándola. El carbón es oxidado y el nitrógeno reducido a amoníaco en presencia de reactivos específicos que actúan como catalizadores. El amoníaco desprendido queda fijado en el ácido sulfúrico como sulfato de amonio, que establece en las condiciones de trabajo.
- Liberación del amoníaco formado, recogiénolo en un volumen conocido de ácido bórico formándose borato de amonio.
- El borato de amonio se titula con ácido clorhídrico empleando como indicador una mezcla de verde de bromocresol y rojo de metilo.

#### Procedimiento

##### Digestión

- Pesar en papel filtro más o menos 0.1 g de muestra y colocarla en un tubo tecator para micro kjeldahl de 250 mL.
- Agregar al tubo, que contiene la muestra pesada:
  - 6.0 mL de ácido sulfúrico.
  - 3 g de la mezcla de catalizador (sulfato de potasio y sulfato de cobre).
- Agitar durante 5 minutos ésta mezcla y colocar los tubos en el equipo de digestión Kjeldhal, al mismo tiempo conectar el sistema de extracción de vapores y condensación de gases. Mover constantemente (por medio de rotación) los tubos y esperar hasta que la solución esté de color azul o verde.

##### Destilación

- Enfriar los tubos, agregando aproximadamente 80 mL agua destilada esperar que enfríen nuevamente.\*
- \* Colocar el tubo en el equipo de destilación.
- En un erlenmeyer de 250 mL colocar 25 mL de la solución de ácido bórico más indicadores y colocarlo en el aparato de destilación (solución de color rojo).

- Agregar 60 mL de solución de hidróxido de sodio al 40%.
- Recibir el destilado en el erlenmeyer de 250 mL el que debe estar en el aparato después de 5 minutos de trabajo del mismo (hasta que complete la destilación se observará un cambio del indicador de rojo a verde. Deje enfriar el tubo por 10 a 15 minutos y luego retirarlo).

#### Titulación

- Titular el destilado obtenido con solución de ácido clorhídrico 0.1N hasta cambio de color del indicador que va de verde a rojo.
- Realizar los mismos procedimientos para las tres variedades por quintuplicado.

#### Cálculos

$$\% \text{ Nitrógeno} = \frac{(\text{mL HCl muestra} - \text{mL HCl testigo}) \times \text{N de HCl} \times 0.014 \times 100}{\text{Peso de muestra (g)}}$$

0.014= Miliequivalentes del nitrógeno.

% de proteína cruda = % Nitrógeno x 6.25.

Este factor de 6.25 se aplica a la mayoría de proteínas animales y vegetales ya que se asume que en su composición poseen entre 16% a 19% de N, cuando se trate de otro tipo de muestra, se debe buscar el factor correspondiente.

## DETERMINACION DE EXTRACTO ETÉREO

### Fundamento

El éter se evapora y se condensa continuamente, al pasar a la muestra extrae materiales solubles. El extracto se recoge en un balón de fondo plano y cuando el proceso se completa, el éter se destila y se recolecta en otro recipiente y la grasa cruda que queda en el balón se seca y se pesa.

### Preparación de material de vidrio y dedales

#### Procedimiento

- Pesar en papel filtro más o menos 2 gramos de muestra a la que se le ha determinado la humedad a 105°C y colóquelos en un dedal de extracción, limpio y seco. Anotar el peso como “peso seco”.
- Cubrir la muestra con un papel filtro de casi igual diámetro al interior del dedal o póngale algodón. Esto permite que el éter se distribuya en forma uniforme.
- Colocar el dedal con la muestra en el recipiente para muestras y fíjelo bajo el condensador del equipo de extracción.
- Pesar el balón limpio y seco.
- Agregar 150 mL de éter al balón de fondo plano y colóquelo sobre el condensador.
- Abrir la llave del agua que enfría el condensador.
- Observa si hay escapes de éter después de que este comienza a ebulir y condensarse. Cuando el nivel del éter en el balón de grasa baje y suba constantemente (debido a que una porción siempre está volatilizándose y otra condensándose), el aparato puede dejarse solo y realizar observaciones periódicas. El periodo de extracción es de 8 horas.
- Después de que la extracción se complete, baje los condensadores y permita que el dedal drene completamente.
- Remover las muestras y colocar en beaker para recoger el éter.
- Colocar nuevamente los balones de grasa y destile el éter.
- Poco antes de que el éter en los balones de grasa se evapore hasta sequedad, remover los balones de grasa.
- Vaciar el éter destilado en un recipiente especial para conservar el éter usado.

- Completar la evaporación del éter que queda en los balones de grasa, dejándole sobre la mesa de trabajo un rato.
- Secar los balones de grasa en una estufa a 100 °C, después enfriarlos en el desecador a temperatura ambiente y pesarlos (anote el peso (g)).
- Realizar el mismo procedimiento para las tres variedades por quintuplicado.

### Cálculos

Peso de muestra = (Peso papel filtro más muestra) - (Peso papel filtro vacío)

Peso de E.E. = (Peso de balón más extracto etéreo) - (peso de balón vacío)

$$\% \text{ Extracto Etéreo} = \frac{\text{Peso de E.E.}}{\text{Peso de muestra}} \times 100$$

### DETERMINACIÓN DE FIBRA CRUDA

#### Fundamento

Consiste en digerir la muestra desengrasada primero con ácido sulfúrico 1.25% y luego con hidróxido de sodio 1.25%, lavando el material después de cada digestión con suficiente agua destilada caliente hasta eliminación de ácido o álcali del material.

La muestra se lava después con etanol, se seca y calcina, calculándose el porcentaje de fibra obtenido después de la calcinación.

#### Procedimiento

- Colocar la muestra desengrasada en un beaker de 600 mL que contenga 200 mL de solución ácido sulfúrico al 1.25%.
- Colocar el beaker en el aparato de digestión, dejar ebulir exactamente 30 minutos girando el beaker cada 5 minutos para evitar que las partículas sólidas se adhieran a las paredes del recipiente.
- Retirar el beaker del aparato de digestión al terminar los 30 minutos; filtrar a través de la tela especial puesta en el embudo y recibir las aguas del lavado en un beaker limpio.

- Lavar el residuo que queda sobre el filtro con agua destilada hirviendo, hasta que el agua de lavado no de reacción ácida, lo que se comprueba con el indicador anaranjado de metilo.
- Al beaker original se le agregan 200 mL de solución de NaOH 1.25% se lleva a ebullición.
- Ebullición durante 30 minutos, lavar siempre con agua destilada hirviendo como en el paso anterior y comprobar ausencia de reacción alcalina agregando gotas de fenolftaleína.
- Pasar el residuo cuantitativamente a un Crisol FOSS con malla sinterizada, y colocarlo en el frasco kitasato.
- Agregar 15 mL de etanol y filtrar aplicando vacío.
- Secar el Crisol FOSS y su contenido en una estufa a una temperatura de 130 °C durante dos horas, poner en un desecador y pesar en balanza analítica digital. Calcinar a 600 °C durante 30 minutos, poner en desecador, enfriar y pesar. La pérdida de peso es considerada como Fibra cruda.
- Realizar el mismo procedimiento para las tres variedades por quintuplicado.

#### Cálculos

$$\% \text{ Fibra cruda} = \frac{\text{Pérdida de peso después de calcinada a } 600 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{Peso de muestra (g)}} \times 100$$

#### DETERMINACION DE CARBOHIDRATOS SOLUBRES O EXTRACTO LIBRE DE NITROGENO (E.L.N)

Esta fracción es calculada con base en las otras determinaciones:

% Extracto libre de nitrógeno o carbohidratos = 100 – (%Cenizas + %Nitrógeno + %Extracto etéreo + %Fibra cruda).

- Realizar el mismo procedimiento para las tres variedades por quintuplicado, para obtener el porcentaje de carbohidratos solubles.

ANEXO D

RESULTADOS DEL ANALISIS BROMATOLOGICO PROXIMAL



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS  
DEPARTAMENTO DE QUIMICA AGRICOLA

**RESULTADO DE ANÁLISIS**

**Fecha de Emisión:** Ciudad Universitaria, 21 de octubre de 2016  
**Fecha de ingreso:** 19 / Septiembre / 2016  
**Tipo de Muestra:** Zacate King Grass  
**Análisis solicitado:** Bromatológico  
**Usuario:** Jerson Romero y Byron Rodríguez- Ing. y Arquitectura

No.	Identificación muestra	Humedad %	Cenizas %	Proteína %	Grasa %	Fibra Cruda %	ELN ó carbohidratos %
216	1 LM	87.47	8.01	6.58	1.30	38.02	46.09
217	2 LM	84.77	11.99	4.67	1.36	33.43	48.55
218	3 LM	85.07	9.35	6.85	1.39	33.20	49.21
219	1 AR	72.57	7.96	5.04	2.53	39.60	44.87
220	2 AR	78.00	17.14	8.42	2.59	32.63	39.22
221	3 AR	79.85	13.46	5.73	1.82	36.77	42.21

**Analista:** Lic. Mario Antonio Hernández Melgar  
Lic. Freddy Alexander Carranza

Atentamente,

"HACIA LA LIBERTAD POR LA CULTURA"



Ing. Agr. Oscar Mauricio Carrillo  
Jefe del Departamento de Química Agrícola

## ANEXO E

### PRUEBAS CON BOMBA CALORIMETRICA, PROCEDIMIENTO, CALCULOS Y CORRECCIONES

## Manejo de la bomba calorimétrica

### Procedimiento

El siguiente procedimiento es para medir el poder calorífico de una muestra desconocida o estandarizada, en el sencillo calorímetro 1341 (Figura 1)



Figura E- 1: Calorímetro 1341

### Preparación de Muestra y Carga de la muestra.

- Preparación de la muestra y carga de la bomba de oxígeno
- Muestra

- Se prepara la muestra mediante una prensa hidráulica para lograr la forma de pastilla cilíndrica con dimensiones de 0.5 mm de altura y con un diámetro no mayor a 1 cm. Las pastillas se preparan utilizando un molde cilíndrico.
- Nunca usar una muestra con masa mayor a 1.1 gramos, cuando se analiza una muestra desconocida (que no se conoce su poder calorífico), no trabajar con un peso de muestra mayor a 1.0 gramos.
- Utilice el soporte para la cabeza de la bomba y coloque la muestra en la cápsula de combustión como se muestra en la figura E-2

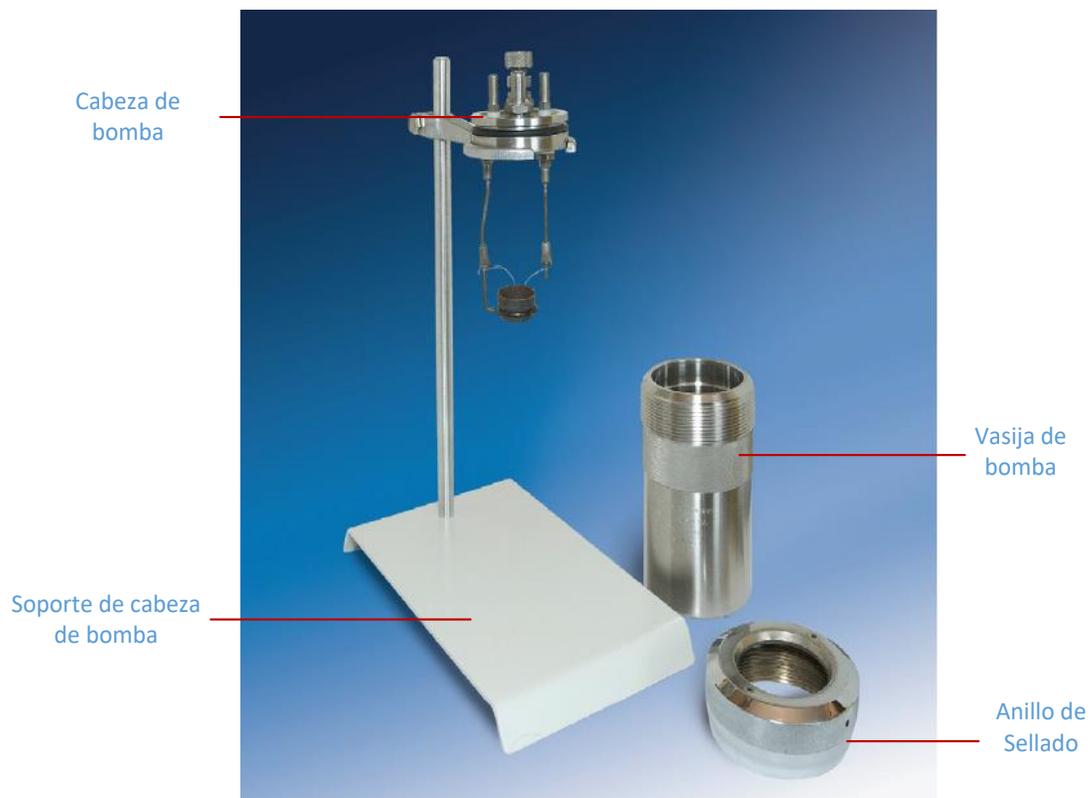


Figura E- 2: Soporte de cabeza de bomba calorimétrica y componentes de la bomba calorimétrica.

- A continuación, sujete los extremos del alambre fusible de 10 cm de longitud, en los orificios de los electrodos, levantando las tapas de los electrodos, como se muestra en la figura 2.



Figura E- 3: Colocación de la muestra y fusibles en cabeza de Bomba

- El alambre debe de hacer contacto con la pastilla en la capsula de combustión.
- Para cerrar la bomba, se debe tener cuidado de no alterar la posición de la pastilla, por lo cual se debe manipular la cabeza de la bomba con suma precaución, cuando la cabeza de la bomba sea trasladada desde el soporte hasta la vasija de la bomba.
- Se debe Revisar el anillo de sellado para confirmar que se encuentre en buen estado.
- Habiendo revisado el anillo se procede a humedecerlo con un agua, para que se deslice libremente en la vasija de la bomba.
- Se debe introducir la cabeza de la bomba dentro de la vasija y llevarla hasta el tope.
- Llenado de bomba: la bomba puede ser llenada con oxígeno de un tanque comercial estándar, para ello se debe abrir la válvula de alimentación que esta sobre la cabeza de la bomba, y conectarse al tanque de oxígeno mediante el cable de llenado de oxigeno.

- Abra la válvula de control de la conexión de llenado y observe como la presión se eleva a la presión deseable (usualmente 30 atm pero nunca más de 40 atm), luego cierre la válvula de control. La válvula de control interna se cerrará automáticamente cuando se corte el flujo de oxígeno, dejando la bomba llenada a la presión más alta indicada 0-55 atm. Libere la presión residual en la manguera de llenado, empujando hacia abajo la palanca que sujeta la válvula de escape.

### **Método de Operación de la bomba calorimétrica**

- Llene la chaqueta del calorímetro con aproximadamente 2 litros de agua destilada, o al menos desmineralizada, la temperatura del agua debe estar por lo menos a 1.5 °C menos que la temperatura de la habitación en la que se encuentra el equipo.
- Coloque ahora la bomba calorimétrica en la chaqueta, asegurándose que la vasija se asiente sobre el patrón circular en el fondo de la chaqueta, la bomba calorimétrica se debe manipular con mucho cuidado para no perturbar la posición de la pastilla de muestra.
- Conecte los cables de ignición a la bomba calorimétrica.
- Coloque la cubierta sobre la chaqueta, y asegúrese que el agitador se mueve libremente antes de conectar el motor por medio de la correa del agitador.
- Coloque el sensor de la termocupla en el orificio del termómetro y asegúrelo.
- Encienda el motor y permita que el agitador trabaje durante 5 minutos, tiempo suficiente para llegar al equilibrio térmico dentro de la chaqueta.
- A partir del minuto 5 efectúe mediciones de temperatura cada minuto durante 5 minutos más.
- Al llegar al minuto 5, encienda la bomba presionando el botón de ignición por al menos 5 segundos
- Tome mediciones de temperatura hasta que se observe que no hay variación (al menos 5 mediciones), el sistema habrá llegado al equilibrio.

- Después de la última lectura de temperatura, detenga el motor, remueva la correa del agitador y levante la cubierta del calorímetro y extraiga la bomba de la chaqueta removiendo los cables de ignición y procesada a secarla con un paño.
- Descargue la presión del gas abriendo la válvula de alimentación antes de intentar remover la cabeza de la bomba. Esta descarga procederá lentamente por un periodo no menor de un minuto para evitar perder los residuos internos. Después que toda la presión sea descargada, desatornille y separe la cabeza de la bomba, colóquela en el soporte. Examine el interior de la bomba por el hollín u otras evidencias de combustión incompleta. Si se encuentran tales evidencias se descarta la prueba.
- Lavar toda la superficie de la bomba con agua destilada y coleccionar el lavado en un beaker.
- Remueva los remanentes de alambre fusible para medir las longitudes de ambas piezas. La longitud combinada de los restos de alambre se anota para su posterior análisis.
- Titular el lavado de la bomba con una solución de carbonato de sodio estandarizada, usando naranja de metilo o rojo de metilo como indicador. Una solución de 0.0709 N de carbonato de sodio es recomendable para esta titulación y simplifica los cálculos. Se puede utilizar soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) o Hidroxido de Potasio (KOH).
- Analice el lavado de la bomba para determinar el contenido de sulfuro de la muestra. Si excede el 0.1% es necesario realizar la corrección.

## **CORRECCIONES TERMOQUÍMICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE PODER CALORÍFICO**

- a) Corrección del termómetro.

Los termómetros proporcionados con calorímetros Parr 1341, son medidos con precisión en intervalos de no menos de 1.5 °C sobre toda escala graduada. Las correcciones a ser aplicadas

a cada uno de estos puntos de medición son reportadas sobre un certificado y ploteados sobre una carta de corrección

b) Corrección del alambre fusible

El alambre usado para la ignición de la muestra es consumido parcialmente en la combustión. De esta manera, se considera la generación de calor por parte del fusible y la resistencia ofrecida a la corriente eléctrica de encendido y por el calor de combustión de esta porción de alambre que es quemado.

c) Correcciones ácidas.

Mientras la combustión tiene lugar en la bomba en un atmósfera de casi oxígeno puro a alta presión y temperatura, algunas reacciones que no ocurrirían en quemados del mismo material bajo de las condiciones normales atmosféricas, tienen lugar. Estas reacciones son importantes porque generan una apreciable cantidad de calor que no puede ser acreditado a la muestra, y por la cual tiene que hacerse una corrección.

Por ejemplo en la combustión normal de carbón, todo el azufre es oxidado y liberado como  $\text{SO}_2$  pero el nitrógeno en el material usualmente no es afectado.

Del mismo modo no ocurre cambio en el nitrógeno del aire para la combustión normal. Pero, cuando el mismo carbono es quemado en la bomba de oxígeno, la oxidación de azufre es convertida hasta una oxidación de  $\text{SO}_3$ , la cual combinada con el vapor de agua forma  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , y alguna parte del nitrógeno es oxidado y combinado con vapor de agua forma  $\text{HNO}_3$ . Estas dos reacciones se convierten en ácidos dentro de la bomba, y requiere una corrección por la cantidad de calor liberado en sus respectivas formaciones.

En el cálculo de esta corrección para la formación de ácido se asume que todo el ácido titulado es ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y que el calor para la formación de 0.1N de  $\text{HNO}_3$ , bajo estas condiciones de la bomba es -14.1 kcal. Obviamente si el ácido sulfúrico está también presente, parte de la corrección para el ácido sulfúrico está también presente en la corrección del ácido nítrico. La corrección del azufre descrita toma la diferencia entre el valor de formación del ácido nítrico y sulfúrico.

d) Corrección de azufre.

Una corrección de 1.4 kcal debe ser aplicada por cada gramo de azufre convertido a ácido sulfúrico. Esto se basa sobre el calor de formación de 0.17 N de  $H_2SO_4$  el cual es -72.2 kcal/mol, pero una corrección de  $2 \times 14.1$  kcal/mol, es incluido en la corrección de ácido nítrico. Por tanto la corrección adicional que debe ser aplicada para el azufre  $72.2 - (2 \times 14.1)$  o 44 kcal/mol, o 1.37 kcal/gramo de azufre.

Por conveniencia es expresado como 13.7 cal por punto por ciento de azufre por gramo de muestra.

En esto radica la importancia de cuantificar el porcentaje de azufre en las muestras analizadas, a fin de poder establecer un factor de corrección apropiado para cada uno de los estratos.

e) Corrección por radiación.

El método recomendado para el cálculo de la corrección por calor ganado o perdido de un calorímetro simple está especificado por la Sociedad Americana para pruebas y materiales publicados bajo las designaciones D240 y D3286 ASTM. Se demostró que durante la prueba puede ser aproximado asumiendo que el calorímetro calentó los alrededores durante el primer 63% de la temperatura alcanzada y un rango igual a la medida durante los primeros 5 minutos de pre período, el método asume que el enfriamiento (o calentamiento) durante el restante 37% del alcance es el mismo que el rango observado durante los 5 minutos de post periodo. Para trabajos experimentales, el punto dividido entre estos dos periodos, está tomado como punto en el tiempo b, cuando la temperatura ha alcanzado 0.6 del total alcanzado.

## **CÁLCULOS: DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO EN BIOMASA (King Grass).**

*Cuadro E- 1: Tabulación de datos de temperatura y tiempo.*

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
<b>0</b>	27.72	14	<b>29.61</b>
<b>5</b>	27.76	15	<b>29.64</b>
<b>6</b>	27.78	16	<b>29.66</b>
<b>7</b>	27.78	17	<b>29.67</b>
<b>8</b>	27.78	18	<b>29.68</b>
<b>9</b>	27.78	19	<b>29.68</b>
<b>10</b>	27.79	20	<b>29.68</b>
<b>11</b>	28.60	21	<b>29.68</b>
<b>12</b>	29.30	22	<b>29.68</b>
<b>13</b>	<b>29.52</b>		

*Masa de muestra:* 1.0460g

*Tamaño del fusible utilizado:* 10cm

*Tamaño del fusible residual:* 1.61cm

*Volumen de titulante:* 8.6mL

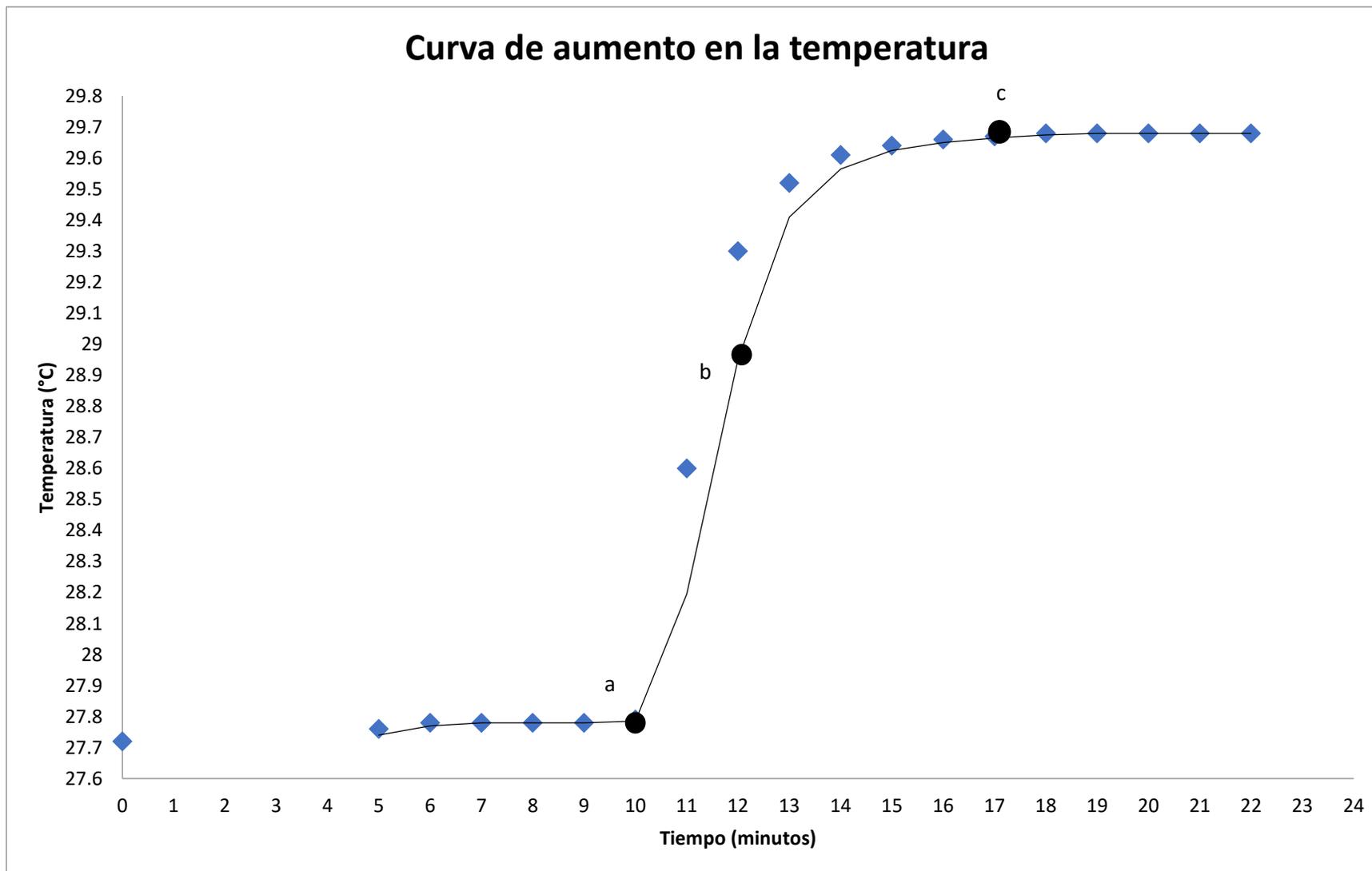


Figura E- 4: Curva de aumento en la temperatura para un ensayo con bomba calorimétrica

$$a = 10\text{min}$$

$$b = 12.5\text{min}$$

$$c = 17.2\text{min}$$

$$t_a = 27.8^\circ\text{C} + 0.004^\circ\text{C} = 27.804^\circ\text{C}$$

$$t_c = 29.7^\circ\text{C} + 0.008^\circ\text{C} = 29.708^\circ\text{C}$$

$$r_1 = (27.8 - 27.77) \frac{^\circ\text{C}}{5\text{min}} = 0.006^\circ\text{C}/\text{min}$$

$$r_2 = -(29.7 - 29.69) \frac{^\circ\text{C}}{5\text{min}} = -0.002^\circ\text{C}/\text{min}$$

$$c_1 = 8.6\text{mL}$$

$$c_2 = 0.1095\%S$$

$$c_3 = (10 - 1.61)\text{cm} = 8.39\text{cm}$$

$$W = 2426\text{cal}/^\circ\text{C}$$

$$m = 1.0460\text{g}$$

$$t = t_c - t_a - r_1(b - a) - r_2(c - b)$$

$$t = 29.708^\circ\text{C} - 27.804^\circ\text{C} - \left(0.006 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}\right)(12.5\text{min} - 10\text{min}) \\ - \left(-0.002 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}\right)(17.2\text{min} - 12.5\text{min})$$

$$t = 1.8984^\circ\text{C}$$

$$e_1 = c_1 = 8.6\text{mL}$$

$$e_2 = 13.7 * c_2 * m$$

$$e_2 = 13.7 * 0.1095 * 1.0460\text{g}$$

$$e_2 = 1.5692$$

$$e_3 = 2.3 * c_3$$

$$e3 = 2.3 * 8.39\text{cm}$$

$$e3 = 19.297\text{cal}$$

$$Hg = \frac{t * W - e1 - e2 - e3}{m}$$

$$Hg = \frac{1.8984^{\circ}\text{C} * 2426\text{cal}/^{\circ}\text{C} - 8.6\text{mL} - 1.5692 - 19.297\text{cal}}{1.0460\text{g}}$$

$$Hg = 4374.81 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$Hg = (1.8)(4374.811) = 7874.66 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$$

$$Hg = (4374.81) * 4.184 = 18304.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

### Determinación de Azufre.

- Lavar toda la parte interior de la bomba, incluyendo la capsula de combustión y paso de válvula y electrodos, con un chorro fino de agua destilada conteniendo 1 ml de solución saturada de anaranjado de metilo por litro. Lavar hasta que la reacción acida no sea observada.
- Recolectar el lavado en un beaker.
- Neutralizar la solución adicionando 1 ml de hidróxido de amonio. Calentar la solución a ebullición y filtrar a través de un papel adecuado.
- Rápidamente lavar el residuo, y filtrar en papel adecuado con agua destilada caliente
- Adicionar suficiente agua llevando a un volumen total de solución de aproximadamente 250 ml.
- Neutralizar con ácido clorhídrico concentrado adicionando 2 ml en exceso.

- Ajusta a ebullición lenta y agitar constantemente, hasta que se adicionen 10 ml de una solución al 10 % de cloruro de bario con una pipeta, continúe moviendo por dos minutos. Cubrir con un vidrio reloj y mantener a ebullición baja en un hot plate. Hasta que el volumen sea reducido a 75 ml.
- Dejar asentar el precipitado por una hora hasta que enfríe
- Filtra y lavar con agua caliente, hasta que quede libre de cloruros.
- Transmitir el papel y el precipitado a un crisol pesado. Secar a calor bajo. Calcinar el papel fuera del flameado.
- Calentar en mufla hasta 925°C hasta peso constante.

### **CÁLCULOS: DETERMINACIÓN DE AZUFRE EN BIOMASA (King Grass).**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

*Cuadro E- 2: Datos para ejemplo de cálculo del porcentaje de azufre de una muestra de fertilizante*

<b>Datos tomados en el laboratorio de determinación de un sulfato soluble en una muestra de fertilizante</b>			
<b>Masa de la muestra de fertilizante, g</b>	<b>Peso del crisol + precipitado, g</b>	<b>Peso del crisol, g</b>	<b>Peso del precipitado, como base BaSO<sub>4</sub>, g</b>
1.0037	54.066	54.0579	0.0081

- **Cálculos.**
- $Ba^{2+} + SO_4^{2-} \rightarrow BaSO_4$
- Encontrando el %S(p/p):

○  $0.0071g BaSO_4 \times \frac{mol BaSO_4}{233.3 g BaSO_4} \times \frac{1 mol S^{6+}}{1 mol BaSO_4} \times \frac{32 g S^{6+}}{mol S^{6+}} = 0.0011 g S^{6+}$

○  $\%S(p/p) = \frac{0.0009738 g}{1.0016 g} \times 100\% = 0.1095\%$

○ **Resultados**

$$\%S(p/p)$$

$$0.1095\%$$