



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN**

**TESIS MONOGRÁFICA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO.**

**Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrícolas
(maíz, trigo sorgo y cacao maní) en el municipio de Tisma.**

AUTORES:

Jhonny Enrique Castillo.

Henry José Moncada Dávila.

Carnet: 2014-1041U - 2013-61417

TUTOR

Msc. Ramiro Arcia Lacayo.

Managua, Nicaragua

Marzo, 2021

DEDICATORIA

- Primeramente, a Dios por habernos dado las condiciones necesarias para seguir luchando por alcanzar nuestra meta, además de su infinita bondad y amor.
- A nuestros padres por habernos apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que nos ha permitido ser personas de bien, pero más que nada, por su amor.
- A nuestro Tutor Ramiro Arcia Lacayo por su valioso tiempo que nos dedicó y motivación para la culminación de la monografía, por habernos compartido sus conocimientos adquirido durante su larga labor como docente y habernos llevado paso a paso en la elaboración de nuestra monografía.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	i
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	5
JUSTIFICACIÓN	10
OBJETIVOS	12
Objetivo General	12
Objetivos Específicos	12
CAPÍTULO 2	13
FUNDAMENTO TEÓRICO	13
Biomasa	13
Biocombustibles sólidos de origen agrícola	13
Fuentes y evaluación de recursos	15
Objetivos y relevancia de la evaluación	15
Clasificación de los recursos	16
Cuantificación del recurso	17
Características de la biomasa como combustible.	17
Caracterización química de la biomasa	18
Combustión directa	22

Tipos de sistemas de combustión.	24
CAPÍTULO 3	26
POTENCIAL ENERGÉTICO.....	26
Zonas de cultivo de maíz.	26
Zonas de cultivo del trigo sorgo.	26
Recopilación de información.....	30
Disponibilidad.....	30
Producción agrícola.....	31
Cuantificación y factibilidad de uso de los de residuos lignocelulósico.....	32
Planteo y estimación del volumen de biomasa disponible.....	32
Estimación del factor de residuo.....	33
Estimación del rendimiento potencial de materia prima para el municipio de Tisma.	36
CAPÍTULO 4	38
PRETRATAMIENTOS APLICADA A LOS RASTROJOS.	38
Análisis del secado de los diferentes rastrojos en estudio.	38
Pre-procesamiento necesario.	39
Pre-procesamientos	40
CAPÍTULO 5	44
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.....	44

Importancia de la composición química de los rastrojos en la combustión.	44
Fusibilidad de la ceniza.....	46
Técnicas para determinar el contenido de ceniza.	47
Importancia del punto de fusión de la ceniza.	48
Inconvenientes de los rastrojos por su composición química.	50
Comportamiento de cenizas.	52
Dinámica de deposición de cenizas.....	52
Problema que ocasiona la ceniza en la caldera.....	54
Impacto de la deposición de cenizas en sistemas de biomasa.	55
Mecanismos de corrosión.	55
Medidas preventivas y correctivas de la corrosión.....	56
Composición química de los rastrojos.	58
Análisis inmediato.	59
Fundamentos teóricos.	59
Análisis elemental.	60
Propiedades químicas.	61
Contenido de nitrógeno.	61
Contenido de azufre.....	61
Contenido de oxígeno.	61

Contenido de cenizas.	62
Contenido de volátiles.....	62
Contenido de metales.	63
Contenido de fibra.	63
Composición de la ceniza del sorgo.	64
Rastrojo de maíz.....	64
Análisis inmediato para el rastrojo de maíz.....	64
Características físicas-químicas del rastrojo.	66
Poder calorífico de residuos agrícolas.....	67
CAPÍTULO 6	71
COMBINACIONES DE RASTROJOS.	71
Parte experimental.....	71
Preparación de las muestras.	71
Resultados análisis bromatológicos	72
Evaluación de parámetros que presentan los rastrojos y que hacen factible la combustión. .	72
Parámetros que deben cumplir los rastrojos.....	73
Comparación de la biomasa y el carbón.	74
Características medias de los combustibles de la serie ligno-hullera.	74
Comparación del análisis elemental del carbón con el análisis elemental de los rastrojos.	76

Comparación del análisis inmediato del carbón con el análisis inmediato de los rastrojos.....	77
Adecuación de los rastrojos antes de ser introducido a la caldera.....	79
Política del gobierno central para la transformación de la matriz energética renovable.	80
Ley 532.	81
Viabilidad económica del uso de los rastrojos como combustible.	83
Proceso de dimensionado del ciclo termodinámico.	88
Parámetros de trabajo de la central.	89
Potencia eléctrica bruta final y rendimiento.....	89
Potencia eléctrica final neta.....	90
Coste de la central.....	90
Coste operativo de la central.	91
Estudio económico.....	92
Obras eléctricas.....	92
CONCLUSIONES	95
ANEXOS.....	97
BIBLIOGRAFÍAS.....	100
WEB GRAFÍAS.....	103

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

H₂O: agua

CO₂: dióxido de carbono

SO₃: Trióxido de azufre

H₂S: ácido sulfhídrico

CaO: óxido de Calcio

Fe₂O₃: óxido de hierro

TiO: Dióxido de titanio

P₂O₅: óxido de fósforo

KCl: cloruro de potasio

CrCl₂: cloruro de cromo

BaO: óxido de bario

SrO: óxido de estroncio

SiO₂: silicio o sílex

K₂O: Óxido de potasio

NO₂: óxido de nitrógeno

HCl: ácido clorhídrico

Al₂O₃: óxido de aluminio

MgO: óxido de magnesio

FeCl₂: cloruro de hierro

ZnCl₂: cloruró de zinc

UNA: Universidad Nacional Agraria

MEM: Ministerio de Energía y Minas

Cza: cenizas

FR: factor de residuo

EE: Extracto Etéreo

VAN: Valor Actual Neto

Th/ha: toneladas por hectárea

PCS: poder calorífico superior

TEP: toneladas equivalentes de petróleo.

IC: índice de cosecha

MS: Materia Seca

EB: energía bruta

PCB: poder calorífico bruto

PCI: poder calorífico inferior

FACA: Facultad de Ciencia Animal

CENAGRO: Censo Nacional

Agropecuario

BEI: Banco Europeo de Inversiones

Biooils: Aceite de pirolisis

Heterótrofo: Organismo que se nutre de sustancias elaboradas por otros seres vivos.

Biológico: perteneciente a la biología o a la vida de los seres vivos.

Hemicelulosa: molécula con ramificaciones, capaz de unirse a las otras moléculas.

Proteínas: Sustancia química que forma parte de la estructura de las membranas celulares.

Lípido: Grasa, sustancia orgánica insoluble.

Lignina: sustancia natural que forma parte de la pared celular de muchas células vegetales.

Pectina: sustancia neutra que se encuentra en muchos tejidos vegetales.

FAO: Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

PBC: Son un grupo de productos químicos orgánicos artificiales.

CIEMAT: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.

A.S.T.M: Asociación Americana de Ensayo de Materiales.

INETER: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.

Agroindustria: es un proceso que se dedica a producir y /o transformar, almacenar y comercializar los productos que se genera por la actividad del campo.

CASUR: Compañía Azucarera del Sur S.A

Heterogeneidad: se refiere a un grupo compuesto por varios elementos diferentes y distinguibles a simple vista.

Deposición: proceso termodinámico en el cual un gas se transforma en un sólido.

Escorificación: acción y afecto de escorificar (fundir), un material derretido.

Combustión: se define como una secuencia de reacciones químicas exotérmicas entre un combustible y un oxidante.

Sofos: (sophos) significa conocimiento.

Trófica: (trophos,) que se traduce como alimento.

Edáficos: adj. Biológico que tiene relación con el suelo en especial como condicionante de las plantas.

Higroscópico: propiedades de algunas plantas de absorber y exhalar la humedad según el medio en el que se encuentre.

Centrifugación: es una técnica que consiste en separar partículas suspendidas en un líquido.

Pellets: denominación genérica para referirse a pequeñas porciones de un material comprimido.

Briquetas: conglomerado de carbón u otra materia combustible en forma de prisma rectangular.

Morfología: es la disciplina que estudia la estructura de un organismo o su característica.

Fluidizado: proceso por el cual una corriente ascendente de fluido se utiliza para suspender partículas sólidas.

Hollín: sustancia negra, muy fina y grasienta que forma el humo y queda adherida a la superficie por donde este sale.

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía

RESUMEN

En esta monografía desarrolló una metodología para estimar el potencial energético de la biomasa residual en el sector agrícola, con el fin de fomentar el uso de la biomasa a nivel del municipio de Tisma, para lograr el diseño de la metodología se tuvieron en cuenta conceptos de interés, como el poder calorífico inferior (PCI) que posee cada uno de los rastrojos estudiados, los potenciales energéticos, tipo residuos/cosecha, tecnologías para la extracción, los procesos de conversión de la energía, entre otros.

Se plantearon fórmulas para la estimación del potencial energético presente en los diferentes residuos agrícolas, identificando las variables más importantes y las fórmulas más adecuadas que permitan de una manera más aproximada la estimación del potencial energético dependiendo las hectáreas cultivadas.

Adicionalmente, se tuvo en cuenta la disponibilidad de los residuos en el departamento, analizando las opciones más convenientes para ser implementados como fuente de energía alternativa.

Y por último se hace una combinación entre los diferentes tipos de rastrojos con el fin de obtener un contenido energético mayor al que presenta cada rastrojo por separado, esto se hará comparando los resultados obtenidos en el análisis y los valores encontrados en las diferentes literaturas consultadas.

LA MONOGRAFÍA SE ESTRUCTURA DE LA SIGUIENTE MANERA:

Se distribuye en 6 capítulos principales que describen la metodología desarrollada, se desarrolló a partir de investigación sobre los parámetros que caracterizan la biomasa residual, como son:

1. el poder calorífico inferior
2. los efectos que ocasionaría la biomasa en el proceso de combustión de acuerdo a composición elemental.
3. determinar la cantidad de residuos que se generan en cada ciclo agrícola
 - Identificar las hectáreas que son destinadas al cultivo agrícola
 - caracterización de los residuos
 - modelamiento matemático para el cálculo del potencial energético de la biomasa residual
 - la humedad relativa de los residuos
 - análisis de resultados.

El Capítulo 1, contiene la introducción, antecedentes, justificación, objetivo (general y específico) y el marco teórico.

El capítulo 2 presenta el fundamento teórico del trabajo, donde se exponen los conceptos de biomasa, tipos de residuos, procesos de conversión de la biomasa y combustión de la biomasa.

En el capítulo 3 se hace una evaluación de los residuos, con el fin de determinar la cantidad que se tiene disponible después de cada ciclo agrícola.

Esto se hará mediante un modelamiento matemático para estimar el potencial energético que representa cada uno de los residuos, haciendo énfasis en las variables principales para el cálculo del poder energético, para esto es necesario realizar una recolección e interpretación de la información adecuada.

Por lo tanto, se describen pasos para lograr adquirir la información necesaria para la aplicación de los modelos matemáticos, identificando las entidades que pueden brindar información actual como lo son el IV CENAGRO y los agricultores de Tisma.

Estos modelos están delimitados a características de los residuos y variables del proceso matemático (factor de residuos, factor de rendimiento, hectáreas cultivadas, entre otros). Sin embargo, estos parámetros en el caso del sector agrícola varían de acuerdo al tipo de cultivo (transitorio o permanente).

Para dar continuidad a la metodología propuesta, **en el capítulo 4** se desarrollarán los diferentes métodos de recolección y transporte de la biomasa, así como también se determinará el grado de humedad que posee durante su recolección en el campo, reducir las impurezas que se puedan adherir durante su empacado, y de esta manera evitar complicaciones en el proceso de combustión.

En el capítulo 5 se hace una evaluación de la biomasa de acuerdo a su composición química, en este capítulo se determinará que si la biomasa en estudio es técnicamente viable, ya que al someterse a un proceso de combustión se generarán gases contaminantes y cenizas, esto provoca que la planta de generación de energía eléctrica tenga un sistema de limpieza más complejo, lo que implica una inversión inicial mayor, de lo contrario se reducirá la vida útil de la planta y la liberación de gases contaminantes a la atmosfera.

En el capítulo 6, los rastrojos son combinados de la siguiente manera: rastrojo de maíz + rastrojo de cacaomaní, rastrojo de maíz + rastrojo de sorgo y, por último, rastrojo de maíz + rastrojo de sorgo + rastrojo de cacaomaní, con el fin de obtener mejores resultados en el proceso de combustión, en especial, mejorar el poder calorífico.

Una vez que ya se conoce el poder calorífico de cada rastrojo, así como también el poder calorífico que contiene la combinación entre ellos, se prosigue a comparar estos valores para determinar cuáles de estas combinaciones aporta mayor cantidad de energía cuando se someten a un proceso de combustión.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Tisma es un municipio en donde se desarrollan diferentes actividades económicas, por ejemplo, de subsistencia como la pesca artesanal, frutales y agricultura a pequeña escala, por otro lado, se desarrollan actividades intensivas de producción como plantaciones de cacao, plátano, caña de azúcar, sorgo, maíz, maní, ganadería y producción de hortalizas.

La mayor parte de terrenos son utilizados para la agricultura por propietarios privados con grandes dimensiones de terrenos, cooperativas y pequeñas parcelas. Un número importante de la población trabaja en las zonas francas textiles.

El municipio tiene un clima que se caracteriza como tropical de sabana, La precipitación promedio anual es de 1,361.3 milímetros. El período lluvioso va de mayo a octubre. La estación seca se extiende desde noviembre hasta abril; siendo los meses más calurosos febrero y marzo (INETER). En los meses de la estación seca, la precipitación mensual es prácticamente nula. Los meses de mayores lluvias son septiembre y octubre.

La temperatura promedio anual es de 26.6°C, con una variabilidad de solo 3° C a lo largo del año. Los meses más calurosos se extienden de febrero a junio, a partir de cual comienza a descender levemente la temperatura, alcanzando sus mínimos en diciembre y enero. Las temperaturas máximas ocurren en abril y mayo.

El municipio de Tisma limita al norte con el municipio de Tipitapa, al sur y oeste con el municipio de Masaya y al este con el municipio de Granada. La cabecera municipal está ubicada a 36 km de la ciudad de Managua.

El término biomasa se refiere a cualquier material no fósil, orgánico biodegradable proveniente de plantas, animales o microorganismos. Esto incluye productos y subproductos de los mismos, así como los residuos agrícolas, forestales, industriales y urbanos. Los líquidos y gases generados en la descomposición de los materiales biodegradables orgánicos no fósiles también son considerados biomasa [1].

La biomasa es una fuente de energía renovable y sustentable, la cual es formada continuamente a partir de la interacción de CO₂, aire, agua, suelo y luz solar con las plantas y animales. Cuando la biomasa es quemada, o utilizada luego de ser convertida en otro tipo de combustible, el carbono de la biomasa reacciona con el oxígeno del aire generando CO₂, que se libera a la atmósfera.

Si se quema completamente, la cantidad de CO₂ generado es igual a la que adquirió la planta en su crecimiento. En otras palabras, el dióxido de carbono generado en la combustión de la biomasa no incrementa el CO₂ del planeta, por ello la biomasa es neutra en emisiones de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, no están contemplados los consumos energéticos (y sus emisiones) en los procesos de siembra, cosecha y transporte de la biomasa para dicho análisis [1,2].

Comparado con otras fuentes de energía renovable, como la energía solar o eólica, la biomasa no tiene problemas de almacenamiento, dado que la biomasa es energía almacenada en sí misma.

A partir de la biomasa pueden ser generados otros tipos de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos o directamente energía térmica y/o eléctrica [2].

La biomasa botánica básicamente se forma en la conversión de CO₂ de la atmósfera en carbohidratos debido a la energía solar y la presencia de clorofila y agua, almacenando energía y liberando O₂. El proceso donde las plantas absorben energía solar es conocido como fotosíntesis.

Los organismos heterótrofos, crecen comiendo especies botánicas o otras biológicas. De esta forma la energía química almacenada en las plantas se pasa a los animales y humanos al ingerir esta, que a su vez generan desechos que pueden ser utilizados como combustible [1,2].

El consumo energético se ha incrementado en los últimos años debido al aumento de procesos industriales y de consumo en los hogares; generándose un interés en reducir la dependencia del petróleo por los países que son importadores de combustibles fósiles, así como también las emisiones de gases de efecto invernadero.

El uso de la biomasa como potencial para la producción de energía es un aspecto que es necesario profundizar debido a las diferentes fuentes energéticas, la composición de estas fuentes y el potencial energético.

Nicaragua es un país con condiciones climáticas apta para la agricultura, que permiten el establecimiento de diversos cultivos agrícolas de importancia en la seguridad alimentaria.

El presente estudio se realizó en el municipio de Tisma, departamento de Masaya. En este municipio son generados anualmente cantidades significativas de residuos agrícolas. Estos residuos pueden ser utilizados en procesos de combustión como combustibles alternativos, desde el punto de vista económico y ambiental.

La cantidad de calor liberado en la combustión completa de un proceso es llamado poder calorífico. En los combustibles cuyos humos contienen vapor de agua se puede distinguir entre poder calorífico inferior PCI y poder calorífico superior PCS. Se llama poder calorífico inferior a la cantidad de calor liberado en un proceso de combustión completa cuando el agua está presente en forma de vapor.

En cuanto al poder calorífico superior es la cantidad de calor liberado en el proceso de combustión completa, incluyendo el calor de condensación del vapor de agua contenido en los humos.

En calderas convencionales no se puede provocar la condensación del gas de combustión, ya que eso provocaría daños de corrosión en las superficies de calentamiento.

Por esta razón, en los cálculos de rendimiento se utiliza para calderas convencionales como magnitud de referencia el PCI. De un modo general puede decirse que cuanto mayor sea la diferencia entre el PCS y el PCI, mayor sería la eficiencia de la energía que puede ser obtenida utilizando la técnica de condensación.

Las calderas de biomasa son una red familiar y para su alimentación se utiliza un sistema mecánico para el movimiento de residuos de biomasa y los subproductos de molinos, pellet, etc.

ANTECEDENTES

La recolección, almacenamiento y transformación de las materias primas agrícolas para su utilización intermedia o final constituye la columna vertebral de la agroindustria en términos más amplios.

Se estima que la producción agrícola en el municipio de Tisma genera grandes cantidades de residuos sólidos, los cuales en el mejor de los casos son utilizados parcialmente en la actualidad, por ejemplo, en la alimentación animal. Sin embargo, la mayor parte de estos residuos permanecen aún sin darles una adecuada utilización.

El termino residuo se refiere a aquellos materiales remanentes o sobrantes generados por las actividades humanas, los cuales debido a sus características físicas, químicas y biológicas pueden ser utilizados en otros procesos.

A nivel nacional, el manejo inadecuado de los residuos agroindustriales ha ocasionado impactos ambientales negativos. Entre los diferentes enfoques que existen para definir a la agroindustria, uno de ellos menciona que es una actividad que integra tanto la producción primaria agrícola, pecuaria y forestal esto es, el proceso de obtención o transformación, así como de comercialización del producto, es decir se establece una sinergia entre un proceso productivo agrícola con un proceso industrial para generar alimentos u otras materias primas no procesadas, las mismas que son posteriormente utilizadas en el mercado.

En otro sentido a la agroindustria se describe como un proceso que se dedica a producir y/o transformar, almacenar y comercializar los productos que se generan por la actividad del campo.

De la actividad agroindustrial se generan residuos que pueden ser sólidos o líquidos, a causa del consumo directo de los productos primarios o de su industrialización los cuales no son de utilidad para el proceso en sí, pero que pueden ser susceptibles de someterlos a un proceso de aprovechamiento o

transformación química, física o biológica, con el propósito de obtener otros productos con valor económico y social.

En el ámbito nacional, el manejo y la disposición final de estos residuos representa un problema ambiental de primer orden, que ocasiona consecuencias en varios sectores como: un impacto en los cauces de las aguas superficiales, la contaminación del suelo y aguas subterráneas, la contaminación de grupos de personas y la contaminación atmosférica cuando estos son sometidos a un proceso de quema.

Ante esta situación existe un interés y a la vez una preocupación de toda la sociedad actual por tratar de cuidar y conservar el ambiente, amerita la necesidad de establecer procedimientos que estén orientados hacia un adecuado manejo de los residuos agroindustriales, mediante el desarrollo de tecnologías ambientalmente sustentables que minimicen los efectos nocivos al equilibrio ambiental, y que además contribuya al bienestar de sus pobladores.

En general, las características de los residuos agroindustriales son muy variadas, dependen de la materia prima y del proceso que los generó, no obstante, comparten una característica principal que es el contenido de materia orgánica, constituida por diferentes porcentajes de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina.

Por ser la materia orgánica su principal componente, en la práctica se les denomina «residuos orgánicos», dentro de este rubro se incluyen otros residuos, como los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, la hojarasca de parques y jardines, así como los residuos domésticos y residuos sólidos municipales.

Cabe mencionar la necesidad de establecer ciertos criterios de selección de los residuos cuando se desea utilizarlos con fines de aprovechamiento como son; disponibilidad, cantidad, que contengan los componentes adecuados para ser objeto de combustión, que sean fáciles de obtener, que puedan ser utilizados sin un pre tratamiento.

En tal virtud de lo señalado, cuando se busca una alternativa de aprovechamiento de los residuos agrícolas, es indispensable realizar estudios de su caracterización química, con la finalidad de conocer su composición, la calidad de constituyentes y la cantidad que se genera, con lo cual se pueden hacer proyecciones necesarias para la planificación de un sistema de combustión más adecuado para su aprovechamiento en una región determinada.

Así como también, para implementar las mejoras en los diseños de los sistemas de gestión y tratamiento de los residuos, y es de esperarse que gracias al proceso desarrollado se genere otro residuo más agotado, el mismo que puede tener otra aplicación, particular que se debe tener en cuenta desde un enfoque de la responsabilidad ambiental, dentro del marco global del desarrollo sustentable.

Es de interés conocer la composición del residuo para la adecuada selección de la tecnología y el aprovechamiento.

El municipio de Tisma, tiene como principal actividad comercial la agricultura, consecuencia de esta, existe una generación de residuos agrícolas, esto debido a sus suelos fértiles y propicios para el cultivo de maíz, trigo sorgo y cacao maní, el destino de estos residuos en la actualidad es inadecuado.

Los problemas agrícolas están relacionados con los aspectos de la educación, salud, nutrición, ecológicas, consumismo y demás los mismos que afectan a la calidad de vida de la población.

Los residuos de maíz, en el caso de los rastrojos, se usan principalmente para la cobertura superficial de los suelos y protegerlos de la acción del viento, la lluvia y su descomposición aporta nutriente al suelo. En lo consultado no se ha encontrado el uso de los residuos del maíz para la producción de energía.

En Nicaragua, las energías primarias son utilizadas ya sea en forma directa a través de la recolección de los datos energéticos como en el caso de la biomasa (leña, bagazo de caña, maní, cascarillas de arroz, residuos de madera etc.).

La producción de energía primaria a nivel nacional durante el año 2016, fue de 1,784.7 miles de tep, lo que representó un incremento del 2.3% con respecto al año 2015 lo que incremento en la producción primaria a nivel energéticos de biomasa, en apenas 0.7%, mientras que el aprovechamiento de la energía solar se mantuvo igual al año anterior.

En el año 2016, la oferta interno bruto primaria alcanzó la cifra de 2,383.3 miles de tep, de los cuales 45.4% corresponde a leña, 27.0% a petróleo crudo, 15.7% a residuos vegetales como el bagazo de caña, cascarillas de arroz, café y maní, ripios y aserrín, en los centros de transformación que realizan estos procesos y son contabilizados en este balance energético son: refinería de petróleo, centrales eléctricas e ingenios azucareros y pequeñas carboneras.

Así mismo, 25.3% de los energéticos primarios enviados a los centros de transformación corresponde a residuos vegetales, específicamente bagazo de caña, utilizada para generación de electricidad en los ingenios azucareros de Monte Rosa, San Antonio, Monte limar y CASUR.

Finalmente, 2.4% de los energéticos primarios que fueron enviados a los centros de transformación, se refiere a la leña utilizada en las diferentes pequeñas carboneras a nivel nacional diseñadas para la producción de carbón vegetal y en menor medida leña utilizada en el ingenio San Antonio e ingenio Monte limar, para cogeneración a los centros de transformación el 1.9% restante corresponde a residuos vegetales (bagazo de caña y cascarillas de arroz, café y maní), carbón vegetal y otras biomasas (ripios y aserrín).

La leña es el principal energético que se consumen en este sector, alcanzando el 85.2% de consumo en el 2016, es decir 952.9 miles de tep (2,974.2 miles de toneladas métricas) las cuales es utilizadas específicamente para cocción de alimentos, especialmente en las zonas rurales.

Se puede observar que el consumo final de este recurso fue 16.8% leña, y el restante 5.6% residuos vegetales (bagazo de caña y cascarillas de arroz, café y maní) y otras biomasas (ripios y aserrín).

A como se puede observar, el comportamiento de la distribución del balance de consumo de las diferentes materias primas de uso para diferentes áreas de utilización que es de suma importancia para el crecimiento económico del país, información que ha sido recopilada de una serie de evaluaciones y resumida dentro del "Balance Energético Nacional" elaborado en el año 2016 por fuentes del MEM.

JUSTIFICACIÓN

La utilización de los residuos agrarios como combustible podría suponer un doble ingreso para los agricultores; por una parte, por la venta de los productos alimentarios, por otra, la comercialización de los residuos. Para posibilitar la planificación de este sistema es necesario conocer la cantidad de residuos que se genera en la explotación y transporte.

La energía está presente en todas las actividades humanas. Su disponibilidad es imprescindible para el desarrollo y para llevar una vida digna. La energía es la fuente del calor de nuestros hogares, de la iluminación y de los procesos productivos y, en definitiva, un elemento clave para el bienestar de las personas y el desarrollo de los pueblos. El acceso a la energía, especialmente a la electricidad, permite incrementar el nivel de ingresos de las familias al facilitar el acceso a medios de producción.

Los recursos con que cuentan el municipio de Tisma son diversos; sin embargo, en gran proporción no son aprovechables; uno de ellos es la biomasa que es aprovechada en un mínimo porcentaje (abono orgánico); Este puede constituirse en una alternativa de generación de energía para el municipio de Tisma, aprovechando los residuos orgánicos proveniente de los diferentes cultivos agrícolas (maíz, trigo sorgo y cacao maní).

Con la constante subida de los precios de los combustibles fósiles, unido a la crisis medioambiental que se genera, se vuelve a valorar la utilidad de los desechos orgánicos y su aprovechamiento para obtener combustibles de ellos.

De esta manera empieza a entenderse así lo poco sensato que resulta importar o extraer combustibles fósiles de zonas remotas para obtener una energía la cual puede conseguirse en buena medida de los residuos que se desechan habitualmente.

Con esta investigación se pretende evaluar el potencial energético generado en los diferentes residuos agrícolas y de esta forma puedan implementarse como combustible para la generación de energía eléctrica, y de esta manera reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, así como también permitirá reducir enfermedades y por ende contribuir a la calidad de vida de las personas.

OBJETIVOS

Objetivo General

Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrícolas (maíz, trigo sorgo y cacao maní) en el municipio de Tisma.

Objetivos Específicos

- Desarrollar un estudio del aprovechamiento energético obtenido al utilizar bagazo de maíz, sorgo y cacaomaní.
- Realizar combinaciones entre los diferentes desechos agrícolas para obtener mejores rendimientos en la combustión.
- Estudio de viabilidad técnica y económica en relación con la explotación de dicha fuente con base a su poder calorífico.
- Determinar el poder calorífico de la biomasa proveniente de los residuos agrícolas (cacaomaní, maíz y trigo sorgo) para su posible aplicación en la generación de energía eléctrica.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTO TEÓRICO

Biomasa

Biomasa, es cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico, y toda materia vegetal originada por el proceso de fotosíntesis, así como los procesos metabólicos de los organismos heterótrofos [7].

La importancia de la biomasa radica en que esta pueda ser aprovechable para ser transformada en energía, ya sea, eléctrica o como fuente de calor, dado que las sustancias orgánicas se dan de la materia vegetal, al quemarse producen energía y algunos otros compuestos como CO_2 y agua H_2O que, a diferencia de los compuestos producidos por los combustibles fósiles, no alteran la composición de la atmosfera y la mantiene a niveles constantes [8].

Biocombustibles sólidos de origen agrícola

Residuos agrícolas

Se considera residuo el subproducto resultante de una actividad determinada y cuyo valor económico es escaso o nulo al no tener aprovechamiento comercial. La biomasa residual agrícola se produce en los campos de cultivo como consecuencia de la actividad agrícola productiva.

La biomasa de origen agrícola puede ser bien biomasa agrícola primaria, llamada entonces cultivos energéticos, o biomasa agrícola secundaria, o residual agrícola, consistente en este caso en los restos vegetales producidos durante los tratamientos aplicados al cultivo: paja tras la cosecha de cereales.

Es usual considerar los cultivos energéticos de manera diferente a la biomasa residual agrícola por dos razones principales. Primero, porque parte de los cultivos energéticos son especies eminentemente forestales (eucalipto, frondosas, etc.) y segundo, porque existen una serie de implicaciones en el manejo de los mismos que hacen que las prácticas agronómicas no se orienten a la calidad del producto, sino más bien a la maximización en la recuperación de la energía invertida.

Respecto de la biomasa de origen forestal, la biomasa de origen agrícola presenta una serie de ventajas, como mero hecho de que el desarrollo de una actividad agrícola es garantía de la producción de restos vegetales. Las principales características del aprovechamiento energético de la biomasa agrícola se resumen a continuación:

- Se producen de manera muy estacional. Por ello el aprovechamiento anual de un recurso puede requerir largos almacenamientos, lo que complica la logística.
- Allí donde existen muchos propietarios con una cantidad de hectáreas pequeñas, la recolección y acopio de restos puede ser muy difícil, especialmente en el caso de podas y arranques. El trabajo de contacto y coordinación con cooperativas y particulares puede ser inviable para su aprovechamiento a gran escala.
- La existencia de un mercado de paja hace que este recurso pueda sufrir cambios de precio de año en año, según la producción agrícola.
- La generación de falsas expectativas puede hacer que los agricultores impongan precios de compra a su biomasa inviables.

Aún con todo lo anterior, el aprovechamiento de los residuos agrícolas es ya un hecho en muchos países. Es destacable el liderazgo de Dinamarca con sus grandes plantas de generación eléctrica por combustión de paja.

Fuentes y evaluación de recursos

La evaluación o inventario de recursos de biomasa, puede ser llevada a cabo por varias razones y el sujeto de la misma puede ser diferente. Habitualmente el sujeto de la evaluación son los residuos agrícolas y forestales, es decir todos aquellos materiales que se generan en los campos de cultivo y en los montes como consecuencia de la actividad agrícola y forestal y cuya demanda en el mercado es nula o muy baja. Por este motivo, la utilización energética de estos materiales puede ser una alternativa.

Para la correcta utilización de los recursos de biomasa, como recursos naturales renovables que son, es necesario realizar evaluaciones de la disponibilidad de los mismos teniendo siempre en cuenta los posibles condicionantes para su explotación sostenible ya que cualquier aprovechamiento de un recurso natural, exige un conocimiento de las existencias (capital) y de los crecimientos (renta).

La explotación agrícola y forestal se caracteriza por estar sometida a ciclos productivos. Estos ciclos son habitualmente de periodicidad anual en el caso de los cultivos agrícolas.

Objetivos y relevancia de la evaluación

Los objetivos marcan el tipo de inventario o evaluación de recursos de biomasa a realizar, que puede ser de los tipos siguientes:

- Inventarios de planificación: son evaluaciones de recursos de zonas amplias como un país, una región o una provincia. El objetivo de estos inventarios es la planificación energética.
- Inventarios de proyecto: se llevan a cabo para evaluar la viabilidad de un proyecto de generación de energía con biomasa. En este tipo de inventarios se evalúan los recursos disponibles y explotables de manera sostenible en un horizonte de tiempo similar a la vida útil del proyecto (por ejemplo, 20 años) clasificándolos en función de aspectos clave como el coste de aprovisionamiento y el impacto ambiental.

Clasificación de los recursos.

Los recursos evaluados se pueden clasificar atendiendo a criterios de accesibilidad, de la siguiente forma:

- Recursos potenciales: todos los existentes sin considerar ningún tipo de condicionante para su uso.
- Recursos disponibles: son los recursos potenciales una vez excluidos los que ya están siendo utilizados y la competencia por los mismos no es posible. También se excluirán aquellos que, por razones medioambientales, de propiedad, u otras de índole no tecnoeconómica no se puedan obtener.

- Recursos utilizables/recolectables técnicamente: son los recursos disponibles que pueden ser recolectados y usados con las limitaciones impuestas por la tecnología que se utilice en su recolección.
- Recursos utilizables/recolectables económicamente: aquellos disponibles cuyos costes de recolección y transporte no superan un valor umbral fijado de antemano.

Cuantificación del recurso.

Se usan archivos históricos de las superficies cultivadas obtenidos de los servicios estadísticos de las distintas comunidades que conforman el municipio, se podrá realizar una evaluación de la evolución interanual de los cultivos considerados, lo cual puede ser suficiente para el propósito perseguido. Los datos estadísticos suministrados son normalmente referidos a una unidad administrativa que es el Término Municipal lo cual suele ser suficiente.

Tras determinar las superficies será preciso evaluar las producciones para lo cual no hay más remedio que acudir a datos históricos suministrados por los servicios estadísticos. Se ha de tomar siempre una media interanual (10 años). Normalmente los datos de producciones se suministran referidos al departamento.

Características de la biomasa como combustible.

Las fuentes de biomasa son tan diversas como lo puedan ser el serrín de aserradero, el rastrojo de maíz, el rastrojo de trigo sorgo y el rastrojo de cacaomaní.

Frente a tal heterogeneidad, la caracterización de la biomasa sirve para obtener una previsión del comportamiento de la biomasa ante las diferentes etapas

involucradas en su uso como fuente de energía: obtención, transporte, tratamiento y conversión en energía.

Las propiedades pueden dividirse en propiedades físicas, químicas y térmicas. Existen multitud de posibles propiedades y análisis a realizar.

En la tabla número 2.1, se resumen cada una de las propiedades y su importancia que tienen en el proceso para ser utilizada como combustible

Parámetros físicos	Densidad real y aparente. Humedad. Distribución granulométrica.	Influye en la selección y el diseño de los equipos de manejo del material y la necesidad de pretratamiento.
Parámetros químicos	Análisis elemental. Análisis inmediato. Componentes estructurales. Composición de cenizas. Fusibilidad de cenizas.	Determina el comportamiento de la biomasa durante los procesos de transformación química y termoquímica.
Parámetros energéticos	Poder calorífico	Determina la cantidad de energía aprovechable.

Tabla 2.1: Elaboración propia / Fuente: CIEMAT

Es necesario determinar las propiedades químicas y físicas de la biomasa a utilizar para diseñar un sistema de combustión eficiente y efectivo.

Caracterización química de la biomasa

Los parámetros que aportan la descripción química del combustible se determinan mediante el análisis inmediato y el análisis elemental.

Análisis inmediato.

El análisis inmediato proporciona los valores de los contenidos de humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo de la biomasa expresados como porcentajes en peso. Básicamente, este análisis sirve para identificar la fracción de la biomasa en la que se encuentra almacenada su energía química (compuestos volátiles y carbono fijo) y la fracción inerte (humedad y cenizas).

Análisis elemental.

El análisis elemental permite establecer el porcentaje en peso de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O), azufre (S) y cloro (Cl). Estos elementos (excepto el cloro) intervienen en las reacciones de oxidación y, por tanto, definen el potencial calorífico del biocombustible.

Composición elemental de cenizas.

Adicionalmente, para poder predecir la posible existencia de fenómenos de corrosión, deposición y escorificación en los equipos, se realiza el análisis de la composición elemental de cenizas. La finalidad de este ensayo reside en determinar la presencia de elementos que pudieran resultar problemáticos en los procesos de transformación termoquímica.

Combustión.

La fotosíntesis en las plantas determina la producción de carbohidratos, tanto estructurales como no estructurales que conforman los tejidos de la misma. Los componentes de la biomasa incluyen celulosa, hemicelulosas, lignina, lípidos,

proteínas, azúcares simples, almidones, agua, hidrocarburos, cenizas y otros compuestos.

Las concentraciones de cada componente varían en función de la especie, tipo de tejido vegetal, etapa de crecimiento y las condiciones de cultivo, Jenkins et al (1998).

Siguiendo lo indicado por dicho autor, los combustibles de biomasa pueden dividirse de forma genérica en cuatro clases de materiales:

1. maderas y leñosos
2. herbáceos y otros materiales de crecimiento anual como pajas, pastos, hojas, subproductos.
3. agrícolas y residuos biológicos como cascara, granos, huesos o pepitas de frutos y estiércol animal.
4. derivados de residuos combustibles y de residuos o papeles no reciclables, a menudo mezclados con plásticos.

Los agrocombustibles se clasifican según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación) en cultivos de combustible, subproductos agrícolas (paja, tallos), los subproductos animales (estiércol y otros excrementos) y subproductos agroindustriales (Hytönen 2000).

La composición de los biocombustibles es compleja; los componentes primordiales incluyen seis elementos principales C, H, O, N, S, Cl y al menos otros ocho elementos Si, Al, Ca, K, Mg, Na, P y Fe. El principal componente de la biomasa es el C, con una proporción del 30 al 60% en peso de materia seca según el contenido de cenizas (Jenkins et al, 1998).

El segundo elemento en importancia, con un 30 a 40% en peso de materia seca de biocombustible es el Oxígeno. El tercer componente principal es el H, que

comprende normalmente de 5 a 6% en peso de la materia seca. Mientras que el N, el S y el Cl suelen ser menos del 1% en peso de la materia seca, pero podrá exceder este valor de diferentes biocombustibles (Paulrud, 2004).

Los componentes de conformación de ceniza resultante de la combustión de la biomasa son metales alcalinos, metales alcalinotérreos y Si. En comparación con la madera, la paja es un combustible de rico en ceniza y contiene niveles más altos de Si y K, y además contiene una mayor cantidad de Cl, N y S (Paulrud, 2004).

Los análisis de diferentes tipos de biomasa que se pueden utilizar como combustibles demuestran que tienen un contenido de S muy inferior a cualquier tipo de Carbón, sin embargo, el contenido de N en la paja es comparable al del Carbón, pero mucho menos que en la madera (Sander, 1997).

Las biomásas más comúnmente utilizadas como combustibles, tales como corteza, paja y cereales contienen concentraciones similares de C, H, pero muestran diferencias significativas en las concentraciones de los principales constituyentes de sus cenizas (Si, Ca, Mg, K, Na, P, S, Cl, Al, Fe, Mn) y en la de cantidad de metales pesados (Cu, Zn, Co, Mo, As, Ni, Cr, Pb, Cd, V, Hg) según (Oberberger et al 1997). Estos elementos inorgánicos influyen en el proceso de combustión en una variedad de formas:

- definiendo la formación de las emisiones de gases y sólidos.
- determinando significativamente el punto de fusión de la ceniza.
- El comportamiento de las incrustaciones y la corrosión en las paredes del hogar.

Por tanto, a fin de diseñar la planta y el control del sistema de combustión adecuado para una biomasa en particular, se deben tener muy en cuenta las cantidades de elementos inorgánicos y los efectos que causan durante la combustión.

Combustión directa

La combustión se define como una secuencia de reacciones químicas exotérmicas entre un combustible y un oxidante, cuyos productos principales son gases como CO, CO₂, N₂, O₂ y H₂O a elevadas temperaturas que portan gran cantidad de calor [19].

La combustión es completa si el único producto de oxidación del carbono es el CO₂, e incompleta si se produce la formación de CO. El medio más común de la conversión de biomasa en energía térmica es la combustión directa, y esta produce alrededor del 90% de toda la energía obtenida de la biomasa [20]. La combustión contribuye con más del 97% de la producción de bioenergía a nivel mundial.

Esta tecnología está ampliamente probada y tiene un costo significativamente bajo, es fiable, y está disponible comercialmente [21]. La combustión es un fenómeno acoplado de transferencia de calor y masa, en el cual se producen reacciones químicas exotérmicas y cuyos productos de combustión fluyen de manera generalmente turbulenta.

Existe una serie de métodos y sistemas de combustión/reactores disponibles en el mercado. Estos pueden clasificarse de manera general en dos categorías: sistemas de combustión de lecho fijo y sistemas de combustión de lecho fluidizado [22].

Para desarrollar un proceso de combustión de manera efectiva en cualquiera de los sistemas antes citados, algunos parámetros tecnológicos deben ser conocidos incluyendo la composición de la biomasa, el tipo de oxidante (aire u oxígeno), la relación oxidante/combustible (estequiometría), tipo de combustor, límites de emisiones entre otros [23].

En la combustión en condiciones reales se emplea una cantidad de aire por encima del necesario para efectuar la oxidación total del biocombustible que se utiliza en cada caso.

La biomasa está formada por una fracción de materia orgánica y otra inorgánica, y estas tienen una influencia decisiva en la combustión. La primera, producida durante el proceso de fotosíntesis de la planta, contiene la mayoría de la energía almacenada que posteriormente será liberada en forma de calor.

La segunda, es importante para el diseño y operación de los sistemas de combustión debido a que es responsable de problemas como el ensuciamiento por cenizas y escoria depositadas en los combustores.

También se debe notar que la presencia de nitrógeno, azufre y cloro es la responsable de la formación de compuestos de riesgo (NO_x , SO_x , HCl , H_2S , entre otros) que pueden afectar la calidad del aire y la vida útil de los sistemas de combustión por la corrosión producida o por las incrustaciones (compuestos alcalinos) formadas en la cámara de combustión que resulta en una disminución de la tasa transferencia de calor [24].

La biomasa presenta una elevada humedad y un alto contenido de oxígeno. La humedad constituye un problema operacional debido a que se requiere energía adicional para eliminarla por la naturaleza endotérmica del proceso de evaporación del agua. Un elevado contenido de oxígeno, resta energía calórica al combustible.

En conjunto, producen una disminución de la cantidad de energía que puede liberar la biomasa por kilogramo de materia seca (poder calorífico). En general, se puede decir que existe una relación lineal negativa entre el contenido de humedad (oxígeno) y el poder calorífico [25].

Dependiendo del poder calorífico, del contenido de humedad de la biomasa, de la cantidad de aire empleada como comburente y el diseño del horno de combustión, se pueden alcanzar temperaturas de flama de unos 1650°C .

Esta temperatura alcanzada y, por tanto, el calor generado debido a la exotermicidad de las reacciones de combustión, permiten que este proceso sea integrado a un sistema de generación de energía eléctrica con un ciclo Rankine, que genera vapor de media y alta presión capaz de mover turbinas acopladas a generadores que producen la energía eléctrica [26].

Esta integración brinda la posibilidad de reducir costos de combustible y la tasa de emisiones netas de gases de efecto invernadero. Estos sistemas de generación o cogeneración por combustión de biomasa ofrecen eficiencias globales entre 30% y 40% [20, 27, 28].

Sin embargo, la dependencia del proceso de combustión de la humedad de la biomasa presenta complicaciones al momento de mantener condiciones uniformes de operación en un sistema de generación de energía eléctrica.

Tipos de sistemas de combustión.

La combustión es el medio de extracción por excelencia de la energía química de un combustible. La energía de la combustión se extrae bien en hornos en los que el fin es calentar un producto (cemento, ladrillos, pan) o en quemadores acoplados a una caldera, en la que se extrae el calor calentando un fluido caloportador, generalmente agua, aceite o aire.

Las calderas pueden ser pirotubulares, cuando los gases de combustión se hacen pasar por tubos inmersos en un depósito de agua. De esta manera los gases ceden calor al agua y se eleva su temperatura. Este tipo de calderas suelen utilizarse en aplicaciones domésticas e industriales.

En el caso contrario, es decir, las calderas acuotubulares, el agua se bombea a través de unos tubos que se insertan en la cámara de combustión o se entrecruzan con los gases para transferir calor de los mismos. En caso de grandes

instalaciones, la caldera consiste en tubos paralelos formando paredes en las que se confina la combustión.

Los quemadores de biomasa se acoplan a calderas pirotubulares o acuotubulares. Estos sistemas no son más que una aplicación a la combustión de los reactores sólido-gas.

Los sistemas generalmente utilizados son la combustión de biomasa sobre un soporte sólido (combustión en parrilla), la combustión en lecho fluidizado y la combustión en suspensión (similar a un reactor de transporte).

Combustión de lecho fijo o parrilla.

En estos sistemas la biomasa se encuentra depositada sobre un soporte físico, generalmente llamado parrilla. Parte de la combustión se realiza sobre el soporte, introduciéndose el aire primario por la parte inferior de la parrilla, y parte se realiza por encima del soporte, donde se introducen los aires secundarios.

Básicamente, en la parrilla se seca la biomasa y se queman las brasas (carbono fijo) y por encima de la parrilla se queman las materias volátiles en forma de llamas, a como se puede apreciar en la figura 2.1.

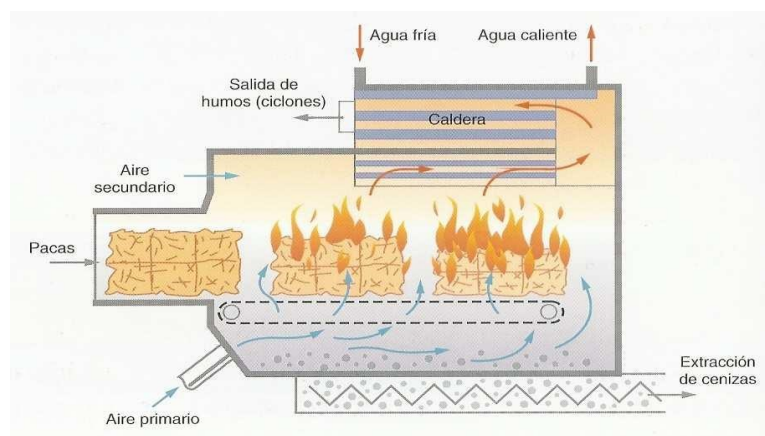


Figura 2.1. Proceso de combustión. Fuente: SOFOS energía [www.sofos.es/biomasa]

CAPÍTULO 3

POTENCIAL ENERGÉTICO.

Los residuos que se consideraron para el sector agrícola fueron escogidos teniendo en cuenta: su disponibilidad en Tisma, su poder calorífico inferior y la producción total de estos cultivos en ese municipio. A continuación, se realiza una breve descripción de los residuos aprovechables para cada uno de los cultivos energéticos.

Zonas de cultivo de maíz.

El maíz se cultiva en todo el país y se puede todo el año, en cinco épocas de siembras, como se puede ver en la siguiente tabla

Época	Fecha
invierno	Mayo-junio
Postrerón	Julio
Postrera	Agosto-septiembre
Apante	Diciembre
Riego	Febrero

Tabla 3.1. Elaboración propia / Fuente: CENAGRO

Zonas de cultivo del trigo sorgo.

Las cantidades, distribución y regularidad de las lluvias son elementos principales que proveen a los suelos la humedad necesaria para satisfacer la demanda de agua de la planta de sorgo, por lo tanto, solo se puede cultivar en tres épocas, a como se puede ver en la siguiente tabla

Época	Fecha
Invierno	Del 15 al 27 de mayo
Postrera	Del 10 al 18 de agosto
apante	Entre los últimos días de noviembre y primeros días de diciembre

Tabla 3.2. Elaboración propia / Fuente: CENAGRO

Desde el inicio de la difusión y puesta en marcha de la producción de biocombustibles a nivel mundial, tres temas han estado siempre en el centro de discusión y controversia, estas son los balances energéticos, la competencia con los alimentos y la preservación del medio ambiente.

Las controversias mencionadas han impulsado con mayor énfasis estudios y tecnologías capaces de emplear los residuos agropecuarios y forestales. El aprovechamiento de los mismos enfrenta desafíos dados sus dos características fundamentales ya mencionadas, baja densidad energética y (poca cantidad de energía por unidad de peso y/o volumen) y su alta dispersión geográfica.

(Bajos volúmenes distribuidos en amplias superficies). Esto implica enormes desafíos relacionados a su acondicionamiento logístico transporte y transformación a fin de lograr cadenas competitivas.

Afectaciones que se provocarían al retirar todo el rastrojo del campo.

Cuando se plantea el retiro y empleo de residuos de cultivos se enfrentan con una nueva exigencia sobre el agroecosistema que debe ser valorado en cada situación en particular.

Los cultivos extensivos de especie gramíneas son potenciales fuentes de materia prima lignocelulósica para producción de energía dada su relativa mayor eficiencia de conversión de la energía solar en compuestos orgánicos.

Una vez realizada la cosecha de estos cultivos queda en el lote de producción, una cantidad importante de biomasa de “residuos de cosecha” que se llaman comúnmente rastrojos.

El rastrojo está compuesto principalmente, por cañas que tienen una alta relación C/N y una alta proporción de lignina y celulosa en sus tejidos.

Descontando los requerimientos del sistema de suelo para mantener sus contenidos de materia orgánica y la compleja red trófica de organismos del suelo, el rastrojo en exceso podría ser utilizado como materia prima para la generación de energía.

La extracción de residuos también tiene su impacto sobre el balance general de nutrientes de cada agroecosistema. La discusión referente a la recolección y manejo de los rastrojos es muy amplia y compleja por la gran diversidad de escenarios edáficos, de eco-regiones y de sistemas productivos que se implementen en cada situación. (Willhelm et al).

Realizando una exhaustiva revisión de antecedentes, se logró en listar seis factores clave que limitarían la extracción de rastrojos, estos serían la erosión hídrica y eólica, el contenido de carbono, el balance de nutrientes, la dinámica del agua y la temperatura del suelo y la compactación.

Para poder realizar estimaciones que permitan evaluar escenarios alternativos, se pueden emplear modelos de balance similar a los desarrollados para el balance de carbono, a esto se debe agregar un término que considere la necesidad de cobertura.

Este término debería estimar la cantidad de rastrojo que es necesario dejar en el lote para evitar pérdidas de agua, reducir los riesgos de erosión y como fuente de materia orgánica.

Los residuos agropecuarios son usados en muchos países con una significativa contribución al aporte energético. Su empleo no está exento de una serie muy importante de consideraciones y cuidados que deben ser atendidos a fin de lograr que su uso sea sustentable en el tiempo.

Entre dichas consideraciones, se resumen a continuación las más importantes:

- El volumen que se genera de rastrojo es potencialmente atractivo para su empleo como biocombustible.
- Hay que considerar factores de variabilidad específica. Existe variabilidad en el volumen de producción y potencialmente en la calidad. Los factores que determinan esta variabilidad son la calidad del sitio (la zona o regiones de producción), el año (precipitaciones, temperatura), el manejo agronómico (genética, fertilización, riego, etc.).
- Debe encararse una revisión exhaustiva y adaptación de los indicadores relacionados a la temática (Índice de cosecha IC, materia orgánica, balance de nutrientes, estructura, mineralización, por ejemplo).
- A pesar que varios trabajos proponen la remoción directa de una proporción del rastrojo, esta práctica presenta riesgo e incertidumbre en términos de sustentabilidad (Pérdida de cobertura, descenso de la materia orgánica, pérdida la estabilidad estructural, aumento de los riesgos de erosión, pérdida de fertilidad química, etc.).
- Se deben explorar alternativas preliminarmente desarrolladas en otros sistemas como por ejemplo la cosecha y aprovechamientos de olotes.
- Para una consolidación de estas prácticas es necesario una evaluación, adaptación y potencialmente desarrollo de maquinaria y equipamiento para la ejecución de los procesos adaptado a los sistemas productivos.

- Debe seguirse evaluando y profundizar permanentemente los balances energéticos, los costos de oportunidad del uso de las fuentes alternativas y su relación costo/beneficio integral para cada etapa (recolección, logística, transformación y reincorporación al sistema).

Recopilación de información.

El objetivo del trabajo es realizar un análisis integral en base a la información disponible que permita plantear la factibilidad del uso de residuos de cosecha de maíz, sorgo y cacaomaní como potenciales fuentes de materia prima para la generación de energía eléctrica. El análisis contempla la evaluación de riesgos ambientales.

Disponibilidad.

Según resultados del IV CENAGRO 2010-2011, se presenta información actualizada de las principales variables estructurales del sector agropecuario, características de las explotaciones, características de sus productores, así como las condiciones de acceso y servicios de las comunidades rurales del municipio de Tisma.

El maíz es un rubro con potencial en el municipio, cuenta con 11,221 manzanas disponibles; no obstante, según el censo, en el período investigado solo se cultivaron 836.38 manzanas, es decir el 7.45% de la superficie disponible.

Producción agrícola.

En Tisma los cultivos extensivos más interesantes de ser evaluados respecto del aprovechamiento de los rastrojos: son el maíz, el sorgo y el cacaomaní. Los motivos principales por los cuales pueden resultar de interés son la extensión del área bajo producción (Tabla 3.3), la gran cantidad de biomasa aérea que queda como rastrojo luego de la cosecha, el momento del año durante el cual se produce el cultivo y las características fisiológicas de estas especies

Cultivos	Superficies cultivadas (ha)
Maíz	7840.5
Sorgo	375.31
Cacaomaní	2015.16
Total	10 230.97

Tabla 3.3 Fuente: elaboración propia / Fuente: CENAGRO

En la figura 3.1, se ve el porcentaje de cada cultivo, ocupando el primer lugar el maíz.

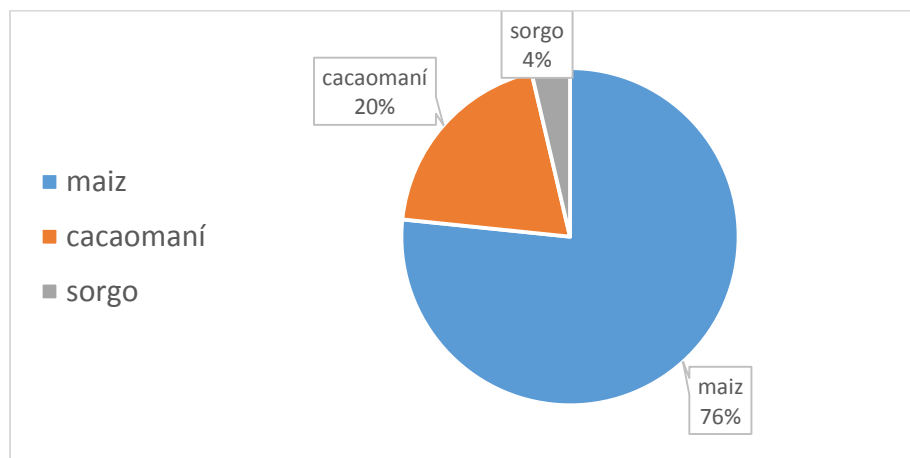


Figura 3.1. Elaboración propia / Fuente: CENAGRO

Con el objetivo de tener una comparación cuantitativa en términos de volumen producido, las estimaciones se realizaron para los tres cultivos, maíz, sorgo y cacaomaní.

El principal uso productivo que se da a los rastrojos es como recurso forrajero. Los rastrojos de maíz son utilizados de manera frecuente para mantener especialmente al ganado durante el verano.

Cuantificación y factibilidad de uso de los de residuos lignocelulósicos.

Estudios preliminares referentes al potencial uso de los rastrojos como biocombustibles.

Entre las diferentes definiciones sobre la agricultura sustentable se puede entender en términos generales como un sistema de producción que, manteniendo la capacidad productiva, será útil a la sociedad indefinidamente, por cumplir los siguientes requisitos:

- Conservar los recursos productivos.
- Preservar el ambiente
- Responder a los requerimientos sociales
- Ser económicamente competitivo y rentable

Planteo y estimación del volumen de biomasa disponible.

Las evaluaciones de recursos son una parte fundamental en el estudio de viabilidad de una planta de biomasa, y ello requiere conocer bien las potencialidades de generación de biomasa según su naturaleza, sea ésta primaria o secundaria.

Las evaluaciones de recursos deben permitir conocer los recursos potenciales y/o utilizables en una zona proporcionando información válida de acuerdo al nivel de detalle deseable.

Las evaluaciones de recursos deben servir para conocer el tamaño o capacidad de producción de energía de una zona, o para la toma de decisión de la ubicación de una planta.

Estimación del factor de residuo.

Para fines de cálculo se ha tomado el siguiente híbrido, ya es adaptable a los terrenos que posee el municipio de Tisma, así como también posee buen rendimiento

Nombre de la tecnología: HÍBRIDO HQ-INTA 993 DE ALTA CALIDAD DE PROTEÍNA..		Código: GB-007
Nombre común: HQ-INTA 993	Nombre científico: Zea Mays Palabra	
Descripción de la tecnología: 3.1 Características agronómicas		
Días a flor femenina	54 a 56	
Altura de planta (cm)	230 a 235 125 a 130	
Altura de mazorca (cm)	Semi cristalino	
Textura de grano	Blanco	
Color de grano	110 – 115	
Días a cosecha	Intermedia	
Madurez relativa	80 a 95	
Rendimiento comercial (qq/mz)	35 a 46	
Densidad poblacional (mil plantas/mz)	Tolerancia al achaparramiento	
Ventaja		
3.2 Origen de la variedad		

H-INTA 991 es un híbrido de tres líneas cuyos progenitores son LN-17, LN-19 y LN-21, las dos primeras líneas fueron mejoradas por CIMMYT y la tercera por el Programa de Maíz de Nicaragua.			
3.3 Adaptabilidad			
H-INTA 991 se puede sembrar desde los 200 a > 1,000 m de altura, se adapta a suelos francos, franco arenoso y areno arcilloso, con pendientes de 15 hasta más de 30%, pH de 6.5 a 7.0, temperaturas <22 a 29° C y precipitaciones durante el ciclo biológico del cultivo de 1,000 a 2,000 mm.			
3.4 Manejo agronómico			
- Época de siembra H-INTA 991 es un híbrido de ciclo intermedio de 110 a 115 días a cosecha, recomendadas para la siembra de Primera (faja del Pacífico), Postrera y Apante (Zona Norte del País). - Densidad poblacional El híbrido H-INTA 991 está recomendado para la siembra con:			
Modalidad	Distancia entre surcos (pulgadas)	Distancia entre plantas (pulgadas)	Distancia entre plantas (miles)
Maquinaria	30 a 32	8 a 10	35 a 46
Bueyes	33 a 36	12 a 16	19 a 27
Espeque	30 a 36	16 a 24	13 a 23
Fertilización - Forma y época de aplicación Al momento de la siembra utilizar 2 quintales de fertilizante completo de las fórmulas 10-30-10 y/o 12-30-10. El fertilizante debe ser depositado en el fondo del surco, cuando existe buena humedad en el suelo. - Fertilización complementaria Para proporcionar a la planta de maíz todos nutrimentos necesarios para su desarrollo y producción, es fundamental la aplicación nitrogenada. Se recomienda aplicar 2 qq/mz de urea 46 %. Sin embargo, se puede realizar fraccionado a razón de 1 qq/mz a los 30 y 40 días después de la siembra. Condiciones ecológicas requeridas: Con el híbrido H-INTA 991 se siembran aproximadamente unas 2 a 3 mil manzanas en las principales zonas maiceras del país. Actualmente se encuentra difundida en las localidades de Quilali, Jalapa, San Ramón, Esquipulas, San Dionisio, Fantasma, Tuma, La Dalia, La Mia, La Guinea, Bocaycito, Las Guayabas, La Corona, El Bochinche, El Bosque, El Horno,			

Jinotega, Matagalpa, Condega, Río Blanco, Wiwili, Juigalpa, Muy Muy, Cuapa, San Marcos, Carazo, Masatepe, Campos Azules, Meseta de los Pueblos, Acuapa, El Sauce, Telica, El Viejo, León, Ticuantepe, Tola, Cárdenas, Santo Tomas, El Coral, Nueva Guinea.

Tabla 3.3. Elaboración propia / Fuente: INTA

El factor de residuo (FR) es la relación entre los rastrojos y el rendimiento, representa el complemento del índice de cosecha (IC). Es decir, la proporción de la biomasa aérea que no es grano o el órgano que se cosecha del cultivo.

El factor de residuo puede calcularse a partir del IC (ecuación 1). Este factor multiplicado por el rendimiento, permite estimar el residuo. En términos generales, para el maíz, se puede considerar un IC de 0,5 (IV CENAGRO). Agricultores de la zona consideran que las plantaciones de maíz y trigo sorgo tienen un índice de cosecha (IC) de 0.51. En zonas aledañas, los valores estuvieron entre 0,43 y 0,57 dependiendo del híbrido utilizado.

Ecuación #1

$$FR = \frac{1-I_c}{I_c}$$

Donde:

FR - factor de residuo

Ic - índice de cosecha

Teniendo en cuenta estos antecedentes, se consideró tres escenarios posibles para el IC y en consecuencia para el FR. Se utilizó un valor de IC de 0,50 como valor promedio, un IC de 0,3 como valor mínimo y un IC de 0,60 como máximo. Para estos valores de FR utilizados serán: 1; 2,33 y 0,67; respectivamente.

Estimación del rendimiento potencial de materia prima para el municipio de Tisma.

Para esta evaluación se tomó en cuenta lo siguiente, se calculó el promedio de los rendimientos y superficies sembradas de maíz considerando el ciclo de cosecha de año (2010-2011). Con estos valores se estimó el rendimiento de rastrojo por hectárea (Tabla 3.4, para los cultivos de maíz, trigo sorgo y cacaomaní) y la producción total según la superficie sembrada (Tabla 3.4, para los cultivos de maíz, trigo sorgo y cacaomaní) utilizando los tres factores de residuo (FR) descritos en el punto anterior.

Tabla 3.4: Rendimiento de rastrojo por hectárea (Tn/ha) considerando los factores de residuo (FR) 2,33; 1 y 0,67 que corresponden a los IC 0,3; 0,50 y 0,60; respectivamente. Los rendimientos del rastrojo fueron estimados para el municipio de Tisma, considerando el rendimiento promedio de maíz durante las campañas 2010 – 2011.

Cultivo	Sup.cosecha (ha)	Rendimiento (Tn/ha)	Rastrojo (Tn/ha)			
			2.33	1	0.67	0.62
Maíz	7,840.5	5	11.65	5	3.35	
Sorgo	375.31	6	13.98	6	4.02	
cacaomaní	2,015.16	3.5				2.17

Tabla 3.4. Elaboración propia / fuente: CENAGRO

Rendimiento de rastrojo (Tn) considerando los factores de residuo (FR) 2,33; 1 y 0,67 que corresponde a los IC 0,3; 0,50 y 0,60; respectivamente. Los rendimientos de rastrojo fueron estimados para el municipio de Tisma.

Considerando los rendimientos y las superficies promedio de maíz durante el ciclo agrícola 2010- 2011. Datos obtenidos IV Censo Nacional Agrario (CENAGRO).

Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrícolas (maíz, trigo sorgo y cacao maní) en el municipio de Tisma

Cultivos	Cantidad de biomasa (Tn/año)			
	2.33	1	0.67	0.62
Maíz	91 342	39 203	26 266	
Sorgo	5 247	2 252	1 509	
cacaomaní				4 373
Cantidad de biomasa (Tn)				
Total	100 962	45 828	32 148	

Tabla 3.5. Elaboración propia / fuente: CENAGRO

Tisma posee un potencial en recurso biomásico, en las mejores condicione de 100,962 toneladas al año, en condiciones promedio, un potencial de 45,828 toneladas y en las peores condiciones, un potencial de 32,148 toneladas al año, siempre y cuando se cultive el 100% de las hectáreas destinadas a la agricultura.

CAPÍTULO 4

PRETRATAMIENTOS APLICADA A LOS RASTROJOS.

La biomasa recién cortada contiene hasta un 40-60% de humedad superficial, pero tanto para combustión como para gasificación, se requieren humedades del 10 a 20%.

No es posible reducir la humedad de la biomasa a menos de un 15-10% de humedad, ya que, por su carácter higroscópico, si se intentara, la recuperaría con el equilibrio de la humedad atmosférica.

Análisis del secado de los diferentes rastrojos en estudio.

Se entiende por secado el procedimiento para eliminar el líquido de un producto, bien por evaporación o por vaporización, con ayuda, por lo general de calor. Pueden considerarse como métodos de secado aquellos en que el agua, sin cambiar de estado, se extrae por medios mecánicos: presión, filtrado o centrifugación.

El secado natural, en cambio, se basa en la pérdida de humedad de la biomasa por evaporación, debido a la influencia de la humedad relativa y de la temperatura del ambiente. El fenómeno de la evaporación a través de una corriente de aire implica un intercambio simultáneo de calor y de materia en el medio.

Pre-procesamiento necesario.

Por la heterogeneidad de la biomasa agrícola, es conveniente considerar los procesos que permitan disminuir la humedad, el tamaño, la granulometría y la eliminación de productos indeseados como: arena, piedras metales entre otros.

Los anteriores factores desfavorecen ampliamente las reacciones que se producen en los reactores de combustión, de ahí la importancia de realizar un tratamiento orientado a eliminar las propiedades físicas no inherentes al tipo de biomasa, no descartando la posibilidad de someter el material a tratamientos que buscan eliminar o modificar parte de los componentes químicos que la confirman.

El pre-procesamiento, por lo general, puede ubicarse dentro de la cadena de aprovechamiento energético, bien sea desde el momento de recolección hasta la entrada de biomasa en el sistema de conversión energética.

Esta fase es clave para definir la factibilidad técnica y económica del proceso completo, debido a que aumenta la eficiencia del sistema. Los procesos que se utilizan con mayor frecuencia en sistemas de combustión de biomasa en estado sólido son:

- Densificación: aumenta su densidad aparente.
- Secado: reduce la humedad.
- Granulometría: adaptación del tamaño para entrada al sistema de combustión.

Pre-procesamientos

Densificación.

Es un proceso de compactación de la biomasa agrícola, el objetivo es obtener un combustible con mayor densidad aparente, la cual considera el volumen ocupado tanto por la fase sólida como la fase de fluidos que, en la biomasa generalmente es aire. Esto incrementa la densidad energética que es la energía por unidad de volumen [35].

Esto puede lograrse al crear un material empaquetado con material derivado de la biomasa o la creación de pellets y briquetas que además de facilitar el transporte, pueden ser utilizados directamente como combustibles debido a sus propiedades homogéneas.

Secado.

La humedad de la biomasa agrícola debe reducirse para incrementar el poder calorífico y asimismo la eficiencia en el proceso de transformación [33]. La humedad se debe a procesos naturales en las fuentes de la biomasa, ya que, por ser de origen agrícola, su constitución es mayoritaria en agua. También el clima es un factor determinante desde el punto de recolección hasta su almacenaje.

El secado de la biomasa podría realizarse de manera artesanal, organizándola de forma tal que corrientes de aire natural y exposición al sol permitan, en un periodo de tiempo moderado, la eliminación natural de la mayor cantidad de humedad.

El secado natural necesita de condiciones climáticas medianamente favorables, es decir, humedad relativa baja, escasez de lluvias y días soleados. Con este método es posible disminuir la humedad en un rango del 20 % a un 10 %.

Granulometría.

El empaquetado consiste en una compactación en el lugar de recolección de la biomasa en estado sólido, se realiza por medio de maquinaria especializada que ata los residuos en forma de paca con el fin de reducir costos de transporte y almacenamiento. La densidad aparente típica de los rastrojos objeto de estudio es de 140Kg/m³.

Metodología de recolección y transporte.

Una de las motivaciones para el desarrollo de los biocombustibles lignocelulósicos es reducir las emisiones de carbono. En consecuencia, las actividades de recolección del rastrojo y posterior transporte deberían insumir la menor cantidad de combustible fósil posible.

Recolección del rastrojo de cacaomaní.

El amarillamiento de las plantas de cacaomaní indica el inicio del periodo de cosecha. Una vez aparecido este síntoma, para determinar con mayor precisión el momento de cosecha, se arrancan varias plantas de diferentes surcos para observar si la mayor parte de las vainas están maduras.

La cáscara de una vaina madura es consistente y su interior color café negruzco; las semillas deben tener su cubierta de color rosado o rojo, la cual debe desprenderse fácilmente y estar despegadas internamente de la vaina.

Si se obtienen entre 75 y 80% de frutos maduros, se debe proceder a la cosecha. La cosecha puede realizarse en forma manual o con maquinaria.

En la cosecha manual se arrancan las plantas y se agrupan en montones pequeños y alineados, para que el sol las termine de secar; luego se separan los

frutos y se vuelven a secar al sol. Esta práctica solo se justifica en áreas pequeñas de no más de 5 a 10 hectáreas.

En el municipio de Tisma existen varios sistemas de cosechar en forma mecanizadas, según la maquinaria utilizada:

- Arrancadora: extrae la planta únicamente.
- Arrancadora-sacudidora: extrae la planta y la sacude eliminándole la tierra.
- Arrancadora-sacudidora-hileradora: extrae las plantas de 1 a 4 hileras, las sacude y las acomoda en una sola línea. Es el sistema de cosecha más adecuado para áreas grandes.

Una vez realizada la cosecha, los frutos deben secarse en el campo, expuestos a la acción directa del sol entre 1 a 2 semanas, hasta que la humedad baje a un 10% a 8%, sin que queden en contacto con el suelo. Para proceder al desgrane y almacenamiento, la semilla debe tener un porcentaje de humedad de 8 a 10 %.

Recolección del rastrojo de maíz y sorgo.

El cultivo de maíz dispone de 7 840 hectáreas a ser cultivadas, pero solo el 7.45% de esos predios se encuentran cultivados, en la actualidad aproximadamente se producen anualmente 6 808.4 toneladas de rastrojo de maíz en 584.41 hectáreas cultivadas. (IV SENAGRO).

La biomasa producida por el residuo del maíz que constituye un recurso energético, está conformada por tallo, hojas, cascara (humedad menor a 12 por ciento). La cantidad de la misma equivale a 2,5 veces el peso del grano de maíz cosechado.

El método tradicional de recolección de rastrojo de maíz se realiza mediante el corte hilerado y la confección de un megafardo o rollo del rastrojo con

posterioridad a la cosecha. La ventaja de este sistema es que corta y hace un hilerado simultáneo del rastrojo con bajo contacto con el suelo, evitando altos contenidos de tierra o cenizas, un factor nada deseable tanto para los procesos de bioenergía cuanto para la transformación en alimento para animales.

La megaenfundadora es actualmente la maquinaria más empleada, ya que por capacidad de prensado y formato del megafardo posee ventajas en la logística del transporte (más kilogramos/camión) hacia la planta de procesado.

El periodo de recolección está sujeto a las variaciones según las fechas de siembra, el ciclo del cultivo, variedades e híbridos, variaciones climáticas de cada año. Respecto de las condiciones que debe tener el material para poder cosecharlo, la confección de reservas de heno (aplicable al caso de los rastrojos de maíz y sorgo) puede realizarse en términos generales hasta con un máximo de 20% de humedad.

El procedimiento para la recolección comienza luego de la cosecha del cultivo (maíz/sorgo), se corta y rastrilla (generalmente con una pasada de rastrillos estelares).

El material que se utiliza para la confección de rollos con las roto-enfundadoras convencionales y se trasladan con cargadores/transportadores de rollos individuales o de a seis comúnmente hacia los lugares que se utilizarán de acopio del establecimiento.

Para traslados a distancias cortas se pueden utilizar transportadores de 6 u 8 rollos y para traslados a distancias largas, carros playos para 20 rollos aproximadamente.

Los productores tienen opciones de recolectar el rastrojo con variadas secuencias de picadoras, cortadoras, enrolladoras, etc., la recolección del rastrojo con una sola máquina combinada tiene la ventaja de reducir las pasadas en el lote.

CAPÍTULO 5

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.

Revisión de literaturas sobre la influencia de la composición de la biomasa en la formación de cenizas, la escorificación, y la corrosión.

Entre los diversos temas que se presentan en relación con la utilización de combustibles sólidos para generación de energía, se encuentran:

- la formación de depósitos de cenizas
- la formación de escoria
- la corrosión
- la sinterización y aglomeración, además de problemas relacionados con la composición química debido a la presencia de Cl, Na y K.

Importancia de la composición química de los rastrojos en la combustión.

Para lograr un sistema de generación estable se debe conocer sobre las tecnologías de quemado y adecuarlas a las necesidades impuestas por el combustible, en particular cuando se trata de desechos agrícolas o cultivos energéticos, los cuales por su composición química tienen un comportamiento diferente al resto de las biomasas.

Éstos combustibles tienen mayor contenido de minerales, en particular Sodio, Potasio, Fósforo y Cloro, alto contenido de cenizas con bajo punto de fusión y alto potencial corrosivo.

El contenido de ceniza de diferentes biomásas es muy variado, pudiendo llegar a ser tan bajo como el 0.5 % en base seca para algunas especies de pulpa de madera, hasta el 20% para algunos cereales o desechos de la industria agropecuaria, particularmente si están contaminados con tierra de la cosecha.

La tabla 5.1 muestra el contenido de ceniza y su relación con la formación de escorias

Combustibles que dan escoria	Contenido de cenizas (%)	Formación de escorias
Mezcla de paja de cebada	10.3	Fuerte
Paja de frijoles	10.2	Fuerte
Tallo de maíz	6.4	Moderado
Paja de trigo y tallo de maíz	7.4	fuerte

Tabla 5.1. Elaboración propia / fuente: INTA

La composición de cenizas está dominada por SiO_2 y CaO , y en menor medida por óxidos de Magnesio, Aluminio, Potasio y Fósforo. La ceniza proveniente de plantas de largos períodos reproductivos como son los árboles, tienen por la dinámica de flujo de nutrientes con la tierra, una composición mineral muy diferente a las plantas que se cosechan varias veces al año, como los cereales.

Estas últimas contienen mayores cantidades de óxidos con bajo punto de fusión, particularmente Potasio y Fósforo. Además, contienen substancialmente menores contenidos de metales pesados.

Para entender y poder predecir cómo se va a comportar un combustible en un determinado sistema de combustión, es necesario realizar ensayos de fusión de cenizas, de composición química y de su morfología.

Fusibilidad de la ceniza.

El análisis para determinar la temperatura de fusibilidad de las cenizas se realiza por ser un dato significativo a la hora de predecir posibles fenómenos de ensuciamiento y escorificación relacionados con la fusión de los depósitos provocados en la transformación termoquímica del combustible.

Los métodos experimentales normalizados que existen para determinar las temperaturas de fusibilidad de la ceniza son diversos, aunque básicamente consisten en calentar progresivamente una muestra de ceniza, moldeada en forma de cubo y registrar la temperatura a la que se observan (mediante una cámara) los cambios más sustanciales en dicha forma.

La figura 5.1 muestra las diferentes fases por las que transcurre una muestra sometida a un análisis de temperatura de fusibilidad. Este análisis proporciona cuatro temperaturas: la temperatura a la que la muestra experimenta un encogimiento, a la que sufre una deformación, a la que se convierte en una semiesfera y la temperatura a la que se produce un achatamiento y se puede considerar que se ha fundido.

A la hora de evaluar a qué temperatura operar para evitar los problemas asociados a la fusión de los depósitos formados en las distintas superficies, diversos autores recomiendan no sobrepasar la temperatura de deformación (Pronobis, 2005) aunque otros eligen la temperatura de encogimiento (Fernández, 2005) como el límite a partir del cual se pueden producir estos fenómenos.

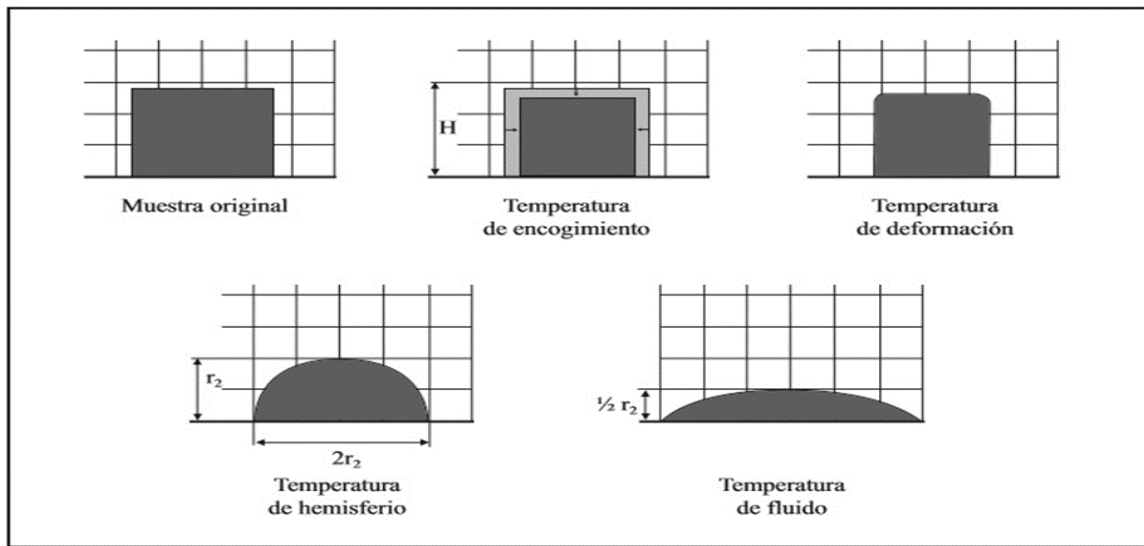


Figura 5.1. Diferentes fases por las que transcurre una muestra sometida a un análisis de temperatura de fusibilidad. (McKendry, 2002).

Técnicas para determinar el contenido de ceniza.

Las técnicas más comunes aplicadas a la determinación del contenido de ceniza y composición de la ceniza de los combustibles sólidos de laboratorio involucran calentar el combustible lentamente en aire, a masa constante hasta una temperatura de 815°C y someter el residuo resultante a un análisis químico elemental.

El residuo de ceniza es normalmente pesado para proveer un estimativo del contenido de ceniza en el combustible y luego es analizado para encontrar los diez mayores elementos presentes (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , TiO_2 , NaO_2 , K_2O , P_2O_5 y SO_3).

El estado en que las concentraciones de los principales elementos de formación de la ceniza se encuentran en la biomasa influye directamente en la cantidad de ceniza que se producirá. Por ejemplo, tanto la paja como los cereales son ricos en ceniza, en comparación con la madera que es un combustible pobre en ceniza.

La cantidad de ceniza producida es relevante para el diseño de sistemas de almacenamiento de ceniza, además para las posibilidades del reciclado y la manipulación de la misma.

Los elementos que conforman principalmente la ceniza en la biomasa son: Si, Ca, K, Mg y P. El Silicio (Si) combinado con Potasio (K) puede conducir a la formación de silicatos de bajo punto de fusión en las partículas de cenizas volantes. Como el K es relativamente inestable, forma cloruros, hidróxidos y sulfatos, todas los cuales desempeñan un papel importante en la corrosión.

El Ca es menos inestable que el K, pero también forma cloruros y sulfatos (Biedermann et al, 2005).

El Ca y el Mg suelen aumentar el punto de fusión de la ceniza mientras que el K y el Na suelen reducirlo. Los Cloruros y el bajo punto de fusión del álcali y los aluminosilicatos pueden también disminuir significativamente el punto de fusión de la ceniza (Miles et al, 1996).

Importancia del punto de fusión de la ceniza.

Un punto de fusión bajo de las cenizas conduce a la sinterización o formación de escoria en la cámara de combustión y esto posteriormente conduce a una planta de reducida eficiencia y corta vida.

La paja, los cereales y el pasto, dan cenizas que contienen bajas concentraciones de Ca y altas concentraciones de Si y K según (Biedermann y Obernberger 2005) y por lo tanto empiezan a sinterizar y se derriten a temperaturas considerablemente menores que combustibles tales como la madera

Sistema	Fusión de la temperatura eutéctica (°C)
NaCl	801
KCl	772
FeCl ₂	677
CrCl ₂	845
NaCl-FeCl ₂	370-374
KCl-FeCl ₂	340-393
NaCl-CrCl ₂	437
KCl-CrCl ₂	462-457

Tabla 5.2. Temperaturas de fusión/eutéctica para compuestos puros y mezclas binarias ricos en cloruro, presentes en los depósitos de cenizas de biomasa y más relevantes en las reacciones de corrosión asociada. (Nielsen et al., 2000).

En la tabla 5.3, se muestran las diferentes temperaturas para cada proceso termoquímico.

Proceso termodinámicos	Características del proceso	Productos principales	Uso primario
Combustión	Exceso de aire $700 \geq T(^{\circ}\text{C}) \leq 1400$ $P > 0.1 \text{ Mpa}$	Gases a elevadas temperaturas	Vapor, calor y electricidad
Gasificación	Oxidación parcial $500 \geq T(^{\circ}\text{C}) \leq 1300$ $P > 0.1 \text{ Mpa}$	CO+H ₂ (gas de síntesis)	Vapor, calor y electricidad
Pirólisis	Ausencia de oxígeno $300 \geq T(^{\circ}\text{C}) \leq 600$ $P > 0.1 \text{ Mpa}$	Biooils (aceite de pirólisis)	Biocombustibles diversos

Tabla 5.3. Temperatura de los principales procesos termoquímicos. Fuente: renovetec.

(Van loo y Koppejan, 2002), mientras tanto, afirman que las concentraciones de Si, K y Ca deben ser seriamente consideradas cuando se selecciona el sistema de combustión adecuado y la tecnología de control de temperatura.

Según (Oberberger et al 1997), los principales compuestos de Ca y el Mg que se forman durante la combustión de biomasa, son óxidos y en menor medida carbonatos, pero el Ca, Mg, K y P también son nutrientes vegetales y

enriquecedores del suelo pudiendo así proporcionar oportunidades para la utilización de las cenizas de biomasa en los bosques o en campos agrícolas.

Inconvenientes de los rastrojos por su composición química.

La paja y los cereales contienen una cantidad significativamente mayor de N, S y Cl en comparación con los biocombustibles leñosos y, por lo tanto, es necesario ajustar en consecuencia los gases de combustión y la tecnología de la limpieza de la caldera.

El análisis de las concentraciones de N, S y Cl en la biomasa es de gran importancia debido a que causan las emisiones gaseosas como NO_x, SO_x y HCl. Los parámetros que también afectan a la formación de estas emisiones son una excesiva concentración de O₂ y CO en los gases de combustión, la temperatura y geometría del hogar, así como los sistemas de precipitación de polvo. (Oberberger et al, 1997).

El N durante la combustión se convierte casi completamente en la fase gaseosa (N₂, NO_x).

El Cl influye principalmente sobre:

- La corrosión que afecta a las superficies del metal en hogares y calderas
- La concentración de ácido clorhídrico en los gases de combustión
- Las emisiones de partículas (KCl, NaCl, ZnCl₂).

Según (Biedermann y Oberberger 2005), cuando las biomásas tienen Cl en concentraciones superiores a 0,1% en peso sobre base seca, se deben esperar problemas asociados a la corrosión. Las medidas a adoptar para luchar contra la corrosión incluyen:

- ✓ Sistemas de limpieza automático de los intercambiadores de calor.
- ✓ Recubrimiento de tubos de caldera.
- ✓ Apropiada selección de materiales.
- ✓ Utilización de optimizadas tecnologías de control del proceso de combustión.

Asimismo, explican cómo el S al dar sulfatos principalmente gaseosos de SO_2 y alcalinos que se encuentran en las emisiones de gases, tienen además un papel importante en los procesos de corrosión.

Altas concentraciones de SO_2 en los gases de combustión causan la sulfatación de cloruros alcalinos y alcalinotérreos, que en consecuencia conducen a la liberación de Cl con la disminución de las temperaturas de los gases de combustión.

El Cl liberado puede ocasionar corrosión a través de la formación FeCl_2 o ZnCl_2 en las superficies metálicas a través de las partículas de ceniza precipitadas en las superficies de los intercambiadores de calor, según explica (Riedl et al 1999), indicando que las investigaciones han demostrado que la ceniza de paja (trigo) u otros cereales, después de la combustión contenían entre 40 a 55% de S, frente al 40 al 70% de la combustión de chip de madera.

Las concentraciones de metales (especialmente Ca) álcali y tierra alcalina en el combustible afectan a la eficiencia de la fijación del S en la ceniza (Biedermann y Obernberger, 2005).

Comportamiento de cenizas.

Los componentes inorgánicos que contienen la biomasa pueden adoptar tres formas: distribuidos uniformemente en el combustible orgánico como en granos de componentes inorgánicos en las partículas de combustible y como material foráneo traído por el combustible en su proceso.

Los cereales con alto contenido de Potasio (1% en el combustible equivalente a más de 20% en la ceniza), tienen substancialmente menores temperaturas de fusión que la madera y sus derivados.

Por ejemplo, una ceniza carente de Cloro comienza a fundirse a poco más de 800°C y está completamente líquida a 1000°C, mientras que una con 20% de Cloro comienza a fundirse a 600°C y está totalmente fundida a 800°C.

Dinámica de deposición de cenizas.

Cuando se lleva a cabo un proceso de combustión con un combustible con alto contenido de cenizas y composiciones químicas que promueven efectos corrosivos en calderas, es importante reconocer que la ceniza es un importante factor a tener en cuenta en el momento del diseño.

Es necesario ubicar los puntos donde la ceniza tenderá a depositarse y estudiar el sistema de flujo de gases con la debida atención.

Los problemas asociados a la deposición de ceniza durante la operación de equipos ocurren en todos los quemadores y calderas de biomasa, siendo las más ocurrentes las siguientes [9]:

- ✓ Aglomeración de partículas de ceniza en el lecho ya sea en la parrilla móvil o en lecho fluidizado debido a condiciones de combustión pobres, desfluidización de lecho fluidizado y problemas de remoción y manejo de ceniza.
- ✓ Deposición de ceniza en los componentes del quemador y su interferencia con la estabilidad del proceso.
- ✓ Acumulación de grandes cantidades de material total o parcialmente fundido de cenizas que interfieren con la operación del sistema. Esto resulta en paradas no programadas de caldera.
- ✓ Deposición de ceniza fundida parcial o totalmente en las paredes de intercambio de calor de caldera, lo cual reduce la transferencia de calor, aumentando la temperatura de gases y bajando el rendimiento de la caldera.
- ✓ Acumulación y subsecuente caída de grandes depósitos de ceniza en las partes altas del horno causando daños en componentes del sistema de combustión.

Estas formaciones de cenizas de escoria ocurren a temperaturas relativamente altas ($>800^{\circ}\text{C}$) en las paredes de refractarios o superficies de intercambio por el lado del agua, ocurriendo relativamente rápido (en manera de horas cuando las condiciones son favorables) involucrando la deposición y aglomeración de partículas de cenizas sólidas o parcialmente fundidas unas sobre otras.

Problema que ocasiona la ceniza en la caldera.

La acumulación de todos estos depósitos también ocurre en las superficies conectivas de calderas, fenómeno conocido como fouling, tanto a altas como a bajas temperaturas.

La formación de depósitos de ceniza en superficies de intercambiadores de calor a temperaturas en el entorno de 800°C a 1000°C es un proceso lento de deposiciones de ceniza parcialmente fundida en las cuales el crecimiento de la capa transcurre a lo largo de los días, conformándose en general por especies de óxidos de metales alcalinos.

La formación de depósitos en la superficie de intercambio ocurre a muy baja temperatura, por sedimentación de material sobre paredes perpendiculares al flujo de gases.

Está claro de la discusión presentada, que los procesos de depósitos de ceniza que ocurren en quemadores y calderas que operan con biomasa son un fenómeno muy complejo, dependiente tanto de las características de la ceniza como del quemador.

El diseño tanto del quemador como de la caldera particularmente donde habrá convección deberá reconocer apropiadamente las características de la ceniza.

El diseño y operación del sistema de combustión y del sistema de limpieza son muy importantes.

Es preferible mantener bajo el nivel de deposición de cenizas que emplear métodos de limpieza, además durante las paradas programadas hay que limpiar exhaustivamente la caldera y las áreas convectivas de cenizas. Existen sistemas de monitoreo de hollín y de limpiado automático que asisten significativamente con la optimización y control de la operación.

Impacto de la deposición de cenizas en sistemas de biomasa.

Impacto químico: corrosión.

Los procesos de corrosión que ocurren del lado de los humos en las calderas son muy complejos y como ocurren a alta temperatura y en condiciones de grandes variaciones de temperatura y composición son extremadamente difíciles de estudiar.

De cualquier manera, debido a la gran importancia que tiene para el diseño y operación de las plantas, estos procesos han sido motivo de recientes investigaciones tanto en el laboratorio, en plantas piloto como a escala industrial.

Se ha demostrado en muchas investigaciones científicas que el cloro tiene efecto catalítico que conlleva a una disociación de los materiales del acero de tuberías en los intercambiadores de calor, aun cuando la temperatura de los tubos es baja (100 a 150°C).

Este problema parece acentuarse en aquellos combustibles con una relación molar Cl:S mayor a 2, donde la ausencia de sulfuros, potencia la formación de cloruros, teniendo un efecto catalítico en la corrosión. [20-25].

En términos generales, la velocidad de corrosión en los tubos de caldera es afectada por diferentes factores: el material de los tubos, las composiciones y temperaturas de gases, la velocidad de transferencia de calor, la dinámica de ceniza depositada, y las propiedades físicas y químicas de la deposición.

Mecanismos de corrosión.

Es común que en calderas de biomasa se haya notado un elevado ritmo de corrosión cuando las temperaturas del metal exceden los 500°C. Una cantidad de mecanismos de corrosión coexisten y pueden ocurrir simultáneamente,

incluyendo procesos de reacciones entre el metal y los óxidos de metales con especies gaseosas de cloro y oxígeno, reacciones en la fase sólida involucrando sales de metales alcalinos (K, Na) como reacciones con ceniza en estado líquido o en cambio de fase.

En plantas de generación eléctrica que operan a base de biomas como combustible, la corrosión más severa está comúnmente asociada con depósitos de ceniza que contienen cloruros de metales alcalinos en superficies de sobrecalentadores.

Estos depósitos son responsables por ritmos de desgaste significativamente altos en metales, con reacciones debajo del punto de fusión del KCl y otras mezclas de cenizas de bajo punto eutéctico (sistemas KCl-FeCl₂-NaCl).

El HCl gaseoso puede entonces difundirse a la superficie del metal y reaccionar para formar cloruros con el mismo.

Este mecanismo ocurre cuando los combustibles tienen bajo contenido de azufre y significativamente alto contenido de cloro (por eso es que se habla de una relación cloruro a sulfato).

Los cereales son mucho más propensos a corrosión, teniendo una relación Cl:S que supera el valor admisible.

Medidas preventivas y correctivas de la corrosión.

Para temperaturas de vapor en el entorno de 500 a 550°C existen condiciones inaceptables cuando se trata de combustibles sensibles a la corrosión. En quemadores que consumen materiales contaminados con desechos con altos contenidos de metales alcalinos, cloruros y bajo contenido de azufre, sufren una significativa corrosión en áreas de sobrecalentadores aún a baja temperatura de vapor. Existe un número de medidas que se pueden adoptar:

- Control de la temperatura de vapor en cuanto al diseño de la caldera a un nivel en el que el ritmo de corrosión sea aceptable.
- El uso de aditivos que modifican la química de los gases de combustión y por lo tanto la deposición de ceniza.
- La selección de aleaciones más resistentes a la corrosión para sobrecalentadores.

En la siguiente tabla suministrada por (Tilman et al 2009), se muestran composiciones típicas de biomásas vegetales tanto en su composición inicial como en la composición de la ceniza

Parámetros	Residuos de madera	Pasto varilla	Rastrojo de maíz
Análisis aproximado (% en peso)			
humedad	42.00	9.84	8.00
Cenizas	2.31	8.09	6.90
Materia volátil	47.79	69.14	69.74
Carbono fijo	7.90	12.938	15.36
Análisis final (% en peso)			
Carbono	29.16	42	42.60
Hidrógeno	2.67	5.24	5.06
Oxígeno	23.19	33.97	36.52
Nitrógeno	0.6	0.69	0.83
Azufre	0.07	0.17	0.09
Humedad	42	9.84	8.00
Cenizas	2.31	8.09	6.90
cloro (%)	0.01	0.18	0.24
poder calorífico superior (kcal/kg)	2,795	3,892.3	3,891.2
Análisis elemental de cenizas (% en seco)			
AlO ₃	3.55	4.51	3.80
BaO			
CaO	45.46	5.60	8.80
Fe ₂ O ₃	1.58	2.03	1.80
K ₂ O	8.52	11.60	17.30
MgO	7.48	3.00	3.40

MnO			
Na ₂ O	2.13	0.58	1.50
P ₂ O ₅	7.44	4.50	2.70
SiO ₂	17.78	65.18	52.10
SrO			
TiO ₂	0.50	0.24	0.13
SO ₃	2.78	0.44	3.70

Tabla 5.4. Análisis inmediato como % en peso en base libre de humedad (Ollero et ál., 2003; ALS/CIEMAT; Biobank, 2005; Miles et ál., 1995).

Propiedades de la biomasa

Las propiedades de la biomasa son de una importancia fundamental a la hora de determinar el tipo de tecnología de conversión termoquímica que se ha de utilizar. Las cenizas en las plantas herbáceas anuales contienen un elevado porcentaje en metales alcalinos y en cloro, debido fundamentalmente a la utilización de fertilizantes.

Las cenizas en las plantas herbáceas anuales contienen un elevado porcentaje en metales alcalinos y en cloro, debido fundamentalmente a la utilización de fertilizantes.

La biomasa tiene un contenido de cenizas inferior al carbón, lo que simplifica la retirada de las mismas en las instalaciones de combustión y disminuye la cantidad de efluentes del proceso en relación al combustible fósil.

Composición química de los rastrojos.

La combustión consiste en una reacción química, altamente exotérmica del oxígeno con ciertos elementos químicos de unas sustancias llamadas combustible. El oxígeno es aportado por el comburente que suele ser aire.

Los combustibles están básicamente compuestos por 2 tipos de elementos químicos: los activos en el proceso de combustión, es decir, los que reaccionan químicamente y los inactivos que permanecen químicamente inalterados.

Los elementos activos van ligados a la materia orgánica del combustible, siendo las especies químicas principales el carbono, el hidrógeno, el azufre y el nitrógeno.

Análisis inmediato.

El objetivo del procedimiento en este apartado ha sido realizar el análisis inmediato de los rastrojos, que comprende la determinación del contenido de humedad, cenizas, materias volátiles y carbono fijo que contienen los mismos, para poder comprobar su uso como posible combustible.

Fundamentos teóricos.

- Cenizas: Es el residuo sólido, expresado en tanto por ciento en peso, resultante de la combustión completa de un combustible.
- Materia volátil: conjunto de hidrocarburos que se volatizan en el calentamiento progresivo del combustible.
- Carbono fijo: resto carbonoso que permanece tras el escape de los volátiles y que está ligado a las cadenas carbonosas de la materia orgánica.

Los elementos inactivos más habituales que se encuentran en los combustibles son:

- Agua (humedad)
- Cenizas (silicatos, carbonatos, SiO_2 ...)

➤ Gases inertes (N_2 , CO_2 ...)

Todo con un objetivo fundamental que es conocer a través de dichos análisis la calidad energética del producto de combustibles sólidos y la idoneidad de la misma como posible combustible a la hora de ser utilizada en proyectos reales a mayor escala. Para ello se debe tener en cuenta que un buen combustible se caracteriza por una serie de cualidades entre las que se encuentran:

- Bajo porcentaje de humedad.
- Elevado Poder calorífico superior (PCS).
- Bajo contenido en cenizas.
- Elevado contenido de carbono fijo.
- Baja presencia de azufre en su composición elemental.

Análisis elemental.

El análisis elemental de una muestra de residuo de biomasa tiene como propósito la determinación de los principales elementos químicos (orgánicos) constituyentes de la misma.

Los elementos más abundantes y pertinentes para determinarse, en una primera fase, son el carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre. Este análisis permite conocer la cantidad de aire u oxígeno que es necesario introducir para la combustión del combustible.

Propiedades químicas.

Las propiedades químicas de los combustibles permiten seleccionar la tecnología adecuada en función de las características del combustible, como el contenido de nitrógeno, azufre, oxígeno, cenizas, volátiles, metales, fibra.

Contenido de nitrógeno.

Nitrógeno no aporta energía en la combustión, pero si su presencia es considerable y en procesos de elevada temperatura, se forma NO_x de origen térmico (Mielnicki y col., 2005) por lo que es necesario un tratamiento rígido en su aplicación (Romero, 2007), por otro lado, el contenido de nitrógeno indica que se pueden obtener subproductos de aplicación fertilizante.

Contenido de azufre.

El contenido de azufre es importante determinar en la biomasa dado que su presencia puede dar lugar a las escorias perjudiciales y formar óxidos muy contaminantes (Fernández, 2003).

Contenido de oxígeno.

La presencia de oxígeno en la biomasa reduce la cantidad de aire necesario (Abrego, 2010) para la combustión, pero reduce el poder calorífico del material combustible. (Castells, 2000; 2012).

Contenido de cenizas.

La ceniza es la materia sólida no combustible de un material, el poder calorífico se reduce con su incremento, además, se depositan en las tuberías de las calderas e intercambiadores dificultando la transmisión de calor, para eliminarlas es necesario tecnologías costosas. (Castells y col., 2005), el alto contenido de ceniza indica sub-productos potenciales como fertilizantes (Solla y col., 2004).

Por consiguiente, las cenizas definen la calidad de la biomasa en la combustión al determinar el contenido en materia incombustible presente. A mayor contenido de cenizas, menor poder calorífico presentará la biomasa y mayores será los sobre costos de manipulación y tratamiento, así como los posibles problemas de erosión en los equipos de combustión.

Contenido de volátiles.

Durante la fase inicial del proceso de combustión se desprenden de la biomasa volátil, consistente en distintas cantidades de hidrógeno, óxido de carbono, metano y otros hidrocarburos de bajo peso molecular.

El contenido en volátiles de la biomasa constituye una importante propiedad de esta, proporcionando una indicación de su reactividad y facilidad de ignición.

Este parámetro caracteriza la estabilidad de la llama tras la ignición, así como la facilidad para la producción de ésta. En este sentido, los rastrojos contienen alto contenido en volátiles y arden con facilidad, es un indicador de la longitud de la llama.

Contenido de metales.

La biomasa contiene bajos niveles de metales traza, el contenido en metales alcalinos y cloro, puede afectar notablemente los equipos. La composición de cenizas de biomasa está dominada por SiO_2 y CaO , y en menor medida por óxidos de Mg, Al, K y P. (Melissari, 2012).

Contenido de fibra.

El contenido de fibra es importante cuando se enfoca desde el punto de vista alimenticio, para efectos de este estudio no es considerado ya que se analiza las características como potencial energético.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros más importantes del rastrojo de sorgo.

Análisis inmediato (% de materia seca)	
Volátiles	73.1
Cenizas	5.9
Carbono fijo	21.0
Análisis elemental (%)	
Carbono	44.7
Hidrogeno	6.3
Nitrógeno	1.56
Azufre	0.21
Cloro	0.60
Poder calorífico del sorgo (Kcal/Kg) ms	
PCS	PCI
4,328.87	3,996.89

Tabla 5.5. Análisis inmediato en base seca (Ollero et ál., 2003; ALS/CIEMAT; Biobank, 2005; Miles et ál., 1995).

Composición de la ceniza del sorgo.

Principales formaciones	
Al ₂ O ₃	0.30
CaO	7.4
FeO ₃	0.29
K ₂ O	45.8
MgO	3.5
MnO	0.15
NaO	0.957
P ₂ O ₅	4.1
SiO ₂	17.8

Tabla 5.6. Composición elemental de la ceniza (% en peso) (Ollero et ál., 2003; ALS/CIEMAT; Biobank, 2005; Miles et ál., 1995).

Rastrojo de maíz.

El rastrojo de Maíz es un material lignocelulósico, pero que además contiene otros elementos químicos, entre los que destacan el azufre, que en la combustión produce óxidos de azufre muy corrosivos; calcio y cloro, que producen gases muy ácidos; potasio, que es productor de cenizas que sintetizan y funden; y silicio, productor de cenizas fusibles.

Por las características de los productos que se originan de la combustión del rastrojo de Maíz, lo hace más complejo en comparación con las astillas de madera, las que apenas disponen de otros elementos distintos, como C, H, O. Sin embargo, el alto contenido de potasio de las cenizas es una ventaja, pues puede ser empleado como fertilizantes (Camps y Marcos, 2008).

Análisis inmediato para el rastrojo de maíz

Análisis inmediato (% en peso)	
Humedad	8
Cenizas	6.9
Materia volátil	69.74
Carbono fijo	15.36

Tabla 5.7. Análisis inmediato en base seca (Ollero et ál., 2003; ALS/CIEMAT; Biobank, 2005; Miles et ál., 1995).

Análisis elemental para el rastrojo de maíz.

Análisis elemental (% en peso)	
Carbono	42.6
Hidrogeno	5.06
Oxigeno	36.52
Nitrógeno	0.83
Azufre	0.09
Cloro	0.24
Poder calorífico superior (Kcal/Kg)	3,891.2

Tabla 5.8. Análisis elemental en base seca (Ollero et ál., 2003; ALS/CIEMAT; Biobank, 2005; Miles et ál., 1995).

Composición de la ceniza del rastrojo de maíz.

Análisis elemental de cenizas (% en seco)	
AlO ₃	3.80
BaO	
CaO	8.80
Fe ₂ O ₃	1.80
K ₂ O	17.30
MgO	3.40
MnO	
Na ₂ O	1.50
P ₂ O ₅	2.70
SiO ₂	52.70
SrO	
TiO ₂	0.13
SO ₃	3.70

Tabla 5.9. Composición elemental de la ceniza (% en peso) (Ollero et ál., 2003; ALS/CIEMAT; Biobank, 2005; Miles et ál., 1995).

Características físicas-químicas del rastrojo.

Resumen las características físicas y químicas de la biomasa como combustible y sus efectos en la combustión

	propiedades	Efectos
Físicas	Contenido de humedad	Durabilidad de almacenamiento. Perdidas de materia seca. Autoignición.
	Densidad a granel	Costos de logística de combustible (almacenamiento, manipulación).
	Contenido de cenizas	Polvo, emisiones de partículas. Utilización de cenizas/costos de eliminación.
	Dimensión de partículas y distribución de tamaño	Determina el sistema de alimentación de combustible. Determina la tecnología de combustión. Propiedades de secado. Formación de polvo. Seguridad operativa durante el transporte de combustible.
Químicas	Carbono C	Valor calorífico bruto (positivo).
	Hidrógeno H	Valor calorífico bruto (positivo)
	Oxígeno O	Valor calorífico bruto (negativo)
	Cloro Cl	Corrosión
	Nitrógeno N	Emisiones de NOx, N2O, HCN
	Azufre S	Emisiones de SOx, corrosión
	Flúor F	Emisiones de HF, corrosión
	Potasio K	Corrosión (intercambiadores de calor, sobrecalentadores). Disminución de las temperaturas de las cenizas. Formación de aerosol. Utilización de cenizas (nutrientes de plantas).
	Sodio Na	Corrosión (intercambiadores de calor, sobrecalentadores). Disminución de las temperaturas de las cenizas. Formación de aerosol.

	Magnesio Mg	Aumento de la temperatura de fusión de las cenizas. Utilización de las cenizas (nutriente vegetal).
	Calcio Ca	Aumento del punto de fusión de las cenizas. Utilización de las cenizas (nutriente vegetal).
	Fosforo P	Aumento del punto de fusión de las cenizas. Utilización de las cenizas (nutriente vegetal).
	Metales pesados	Emisiones de contaminantes. Problemas de utilización y eliminación de cenizas. Formación de aerosol.

Tabla 5.10. Características físico – químicas de los rastrojos y sus efectos en la combustión. Fuente: guía sobre el aprovechamiento industrial de la biomasa.

Poder calorífico de residuos agrícolas.

Para determinar el potencial energético que tienen los rastrojos es necesario conocer de ante mano el poder calorífico que tienen.

Poder calorífico superior.

El poder calorífico superior (PCS) o poder calorífico bruto (PCB) mide la cantidad total de calor que se producirá mediante la combustión. Sin embargo, una parte de ese calor permanecerá en el calor latente de la evaporación del agua existente en el combustible durante la combustión.

Conocer el poder calorífico o contenido energético de la biomasa residual agrícola es imprescindible para evaluar la viabilidad de su valorización energética y el rendimiento que tendría una instalación de valorización energética empleando la biomasa en estudio.

La energía almacenada en los tejidos vegetales se determina dentro de un calorímetro adiabático donde se igualan las temperaturas interna y externa, siendo el calor interno el aprovechable ya que no hay fuga de este.

En los combustibles que contienen hidrogeno, como es el caso de la biomasa residual agrícola, se ha de diferenciar dos conceptos diferentes:

- Poder Calorífico Superior (PCS)
- Poder calorífico Inferior (PCI)

Esto se debe a que en estos tipos de combustibles que contienen hidrogeno, la combustión del hidrogeno produce vapor de agua. Al efectuar la determinación en una bomba calorimétrica, los gases de combustión se enfrían hasta las condiciones iniciales, por tanto, el vapor de agua formado se condensa desprendiendo calor (30).

El calor total contabilizado en la bomba, es tanto el calor del combustible como el calor de condensación del vapor de agua formado en la combustión. La suma de estos dos valores es el PCS.

Poder calorífico inferior.

En la utilización habitual de los combustibles, los productos de combustión no pueden ser enfriados hasta las condiciones ambientales y por ello no es factible el aprovechamiento del calor de condensación del vapor de agua formado.

Por tanto, se define el PCI como el calor que se desarrolla en el proceso asumiendo que los productos de combustión se encuentran en estado gaseoso y que el calor de condensación del vapor de agua formado no está disponible.

El PCI es un parámetro importante del comportamiento de un incinerador. Los productos con PCI superior a 3,500 Kcal/kg son autocombustibles. Además, la mayoría de los equilibrios termodinámicos de una combustión se desplazan favorablemente con temperaturas altas en el medio reactivo.

Se acelera la vaporización, y la aportación de energía de activación. La única limitación para la temperatura de combustión la constituyen los materiales de la cámara de combustión. Suele ser de unos 1000 °C, pero puede variar entre 500/600 °C y 1400 °C. La presencia de agua influye en la combustión, modificando los equilibrios y consumiendo calor.

El potencial energético de la biomasa, como el de cualquier otro combustible, se mide en función del poder calorífico del recurso, o bien, en función del poder calorífico del producto energético resultante de su tratamiento.

A modo de ejemplo, en la tabla 5.11 se recoge el poder calorífico inferior, para distintos contenidos de humedad, de algunos de los recursos de biomasa más habituales.

Hablando en términos medios, el poder calorífico inferior (PCI) de la biomasa permite obtener aproximadamente 15,000 kJ/kg (equivalente a poco más de 3,500 kcal/kg y a 4 kWh/kg), el PCI del gasóleo es de 42,000 kJ/kg y el de la gasolina es de aproximadamente 44,000 kJ/kg. Es decir, por cada tres kilogramos que no se aprovechan de biomasa, se desperdicia el equivalente a un kilogramo de gasolina.

En la actualidad esto ocurre muy a menudo, la biomasa se elimina sin aprovechamiento por las molestias que produce y los obstáculos que ocasiona en las labores en las que se genera.

En la tabla 5.10 se puede ver diferentes poderes caloríficos para diferentes rastrojos, donde se aprecia el poder calorífico de los rastrojos que se pretenden utilizar

Poder Calorífico Inferior (PCI) de los residuos de distintos cultivos (Kcal/Kg).	
Cultivos	PCI (Kcal/Kg)
Sorgo	3,630
Maíz	3,597
Cacaomaní	3,480
Cebada	3,714
Avena	3,733
Trigo	3,702
Girasol	3,382
Arroz	3,630
Algodón	3,630
Remolacha	3,630
Tomate	3,630
Para los residuos de trigo, maíz, cebada, avena y girasol, se ha considerado una humedad del 12%; para el resto de residuos el grado de humedad considerada ha sido del 10%.	

Tabla 5.11. Fuente: CIEMAT (trigo, maíz, cebada, avena y girasol), Fernandez,J. (sorgo, arroz, algodón, remolacha y tomate).

En la tabla 5.12, se puede ver como el contenido de humedad presente en la biomasa provoca que el poder calorífico se reduzca.

biomasa	seca	10% de humedad	15% de humedad
Paja de cereales	4000	3600	3300
Sarmientos de vid	4000	3300	2300
Ramas coníferas	4600	3600	2500
Ramas frondosas	4200	3300	2300
Cortezas coníferas	4700	3600	2600
Cascara de almendra	4400	3900	3700
Cascara de cacaomaní	3900	3500	3300
Serrín/virutas, coníferas	4900	4500	3800
Serrín/viruta, frondosas	4700	4300	3600

Tabla 5.12. Poder calorífico inferior (kcal/kg) de distintos tipos de biomasa Forestal. / Fuente: IDAE.

CAPÍTULO 6

COMBINACIONES DE RASTROJOS.

Parte experimental.

Para el presente estudio se seleccionaron los rastrojos provenientes de la Finca El Carmen-Tisma, donde se cultivan cada año grandes cantidades de maíz, sorgo y cacaomaní, por lo tanto, después de cada cosecha queda una cantidad considerable de residuos agrícolas en el campo que hasta el momento no tiene ninguna aplicación beneficiosa.

Las muestras usadas en el presente estudio fueron picadas y secadas al aire libre, dejadas en el campo durante 90 días, logrando reducir su humedad del 60% al 10%.

Las muestras fueron analizadas por el laboratorio de bromatología de la UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA-UNA, EN LA FACULTAD DE CIENCIA ANIMAL-FACA.

Preparación de las muestras.

Después que los rastrojos fueron secados de forma natural, se sometió a reducción de tamaño en un molino de cuchillas Cyclotec 1093, para luego ser sometidas a los diferentes ensayos que determinarán cuales de las combinaciones presenta mayor poder calorífico.

Resultados análisis bromatológicos

ID lab.	%MS	%Cza	%PC	%FND	%FÁD	%EE	%FC	EB (kcal/kg)	ELN
56190320	94.31	7.08	6.23	67.69	63.02	2.64	62.67	4628.00	21.68
57190320	94.90	7.79	4.32	73.55	68.35	0.38	66.20	4482.45	21.31
58190320	94.52	8.05	6.36	68.23	61.23	0.58	62.15	4473.92	22.86

Tabla 6.1. Resultados de laboratorio. Fuente propia

Simbología:

MS: Materia Seca, Cza: cenizas, PC: Proteína Cruda, FND: Fibra Neutro Detergente, FÁD: Fibra Ácido Detergente, EE: Extracto Etéreo, EB: energía bruta, ELN: extracto libre de Nitrógeno.

Observaciones:

56190320: 20% rastrojo maíz + 20% rastrojo maní

57190320: 10% rastrojo maíz +20% rastrojo sorgo

58190320: 10% rastrojo maíz + 15% rastrojo sorgo + 15% rastrojo maní

Según los resultados obtenidos, quien presenta mayor poder calorífico es la combinación del rastrojo de maíz con el rastrojo de cacaomaní, así como también un bajo contenido en cenizas en comparación con las demás combinaciones.

Evaluación de parámetros que presentan los rastrojos y que hacen factible la combustión.

El siguiente análisis está basado en la comparación de los rastrojos agrícolas con el carbón que son comúnmente utilizados en las plantas térmicas convencionales.

Estos han sido objeto de estudio durante muchos años, por lo tanto, se tiene un amplio conocimiento en el empleo de este combustible fósil en la generación de energía eléctrica, los cuales presentan muy buenos parámetros durante el

proceso de combustión, así como también liberan gases causantes del calentamiento global, lluvias acidas y desechos tóxicos, por lo tanto, se busca la implementación de nuevas fuentes de energía que sean amigable con el medioambiente.

Efectos de las propiedades más importantes a analizar en el rastrojo de maíz, sorgo y cacaomaní, tanto sobre los diferentes sistemas o equipos de la central (haciendo especial énfasis en los relativos a control ambiental), como en las distintas variables de coste operativos comentadas con anterioridad (capacidad de producción, consumo específico, mantenimiento y disponibilidad).

Parámetros que deben cumplir los rastrojos.

En concreto, se detallan las influencias más notables, en función de los hechos investigados en apartados anteriores, de los siguientes parámetros de los rastrojos:

1. Contenido en cenizas y composición de ésta.
2. Poder calorífico.
3. Contenido en azufre.
4. Contenido de humedad.
5. Contenido en materias volátiles.
6. Temperatura de fusión de cenizas.
7. Contenido en sodio.
8. Contenido en cloro.

Estos parámetros o propiedades son, en general, los de mayor utilización en la operación habitual de una central térmica, bien de forma directa, bien a través de correlaciones en las que estos parámetros intervienen.

Comparación de la biomasa y el carbón.

Para poder determinar la viabilidad técnica de los rastrojos, se comparan los parámetros más importantes del carbón con los del rastrojo, los cuales fueron proporcionados mediante el análisis elemental y el análisis inmediato, ya que no todos favorecen el proceso de la combustión.

Por la similitud de sus características físicas, químicas y energéticas, con frecuencia se comparan el carbón y la biomasa. En particular, la equiparación se realiza cuando se quiere utilizar un combustible determinado en unos equipos diseñados para otro o a la hora de estudiar una posible co-combustión de ambos recursos en un mismo equipo.

La clasificación de los carbones se realiza en función de su poder calorífico, así se puede dividir en varios rangos. Ordenando de menor a mayor poder calorífico, la clasificación sería: turba, lignito, sub-bituminoso, bituminoso (hulla) y antracita. Los tres primeros se consideran de carbones de bajo rango y los dos últimos son denominados como carbones de alto rango.

Características medias de los combustibles de la serie ligno-hullera.

Tipo	Análisis elemental			Relación entre átomos		Poder calorífico Kcal/Kg		Volátiles %
	C%	H%	O%	Y=H/C	X=O/C	Superior	Inferior	
Madera	50	6.1	43.9	1.46	0.66	4750	4450	80
Turba	59.3	5.7	35	1.15	0.44	5700	5400	67
Lignito	70	5.5	24.5	0.94	0.26	6750	6450	54
Hulla:								
Grasas	88.2	5.3	6.5	0.72	0.06	8600	8400	30
Semigrasas	92.4	4.4	3.2	0.57	0.03	8700	8500	17
Secas	93.5	3.8	2.7	0.48	0.02	8650	8450	9
Antracitas	95.5	2.5	2	0.31	0.02	8400	8300	3

Tabla 6.2.

Fuente: http://idea.electura.es/publicacion/221eneg%EF%BF%Bda_biomasa

Densidad y humedad de los distintos tipos de carbón

Combustible	Densidad media (Kg/m³)	Humedad
Turbas	360	20-30%
Lignitos	1050	15-25%
Hullas	1350	5%
Antracitas	875	3%

Tabla 6.3. Esta humedad, según normas A.S.T.M., se mide a 30°C en presencia de aire y un 97% de humedad relativa.

En la tabla 6.4 se muestra el contenido de elementos que presentan los carbones, donde los porcentajes de estos elementos van a variar de acuerdo a la variedad de carbón que se evalué

Contenido de humedad	1-60%
Carbono	65-95% peso
Hidrogeno	3-6% peso
Oxigeno	2-30% peso
Azufre	0.2-11% peso
Nitrógeno	1-15% peso

Tabla 6.4. Fuente: http://idea.electura.es/publicacion/221eneg%EF%BF%Bda_bio masa

En la siguiente tabla se muestran los principales análisis del bagazo de caña. En la actualidad este tipo de biomasa es utilizada por los ingenios para generar energía eléctrica, aprovechando de esta manera los residuos que ellos mismo generan

Propiedades físicas-químicas del bagazo de caña	
Humedad (%)	4
Volátil (%)	68-70
Cenizas (%)	1.26
Carbono fijo (%)	28.7-30.7
C (%)	48-58
H (%)	5.97
O (%)	38.94
N (%)	0.2

Tabla 6.5. Elaboración propia. Fuente: Guía sobre el aprovechamiento industrial de la biomasa.

Comparación del análisis elemental del carbón con el análisis elemental de los rastrojos.

Los rastrojos tienen contenidos de carbono considerablemente más bajos que en el caso del carbón. Para el carbón la ratio atómica entre hidrógeno y carbono es típicamente 1 mientras que para las biomásas suele rondar 1,5 (ver tabla 6.2).

En cambio, el contenido en oxígeno es considerablemente más elevado en los rastrojos. Como resultado de todo ello, el poder calorífico de los rastrojos es apreciablemente menor que el de los carbones (ver figura 6.1). Ciertos tipos de biomasa forestal pueden llegar a tener valores similares de poder calorífico a los carbones de bajo rango.

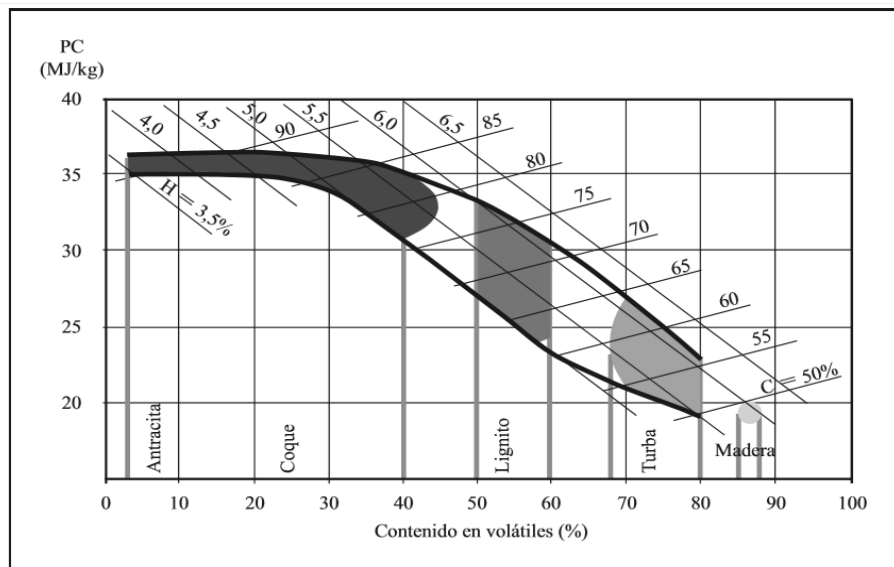


FIGURA 6.1. Comparación entre diferentes carbones y madera del contenido de carbono e hidrógeno, del poder calorífico y del contenido en volátiles (adaptado de Alakangas, 2005).

El porcentaje de azufre en los rastrojos es sustancialmente más bajo que en el caso del carbón y en consecuencia las emisiones de óxidos de azufre y ácido sulfúrico son menores.

Comparación del análisis inmediato del carbón con el análisis inmediato de los rastrojos.

Contenido en volátiles.

El contenido en volátiles de los rastrojos oscila entre el 60-80% mientras que en el carbón es 10-50% en peso y base seca. La relación entre los volátiles y el carbono fijo es más alta para la biomasa (3-4 veces o incluso mayor) que para el carbón (inferior a la unidad), por lo que los rastrojos son más reactivos que el carbón y su volatilización ocurre a menor temperatura (200-450°C para los rastrojos y 350-600°C para el carbón), por lo tanto, los rastrojos son generalmente más reactivos que los combustibles fósiles como el lignito y la antracita.

El contenido de volátiles en el rastrojo de maíz es de 69.74%, en el del sorgo es de 72.8, difieren en un mínimo entre los diferentes rastrojos, pero comparado con el carbón que oscila entre el 10-50%, lo que significa que favorece la combustión.

Carbono fijo.

El contenido de carbono fijo presente en el rastrojo de maíz es de 15.36%, rastrojo de sorgo es de 21%, es decir tienen mayor porcentaje y en relación con el bagazo de caña, que es de 14.95, lo cual significa que produce menores emisiones de CO₂ por toneladas.

Humedad.

Los contenidos de humedad de los rastrojos son en general superiores a los del carbón, por lo que, a diferencia de este último, en muchas ocasiones los rastrojos precisan de un proceso de secado previo a su transformación termoquímica.

El contenido de humedad después de la cosecha de los diferentes rastrojos es de 60%, lo cual indica que se trata de biomásas húmedas, es necesario reducir humedad, la misma que puede oscilar entre el 50% del contenido de humedad para ser utilizado como combustible sólido en calderas, tal como es el caso del bagazo de caña. En este caso se utilizará el secado natural.

Finalmente, conviene subrayar que, en términos generales, el contenido en humedad de los rastrojos a quemar no debe superar el 60%, ya que, en caso contrario, el aporte de energía de la unidad de combustible será menor que la necesaria para evaporar toda el agua contenida en ella.

Contenido de cenizas.

El contenido de cenizas es menor en los rastrojos que en el carbón. Por otro lado, su composición es diferente y suele ser más problemática, al tener las cenizas de los rastrojos mayor contenido en metales alcalinos que las cenizas del carbón.

El contenido de ceniza presente en el rastrojo de maíz es de 6.9%, la del sorgo es de 6.2%, estos valores son bajos en referencia al que proporciona el carbón que es de 11.27%, lo cual significa que el uso de los rastrojos como combustible disminuye los depósitos en tuberías de las calderas e intercambiadores, facilitando el proceso de transmisión de calor.

Un inconveniente importante que presentan las cenizas de estos rastrojos, es su alto contenido en álcalis, principalmente potasio y una baja relación Ca/K, esta circunstancia se asocia a la formación durante la combustión de compuestos eutécticos de bajo punto de fusión, que se volatizan y terminan formando aglomerados en el hogar de los combustores o depósitos en las partes más frías de los intercambiadores, causando problemas de funcionamiento, tales como una disminución considerable de la eficiencia de los intercambiadores.

De forma general, el contenido de elementos principales del carbono está comprendido entre un rango que va a depender del tipo de carbón (alto o bajo rango). En la tabla 6.4 se puede observar los porcentajes de elementos que puede contener el carbón.

Desde un punto de vista de aprovechamiento energético, los análisis demuestran que los rastrojos poseen un bajo contenido en carbono y elevado contenido en oxígeno y en compuestos volátiles, estos últimos son los que concentran una gran parte del poder calorífico de estos residuos agrícolas.

Si bien, el poder calorífico depende mucho del tipo de rastrojo considerado y de su humedad, esta característica y el bajo contenido en azufre los convierten en un producto singularmente atractivo para ser aprovechado energéticamente.

Adecuación de los rastrojos antes de ser introducido a la caldera.

Densidad energética (kJ/m^3): el poder calorífico de los rastrojos es menor que el de los carbones que se utilizan habitualmente en las plantas de producción eléctrica. Este hecho, unido a que la densidad de los rastrojos también es inferior, supone que, para la misma cantidad de energía, sea necesario más combustible y además que este ocupe mucho más volumen.

Esto impide que en muchos casos se puedan utilizar los sistemas de alimentación del carbón para la biomasa y sea necesario utilizar quemadores específicos para el nuevo combustible. En el caso de carbones de bajo rango, baja densidad energética, esta propiedad es muy similar a la mayoría de la biomasa que se usa en co-combustión, lo que facilita la adaptación de la planta a esta tecnología.

La forma y tamaño de las plantas de maíz, sorgo y cacaomaní suponen un tratamiento previo para ser utilizado como combustible, lo opuesto involucra grandes volúmenes que pueden afectar el costo del transporte.

En primer lugar, los rastrojos presentan una densidad inicial inferior, por lo general, entre 3 y 6 veces la del carbón y un poder calorífico unas 2 veces inferior, lo que determina que su densidad energética sea de 6 y hasta unas 15 veces inferior a la del carbón.

Política del gobierno central para la transformación de la matriz energética renovable.

El gobierno como parte de sus funciones inherente de garantizarle a todos sus gobernados los recursos básicos y necesarios se encuentran en la posición de ser quienes incentiven las nuevas inversiones de la energía con una tendencia a ser más sostenible, tomando en consideración que las crisis energéticas que el país ha tenido se han dado a la alta concentración de energía producida a base de bunker, de ahí, de esa crisis aguda de 2006.

Se puede considerar que las políticas encaminadas a este tipo de inversión han sentado las bases legales y fiscales que motiven al inversionista a emplear nuevas tecnologías.

Ley 532.

Por ello, resulta necesario resaltar la creación de la ley 532 en 2005 y sus reformas posteriores para entender como desde el gobierno central se trata de impulsar la creación de energías renovables buscando disminuir costos, contaminación ambiental y precio del consumidor final, además para mantener una producción estable que no resulte en una crisis energética futura, resulta justo transformar la matriz con este tipo de energías.

En el largo plazo el gobierno central, y además como prioridad nacional, antepone su enfoque en obtener energía que reduzca la contaminación ambiental, un sistema interconectado que permita fluido constante y servicio de calidad a la población.

La seguridad jurídica y beneficios fiscales otorgados a estos proyectos son toda una innovación en materia de inversión al sector energético.

Ley 532, Ley para la promoción de generación eléctrica con fuentes renovables.

La ley 532 tiene como objetivo promover el desarrollo de nuevos proyectos de generación eléctrica con fuentes renovables y de proyectos que realicen ampliaciones a la capacidad instalada de generación con fuentes renovables y que se encuentren actualmente en operación.

Así mismo como de los proyectos de generación de energía eléctrica que ocupen como fuente la biomasa y/o biogás producidos en forma sostenible, estableciendo incentivos fiscales, económicos y financieros que contribuyan a dicho desarrollo, dentro de un marco de aprovechamiento sostenible de los recursos energéticos renovables.

Así mismo la ley establece cuales son consideradas dentro de todos los recursos naturales fuentes renovables y es en base a ellas que se debe trabajar. Eólica, Hídrica, geotérmica, solar y biomasa haciendo un especial énfasis en esta última,

considerando cuales deben ser este tipo materia prima y como se debe producir, así como las instituciones encargadas de dar la autorización de su uso.

Esta ley considerada de interés nacional y que debe ser prioridad para todas las instituciones involucradas trae en su esencia beneficios de tipo fiscal para su aprovechamiento, siendo los más importantes los siguientes:

- Exoneración del pago de los derechos arancelarios de importación (DAI)
- Exoneración del pago del impuesto al valor agregado (IVA)
- Exoneración del pago del impuesto sobre la renta y del pago mínimo definido del IR en la ley n°453 durante 7 años a partir de la entrada en operaciones comercial o mercantil del proyecto, así mismo durante el mismo periodo estarán exentos los ingresos derivados por venta de bonos de dióxido de carbono
- Exoneración de los impuestos municipales vigentes sobre bienes inmuebles, ventas, matriculas, durante la construcción del proyecto. Por un periodo de 10 años a partir de la entrada en operaciones del proyecto aplicando de la siguiente manera: 75% durante los tres primeros años, 50% durante los siguientes 5 años y 25% durante los últimos dos años.
- Exoneración de todo tipo de impuestos que pudieran existir por explotación de riquezas naturales por un periodo máximo de 5 años después del inicio de operaciones
- Exoneración de timbres fiscales durante 10 años

La contratación de energías proveniente de fuentes renovables debe ser prioridad para las empresas distribuidoras.

Lo anterior, muestra lo más importante que la ley establece sobre los beneficios del negocio de energías limpias, cabe considerar que una debilidad es que para la formalización de una empresa jurídica que este tipo de proyectos requiere sigue cumpliendo los requisitos normales y burocráticos que el sistema mercantil establece, lo cual podría ser superado si se considera darle prioridad al proceso de registro de las empresas que deseen invertir en estos proyectos.

Incluso la ley no considera a aquellos que realicen inversiones en sus negocios y que instalan fuentes renovables aisladas para uso comercial como paneles solares en panaderías o tubos fotovoltaicos en hoteles para calentamiento de agua.

Viabilidad económica del uso de los rastrojos como combustible.

Calculo de la biomasa necesaria.

Para determinar la viabilidad económica de la central, es necesario determinar si se va a poder abastecer a la central con la biomasa con que se dispone. Para ello se determina la cantidad de biomasa que es necesaria para alimentar la central y la cantidad de rastrojo que se produce anualmente en las hectáreas estimadas.

Se tomará en consideración que solo el 7.45% de las hectáreas disponibles para la agricultura están siendo cultivadas, por lo tanto, la planta será dimensionada en función de la cantidad de rastrojo que se está produciendo en la actualidad. Donde se estima que se dispone de 15,000 toneladas de rastrojo en total, con una humedad promedio del 30%.

Cálculo del consumo de biomasa agrícola residual demandado por la planta de combustión.

Para ubicar la planta de generación eléctrica se debe establecer, en primer lugar, la cantidad de biomasa que debe suministrarse anualmente. Este consumo de materia prima incluye la biomasa operativa que utiliza la planta de forma mensual.

Poder calorífico del combustible.

Se escogió la combinación de rastrojo que mayor poder calorífico aporta, en este caso corresponde al 20% de rastrojo de maíz + 20% de rastrojo de cacaomaní, el cual es de 4,628 Kcal/Kg.

Componentes principales de la central de generación de energía eléctrica.

Tomando en cuenta la cantidad de rastrojo disponible y su poder calorífico, se prosigue a seleccionar una caldera que su consumo de rastrojo esté por debajo de las 15,000 toneladas, asegurando de esta manera su funcionamiento durante el tiempo proyectado (7200h).

Por lo tanto, la caldera que mejores condiciones presta, como es su caudal másico y su forma de generar calor mediante combustión directa, además que el combustible con que se alimenta son pacas de rastrojos con una humedad máxima de 15 a 21%. Teniendo en consideración las características anteriores, se ha optado por elegir la siguiente caldera

Modelo	CJTO.CAMARA DE COMBUSTIÓN PAJA
Familia	Cámara de combustión de combustibles sólidos vegetales.
Características de funcionamiento	Características constructivas
Potencia calorífica <60 000 000 Kcal/h Cámara de combustión Temperatura (Max): 900°C Combustible Paja de cereal: cebada, trigo, triticales, etc. Otras pajas mezcladas o picadas: colza, maíz, etc. Paja entera sin triturar ni moler solo disgregarla. Humedad 10-14% Humedad del 15-21% sería el máximo aconsejable sin problemas de funcionamiento, para humedades superiores tendría de ser con precaución y menos kg/hora en el de transporte de paja. Humedades superiores al 30% podrían traer roturas de cadenas y atascos. Poder Calorífico Inferior >3500 Kcal/Kg. Funcionamiento Generación de calor mediante combustión directa de combustible. El combustible es depositado en el alimentador de combustible y alimentado posteriormente en el hogar de combustión.	Alimentador-Disgregador de combustible Alimentador con avance por empuje mecánico. En función de la potencia, existen diferentes tamaños de alimentador. Disgregador de rodillos accionados por cadenas a baja velocidad entre 4-25rpm. Consumo eléctrico del disgregación y caldera muy bajo, según modelos y potencias estaría entre 1-1.8kw por cada 100kg de paja (350.000 Kcal. aproximadamente). Paja entera sin triturar ni moler solo disgregarla. Aconsejable la empacada paja seca

Tabla 6.6. Fuente: StandarKessel, range of products and services

Conociendo el poder calorífico del combustible y el caudal másico de la caldera, se calculará que cantidad de energía térmica que se podrá generar y la cantidad de rastrojo que se consumirá durante las 7200h que se tiene estimado que funciones la central.

El consumo máximo de biomasa en la caldera es de 1,859 kg/h. Si se considera que la planta trabaja de forma intensiva a lo largo del año se obtiene un total de 7,200 horas de funcionamiento. Por lo tanto, según la ecuación #2 se requieren 13 388.8 toneladas de biomasa con humedad inferior al 15% para alimentar la caldera durante un año.

ecuación #2.

$$biomasa\ en\ un\ año = \frac{1,859 \frac{Kg}{h} * 7,200\ h}{1,000Kg} = 13,338.8\ Toneladas$$

Por lo tanto, la central consumirá 13 339 toneladas de rastrojos al año.

Potencia térmica de la caldera.

Es el resultado de multiplicar el caudal másico de rastrojo que entra en la caldera por su poder calorífico. El resultado se muestra en KW.

Ecuación #3

$$PCI \left(\frac{Kcal}{Kg} \right) = 4,628 \frac{Kg}{h} * 4.1855 \left(\frac{KJ}{Kg} \right) = 19,370.5 \frac{KJ}{Kg}$$
$$Q^{\circ}comb = \frac{1,859 \frac{Kg}{h} * 19,370.5 \frac{KJ}{Kg}}{3,600\ S} = 10,000KW$$

La caldera funcionara a una potencia de 10Mw térmicos

Coste de la biomasa.

Para el cálculo del coste de la biomasa, se va tener en cuenta el coste de recogida y de transporte a la central, según los precios medios de recolección. Puesto que en este caso la recogida del combustible la realizarán los agricultores.

La siguiente información fue proporcionada por el agricultor y productor don Mario Gonzales.

Confección de megafardos.

Estos megafardos pesan entre 250 y 800 kg, siendo los más frecuentes de 400 kg. Las dimensiones de los megafardos más comunes son de 2,2 x 0,9 x 0,8 m. El costo aproximado de confección, dependiendo del rinde y condiciones del rastrojo, es de 25 a 30 US\$ por megafardo confeccionado en el establecimiento originador.

Por su forma, son más fáciles de transportar y almacenar. Una de las ventajas más importantes del megafardo, tiene que ver con la logística por la consolidación de las cargas. En equipos convencionales de 14m. se cargan entre 50 y 55 megafardos/ camión.

Otras ventajas son la mayor densidad alcanzada, las menores perdidas, la practicidad y operatividad en la logística del traslado y acopio, como también la mejora en el desarme de los mismos para el suministro.

A manera de referencia puede considerarse un valor de 30 US\$ por megafardo puesto en origen. El proceso consiste en:

- corte: 20US\$ / ha
- rastrillado y confección: Entre 5 US\$ / paca
- juntarlo en el establecimiento entre 3US\$ / paca
- carga/descarga a camión oscila entre 2 US\$ / paca por operación.

Durante la práctica de recolección de los rastrojos de cosecha de maíz, cacaomaní y sorgo especialmente, queda normalmente un remanente en el

campo de entre un 20 y un 45% estimativamente. Durante el transporte las pérdidas se estiman en menos de un 5%.

Considerando que los agricultores establezcan un precio de 30 dólares por las pacas de 400Kg a pie de planta con una humedad del 20%, teniendo en cuenta que la central consume 33,462 pacas de 400Kg al año, por lo tanto, la planta tendría un gasto de 1 003,860 US\$/año en compra de pacas de rastrojo.

Ecuación #4

$$\text{costo del combustible} = 33,462 \text{ pacas} * 30\text{US\$} = 1,003,860\text{US\$}$$

Proceso de dimensionado del ciclo termodinámico.

Turbina.

Para seleccionar la turbina se tuvo en cuenta la potencia de la caldera, la temperatura máxima de funcionamiento y su eficiencia.

El rendimiento del ciclo termodinámico viene dado en gran parte por la elección de una buena turbina. Dependiendo de los materiales y de su construcción podrá soportar unas u otras condiciones de trabajo.

Para el caso de la turbina se ha escogido el modelo SST-060 de Siemens, cuyas características técnicas son las siguientes:

Datos técnicos	
Potencia	Hasta 6 MW
Temperatura del vapor vivo	Vapor saturado seco hasta 530°C
Presión de vapor vivo	Hasta 131 bar
Presión del vapor de salida	Contrapresión 29 bar
Velocidad	Según la maquina accionada

Tabla 6.7. Fuente: Catálogo turbina de vapor prediseñadas Siemens

Para el dimensionado se ha escogido la turbina SST-060, de hasta 6 MW de potencia, del catálogo de Siemens Turbinas de Vapor Prediseñadas.

Los parámetros de vapor máximos para esta turbina son 131 bar y 530 °C.

Parámetros de trabajo de la central.

De acuerdo a la elección de los principales componentes, los parámetros de trabajo del ciclo termodinámico de la central son los siguientes:

- Presión Caldera: 50 bar
- Eficiencia Térmica Caldera: 95%
- Eficiencia Turbina: 85%
- Temperatura Ambiente: 20°C
- Temperatura Hogar Caldera: 900°C
- Poder calorífico combustible: 19 370.5 KJ/kg
- Caudal Másico Combustible: Caldera 1 859 Kg/h

Potencia eléctrica bruta final y rendimiento.

La potencia térmica que se le suministrará a través del combustible a la central será de 10MWt. La central tiene un rendimiento de 31.85%, por lo tanto, tendrá una potencia eléctrica generada de 3.185MWe.

Ecuación #5

$$potencia\ electrica = 10MWt * 31.85\% = 3.185MWe$$

Potencia eléctrica final neta.

La potencia eléctrica final bruta que generará la central será de 3,185 MW. Ahora bien, toda esa potencia eléctrica no podrá ser vertida a la red ya que parte de la energía producida por la central deberá servir para abastecer las instalaciones y máquinas de la propia central.

Las centrales de generación eléctrica con esta capacidad, tienen un promedio de consumo de energía eléctrica del 5% de su generación, por lo tanto, la potencia que estará disponible para ser comercializada es:

Ecuación #6

$$3185KW - (3185KW * 0.05) = 3.02575MW$$

Coste de la central.

Puesto que se trata de un tipo de proyecto poco común y para el cual se deberían fabricar la mayoría de componentes según las necesidades de la central y del mismo entorno, resulta imposible obtener un coste totalmente fiable.

Según la página web <http://www.energia.renovetec.com>, el coste de construcción de una central térmica de biomasa en Europa ronda los 2,5 millones de euros por MW de potencia instalada.

Este coste por MW de potencia instalada incluye:

- ✓ Ingeniería del proyecto
- ✓ Permisos y licencias de construcción
- ✓ El suministro de todos los equipos
- ✓ El montaje y puesta en marcha

No incluye:

- ✓ El coste de la línea eléctrica desde la planta hasta la subestación de interconexión con la red eléctrica
- ✓ Los costes relacionados con la toma de agua de refrigeración y servicios
- ✓ Los costes del terreno en que se asienta la central
- ✓ Otros costes u obras no indicados.

El precio de construcción de la central sería de:

Ecuación #7

$$2,500,000\text{€} * 3.185\text{MW} = 7,962,500 \text{ euros}$$

Lo equivalente a 9,395,750 dólares

Coste operativo de la central.

En este apartado se tendrán en cuenta el coste del combustible, el coste operativo y de mantenimiento de la central.

combustible	Precio	Cantidad	Peso	Coste anual
Rastrojos	30 US\$	33,347 pacas	400Kg	1,000,410 US\$

Tabla 6.8. Coste total anual del combustible de la central. Fuente: Propia

Suponiendo un coste operativo y de mantenimiento de la central de 11 US\$/MWh:

Ecuación #8

$$11 \frac{\text{US\$}}{\text{MWh}} * 7,200 \text{ h} * 3.185\text{MW} = 252,252 \text{ US\$}$$

El coste operativo y de mantenimiento anual de la central será de 252,252 dólares.

Estudio económico.

Una vez calculados los costes, se procede a calcular los ingresos anuales. Según el Ministerio de Energía y Mina, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica, la retribución para centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de residuos de aprovechamientos forestales y otras operaciones silvícolas en las masas forestales y espacios verdes, es de 120 US\$/MWh. Si se multiplica por el número de horas de funcionamiento y por los Megawatios de potencia generados se obtendrá:

Ecuación #9

$$120 \frac{US\$}{MWh} * 7200h * 3.02575 MW = 2,614,248 US\$ \text{ anual}$$

Por lo tanto, la central tendrá un ingreso anual de 2,614,248 dólares.

Obras eléctricas.

Construcción de una subestación eléctrica de 5MW.

Construcción de una línea de transmisión en 138KV.

El proyecto consiste en el suministro de estructuras y materiales, herrajes y accesorios, obras civiles y montaje electromecánico, prueba y puesta en servicio, para la construcción de:

- La subestación eléctrica.
- 2.5KM de línea de transmisión en 138KV

La subestación tiene un costo de 2,261,893.333US\$, según el presupuesto aprobado por ENATRE para el año 2016 para obras mayores a los 500,000US\$.

La línea de transmisión de 138KV tendrá un costo de 625,000US\$.

En esta figura está señalizado la ubicación de la central eléctrica y la distancia de la línea de transmisión de 138KV a la subestación más cercana.

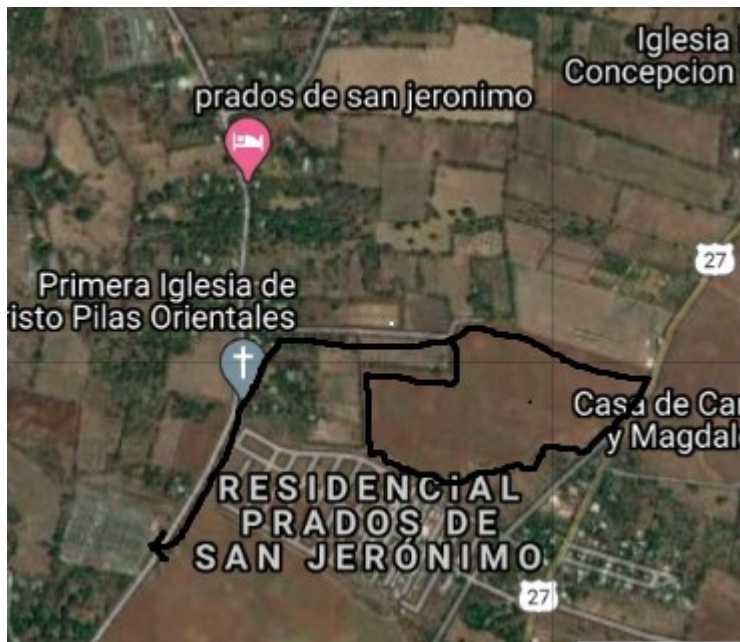


Figura 6.1. fuente: elaboración propia

Beneficio anual.

Beneficio anual = ingreso anual – coste combustible – coste operación y mantenimiento.

$$beneficio\ anual = 2,614,248 - 1,000,410 - 252,252 = 1,361,586\ US\$$$

Cálculo del Valor Actual Neto (VAN).

Para el cálculo del VAN se ha tomado un flujo de caja constante durante los primeros 10 años, por lo tanto, se utilizará la siguiente ecuación:

Ecuación #10

$$VAN = -I_0 + V_t \frac{1 - (1 + K)^{-N}}{K}$$

- I_0 – valor del desembolso inicial de la inversión
- V_t – flujo de caja en cada periodo
- N – número de periodos considerados
- K – tipo de interés

La tasa de interés que aplica a los préstamos el Banco Europeo de Inversiones (BEI) es variable basándose en la Tasa Libor que existe en el momento del desembolso. Para evaluar la planta de generación eléctrica se tomará una tasa del 3.3994% que corresponde a una tasa promedio.

Años	Dólares
Calculo anual del VAN	1 -8,078,928.046
	2 -6,805,398.456
	3 -5,573,573.934
	4 -4,382,569.976
	5 -3,230,563.331
	6 -2,115,553.74
	7 -1,039,784.728
	8 37,317.30114
	9 1,010,973.154
	10 1,985,659.519

Tabla 6.9. Valor del VAN con un interés del 3.33994%. Fuente: Propia

A como se puede observar en la tabla superior, la inversión queda amortizada el onceavo año. Después de once años la instalación empezaría a generar beneficios.

CONCLUSIONES

En base a los resultados se concluye:

Se logró realizar un estudio de aprovechamiento energético donde pone en evidencia que el municipio de Tisma cuenta con un potencial energético alto al utilizar los rastrojos de maíz, trigo sorgo y cacaomaní como posibles combustibles para la generación de energía eléctrica.

Al combinar los diferentes rastrojos, se obtuvo mejor poder calorífico y, por ende, mayor rendimiento en la planta de generación eléctrica.

Por lo tanto, el uso combinado de rastrojo como combustible, es aplicable. En primer lugar, presentan buen poder calorífico, los niveles de contaminación se podrían decir que son nulos en comparación con los combustibles fósiles y existe en el mercado reactores que utilizan pacas de rastrojo como combustible, lo que significa que no se tendría que invertir en la fabricación de equipos nuevos específicamente para la central que se pretende construir.

Económicamente es viables, ya el VAN arroja cifras positivas después del onceavo año, lo que indica que a partir allí la central comenzara a generar beneficios.

RECOMENDACIONES.

Se recomienda que para futuras investigaciones, hagan un estudio sobre la sustitución de los fertilizantes minerales por compost u otros productos orgánicos que den lugar a una disminución de la cantidad de metales alcalinos en aquellas partes de la planta que se van a combustionar y que, por tanto, su utilización ayude a combatir los problemas antes mencionados que hacen que hoy por hoy la biomasa no sea todo lo competitiva que cabría esperar en comparación con los combustibles fósiles tradicionales.

ANEXOS.



Rastrojo de sorgo listo para fabricar pacas.



Proceso de fabricación de pacas de sorgo con una rotoenfardadora JHON DEERE.

Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrícolas (maíz, trigo sorgo y cacao maní) en el municipio de Tisma



Molino de cuchilla para laboratorio CICLOTEK.



Preparación de muestra de rastrojo de maíz para su posterior análisis.

Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrícolas (maíz, trigo sorgo y cacao maní) en el municipio de Tisma



Horno de secado BINDER.



Determinar el contenido de cenizas de cada rastrojo.



Residuo de ceniza.

BIBLIOGRAFIAS.

- [1]. Mansell, S. (2019). Ministerio de Energía y Mina. Gobierno de reconciliación y unidad nacional. Recuperado de http://www.cndc.org.ni/graficos/graficaGeneracion_Tipo_TReal.php.
- [2]. CEPAL. (2015). Informe Nacional de Monitoreo de la Eficiencia Energética de Nicaragua.
- [3]. Climascopio. (2013). América Latina y el Caribe atraen un creciente porcentaje de la inversión Global en Energía Limpia. Obtenido de <http://www.iadb.org/es/noticias/comunicados-de-prensa/2013-1016/climascopio-2013,10607.html>.
- [4]. ENEL. (2017). Proyectos Geotérmicos. Obtenido de <http://www.enel.gob.ni>.
- [5]. FUNIDES. (2016). El sector de la energía eléctrica de Nicaragua.
- [6]. González, J. A. (2009). Centrales de Energías Renovables. Madriz: Pearson Educación, S.A.
- [7]. GRUN. (2012). Plan Nacional de Desarrollo Humano 2012-2016. Obtenido de <http://www.pndh.gob.ni/documentos/pndhActualizado/pndh.pdf>.
- [8]. IRENA. (2015). Evaluacion del Estado de Preparacion de las Energias Renovables Nicaragua. Obtenido de http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RRA_Nicaragua_ES_2015_SP.pdf.
- [9]. IRENA. (2016). Análisis del mercado de energía renovable - América Latina. Obtenido de http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Market_Analysis_Latin_America_summary_ES_2016.pdf.
- [10]. IRENA. (2017). Estadísticas de Capacidad Renovable. Obtenido de http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2017.pdf.
- [11]. MEM. (2016). Evaluación de la Gestión Institucional. Obtenido de <http://www.mem.gob.ni>.
- [12]. MEM. (2017). Plan de Expansión de la Generación Eléctrica 2016-2030. Obtenido de <http://www.mem.gob.ni/wp-content/uploads/2017/03/Plan-de-Expansion2016-2030.pdf>.

- [13]. Mundial, B. (2012). Mitigación de la vulnerabilidad a los precios del petróleo altos y volátiles: Experiencia del sector eléctrico en América Latina y el Caribe. Obtenido de <http://www.bancomundial.org/>.
- [14]. Rodríguez, J. C. (2008). Energía Renovables y Eficiencia Energética. Isla Canarias: Instituto Tecnológico de Canarias.
- [15]. Solá Montserrat, R. (2008). Estructura económica de Nicaragua y su contexto Centroamericano y mundial. Managua: Hispamer.
- [16]. Alconchel Ungría José Andrés, (1988). Tesis doctoral "Modelización exergética de ciclos de vapor en plantas termoeléctricas". Presentada en la ETSII Zaragoza
- [17]. Bronte, J. (noviembre-diciembre 1994) Gestión de Vida de Centrales Térmicas. Energía.
- [18]. Cortés, C. (julio 1991) Fusión de Escorias en Calderas de Potencia con Carbón de Bajo Rango. Análisis, Diagnóstico y Estrategias Preventivas de Operación. Zaragoza.
- [19]. Fuertes Sánchez, Alicia (2009) Posibilidades técnicas del uso de biomasa no alimentaria para la obtención de energía en España. Proyecto Fin de Carrera, E.T.S.I. Agrónomos (UPM).
http://oa.upm.es/1456/1/PFC_ALICIA_FUERTES_SANCHEZ.pdf
- [20]. IDAE. (2007) Energía de la biomasa. Serie: manuales de energía de la biomasa 2. Editorial IDAE, Madrid, 134 pp.
- [21]. IDAE. (2005) Plan de Energías Renovables en España 2005-2010. Editorial IDAE, Madrid, 347pp.
- [22]. IDAE. (2011) Plan de Energías Renovables en España 2011-2020. Web IDAE, Madrid. <http://www.idae.es/index.php/id.670/mod.pags/mem.detalle>
- [23]. H. Escalante, J. Orduz, et al., Atlas del potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia, Upme, IDEAM, Colciencias, UIS, 2011, pp. 1-171.
- [24]. M. Coviello, J. Gomez y C. Razo, Biocombustibles líquidos para el transporte en América Latina y el Caribe, Cepal, 2006, pp. 1-183.
- [25]. C. Cardona y O. Sánchez, "Producción Biotecnológica Carburante I: Obtención a partir de diferentes materias primas", INCI, vol. 30, No.11, pp. 1-11, 2005.
- [26]. IICA, Atlas de la Agro energía y los biocombustibles en las Américas, 2007, [en línea]. Disponible: <http://www.iica.int>
- [27]. S. Sánchez, A. Moya, I. Romero, et al, Aprovechamiento de residuos de poda del olivar mediante conversión termoquímica. Ingeniería Química, pp. 194-202

- [28]. CASTELS, X. E., Tratamiento y valorización energética de residuos, Díaz Santos, 2005.
- [29]. IDAE, Energía de la biomasa. Libros de la serie de publicaciones incluidas dentro de los manuales de energías renovables, IDAE-Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2008.
- [30]. NORMAUNE-CENTS 14961:2005, Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles, 2005.
- [31]. ANANIAS, R., Física de la madera, apuntes de asignatura, Departamento Ingeniería en maderas, Universidad del Bío-Bío, Chile, consultado en < <http://zeus.dci.ubiobio.cl/~ananas/>>, 2009.
- [32]. ACCIONA, Planta de biomasa por combustión de paja de Sangüesa, consultado en: <http://www.accionaenergia.com/secciones/0002020301/Es/Folleto_planta_biomasa.pdf>.
- [33]. LEVENSPIEL, O., El omnilibro de los reactores químicos, Reverté, 1986.
- [34]. SANTAMARÍA, J. M., HERGUIDO, J., MENÉNDEZ, M. A., y MONZÓN, A., Ingeniería de reactores, Síntesis, 1999.
- [35]. SMITH, J. M., Ingeniería de la cinética química, CECSA, 1995.
- [36]. CASALS, F., Optimización de la valoración energética de combustibles biomásicos mediante tecnología de cámara torsional, Universidad de Zaragoza, 2003.
- [37]. JUNTAANDALUCÍA, Generación de energía térmica con biomasa. Equipos e instalaciones, 2003.
- [38]. BERLANGA-LABARI, C., y FERNÁNDEZ-CARRASQUILLA, J., Revisión sobre la corrosión de tubos sobrecalentadores en plantas de biomasa, 2006.

WEB GRAFÍAS

<http://legislación.samblea.gob.ni>

<http://www.dynamotive.com>

<http://bun-ca.org.net/publicaciones/BIOMASA.pdf>

<http://www.btgworld.com>

<http://www.ine.gob.ni/index.php/electricidad/estadistica>

<http://www.enatrel.gob.ni>

<https://www.minergia.go.bmx>