

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
Sección Ingeniería Mecánica



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

“Estudio experimental de la efectividad del proceso de lavado en la remoción de metales alcalinos respecto de variables del tiempo y temperatura de lavado aplicado a las hojas de caña de azúcar picadas con miras a su empleo en procesos de combustión.”

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller

ALEJANDRO MANUEL TIRADO RAMOS

ASESOR: Mg. Estela de la Gracia Assureira Espinoza

Lima, Febrero del 2016



© 2016, Alejandro Manuel Tirado Ramos

(*) Ninguna parte de la tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o procedimiento, sin el permiso escrito otorgado por el autor.

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos acerca de la mejora de las propiedades físicas y químicas de las hojas de caña de azúcar (HCA) a partir del lavado o lixiviación (pre-tratamiento físico), con miras a su uso en procesos de aprovechamiento energético como lo es la combustión.

En primer lugar se procedió con la clasificación de la HCA con el objetivo de poder determinar su comportamiento en un proceso de combustión. Dentro de las características favorables resaltan su gran porcentaje de materia volátil y bajo contenido de nitrógeno (menores emisiones de óxidos nitrosos). Sin embargo, estas presentaron ciertas desventajas como, por ejemplo, su baja densidad (31.18 kg/m^3); un tamaño de partícula en el orden de los centímetros; y por sobre todo, su alto contenido de álcalis (potasio, sodio, cloro, azufre), los cuales acarrean problemas operacionales como es la corrosión, ensuciamiento (*fouling*) y las escorificación (*slagging*). Se procedió a caracterizar las HCA vírgenes para establecer parámetros de partida previa al pre-tratamiento al cual iban a ser sometidas.

Como parte del proyecto FINCYT (fondo para la innovación, ciencia y tecnología) se determinó que el método de pre-tratamiento de lavado o lixiviación sería el más efectivo debido a ensayos previos elaborados en la PUCP los cuales dieron resultados positivos, además de no afectar las propiedades químicas de la HCA. Luego de haber elegido el método, se fijaron parámetros de la temperatura del lavado a 80°C , 40°C y 20°C , un tiempo de residencia de 10 y 20 minutos, y las velocidades de agitación V1, V2, V3 manteniendo una variable constante de concentración líquido/sólido de 3,33%.

De los ensayos se concluyó que al aumentar la temperatura de trabajo se generó una mayor reducción de álcalis; lo mismo ocurrió al aumentar la velocidad de agitación y el tiempo pero en una menor escala de efectividad. De acuerdo a las curvas de los ensayos se concluyó que la mejor combinación de parámetros sería el ensayo a 20 minutos, 80°C y a una velocidad de agitación V2. Finalmente, se comprobó que hubo una reducción de 62% en cuanto al índice de álcalis, una reducción de 12% de contenido de Cloro, una reducción de 65% del radio de contenido, un aumento del 4% del índice de viscosidad y una reducción de 70% en cuanto al índice de incrustaciones (*fouling*).

Dedicatoria



A mis padres Alejandro Tirado y María Ramos, mis abuelos Oswaldo Ramos, María Díaz, Manuel Tirado y Susana Merino, mis tíos Jorge Tirado, Marlene Tirado, Yrma Ramos y Sara Ramos quienes creyeron en mí en todo momento.

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer a mis padres Alejandro y María por el inmenso apoyo tanto económico como emocional a lo largo de mi carrera universitaria en la mejor universidad del país. Gracias a ellos pude culminar mis estudios de la mejor manera posible y les estoy inmensamente agradecido.

También quisiera agradecer a mi asesora la Mg. Estela Assureira por el constante apoyo, disposición y confianza que depositó en mí para poder culminar el tema de tesis.

Adicionalmente, agradecer a los demás miembros del jurado, los profesores Freddy Rojas y Alan Flores por darme el tiempo de revisar mi tesis y dar sugerencias de mejora antes de la presentación final.

También quisiera agradecer a mis amigos Jan Vicente y Luis Bastidas por la ayuda incondicional que me brindaron para poder culminar mis ensayos de tesis. A mis amigos Albert Villanueva y José Heredia por darme ánimos y fuerza durante toda mi etapa universitaria.

Finalmente, agradecer a los demás miembros de mi familia, a mis tías Yrma, Sara, César, a mis primas María Isabel, Natalia y a mi abuelita Benilde que en paz descansen y estoy seguro debe estar orgulloso de mi logro.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	i
ÍNDICE DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	xi
SIMBOLOGÍA.....	xi
INTRODUCCIÓN	1
1. CAPÍTULO I: BIOMASA Y SU EMPLEO EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN Y CO-COMBUSTIÓN	5
1.1 Energías renovables.....	5
1.2 Biomasa	6
1.3 Situación actual de la biomasa en el mundo.....	8
1.4 Clasificación de la biomasa	11
1.4.1 Biomasa residual natural	11
1.4.2 Biomasa residual seca.....	12
1.4.3 Biomasa residual húmeda	12
1.4.4 Cultivos energéticos	12
1.5 Caracterización de la biomasa.....	12
1.6 Formas de aprovechamiento de la biomasa	15
1.6.1 Generación de energía térmica.....	16
1.6.2 Generación de energía eléctrica.....	16
1.6.3 Cogeneración y trigeneración	17
1.6.4 Co-combustión	18
1.6.5 Generación de energía mecánica	19
1.7 Procesos de conversión energética de la biomasa	19
1.7.1 Conversión termoquímica.....	19

1.7.2	Conversión biológica	20
1.7.3	Conversión fisicoquímica	21
1.7.4	Conversión química	21
1.7.5	Conversión física	21
1.8	Métodos de predicción de defectos presentes en las biomosas.....	22
1.9	Métodos de pre-tratamiento para la mejora de propiedades de la biomasa	28
1.9.1	Pre-tratamiento físico.....	29
1.9.2	Pre-tratamiento de densificado	30
1.9.3	Pre-tratamiento térmico	30
1.9.4	Pre-tratamiento biológico	32
1.9.5	Pre-tratamiento químico.....	32
1.9.6	Pre-tratamiento físico-químico	33
1.9.7	Complemento del proceso de lavado como pre-tratamiento físico	34
1.10	Estudios previos en la PUCP	40
2.	CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN DE LA HOJA DE CAÑA	41
2.1	Introducción a la hoja de caña	41
2.2	Morfología de la hoja de caña de azúcar	41
2.2.1	Lamina foliar o limbo.....	42
2.2.2	Vaina o yagua.....	43
2.3	Tipos de hojas de caña.....	43
2.4	Producción de hoja de caña en el Perú	44
2.5	Caracterización de la hoja de caña.....	47
2.6	Aprovechamiento de la HCA con miras a su empleo en procesos termoquímicos	51
2.6.1	Pirolisis	52
2.6.2	Gasificación	53
2.6.3	Combustión	57
2.6.4	Co-combustión	58

2.6.5	Mezcla de biomasa y carbón	60
2.6.6	Biomasa y carbón sin mezclar	60
2.6.7	Conclusiones de las experiencias del proceso de combustión.....	61
3.	CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.....	62
3.1	Plan de trabajo del desarrollo experimental	62
3.2	Condiciones iniciales de las HCA recibidas	64
3.3	Acondicionamiento de las HCA vírgenes	67
3.4	Análisis de las propiedades de la HCA sin pre-tratamiento.....	71
3.5	Cálculo e interpretación de índices de <i>slagging & fouling</i> para la HCA virgen...73	
3.6	Pre-tratamiento de lavado de las HCA.....	74
3.7	Lavado de las HCA.....	78
3.8	Selección de la mejor muestra lavada	85
3.9	Gráficas de curva de conductividad eléctrica (CE)	86
3.10	Acondicionamiento de la HCA óptima lavada	88
3.11	Cálculo e interpretación de índices de <i>slagging & fouling</i> para la HCA lavada..93	
4.	CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	95
4.1	Resultados del análisis elemental.....	95
4.2	Resultados de análisis de cenizas	96
4.3	Resultados de análisis inmediato.....	96
	CONCLUSIONES	99
	RECOMENDACIONES.....	100
	BIBLIOGRAFÍA.....	101
	ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Tabla 1.1 Biomosas más significativas para ser usadas como energías renovables.	6
Tabla 1.2 Composición química de la ceniza de la HCA.	13
Tabla 1.3 Interpretación de los índices de alcális	26
Tabla 1.4 Interpretación del Rs	26
Tabla 1.5 Interpretación del porcentaje de cloro	27
Tabla 1.6 Interpretación del índice de viscosidad de la escoria	27
Tabla 1.7 Interpretación del índice de fouling	28
Tabla 1.8 Resumen de índices para la determinación de presencia de slagging & fouling	28

CAPÍTULO II

Tabla 2.1 Superficie cosechada, producción, rendimiento, precios, exportación e importación de la caña en el Perú	44
Tabla 2.2 Producción de la caña de azúcar en departamentos del Perú	45
Tabla 2.3 Países productores de caña de azúcar en el 2013	46
Tabla 2.4 Principales residuos agroindustriales	47
Tabla 2.5 Valores aproximados de las propiedades químicas de la hoja de caña	47
Tabla 2.6 Efectos de las propiedades físicas en el proceso de combustión	48
Tabla 2.7 Efectos de las propiedades químicas en el proceso de combustión	48
Tabla 2.8 Propiedades de diferentes biomosas con fines energéticos.	49
Tabla 2.9 Propiedades químicas de diferentes biomosas con fines energéticos.	50
Tabla 2.10 Característica de las hojas de caña de azúcar virgen	50
Tabla 2.11 Tipos de pirolisis y sus características	53
Tabla 2.12 Ventajas, desventajas y campos de aplicación de las diferentes tecnologías de combustión de biomasa	61

CAPÍTULO III

Tabla 3.1 Matriz de ensayos con variación de tiempo, velocidad de agitación y temperatura a una concentración de 3,33%	63
Tabla 3.2 Descripción de concentración sólido/liquido	63

Tabla 3.3 Descripción de velocidades de agitación utilizadas en los ensayos de lavado	64
Tabla 3.4 Resultado del pesado de las bolsas recibidas	65
Tabla 3.5 Resultados de ensayos realizados en muestra de HCA virgen	71
Tabla 3.6 Índice de álcali para muestra de HCA virgen	73
Tabla 3.7 Rs para muestra de HCA virgen	73
Tabla 3.8 %Cl para muestra de HCA virgen	73
Tabla 3.9 SR para muestra de HCA virgen	74
Tabla 3.10 Fu para muestra de HCA virgen	74
Tabla 3.11 Conductividad electrolítica de disoluciones de Cloruro de Potasio	76
Tabla 3.12 Conductividad electrolítica de disoluciones de Cloruro de Sodio	76
Tabla 3.13 Conductividad en distintos tipos de aguas	77
Tabla 3.14 Resultados de conductividad eléctrica promedio	86
Tabla 3.15 Índice de álcali para muestra de HCA lavada óptima	93
Tabla 3.16 Rs para muestra de HCA lavada óptima	93
Tabla 3.17 %Cl para muestra de HCA lavada óptima	94
Tabla 3.18 SR para muestra de HCA lavada óptima	94
Tabla 3.19 Fu para muestra de HCA lavada óptima	94
CAPÍTULO IV	
Tabla 4.1 Tabla comparativa de análisis elemental de HCA virgen y HCA lavada	95
Tabla 4.2 Tabla comparativa de análisis de ceniza de la HCA virgen y HCA lavada	96
Tabla 4.3 Comparativa de poder calorífico de la HCA virgen y HCA lavada	97
Tabla 4.4 Comparación del índice de álcali de la HCA virgen y HCA lavada	97
Tabla 4.5 Comparación del %Cl de la HCA virgen y HCA lavada	97
Tabla 4.6 Comparación del Rs de la HCA virgen y HCA lavada	98
Tabla 4.7 Comparación del SR de la HCA virgen y HCA lavada	98
Tabla 4.8 Comparación del Fu de la HCA virgen y HCA lavada	98
ANEXOS	
Tabla 5.1 Balance de masas de ensayos realizados	116
Tabla 5.2 Resultado de valores de conductividad eléctrica	118

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1	Ciclo de generación de la biomasa	7
Figura 1.2	Superficie de ecorregiones en el Perú en el año 2014	9
Figura 1.3	Potencial energético disponible correspondiente a residuos biomásicos	10
Figura 1.4	Porcentajes de residuos agrícolas (hoja de caña) en el Perú	10
Figura 1.5	Clasificación de la biomasa	11
Figura 1.6	Planta generadora de energía eléctrica a partir de la biomasa	17
Figura 1.7	Procesos de conversión energética de la biomasa	19
Figura 1.8	Clasificación por objetivos de pirolisis	31

CAPÍTULO II

Figura 2.1	Componentes de la hoja de caña	42
Figura 2.2	Producción de la caña de azúcar en departamentos del Perú	45
Figura 2.3	Tipos de tecnologías para la generación de energía eléctrica	56
Figura 2.4	Opciones de co-combustión directa	60

CAPÍTULO III

Figura 3.1	Costales con HCA de azúcar	65
Figura 3.2	Pesado de costales con HCA de azúcar	66
Figura 3.3	Almacenamiento de las HCA seleccionadas	66
Figura 3.4	Diagrama de procesos para el acondicionamiento de las HCA vírgenes	67
Figura 3.5	Proceso de trozado de la HCA	68
Figura 3.6	Tamizado de las HCA en zaranda	69
Figura 3.7	Molido de las HCA en la licuadora	70
Figura 3.8	Cribado de las HCA en la cribadora	70
Figura 3.9	Presentación final de las HCA molidas	71
Figura 3.10	Diagrama de procesos para el lavado de las HCA a tratar con lavado en agua	75
Figura 3.11	Curva entre la conductividad eléctrica y la cantidad de sólidos totales	78
Figura 3.12	Pesado de la HCA	79
Figura 3.13	Pesado de agua corriente	80
Figura 3.14	Ensayo con código 80 de lavado de HCA	81
Figura 3.15	Aplicación de velocidad de agitación V2 a ensayo número 80	81

Figura 3.16 Escurrido de la HCA luego del lavado	82
Figura 3.17 Pesado de la HCA luego del lavado	82
Figura 3.18 Pesado del agua residual luego del lavado	83
Figura 3.19 Presentación de agua luego de los ensayos de lavado 1, 2 y 3	83
Figura 3.20 Presentación de agua luego de los ensayos de lavado 142, 143 y 144	84
Figura 3.21 Toma de medida de conductividad del ensayo de lavado número 1	84
Figura 3.22 Toma de medida de conductividad del ensayo de lavado número 2 y 3	85
Figura 3.23 Toma de medida de conductividad del ensayo de lavado número 31 y 32	85
Figura 3.24 Curva de Temperatura vs Conductividad Eléctrica para todos los ensayos	87
Figura 3.25 Lavado de la HCA óptima	89
Figura 3.26 Supervisión del lavado de la HCA óptima	89
Figura 3.27 Escurrido de la HCA óptima	90
Figura 3.28 Presentación de la HCA antes de ingresar al horno	90
Figura 3.29 Secado de las HCA en horno	91
Figura 3.30 Molienda de la HCA óptima	91
Figura 3.31 Cribado de la HCA molida	92
Figura 3.32 Presentación final de la HCA molida con tamaño de grano M60	92
Figura 3.33 Agua residual del lavado de la HCA óptima	93
ANEXOS	
Figura 5.1 Resultados de ensayos realizados en muestra de HCA virgen	115
Figura 5.2 Ensayo y método de HCA Virgen	115

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

HCA: hoja de caña

RAC: residuos agrícolas de cosecha

TEP: toneladas equivalentes de petróleo

GICB: Grupo de Investigación Carbón Biomasa

ETE: Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588

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

IEAB: *International energy agency bioenergy*

CE: conductividad eléctrica

TDS: *Total Dissolved Solids*/ sólidos disueltos totales

FINCYT: Fondo para la innovación, ciencia y tecnología

INEI: Instituto nacional de estadística e informática

SIMBOLOGÍA

ρ : *densidad aparente*

pH : *nivel de acidéz*

S : *Siemens*

PCS : *poder calorífico superior*

PCI : *poder calorífico inferior*

INTRODUCCIÓN

El incremento del consumo energético mundial en los últimos años debido a nuevos avances tecnológicos, la necesidad de reducir la dependencia del petróleo (fuente agotable de energía) y la toma de conciencia por reducir los problemas ambientales asociados con el uso de los combustibles fósiles provoca necesariamente la focalización de esfuerzos hacia el estudio y desarrollo de las energías alternativas y renovables como la biomasa.

En el Perú, los residuos agrícolas y forestales son recursos que actualmente no son explotados comercialmente y pese a que presentan un gran potencial no se contabilizan como fuente de energía primaria comercial en el Balance Nacional de Energía. Estudios realizados por el Grupo de Investigación Carbón Biomasa en a PUCP, identificaron que anualmente se generan 2'000,000 de toneladas métricas de HCA con un contenido energético de 660,000 toneladas equivalentes de petróleo. Las acciones a nivel público y privado orientados a promover el desarrollo de la bioenergía requieren mejorar la capacidad del país en el conocimiento de aspectos relacionados con la oferta, composición y las tecnologías de aprovechamiento que actualmente existe sobre la biomasa con fines energéticos.

El presente trabajo se basa en el estudio experimental de la mejora de propiedades físicas y químicas de las hojas de caña de azúcar (HCA) picada a partir del método de pre tratamiento del lavado, mediante la variación de la temperatura, tiempo en el cual estuvo expuesta la HCA en el agua, y la velocidad de agitación con la que se trabajó, esto con miras a su empleo en procesos de combustión y co-combustión.

El primer capítulo abarca lo correspondiente a la biomasa, su definición, clasificación y características más resaltantes, además del uso en cuanto a aprovechamiento energético y métodos de pre-tratamientos para generar mejoras en sus propiedades con miras a procesos de combustión.

El segundo capítulo describe específicamente a la hoja de caña de azúcar, desde su origen, morfología, producción de esta en el Perú y finalmente las características de la hoja de caña como resultado de los análisis último, inmediato, poder calorífico y densidad aparente elaborados en un laboratorio externo.

En el tercer capítulo se describe el desarrollo del trabajo experimental elaborado en el laboratorio de investigación Carbón-Biomasa, detallando cada proceso a seguir para el envío de la muestra de hoja de caña virgen, y para el método de pre-tratamiento de la hoja de caña mediante el lavado con agua potable. Luego de seleccionar la mejor muestra se procedió a la preparación de la muestra para ser llevada al laboratorio esta vez de la hoja de caña lavada la cual generó mejores respuestas de mejora.

Finalmente, en el cuarto capítulo se desarrolló el análisis de los resultados obtenidos comparando las propiedades de la hoja de caña virgen con la hoja de caña tratada con agua potable, llegando a concluir que efectivamente el método de pre-tratamiento de la hoja de caña mediante el lavado con agua potable mejora las propiedades físicas y químicas, aumentando su poder calorífico lo cual es fundamental con miras a utilizar la hoja de caña en procesos de combustión.

Objetivo general:

Determinar el porcentaje de remoción de alcális de la hoja de caña picada (1-10 mm) mediante el proceso de lavado, utilizando variables de tiempo (10 y 20 min), temperatura (20, 40 y 80 °C) y velocidad de agitación (V1, V2, y V3) para una concentración de 3,33%.

Objetivos específicos:

Hojas de caña de azúcar en procesos de combustión:

- Definir conceptos sobre la bioenergía y sobre el uso de biomasa residuales en procesos de combustión.
- Conocer los requerimientos de un proceso de combustión aplicado a biomasa residuales.
- Conocer los residuos generados en el proceso de cosecha de la caña de azúcar.
- Determinar las características de la hoja de caña para uso energético.

Métodos de tratamiento:

- Estudiar los métodos de mejora de propiedades de la hoja de caña con miras a procesos de combustión.
- Estudiar los métodos de remoción de metales alcalinos presentes en la hoja de caña, enfatizando en el proceso de lavado.
- Explorar las diferentes técnicas de lavado existentes.

Materiales y métodos:

- Aplicar el método de lavado con agua potable como pre-tratamiento físico y desarrollarlo en el laboratorio.
- Desarrollar los 54 ensayos con los parámetros de tiempo, temperatura y velocidad de agitación para una concentración de 3,33%.

Análisis de resultados:

- Determinar el ensayo más efectivo a partir de los parámetros determinados.
- Analizar la efectividad del proceso de lavado mediante los resultados obtenidos en los ensayos.

Hipótesis:

- Es posible mejorar las propiedades físico-químicas de las HCA mediante el uso del lavado como pre-tratamiento físico, el cual incrementará el poder calorífico con miras a su utilización en procesos de combustión.
- La variación de temperaturas como parámetros de ensayo (20°C, 40°C y 80°C) en el pre-tratamiento de lavado afectará en la remoción de alcális presentes en la HCA.

- La variación de tiempo (10 y 20 minutos) en el que la HCA estará expuesta en el agua de lavado durante el pre-tratamiento afectará en la remoción de metales alcalinos presentes en esta.
- Mediante el proceso de lavado como pre-tratamiento físico, las HCA expuestas a una mayor velocidad de agitación se verán favorecidas respecto a las otras en la efectividad de remoción de alcális presente en las HCA.



CAPÍTULO I: BIOMASA Y SU EMPLEO EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN Y CO- COMBUSTIÓN

El presente capítulo abarca lo correspondiente a la biomasa, su definición, importancia a nivel mundial, clasificación y características más resaltantes, además de su uso en cuanto a aprovechamiento energético y tipos de procesos usados hoy en día para generar energía no contaminante.

1.1 Energías renovables

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía contenida en ellas, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Ejemplos de fuentes inagotables serían el sol, el aire, el agua, residuos, etc.

Estas energías contribuyen a cuidar el medio ambiente más ahora debido a los efectos contaminantes y el agotamiento de los combustibles fósiles, las energías renovables son ya una alternativa tangible. Las energías renovables se clasifican de la siguiente manera: energía eólica, energía solar, energía geotérmica, energía hidráulica, biomasa, biogás, energía maremotriz.

Algunos factores que contribuyen a utilizar energías renovables en sustitución a combustibles fósiles serían los grandes efectos contaminantes que los combustibles fósiles como el carbón o petróleo generan, a comparación de las energías renovables las cuales contaminan en una menor escala.

Otro factor es que los combustibles fósiles producen gases que generan el efecto invernadero, contribuyendo al calentamiento global, muy hablado en estos tiempos. Las energías renovables no producen estos gases perjudiciales para el medio ambiente.

La producción de estas energías renovables contribuye a la reducción de costos por no tener que transportarlos, además que no fluctuarían su precio como si lo hacen los petróleos y por supuesto generarían más puestos de trabajo, además de que estas fuentes renovables son inagotables a diferencia de los combustibles fósiles los cuales en algún momento se van a acabar.

1.2 Biomasa

De acuerdo con la ETE (Especificación Técnica Europea CEN/TS 14588), la biomasa se define como “Todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización”. [1]

Otra definición es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente. Las plantas transforman la energía radiante del sol en energía química a través de la fotosíntesis, y parte de esta energía queda almacenada en forma de materia orgánica [2]

Actualmente, la energía de la biomasa deriva de materiales vegetales y animales, como madera de bosques, residuos de procesos agrícolas y forestales o basura humana, animal o industrial. Existen aproximadamente 86 variedades de biomasa las cuales proceden de diferentes fuentes de recursos. Se considera a la biomasa como el tipo de energía renovable más importante en la contribución a la energía total consumida. [3]

Tabla 1.1
Biomasa más significativas para ser usadas como energías renovables. [4]

Recursos de biomasa	Tipo de residuo	Características físicas
Residuos forestales	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces	Polvo, sólido, HR ² > 50% Polvo sólido, HR 30-45% Sólido, HR >55%
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales Cáscara y polvo de granos secos (arroz y café) Estiércol Residuos de cosechas: tallos y hojas, cáscaras, maleza, pastura	Sólido, alto contenido humedad Polvo, HR <25% Sólido, alto contenido humedad Sólido HR >55%
Residuos industriales	Pulpa y cáscara de frutas y vegetales Residuos de procesamiento de carnes Aguas de lavado y pre-cocido de carnes y vegetales Grasas y aceites vegetales	Sólido, humedad moderada Sólido, alto contenido de humedad Líquido Líquido, grasoso
Residuos urbanos	Aguas negras Desechos domésticos orgánicos (cáscara de vegetales) Basura orgánica (madera)	Líquido Sólido, alto contenido humedad Sólido, alto contenido humedad

La biomasa surge como una solución ante el problema de contaminación ambiental. Está catalogada como una fuente renovable debido a que proviene del sol, más específicamente, en el proceso de fotosíntesis, la clorofila de las plantas captura la energía y convierten el dióxido de carbono del aire y el agua del suelo en carbohidratos para formar materia orgánica. Al quemarse estos carbohidratos, retornan a su forma de dióxido de carbono y agua, pero ahora liberando la energía contenida. Esta biomasa es la única fuente de energía netamente neutra en dióxido de carbono (CO_2), es decir que no produce más dióxido de carbono en la atmósfera.

Las fuentes de biomasa que pueden ser utilizadas para la producción de energía abarcan un amplio rango de materiales y fuentes como residuos de la industria forestal y la agricultura, desechos urbanos y plantaciones energéticas las cuales se usan usualmente para procesos modernos de conversión, involucrando la generación de energía a gran escala enfocándose a la sustitución de combustibles fósiles.

A continuación una figura de cómo se genera la biomasa:

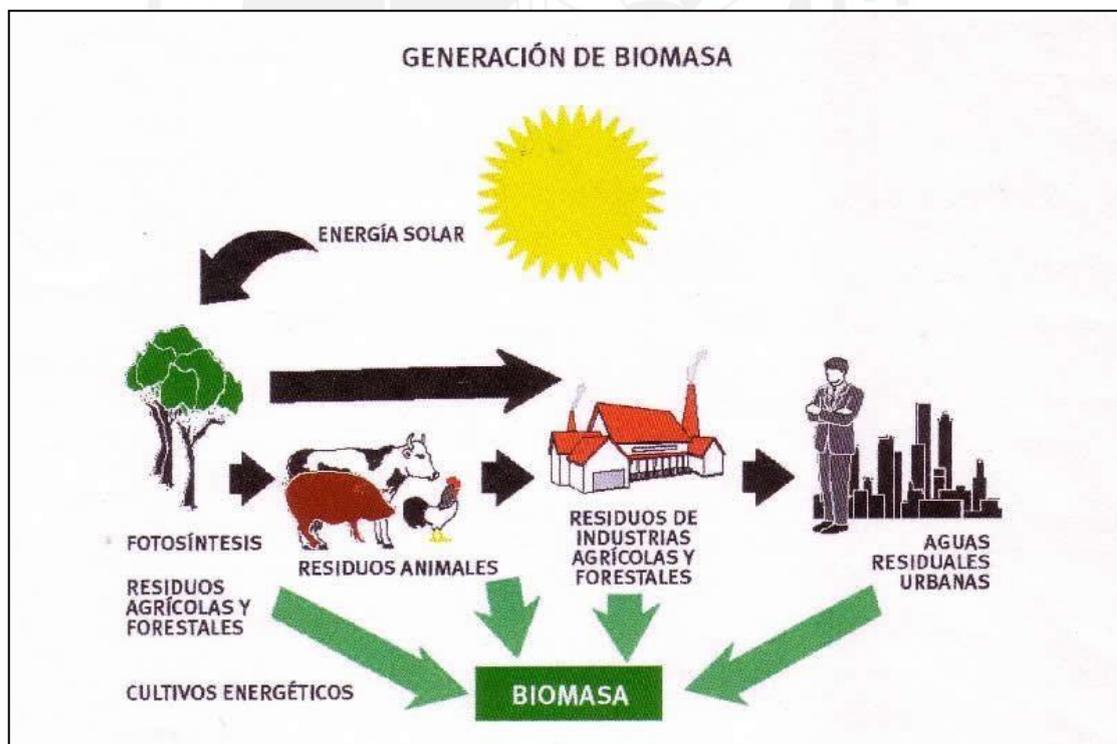


Figura 1.1
Ciclo de generación de la biomasa [5]

1.3 Situación actual de la biomasa en el mundo

Según la Agencia Internacional de la Energía en una de sus publicaciones, se hacía eco del Fondo de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) exponiendo que algunos países pobres obtienen el 90% de su energía de la leña y otros biocombustibles.

Además la FAO reconoce también que “la mejora del uso eficiente de los recursos de la energía de la biomasa - incluidos los residuos agrícolas y las plantaciones de materiales energéticos - ofrece oportunidades de empleo, beneficios ambientales y una mejor infraestructura rural”. Incluso va más allá al considerar que el uso eficiente de estas fuentes de energía ayudarían a alcanzar dos de los objetivos de desarrollo del milenio: “erradicar la pobreza y el hambre y garantizar la sostenibilidad del medio ambiente”.

Volviendo al principio, la biomasa podría ser el vector energético que permitiera el desarrollo de los países pobres, evitando que el aumento del consumo energético asociado a este desarrollo pusiera en peligro el medio ambiente y la seguridad de abastecimiento energético de nuestra sociedad.

Esta fuente de energía supone un tercio del consumo energético en África, Asia y Latinoamérica, siendo la principal fuente de energía en los hogares de 2.000 millones de personas.

El problema del uso de biomasa, en situación de supervivencia, es su falta de desarrollo tecnológico y de eficiencia energética, situándose fuera de una planificación sostenible de su aprovechamiento, lo que conlleva a la deforestación de grandes áreas con su consecuente grave impacto ambiental asociado.

Más del 10% de la superficie mundial se utiliza actualmente para cultivos y un 25% para pastos de ganadería y otras producciones animales. Un mayor desarrollo de la tecnología y una adecuada planificación del aprovechamiento de la biomasa, supondría un impulso para el mercado internacional de biomasa, mejoras ambientales y el desarrollo rural de zonas degradadas. [6]

En el Perú, los residuos agrícolas y forestales son recursos que hoy en día no son aprovechados comercialmente y pese a que representan un gran potencial energético

no se toman en cuenta como fuente de energía primaria comercial en el Balance Nacional de Energía. Las acciones a nivel público y privado orientados a promover el desarrollo de la bioenergía requieren mejorar la capacidad del país en el conocimiento de aspectos relacionados con la oferta, composición y las tecnologías de aprovechamiento que actualmente existe sobre la biomasa con fines energéticos.

El BIOMAP PERÚ o Atlas de la Biomasa Energética del Perú desarrolló entre los periodos 2003 a 2011 la selección de los residuos con mayor potencial energético en nuestro país, basándose en estadísticas de la producción agrícola y forestal nacional a los cuales se realizó un muestreo de campo a nivel nacional de residuos biomásicos seleccionados a los cuales se les aplicó los análisis correspondientes para su caracterización. [43]

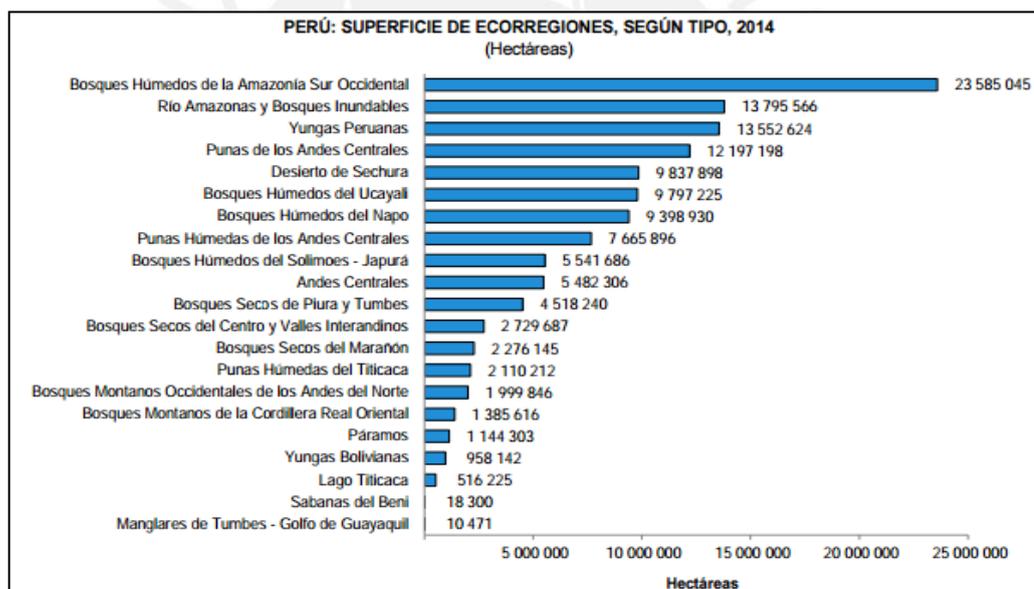


Figura 1.2

Superficie de ecorregiones en el Perú en el año 2014 [43]

Las estadísticas arrojaron los siguientes resultados a nivel nacional. En la siguiente figura se muestran las provincias con mayor potencial energético residual.

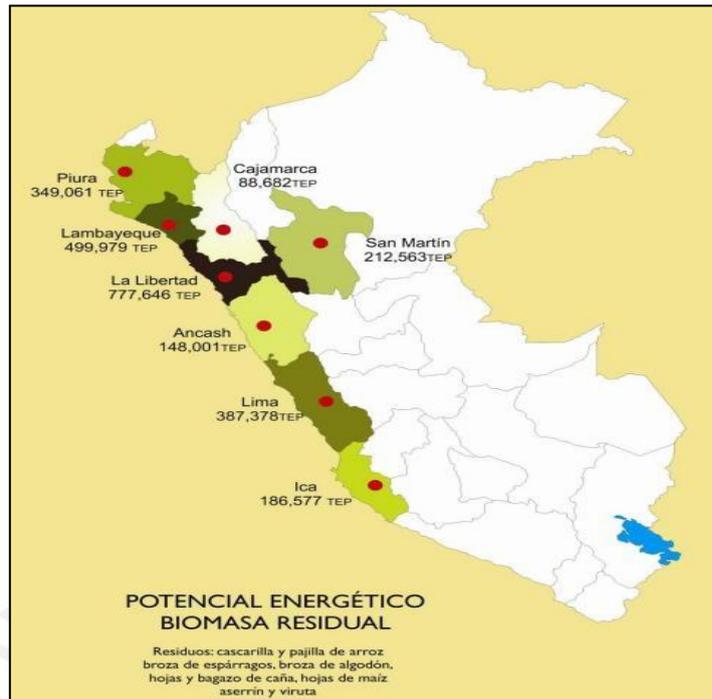


Figura 1.3

Potencial energético disponible correspondiente a residuos biomásicos [43]

En la figura 1.3 se detallan las cantidades anuales en TEP (toneladas equivalentes de petróleo) de producción de diferentes biomásas y la distribución en diferentes provincias del Perú.

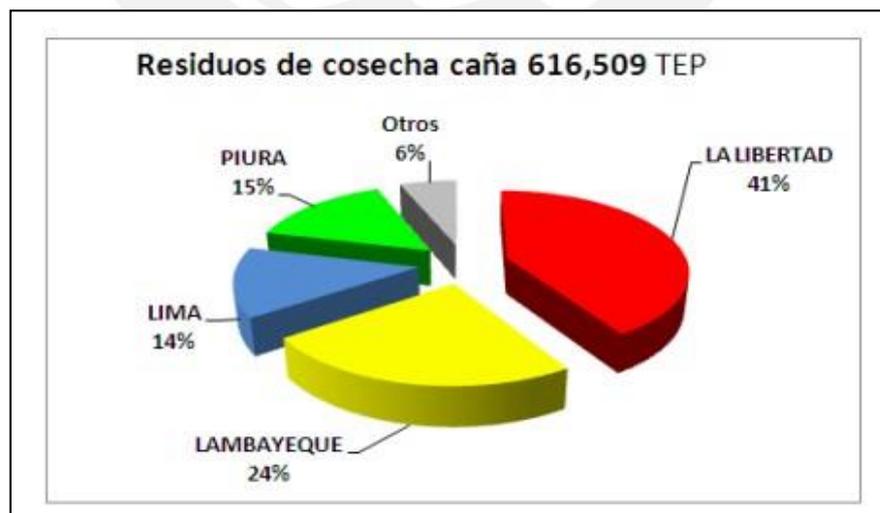


Figura 1.4

Porcentajes de residuos agrícolas (hoja de caña) en el Perú [43]

1.4 Clasificación de la biomasa

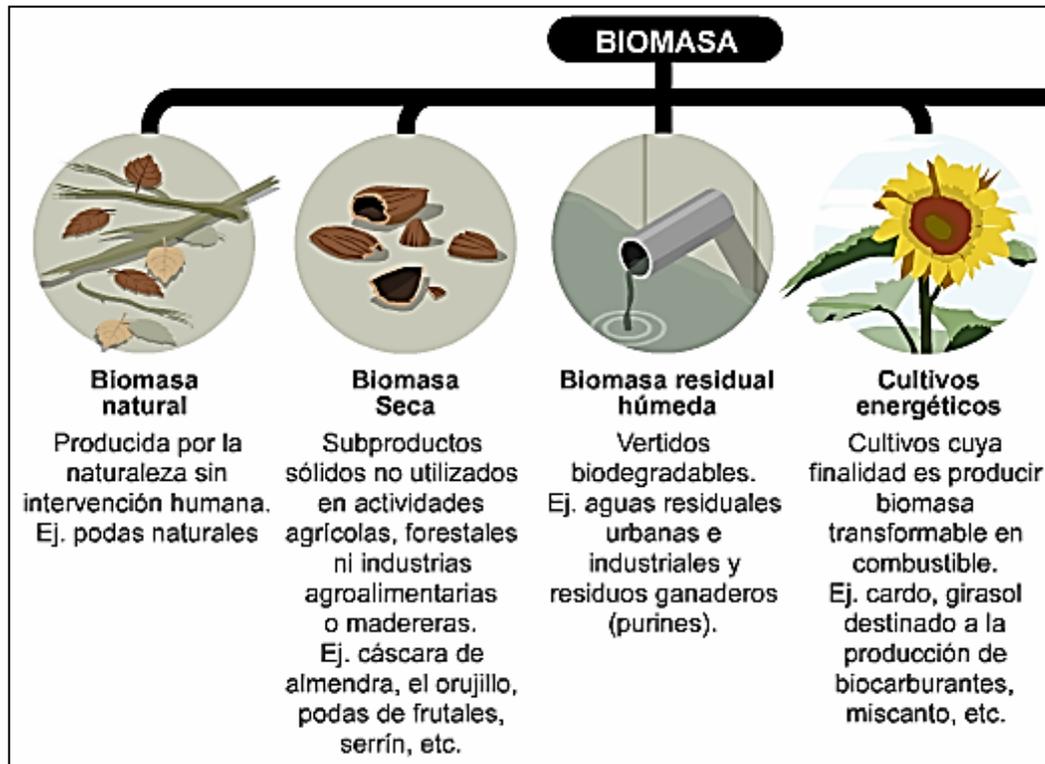


Figura 1.5

Clasificación de la biomasa [1]

Según el origen del que provenga, la biomasa se puede clasificar en cuatro grandes ramas, ya sea de árboles, plantas o residuos animales las cuales pueden convertirse en energía; las provenientes de residuos provocados (aserrín, podas, ramas, cortezas, etc.); los residuos naturales provenientes de la flora (cascaras de maíz, café, caña, arroz, etc.); y de los residuos urbanos (basura orgánica, agua sucia, etc.).

1.4.1 Biomasa residual natural

Es la biomasa que se produce en la naturaleza sin ninguna intervención humana. A partir de dichos residuos se puede obtener un combustible de gran calidad; empero, no es una propuesta atractiva debido a las impurezas, heterogeneidad y elevada humedad, además que su explotación no es viable económicamente debido a los costos de adquisición y transporte. [2]

1.4.2 Biomasa residual seca

Es la biomasa generada de los residuos agrícolas, de agroindustria e industria maderera. En este conjunto se encuentran por ejemplo los residuos de materia orgánica obtenida de los diferentes procesos madereros como aserrín, astillas, etc. También se encuentran los residuos provenientes de la manufactura agroalimentaria, así como los residuos orgánicos procedentes del sector agro ganaderos, como los restos que derivan de las explotaciones agrarias (frutales, olivos, cascaras de almendra, etc.); subproductos agrícolas (paja de cereales, tallos, cascarillas, etc.); restos ganaderos. [2]

1.4.3 Biomasa residual húmeda

Es la biomasa proveniente de residuos biodegradables que abarcan el sector urbano, industrial y ganadero. Los residuos animales (el estiércol, escamas, o restos de animales muertos) se transforman para obtener biogás de tipo metano, que se usan como combustible para generar electricidad. Por otro lado, tenemos los residuos ganaderos como el excremento y excreciones de animales vacunos, restos de carnes, etc. Los residuos sólidos urbanos e industriales son generados producto de la actividad humana diariamente, como por ejemplo la basura biodegradable, papeles, plásticos, bolsas, cartones, etc. [2]

1.4.4 Cultivos energéticos

Estos cultivos se generan con la única finalidad de producir biomasa transformable en combustible. Los árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento son ideales, los cuales se siembran en tierras no fértiles para buscar el menor costo. Estos cultivos se dividen en: cultivos ya existentes (cereales, oleaginosas, remolachas, etc.) para la producción de biocarburantes; lignocelulósicos forestales (chopo, sauces, etc.) y lignocelulósicos herbáceos (*cynara cardunculus*, etc.) para producción de calor y electricidad; otros cultivos como la papa. [2]

1.5 Caracterización de la biomasa

Las características tanto físicas como químicas de la biomasa determinan el tipo de combustible o subproducto energético que se puede generar, además de conocer el tratamiento previo que se necesite aplicar según el tipo de biomasa. Para esto se va a definir el contenido de humedad, porcentaje de ceniza, porcentaje de materia volátil y

carbono fijo mediante el análisis inmediato; luego en el análisis último se determinan los componentes químicos de la biomasa; finalmente se definirá el poder calorífico y densidad aparente.

1.5.1 Análisis inmediato

Es el conjunto de ensayos mediante los cuales se determinan los porcentajes de humedad, cenizas, materia Volátil y carbono fijo.

- Contenido de humedad

Es la cantidad de agua presente en la biomasa por kilogramo de material seco. La humedad óptima para transformar la biomasa en energía debe ser menor que el 30%, de ser esta mayor, primero se debe evaporar el agua para luego iniciar el proceso de conversión energética. En general entre más humedad contenga la biomasa utilizada, menos será su valor calorífico. [3] [7] [9]

- Porcentaje de cenizas

Indica la cantidad de materia sólida que no es utilizable como combustible por kilogramo de biomasa. Conocer el porcentaje de ceniza generado y su composición es importante ya que es un indicador de eficiencia del proceso de combustión y en algunos casos se puede utilizar la ceniza; por ejemplo la ceniza de cascarilla de arroz es muy buen aditivo para mezclarla con el concreto y para la fabricación de filtros de carbón activo. [3] [7] [8]

Tabla 1.2
Composición química de la ceniza de la HCA. [38]

Componente / Component	%
K ₂ O	3.00
Na ₂ O	0.11
CaO	6.00
MgO	2.00
Al ₂ O ₃	0.60
SiO ₂	81.0
Fe ₂ O ₃	0.70
TiO ₂	0.04
P ₂ O ₅	1.10
SO ₃	1.40
MnO	0.08
ZnO	0.03
PPI 110 °C a 1100 °C	4.00

- Porcentaje de materia volátil

Es el porcentaje de biomasa que es liberada cuando esta es calentada a determinadas condiciones. Durante este proceso la biomasa se descompone en gases inflamables y materia calcinada. Por lo general la biomasa tiene un contenido en materia volátil muy elevada (>65%) lo que favorece su combustión. [3] [7] [8]

- Carbono fijo

El carbono fijo se define como la masa sólida restante después de la liberación de las sustancias volátiles y la exclusión de cenizas y de humedad. [3] [7] [9]

1.5.2 Análisis último

Determina el contenido de compuestos simples que se gasifican y aportan energía en las reacciones de combustión. Este análisis incluye cuantificar en la muestra el porcentaje en peso de carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S) y nitrógeno (N). Está comprobado que la composición química de los componentes de la biomasa son muy variables debido a los cambios bruscos de humedad, eficiencia de la ceniza y diferencia genética de la materia inorgánica de la biomasa, entre otros. Sin embargo, en rango de prioridad, estos son los componentes químicos de la biomasa: Carbón (C), Oxígeno(O), Hidrógeno(H), Nitrógeno(N), Calcio(Ca), Potasio(K), Silicio(Si), Magnesio(Mg), Aluminio(Al), Azufre(S), Hierro(Fe), Fósforo(P), Cloro(Cl), Sodio(Na), Manganeso(Mn), Titanio(Ti).

El contenido de carbón en las biomásas oscila entre 42-71%; el contenido de oxígeno en la biomasa es calculado por diferencia porcentual y varía entre 16-49%; el contenido de hidrogeno en la biomasa varía en el intervalo de 3-11%; el nitrógeno en la biomasa oscila entre 01.-12%; sabiendo que el contenido de azufre en la biomasa se da en pocas cantidades este oscila entre 0.01-2.3%; al igual que el azufre, el cloro también aparece en pocas concentraciones y varía entre 0.01-0.9%. [7] [9]

1.5.3 Poder calorífico

El contenido de poder calorífico por unidad de masa es el parámetro que determina la energía disponible en la biomasa estudiada. Este poder calorífico se relaciona directamente con su contenido de humedad. A mayor porcentaje de humedad se reduce la eficiencia de la combustión debido a que una gran parte del calor liberado es utilizado para evaporar el agua y no es aprovechado en la reducción química del material. [7] [8]

1.5.4 Densidad aparente

Es la densidad efectiva de un material sólido granulado, particulado o pulverulento, es decir, es la densidad de un material cuando se considera tanto el volumen ocupado por la fase sólida como el debido a la fase fluida que incorpora que por lo general es aire. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, reduciendo así los tamaños de los equipos y aumentando los periodos entre cargas. En cambio una baja densidad aparente requiere todo lo contrario, además de presentar problemas para fluir por gravedad, complicando el proceso de combustión y elevando costos de procesamiento. [8]

1.6 Formas de aprovechamiento de la biomasa

Existen varias formas de aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía. La más simple es combustionando directamente en calderas o estufas, la cual cubre la demanda de energía térmica de industrias y edificios. El uso puede incrementarse, debido a la evolución tecnológica de estufas y calderas, la estandarización de los combustibles, el bajo precio frente a los combustibles habituales. [15]

Si lo que se desea es generar energía eléctrica, se puede realizar mediante calderas que evaporen el agua utilizando biomasa, siendo similar el procedimiento a cuando se realiza mediante turbinas de vapor. También puede generarse en centrales que utilicen biomasa energética en los que se apliquen procesos de co-combustión; es decir, de uso combinado de dos combustibles. [16]

Otra forma de aprovechamiento energético sería la gasificación de donde se obtiene gas pobre el cual es usado en motores generadores de energía eléctrica a través de un alternador. El calor residual puede ser aprovechado con fines térmicos, por lo que la biomasa es usada también en ciclos de cogeneración. Finalmente, mediante procesos químico-físicos, se pueden obtener biocarburantes que se emplean en el área de transporte [17].

Existen varias formas de aprovechamiento de biomasa como fuente de energía: la más común es la generación de energía térmica (agua o aire caliente, vapor, etc.), también se puede generar energía eléctrica e incluso mecánica mediante el uso de biocarburantes en motores de combustión interna.

1.6.1 Generación de energía térmica

El sistema más extendido para este tipo de aprovechamiento está basado en la combustión de biomasa sólida, aunque también es posible quemar el biogás procedente de la digestión anaerobia de un residuo líquido o el gas de síntesis generado en la gasificación de uno sólido.

Las aplicaciones térmicas con producción de calor y agua caliente sanitaria son las más comunes dentro del sector de la biomasa, sin embargo también es posible la producción de frío, siendo esta última opción la más excepcional.

Existen instalaciones industriales que producen biomasa y donde se requiere energía térmica en sus procesos.

Otro tipo de instalaciones se dan en el sector doméstico y de servicios con elevada centralización, puesto que el coste de la instalación por unidad de energía producida disminuye significativamente con el tamaño de la misma.

1.6.2 Generación de energía eléctrica

En función del tipo y cantidad de biomasa disponible varía la tecnología más adecuada a emplear para este fin:

- Ciclo de vapor: está basado en la combustión de biomasa, a partir de la cual se genera vapor que es posteriormente expandido en una turbina de vapor.
- Turbina de gas: utiliza gas de síntesis procedente de la gasificación de un recurso sólido. Si los gases de escape de la turbina se aprovechan en un ciclo de vapor se habla de un “ciclo combinado”.
- Motor alternativo: utiliza gas de síntesis procedente de la gasificación de un recurso sólido o biogás procedente de una digestión anaerobia.

En la figura 1.6 se observa una planta generadora de energía eléctrica a partir de biomasa combustionada.

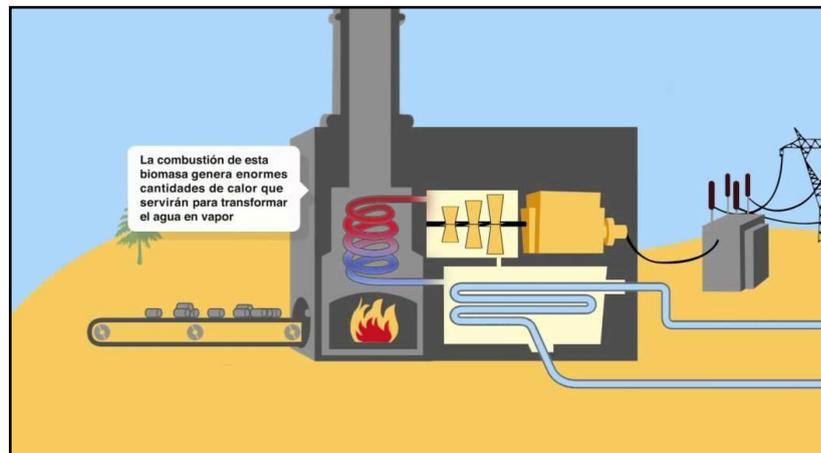


Figura 1.6

Planta generadora de energía eléctrica a partir de la biomasa [10]

1.6.3 Cogeneración y trigeneración

Cuando una entidad presenta consumos térmicos y eléctricos importantes se puede plantear la instalación de un sistema de cogeneración, consistente en la producción conjunta de energía térmica y eléctrica. Esta tecnología presenta como gran ventaja la consecución de rendimientos superiores a los sistemas de producción de energía térmica o eléctrica por separado. Un óptimo aprovechamiento de la biomasa es en este tipo de procesos de cogeneración y trigeneración donde se obtienen producciones eléctricas entre el 15 y el 20% y aprovechamientos térmicos que alcanzan una eficiencia total del 80%.

El principio de funcionamiento de la cogeneración se basa en el aprovechamiento de los calores residuales de los sistemas de producción de electricidad comentados en el epígrafe anterior. Aunque cada caso debe ser estudiado en detalle, en general la cogeneración es adecuada para empresas con consumos de energía eléctrica importantes, con un factor de utilización elevado (más de 5.000 h/año) y donde sea posible aprovechar energía térmica a temperatura media (alrededor de 400-500° C). Un sistema de cogeneración basado en la utilización de biomasa permite disminuir el coste de la factura, tanto la eléctrica (existiendo la posibilidad añadida de venta del excedente de electricidad) como la de combustibles fósiles. En la figura 1.5. se detalla el sistema de cogeneración.

1.6.4 Co-combustión

La co-combustión de la biomasa/carbón es una opción de energía renovable que promete una reducción considerable de dióxido de carbono (CO₂), óxido de azufre (SOX) y óxido de nitrógeno (NOX). Combustionar biomasa con carbón al mismo tiempo produce uno de los medios más eficaces de reducir emisiones de CO₂ de las centrales térmicas de carbón. Recientes estudios identificaron más de 100 casos exitosos de combinación entre biombras distintas (herbáceas, leñosas, desechos animales, desechos antropomorfos) con cualquier tipo de carbón combustionando en distintos tipos de hornos (tangenciales, de pared, ciclo de encendido).

La IEAB (*International energy agency bioenergy*) determinó que la co-combustión representa entre el riesgo más bajo, menos costoso, más eficiente, y la opción más a corto plazo de generación de energía eléctrica renovable bajo discusiones recientes. Sin embargo, aún existen incertidumbres acerca de su aplicación tecnológica a largo plazo.

Está claro que los productos forestales y agrícolas generan residuos que resultan más que beneficiosos al medio ambiente al ser usados como combustibles, sin embargo este proceso no es del todo amigable para el medio ambiente pero a comparación de los combustibles fósiles es recomendable.

La adición de biomasa a una caldera de carbón disminuye ligeramente la eficiencia de una central térmica de calor. Esto se debe mayormente al uso de aire no pre calentado en quemadores de biomasa o inyectores; también debido a al aumento de las pérdidas parásitas asociadas a la preparación de combustible más intensivo de energía y manipulación y al ligero aumento de humedad en el combustible.

Está comprobado por resultados de ensayos que la combustión de biomasa con carbón genera eficiencias en un rango entre 30 a 38%, superando ampliamente la eficiencia en los sistemas de biomasa reservados y excediendo el estimado de eficiencia de muchos sistemas basados en biombras avanzadas. Los costos de instalación de co-combustión en una planta de energía oscilan entre 50 a 300 \$/KW de capacidad de la biomasa, y esto se debe a que la co-combustión aprovecha la infraestructura existente de la planta de energía con mínimos cambios. [12]

1.6.5 Generación de energía mecánica

Los biocarburantes pueden ser empleados en los motores alternativos de automóviles, camiones, autobuses, etc., sustituyendo total o parcialmente a los combustibles fósiles. La utilización de biocarburantes es especialmente interesante en industrias agrarias que dispongan de una adecuada materia prima para su producción (aceites reciclados, colza, girasol, maíz, trigo, papa, etc.) y que puedan auto consumirlos (por ejemplo en tractores), llegando a suponer importantes ahorros en la factura de los combustibles.

1.7 Procesos de conversión energética de la biomasa

En la Figura 1.7 se pueden apreciar los diferentes pre-tratamientos y procesos, según la clasificación de la biomasa, para el aprovechamiento energético de la misma; así como los productos finales e intermedios y sus aplicaciones. Este análisis es más específico para los diferentes productos y sub-productos obtenibles de la biomasa.

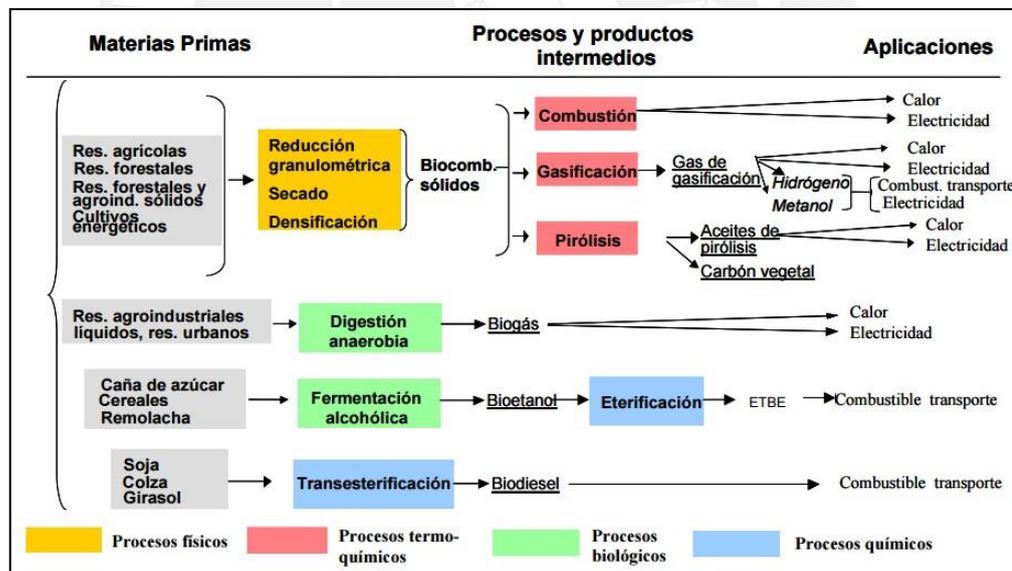


Figura 1.7

Procesos de conversión energética de la biomasa [1]

1.7.1 Conversión termoquímica

Estos métodos se basan en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa. Están bien adaptados al caso de la biomasa seca, y, en particular, a los de la paja y de la madera.

- Combustión

Es un tratamiento a temperaturas entre 800°C y 1000°C en el que no hay control de la cantidad de oxígeno. En esta reacción se libera agua, gas carbónico, cenizas y calor. Este último es usado para el calentamiento doméstico o industrial o para la producción de electricidad. [13] [14]

- Pirólisis

Es un tratamiento que ocurre a temperaturas entre 500°C y 600°C, en ausencia de oxígeno, llamándose también combustión incompleta. Se basa en la descomposición de la materia orgánica por medio del calor. Como resultado se obtiene una mezcla que posee parte sólida (principalmente carbón), parte líquida y parte gaseosa. Los líquidos y los gases son hidrocarburos y compuestos alifáticos. Estos gases de poco poder calorífico pueden utilizarse para accionar motores diésel, para producir electricidad o para mover vehículos. [13] [14]

- Gasificación

Es un tratamiento que ocurre a temperaturas entre 700°C y 1200°C muy parecido a la pirólisis; pero, en este caso, la cantidad de oxígeno si es controlada, reduciendo significativamente la obtención de sólidos respecto al proceso anterior. Como resultado se obtiene un gas denominado gas pobre compuesto por metano, hidrogeno y monóxido de carbono que se utiliza como combustible. [5] [6]

1.7.2 Conversión biológica

Estos procesos utilizan las características bio-químicas de la biomasa y la acción metabólica de organismos microbiales para producir combustibles gaseosos y líquidos. La conversión biológica es idónea para la transformación de la biomasa húmeda (más del 75% de humedad relativa).

- La digestión anaeróbica

Es un proceso en el cual la carga contaminante de residuos biodegradables es reducida por medio de bacterias, las cuales degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno. En este proceso la biomasa es fermentada en espacios cerrados, para luego de unos días y dependiendo de la temperatura del ambiente se obtiene un gas (biogás) y una parte sólida que concentra los minerales y los productos de difícil degradación. El biogás contiene dióxido de carbono y una elevada porción de metano (50% a 70%) la cual puede ser usada como combustible. [5] [6]

- La fermentación alcohólica

Proceso utilizado en residuos de plantas de cultivos azucareros o de cereales con el fin de obtener alcoholes como el etanol y metanol; el primero se produce por medio de la fermentación de azúcares y, el segundo por la destilación destructiva de madera, para luego usados como combustibles en motores de explosión, ya sea directamente o mezclados con gasolina. [5] [6]

1.7.3 Conversión fisicoquímica

- Prensado/extracción

La conversión fisicoquímica produce un biocombustible líquido a partir de la biomasa que contiene aceite vegetal. Esta tecnología es similar a la conversión para producir aceite vegetal en la industria alimenticia.

El aceite vegetal se produce al prensar y/o extraer el aceite de la semilla de manera que sólo se pueden usar especies que contienen aceite, como la semilla de colza, el girasol, el frijón de soya, el aceite de palma, etc.

1.7.4 Conversión química

Su objetivo es generar biodiesel mediante ácidos grasos y esteres alcalinos (formado por agua mediante la relación de un ácido y un alcohol) obtenidos de aceites vegetales, grasas animales y grasas recicladas).

- Esterificación

Proceso en el que se sintetiza un éster haciendo reaccionar, mediante catalizadores, un ácido orgánico con un alcohol. El producto de la reacción es un éster y agua.

- Transesterificación

Proceso utilizado para obtener biodiesel el cual consiste en combinar el aceite, que por lo general es aceite vegetal, con un alcohol ligero, normalmente metanol, dejando como residuo glicerina, la cual se separa para emplearlo en otras industrias.

1.7.5 Conversión física

- Fragmentación

La superficie específica aumenta, facilitando la ignición y combustión del biocombustible, además homogeniza el tamaño de partícula del combustible, facilitando su maniobrabilidad.

- Secado

Es una técnica simple basada en el aprovechamiento de las condiciones ambientales favorables para facilitar la deshidratación de los residuos y obtener unos niveles de humedad que posibiliten un manejo económico. El poder calorífico aumenta y con esto facilita el proceso ya que si la materia prima está muy húmeda, el proceso aumenta su costo, además de obtener un producto final de mala calidad.

- Compactación

Técnica necesaria para aumentar la densidad asimismo que disminuyen los gastos de almacenaje y transporte ya que algunos biocombustibles tienen una baja densidad.

1.8 Métodos de predicción de defectos presentes en las biomásas

Si bien la biomasa está considerada como la mejor fuente de energía renovable en el mundo, su alto contenido de constituyentes inorgánicos presentes durante el proceso de conversión térmica genera un impacto negativo en el medio ambiente. Estos constituyentes inorgánicos (en su mayoría calcio, potasio, cloro, sulfuro) generan grandes cantidades de escorificación (*slagging*) en máquinas como reactores, intercambiadores de calor, hornos, turbinas y otros equipos. No solo escorificación, también se puede encontrar incrustaciones, corrosión y aglomeración en máquinas de este tipo. [23]

Básicamente los problemas que se pueden presentar son:

- Formación de costras sobre la parrilla y problemas de extracción de escorias
- Obstrucción de los agujeros de entrada de aire primario en la parrilla
- Obstrucción de la entrada de biomasa con depósitos de escoria
- Grandes depósitos en superficies refractadas y paredes de agua
- Acumulaciones alrededor de las entradas de aire secundario
- Estrechamiento de los pasos de gases por depósitos
- Puntos calientes por postcombustión superficial
- Erosiones de las zonas de transmisión de los conductos de gases
- Depósitos incrustantes en las zonas de entrada de gases al sobrecalentador

- Puentes y bloqueos en los haces de convección
- Corrosión y erosión de los tubos del sobrecalentador

Índices de escorificación y ensuciamiento (*Slagging & Fouling*)

Los álcalis pueden estar contenidos en las cenizas o pueden ser expulsados en forma de gases y sus elevados contenidos, en conjunto con otros elementos perjudiciales presentes habitualmente en su composición, fundamentalmente cloro y azufre, los cuales originan una tendencia a provocar fenómenos de depósitos, incrustaciones, erosión en las cámaras de combustión, corrosión en diversas partes de las calderas de biomasa, reducción de la transferencia de calor, reducción de la eficiencia de la combustión, y generación de erosión. En general, parece que las plantas de crecimiento más rápido, tienden a tener concentraciones más altas de metal alcalino y sílice.

El potasio y sodio; ya sea, en forma de óxidos, hidróxidos o compuestos órgano-metálicos, tienden a bajar el punto de fusión de cenizas. Esto da lugar a formación de escoria en las superficies sometidas a radiación, ya sea la rejilla de la caldera o en el lecho (*slagging*), y el ensuciamiento de las superficies de transferencia de calor convectivas (*fouling*) por medio de incrustaciones [18] [19]. Sin embargo, la presencia de algunos álcalis como el silicato de aluminio, al ser más estable y con un punto de fusión alto, son empleados para reducir la cantidad de gas e incrementar el punto de fusión de las cenizas. [20]

El ensuciamiento (*fouling*) o depósito se conoce comúnmente como las capas de materiales (ceniza) recogidos en la superficie de los equipos de transferencia de calor. Este efecto es causado por la vaporización, durante el proceso de la combustión, de los elementos volátiles inorgánicos que contiene el carbón. Como en la sección de convección de la caldera se absorbe calor a menor temperatura, los compuestos formados condensan sobre las partículas de ceniza y sobre la superficie termo-intercambiadora, formando una sustancia viscosa sobre la que se inicia la deposición del polvo de ceniza.

La formación de escoria está relacionada con la concentración de elementos de protección (silicio, aluminio y azufre), de elementos peligrosos (cloro, sodio y potasio) y especialmente de los volátiles (cloro, azufre, potasio y sodio) de la biomasa. Altas concentraciones de cloro, potasio y sodio, promueven la formación de partículas finas

de cloruros de álcali, lo que ocasiona serios problemas de formación de escoria, por el contrario, altas concentraciones de silicio y aluminio, atrapan las sustancias alcalinas a través del silicato de aluminio y disminuyen los problemas de formación de escorias.

La escorificación (*slagging*) se sitúa en los depósitos en las paredes del horno u otras superficies las cuales se expone al calor de radiación predominante. Para que una partícula de ceniza se pueda adherir a una superficie limpia y constituir una deposición, debe tener una viscosidad lo suficientemente baja como para que pueda mojar la superficie. En las superficies tubulares limpias, raras veces se forman depósitos de escoria, ya que antes de que se produzcan deposiciones significativas tiene que transcurrir un período determinado de acondicionamiento, en las siguientes fases:

- a) Conforme las partículas de ceniza se aproximan a un tubo limpio, si no existe un impacto directo de la llama sobre la superficie considerada, la mayoría de ellas tiende a re-solidificar debido a la temperatura relativamente baja de la superficie tubular.
- b) Debido al impacto con la superficie tubular, las partículas se fracturan y dispersan parcialmente en el flujo de humos; sin embargo, tras un período de tiempo se comienza a formar sobre el tubo una capa base, como consecuencia de la sedimentación de partículas finas o de la acumulación gradual de partículas con componentes de bajo punto de fusión.
- c) Conforme crece el espesor de la capa base, la temperatura de la cara del lado del fuego aumenta de forma significativa respecto a la temperatura de la superficie tubular.
- d) A veces, la temperatura exterior de la capa supera la del punto de fusión de la mayoría de los componentes de la ceniza, con lo que la superficie exterior de la deposición comienza a derretirse, y el proceso se acelera porque la escoria en estado plástico atrapa todas las partículas que impactan sobre la deposición
- e) Finalmente, el espesor de la deposición llega a un estado de equilibrio cuando la escoria comienza a fluir, o bien cuando alcanza un peso tan grande que se desprende de los tubos y cae. Según sean la resistencia y características físicas de la deposición, los sopladores de aire o de vapor tienen que controlar y eliminar la mayor parte de la misma; la deposición base queda adherida al tubo, facilitando deposiciones ulteriores que se suelen acumular con mucha más rapidez.

La corrosión se define como el deterioro de las propiedades intrínsecas de un material debido a la reacción con su entorno. Esta puede ser causada ya sea directamente por especies en fase gaseosa, por depósitos o por una combinación de ambos. En calderas, por ejemplo, estos problemas son considerados como importantes debido a que puede afectar al diseño, tiempo de vida y el funcionamiento de los equipos de combustión, aumentar el costo de operación, disminuir la eficiencia de la caldera, aumentar las emisiones de dióxido de carbono, deteriorar el comportamiento de la combustión con temperaturas elevadas, aumentar los óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono, reducir la transferencia de calor y provocar la corrosión y erosión.

Las principales contribuciones a la incrustación, la formación de depósitos, escorificación y la corrosión provienen de la composición de ceniza junto con azufre y cloro contenidos que facilita la movilidad de muchos compuestos inorgánicos, en particular los compuestos alcalinos incluidos el potasio y el sodio forman silicatos alcalinos que se funden a baja temperaturas (pueden ser inferiores a 700°C), proporcionando así una pegajosa superficie para la deposición mejorada.

Debido a que los combustibles hechos de biomasa contienen una mayor variedad de materiales inorgánicos en comparación con el carbón, los temas de ensuciamiento y corrosión necesitan ser analizados. Esto es particularmente cierto para algunos residuos agrícolas y el crecimiento de nuevos árboles donde la ceniza puede tener contenido de metales alcalinos relativamente altos, sobre todo sodio y potasio. El sodio y el potasio disminuyen el punto de fusión de cenizas y, por lo tanto, puede aumentar la deposición de ceniza y el ensuciamiento de tubo de la caldera.

Existen diversos métodos para predecir la formación de escoria y el ensuciamiento debido a la combustión de los combustibles de biomasa, los cuales son una adaptación de índices aplicados a la industria del carbón. Uno de dichos métodos es el cálculo del índice de alcali, el cual se basa en calcular el peso en kilogramos de alcali ($K_2O + Na_2O$) por giga Joule (GJ) del poder calorífico del combustible, todo esto multiplicado por el porcentaje de cenizas de la biomasa.

El índice de alcalinidad (I.A.) revela la tendencia de formar aglomerados. Los valores mayores a 0.17 kg GJ⁻¹ llevan a probabilidades de *fouling*, mientras que los valores mayores a 0.34 kg GJ⁻¹ sugieren la certeza de *fouling*.

La fórmula es expresada de la siguiente manera: [18]

$$(I.A.) = \frac{kg (Na_2O + K_2O)}{GJ} = \frac{\% Na_2O + \% K_2O \times \% Cenizas}{PCS} \quad (EC 1)$$

Donde los valores resultantes del índice determinan si existe la posibilidad o no de algún problema de escorificación (*slagging*).

Tabla 1.3
Interpretación de los índices de álcalis [42]

Índice de Álcali	Efectos
0.17 – 0.34	Mediana posibilidad de <i>slagging</i>
> 0.34	Alta posibilidad de <i>slagging</i>

Otro método importante para predecir el fenómeno es escorificación es mediante el radio base/ácido:

$$R_{B/A} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$$

La tasa de ácido/base ($R_{B/A}$) estima la probabilidad de la fusión de la ceniza. Entre más alta la $R_{B/A}$, mayor es la probabilidad de cenizas fundidas. Pero este índice debe interpretarse con cautela porque, como la biomasa no sigue la misma tendencia que el carbón, este indicador parece no tener el mismo significado para la biomasa. Una mejor estimación de la fusibilidad de la ceniza es dada por la prueba de fusibilidad en atmósfera de reducción, la cual se detalla a continuación.

A esta ecuación se le hace una corrección en base a las concentraciones de cloro y azufre presentes en la biomasa, para así poder determinar el impacto que genera en la formación de escoria. [21]

$$R_s = R_{B/A} \times S^d \quad (EC 2)$$

S^d : es el porcentaje de azufre y cloro en base seca.

Tabla 1.4
Interpretación del R_s [21]

R_s	Efectos
< 0.6	Baja posibilidad de <i>slagging</i>
0.6 – 2.0	Mediana posibilidad de <i>slagging</i>
2.0 – 2.6	Alta posibilidad de <i>slagging</i>
> 2.6	Severa posibilidad de <i>slagging</i>

Otro parámetro utilizado para identificar la posibilidad de formación de escoria o corrosión es en el contenido de cloro presente en el combustible de la biomasa.

Tabla 1.5
Interpretación del porcentaje de cloro [22]

Cl (%)	Efectos
< 0.2	Baja posibilidad de <i>slagging</i>
0.2 – 0.3	Mediana posibilidad de <i>slagging</i>
0.3 – 0.5	Alta posibilidad de <i>slagging</i>
> 0.5	Muy alta posibilidad de <i>slagging</i>

Existe también el radio de índice de viscosidad de escoria:

$$S_R = \frac{SiO_2 \times 100}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO} \quad (EC 3)$$

Tabla 1.6
Interpretación del índice de viscosidad de la escoria

S _R	Efectos
72-80	Baja posibilidad de <i>slagging</i>
72 – 65	Mediana/Alta posibilidad de <i>slagging</i>
65-50	Severa posibilidad de <i>slagging</i>

Por último existe el índice de incrustaciones (*fouling*) el cual se basa en el radio base-ácido (F_U) pero con mayor importancia en los álcalis. De esta manera, se estudia la inclusión del cloro y azufre no tomados en cuenta antes, los cuales influyen en la vaporización de los elementos alcalinos. [21]

Aunque índices distintos dan información cualitativa sobre las tendencias de *fouling* de un combustible, se debe notar que sólo dan una idea preliminar de lo que podría ocurrir, ya que el comportamiento real depende de las características específicas del proceso a la hora de combustionar la biomasa en cuestión.

$$F_U = R_{B/A} \times Na_2O + K_2O \quad (EC 4)$$

Tabla 1.7
 Interpretación del índice de *fouling* [21]

F_u	Efectos
< 0.6	Baja posibilidad de <i>fouling</i>
0.6 - 40	Alta posibilidad de <i>fouling</i>
>40	Severa posibilidad de <i>fouling</i>

 Tabla 1.8
 Resumen de índices para determinación de presencia de *slagging* & *fouling*.
 Fuente: Elaboración propia

Ecuación	Índice	Probabilidad de <i>slagging</i>				Fórmula
		baja	mediana	alta	severa	
1	I.A.		0,17-0,34	>0,34	–	$I.A. = ((\%Na_2O + \%K_2O) \times \%Cenizas)/PCS$
2	Rs	< 0,6	0,6-2,0	2,0-2,6	>2,6	$R_b = R_{B/A} \times S_d$
	%Cl	< 0,2	0,2-0,3	0,3-0,5	>0,5	
3	SR	72-80	72-65	65-50		$SR = (SiO_2 \times 100) / (SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO)$
Ecuación	Índice	Probabilidad de <i>fouling</i>			Fórmula	
4	FU	<0,6	0,6-40	>40	$F_U = R_{B/A} \times (\%Na_2O + \%K_2O)$	

Con la determinación de todos los índices de *slagging* & *fouling* es cuando se pueden apreciar de manera definitiva si existirán problemas de formación de escorias e incrustaciones al momento de utilizar las HCA en procesos de combustión. La principal causa de estos elementos es la presencia de alcalis y el cloro y azufre presentes, por lo que es necesario definir pre-tratamientos para disminuir estos problemas causados por el alcalis.

1.9 Métodos de pre-tratamiento para la mejora de propiedades de la biomasa

Estudios previos de investigadores han tratado de resolver estos problemas que genera la biomasa encontrando pre-tratamientos con el fin de mejorar sus propiedades al momento de utilizar estas en el proceso de combustión y co-combustión. El propósito es convertir la biomasa en un combustible homogéneo con un alto nivel de densidad energética con propiedades admisibles para su uso óptimo, evitando los efectos adversos por ciertas características como es el exceso de humedad.

Dependiendo de la humedad relativa de la biomasa, los pre-tratamientos se pueden dividir tanto para biomásas secas (menor al 50% en base húmeda) como para las biomásas húmedas (mayor al 50% en base húmeda).

1.9.1 Pre-tratamiento físico

Por medio de diversas técnicas, el objetivo de este pre-tratamiento es tratar de modificar solo las características físicas de la biomasa, sin afectar el aspecto de composición química.

Reducción de humedad: Este pre-tratamiento se consigue mediante el secado de la biomasa el cual puede realizarse de manera natural apilando la materia en pilas, o bien de manera forzada, con sistemas de secado industriales. El secado natural consiste en dejar que el material pierda humedad y lo transfiera al ambiente que lo rodea; para esto las condiciones climáticas deben ser medianamente favorables: humedad relativa baja, escasez de lluvias y calentamiento solar. En este caso la reducción de humedad puede ser de 20 a 30%. En el caso del secado forzado la reducción de humedad del residuo se da mediante un aporte de energía externo suministrado normalmente en forma de calor. Para este método existen secaderos directos e indirectos siendo los cuales se eligen según la capacidad económica del que los use. [24]

Reducción granulométrica: El objetivo de este pre-tratamiento es transformar la biomasa inicial en piezas de menor tamaño: astillas, aserrín, polvo, etc. se diferencia entre la disgregación, el triturado, el astillado y la molienda. La diferencia entre ellas es el tamaño final obtenido, mayor para el triturado y menor para la molienda, así como las tecnologías disponibles para realizarlo. Los sistemas de disgregación permiten desintegrar el material empacado en las piezas que lo conforman; el triturado consiste en transformar piezas de biomasa de grandes dimensiones (troncos, tocones, ramas, etc.) en piezas más pequeñas y en función del método empleado para la trituración puede efectuarse a baja velocidad o alta velocidad; el astillado consiste en sistemas de rotación rápida que transforman biomasa de tamaño intermedio (ramas o troncos de diámetro pequeño) en astillas desde pocos a varios centímetros; finalmente, la molienda se aplica normalmente cuando se desea conseguir combustibles de menor tamaño que las astillas por los requerimientos del uso final. La molienda es necesaria

cuando se necesita fabricar productos densificados como pellets y briquetas o cuando la tecnología de aprovechamiento energético lo requiere (por ejemplo, combustión pulverizada). [24]

Lixiviación/lavado: Como se ha mencionado antes, los problemas de la biomasa para procesos de combustión y co-combustión incluyen la formación de escoria, depósito de ceniza, corrosión, aglomeración y problemas químicos debido a la presencia de Cl, Na y K; ante esto, el lavado y lixiviación de agua se presentan como tratamientos reductores de compuestos de alcalis de la biomasa. Existe también el método de lavado en lluvia de agua el cual se lleva al punto de precipitación en el campo de siembra y se espera a que este seque para la posterior cosecha. El potasio y cloro son reducidos parcialmente por el baño de lluvia, niebla o rocío y el lixiviado puede ser eliminado a través del tratamiento en la tierra, devolviendo nutrientes valiosos a la tierra. [25]

1.9.2 Pre-tratamiento de densificado

Los procesos de densificación o compactación se aplican cuando se desea obtener un incremento de la densidad energética de la biomasa, así como la mejora de sus propiedades como combustible alternativo. Una opción puede ser crear un material empaquetado para mejorar el transporte, y que posteriormente es disgregado y triturado. Otra opción es la creación de pellets y briquetas, que además de mejorar la compactación para el transporte, son utilizados directamente como combustible por tener propiedades homogéneas.

Generalmente para estos procesos de briquetado y peletizado se utilizan materiales residuales que provienen de los procesos de transformación de la madera (serrines, virutas, polvo de lijado, etc.) o sub-productos agrícolas (cáscara de arroz, de girasol, etc.) Antes se le debe aplicar a este material original una serie de tratamientos tales como el secado, astillado y/o molienda. Luego este material se calienta y se comprime, aglomerando sus partículas y formando un sólido compacto. [24]

1.9.3 Pre-tratamiento térmico

Es el tratamiento en el cual la biomasa es modificada a partir de los cambios de estado que pueda sufrir la estructura de la misma.

Torrefacción: es un proceso de calentamiento que busca generar cambios físico-químicos en el material tratado para dotarlo de propiedades diferentes a las iniciales. Este proceso es más utilizado en el café, ya que trata de preservar y dotar al grano de un aroma apropiado. Para los biocombustibles, la torrefacción genera características muy interesantes para su gestión y valorización. El material pierde humedad y se convierte en higroscópico (no absorbe humedad), de manera que su almacenamiento puede realizarse al aire libre sin que ello perjudique sus propiedades. Ante esto, el material resulta estable frente a la degradación de micro-organismos y evitan problemas de biodegradación. Además, el material pierde elasticidad y puede molerse con mayor facilidad. [24]

Pirolisis: es la descomposición de la materia orgánica por medio de aporte de energía en forma de calor en una atmósfera inerte o de vacío. Con esto se obtiene un residuo carbonoso, gases condensables y productos gaseosos. Los productos finales obtenibles por medio de la pirolisis varían de acuerdo a la velocidad de calentamiento, tiempo de residencia, temperatura y presión. Desde el punto de vista del objetivo a conseguir, la pirolisis busca la obtención de fracciones sólidas, líquidas o gaseosas a partir de la biomasa, con el objetivo de utilizarlas en la generación termo-eléctrica, o aprovechar su alto valor añadido en el mercado. [24]

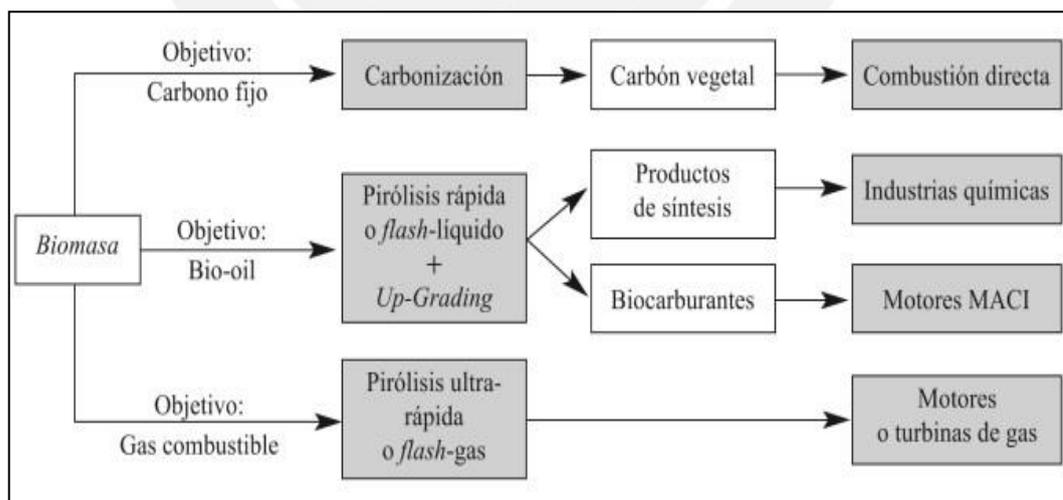


Figura 1.8

Clasificación por objetivos de pirolisis [24]

Gasificación: es un proceso termo-químico en el cual la materia carbonada es transformada en un gas combustible con poder calorífico, mediante una serie de reacciones generadas por altas temperaturas y con la presencia de un agente gasificante. El gas resultante permite el aprovechamiento de dicha biomasa en turbinas de gas, ciclos combinados o motores alternativos de combustión interna.

Luego del calentamiento inicial el cual promueve el craqueo de los componentes de la biomasa, las fracciones orgánicas ligeras se escapan de la materia sólida y se re-combinan, gracias a las altas temperaturas locales, con el agente gasificante, esto es, con los gases reactivos introducidos en las zonas donde se cree tenga lugar las reacciones de gasificación. Los agentes gasificantes que promueven este pre-tratamiento pueden ser: hidrógeno, vapor de agua, oxígeno o aire. [24]

1.9.4 Pre-tratamiento biológico

La biomasa es sometida a determinados micro-organismos o enzimas, con el objetivo de encontrar una variación de sus propiedades a partir de la degradación de la misma.

Deslignificación: es un enfoque atractivo para el tratamiento previo de la biomasa lignocelulósica. El proceso es adecuado ya que requiere de bajo consumo de energía, y produce baja formación de sustancias tóxicas a partir de microbios.

Tratamiento microbiano: en ellos se incluye los hongos como los de podredumbre blanca, marrón y blanda, además de bacterias. Los de podredumbre marrón y blanda, degradan principalmente los polisacáridos de plantas con un mínimo de degradación de la lignina, mientras los hongos de podredumbre blanca son capaces de completar la mineralización tanto de la lignina como del polisacárido. Sin embargo, este tratamiento es muy lento y algunos componentes importantes como la hemicelulosa y celulosa de la biomasa también se consumen, ya sea por el mismo microorganismo o por algunos invasores externos.

1.9.5 Pre-tratamiento químico

La biomasa cambia su composición química, a partir de reacciones entre sus elementos constituyentes.

Ozonólisis: es una estrategia prometedora de pre-tratamiento debido a que está demostrado el potencial para materiales lignocelulósicos. Utiliza numerosas mezclas de disolventes orgánicos o acuosos, tales como el etanol, acetona, etilenglicol, trietilenglicol, alcohol de tetrahidrofurfurilo, glicerol, fenol acuoso, y butanol acuoso. Sus principales fracciones luego del pre-tratamiento de la biomasa son: fibras celulósicas, lignina sólida obtenida después de la eliminación del disolvente volátil, y solución líquida de azúcares de hemicelulosa principalmente de xilosa.

Durante la ozonólisis, es necesario eliminar los disolventes del sistema mediante el uso de técnicas de extracción y separación apropiadas como la evaporación y condensación. Los disolventes deben ser separados con la finalidad de eliminar factores inhibidores para la hidrólisis enzimática y los microorganismos fermentativos. Esto produce un sustrato de celulosa altamente digestible por casi todo tipo de materia prima y la lignina la cual posee un alto potencial de utilización la cual puede ser recuperada después del tratamiento.

Irradiación: por medio de rayos gamma, se irradia con la finalidad de romper los acoplamientos glucosídicos, como consecuencia aumenta el área de la superficie de la celulosa reduciendo así su cristalinidad. Este método de pre-tratamiento es considerado costoso para operaciones a gran escala con considerables preocupaciones medioambientales y de seguridad.

1.9.6 Pre-tratamiento físico-químico

Modificación de las características físicas de la biomasa, a partir de un cambio de la composición química de la misma.

Lavado a alta temperatura: es un pre-tratamiento hidrotérmico que utiliza agua a una alta temperatura para mantener el estado líquido y causar alteraciones en la estructura de la lignocelulosa. No requiere de ningún catalizador, y por lo general las temperaturas de operación varían de 150°C a 230°C para tiempos de residencia desde el orden de los segundos a horas.

Explosión de vapor: pre-tratamiento en el que la biomasa se somete a vapor presurizado durante un periodo determinado de tiempo, para luego despresurizar violentamente. Este proceso hace que los productos sean objeto de una

descompresión explosiva. Una característica importante de este método está relacionada con el tiempo de reacción, desde varios segundos a unos pocos minutos antes que el material sea expuesto a la presión atmosférica. Los factores más importantes que afectan la eficacia de la explosión de vapor son: el tamaño de partícula, la temperatura, el tiempo de residencia, y el efecto combinado de la temperatura y el tiempo. Para la caña de azúcar, por ejemplo, se necesita temperaturas de funcionamiento de 188°C a 243°C con un tiempo de reacción entre 0.5 y 0.44 minutos.

Explosión fibrosa con amoníaco: es un proceso en el que la biomasa lignocelulósica tiene contacto con amoníaco acuoso líquido a temperatura y presión moderada o alta durante un periodo de tiempo, y luego la presión se reduce violentamente. Típicamente las condiciones de funcionamiento incluyen amoníaco acuoso, de 1 a 2 kg de biomasa por kg de NH₃ seco y los valores de pH deben ser menores a 12.

El amoníaco tiene un marcado efecto sobre la lignocelulosa causando hinchazón y alteraciones físicas en las fibras de la biomasa, descristalización parcial de la celulosa, y la descomposición de los enlaces lignina-carbohidratos. Solo se produce un material sólido debido a que durante el tratamiento solo una pequeña cantidad del material es solubilizado y la mayoría de los componentes de la biomasa permanece en la fracción sólida. Por tanto, se necesita tanto la celulosa como la hemicelulosa para el proceso de hidrólisis enzimática.

1.9.7 Complemento del proceso de lavado como pre-tratamiento físico

En este tema se complementará la información del lavado o lixiviación como pre-tratamiento físico debido a que es el método seleccionado por la tesis para realizar los ensayos correspondientes.

El potasio (K), sodio (Na), azufre (S), cloro (Cl), zinc (Zn) y plomo (Pb) en el combustible determinan la masa de los aerosoles, la cantidad de emisiones así como el comportamiento químico de las biomásas que determinan problemas de corrosión y ensuciamiento. Debido a esto, diversos métodos han sido desarrollados con el fin de reducir las concentraciones de elementos de las HCA que acarrear efectos adversos, por lo que la presente investigación tiene como fin usar un pre-tratamiento del orden físico para la mejora de las propiedades de las HCA, siendo el lavado una alternativa atractiva y efectiva, ya que el impacto económico es mediano respecto a los demás

pre-tratamientos, se basa principalmente en la reducción de alcális, aumentando su poder calorífico, y así eliminando los problemas de corrosión, generación de escorias e incrustaciones, además de no influenciar en la composición química de la biomasa. [26] [25]

Diversos investigadores han estudiado el comportamiento de las biomásas al momento de combustionar y la generación de problemas que estas acarrearán.

Steenari, B.M. et al. (1998) estudiaron la formación de componentes cristalinos (carbonatos, sulfatos, cloruros), sus reacciones a Altas temperaturas en ceniza de paja de trigo y el comportamiento de la sinterización y fusión Durante la combustión de la paja a bajas temperaturas. También se encuentra el potasio a bajas temperaturas en grandes cantidades debido a su bajo punto de fusión. A 800°C comienzan a aparecer los óxidos y silicatos.

Nielsen, H.P. et al. (2000) por su parte estudiaron la deposición generada por la combustión de la paja de trigo, la cual consiste en partículas de ceniza, cantidades limitadas de material condensado que consiste básicamente en silicio, potasio, calcio y pequeñas cantidades de fósforo, cloro y sulfuro. En la fase vapor la deposición consiste en partículas con forma angular y una forma esponjosa de sulfato de potasio (K_2SO_4).

En la fase de pirolisis para producir biocombustibles, el alcális (sodio y calcio) contenido en la biomasa ejerce un efecto catalítico en la pirolisis del material celuloso, y los iones inorgánicos pueden disminuir la temperatura de descomposición de la celulosa, como lo indica el diferencial termo gravimétrico en los picos de celulosa y hemicelulosa. Las características tanto físicas y químicas del biocombustible también se ven afectadas debido al alcális presente y sus altos componentes inorgánicos en la biomasa los cuales catalizan las reacciones de polimerización aumentando su viscosidad.

Durante el proceso de gasificación con dióxido de carbono, los metales de la biomasa (calcio, potasio y sodio) ejercen una acción catalítica y el potasio pierde su actividad catalítica por la presencia de silicio.

También se reportó que a temperaturas menores a 700°C, la gasificación catalítica del Carbón con Niquel o Hierro, desactiva ambos metales los cuales tienen bastante contenido en la ceniza.

Los constituyentes inorgánicos pueden evitar porosidades bloqueando las entradas en los poros en los procesos de activación del carbón en compuestos como pajas, semillas de frutas y cascara. Algunas investigaciones indican que el área especial del carbón activado apenas excede los 800 m²/g si el inicial tiene alto contenido de constituyentes inorgánicos.

Así como los problemas que generaban la combustión de la biomasa fueron estudiados por algunos investigadores con el fin de reducir las concentraciones de elementos de las HCA que acarrear efectos adversos, también existieron investigaciones para disminuir los problemas generados luego de la combustión, por lo que la presente investigación tiene como fin usar un pre-tratamiento del orden físico para la mejora de las propiedades de las HCA, siendo el lavado una alternativa atractiva, efectiva, y de bajo costo ya que además no influencia en la composición de la biomasa.

El lavado o lixiviación de las HCA puede ser desarrollada de diferentes formas, por ejemplo puede ser expuesto después de la extracción al agua de lluvia o puede ser lavado mediante parámetros controlados en un ambiente adecuado. El lavado reduce principalmente el contenido de cloro y potasio (metales alcalinos) de una manera significativa. [27] [25]

- Lixiviación en agua

La lixiviación del agua por ejemplo es uno de los métodos que puede remover la mayoría de iones solubles como son potasio, cloro, etc., siendo útil en la industria azucarera.

Otro método, el más simple, para remover componentes inorgánicos es el lavado en lluvia de agua el cual se lo lleva al punto de precipitación en el campo de siembra y se espera a que seque para la posterior cosecha. El potasio y cloro son reducidos parcialmente por el baño de lluvia, niebla o rocío y el lixiviado puede ser eliminado a través del tratamiento en la tierra, devolviendo nutrientes valiosos a la tierra.

Luego de analizar estos métodos de remoción de constituyentes inorgánicos, la lixiviación del agua parece ser el mejor método por ser eficiente, rápido y de bajo costo. No solo remueve estos elementos inorgánicos del agua soluble K, Na, Ca, Cl, S, y Mg sino que además en el proceso de conversión térmica de biomasa, mejora la calidad de la ceniza restante.

Este método depende del tipo de material a tratar y las condiciones de tratamiento, incluyendo el tiempo de lixiviación, el ratio de agua de biomasa, temperatura del agua, y el tamaño de partícula de la biomasa. El agua luego del método puede depositarse en el campo o reutilizarse por destilación u osmosis reversa.

Jenkins, B.M. et al. (1996) descubrieron que también existe un lavado multi-paso en el cual la biomasa es pirolizada a una temperatura moderada en el que el potasio es retenido en el carbón. Luego el potasio y el cloro residual son extraídos del carbón por lavado en agua. El resultado indica que el nivel de liberación del cloro es más rápido que el del potasio. Además la liberación del potasio dependió bastante de la temperatura del agua y del tipo de carbón. En comparación con el solo paso directo de lavado con agua, debido a que el material a lavar es más pequeño, la cantidad de agua necesaria para el proceso es menor, y como la pirolisis del gas es generada en el proceso leve de pirolisis, entonces puede ser quemado como combustible directamente. Entonces, el carbón generado en la primera fase de pirolisis es más fácil de moler que la biomasa.

Fahmi, R. et al. en el año 2008 realizaron el lavado del *switchgrass* que en español se le llama pasto varilla o pasto aguja, la cual es una planta perenne nativa en temporada cálida oriunda de Canadá, con agua ionizada a 25°C por dos horas logrando un 80% de remoción de metales alcalinos. Luego, al comparar las muestras antes y después de la remoción, se obtuvo que el rendimiento, la estabilidad y la calidad de los productos pirolizados fueran afectados por el contenido de constituyentes inorgánicos ya que algunos elementos inorgánicos ejercen una acción catalítica para la pirolisis.

Ya que algunos elementos no son solubles al agua, se usa ácido diluido para remover estos elementos de la biomasa que son ácido clorhídrico (HCl), ácido fluorhídrico (HF), y ácido nítrico (HNO₃). [27] [25]

- Lixiviación en ácido

La lixiviación en ácido puede remover más componentes inorgánicos que el lavado en agua, sin embargo este método genera un problema ambiental ya que la lixiviación del pre-tratamiento no es recomendable para liberar al medio ambiente, restringiendo así sus aplicaciones a gran escala. El lavado en ácido hidroliza la hemicelulosa y celulosa en pequeñas moléculas las cuales podrían producir un impacto negativo en la biomasa y sus productos derivados.

Suzuki, T. et al. evaluaron en los años 1994, 1996 y 1999 la remoción de constituyentes inorgánicos de dos cortezas de madera, de roble y de alerce (tipo de pino) con lixiviación en HNO₃ y HCl. El resultado dedujo que con ambos tratamientos se obtiene el mismo resultado, pero el HNO₃ desarrolla una porosidad adicional en el tejido celuloso a un mayor grado que el HCl. Como resultado, se logra una mejor dispersión de catalizadores impregnados en partículas lo que lleva a una mayor actividad catalítica.

- Comparación de tratamientos de lixiviación en agua y en ácido

Luego de describir tanto la lixiviación con agua y con ácido, es recomendable realizar una comparación para determinar el pre-tratamiento que genera mejores resultados en la biomasa.

Los ensayos para el *switchgrass* fueron dos grandes muestras las cuales fueron mojadas y sumergidas en ácido y agua respectivamente bajo diferentes condiciones de lixiviación. Luego, la solución fue filtrada y lavada con agua destilada a un valor constante de pH. Las muestras lixiviadas fueron secadas a 105°C por 24 horas. Los resultados fueron los siguientes:

Ambos tamaños de fraccionamiento y lixiviación fueron aplicados para remover elementos inorgánicos del *switchgrass* y la corteza de pino. El tamaño fraccionado resultó ser efectivo en remover un 20% de elementos inorgánicos tanto para el *switchgrass* heterogéneo como para la corteza de pino homogéneo. La lixiviación en agua fue efectiva en un 40% de remoción de constituyentes inorgánicos del *switchgrass* por su alto contenido de elementos inorgánicos en agua soluble. Sin embargo, la lixiviación en agua para la corteza de pino no fue efectiva en la remoción de constituyentes inorgánicos debido a su bajo contenido de compuestos inorgánicos en agua soluble. [27]

La lixiviación mediante una solución de ácido diluido removi6 la mayoría de constituyentes inorgánicos de ambas muestras sin embargo es un proceso costoso y no recomendable para la HCA.

La adecuada selecci6n de un m6todo de remoci6n de constituyentes inorgánicos depende en gran medida del costo de las diferentes soluciones de ácidos, en la tolerancia de los procesos ante elementos externos presentes por el tratamiento y la aplicaci6n de la biomasa tratada la cual necesita ser evaluada sobre una base caso por caso. [27]

- Desventajas del lavado

El m6todo de lavado parece ser la opci6n m6s rentable, sin embargo presenta ciertas desventajas, ya que el proceso en s3 genera una reducci6n del poder calorífico de la biomasa en apropiadamente 8%. Sin embargo, esta p6rdida se ve anulada por el incremento del poder calorífico que se da al disminuir principalmente sustancias como el cloro y potasio; y por el aumento de vida de las calderas al anular problemas de corrosi6n y ensuciamiento.

En la actualidad, el lavado de la biomasa solo se da en plantas de pequeña o mediana escala a pesar de ser un proceso econ6mico y, hasta los resultados encontrados, muy eficiente en su prop6sito.

El lavado tambi6n posee otras ventajas, por ejemplo en la posterior aplicaci6n de las cenizas producto de la co-combusti6n. Esto debido a que las cenizas no contienen sales alcalinas u otras impurezas, y pueden ser utilizadas como aditamentos en el cemento. As3 mismo como el cloro es necesario en la formaci6n de dioxinas y furanos, el lavado tambi6n contribuye a la reducci6n del nivel de emisiones de estos.

Existen diferentes t6cnicas para realizar el lavado con agua, ya sea verter agua, del grifo o agua destilada, a la biomasa que se encuentra en una malla fina. El agua usada y las part3culas finas terminan debajo la muestra. Otra opci6n es sumergiendo y remojando las muestras en agua destilada a una temperatura superior a la ambiental. Por ultimo existe tambi6n el lavado a la intemperie, con agua de lluvia.

1.10 Estudios previos en la PUCP

El Grupo de investigación CARBON – BIOMASA PUCP se encarga desde hace más de 22 años a la investigación y desarrollo de procesos de conversión de la biomasa y del carbón mineral en combustibles y energía, así como en su transferencia al mercado. En esta gran trayectoria, se han realizado varias investigaciones así como la implementación y desarrollo de proyectos. Dentro de los alcances ya obtenidos, está el desarrollo del Atlas de Bioenergía del Perú (BIOMAP) dentro del proyecto de BIOPLAT PERÚ; la producción de bio-briquetas, el diseño de cocinas y la publicación de artículos de investigación.

Además desde ya un tiempo se viene desarrollando el proyecto FINCYT, el cual analiza la producción de energía a partir de las hojas de caña de azúcar (HCA) unido a la obtención de una puzolana artificial-material de adición del cemento. Las HCA serán transformadas en procesos de densificación y por medio de pre-tratamientos, para facilitar su aprovechamiento energético mediante procesos termoquímicos, a partir de la mejora de sus propiedades; y las cenizas generadas en el proceso se conviertan en material de adición al cemento.

Además, trabajos previos han mostrado la factibilidad de remover los metales alcalinos mediante el pre-tratamiento de lavado empleando agua destilada a 80°C durante 30 minutos con agitación periódica. Lo que ahora se busca es lograr la optimización del proceso mediante la variación de temperaturas y tiempo en el que la HCA estuvo expuesta en el agua, y de agitación periódica para lograr obtener un óptimo que resulte menos costoso y más eficiente.

Esta propuesta permitirá que empresas cañeras dispongan de una alternativa viable en cuanto al aprovechamiento de sus desechos de cosecha, utilizando estos como fuente de energía renovable y al mismo tiempo generar materias primas de bajo costo como son el material cementicio suplementario. Además la adición al cemento de cenizas con características reactivas a partir de las HCA, representa para las industrias cementeras beneficios técnicos y ecológicos al mejorar las propiedades del cemento (Aitcin 2000) y al mismo tiempo reducir el consumo de combustibles y las emisiones de gases de efecto invernadero. El resultado final tendrá un balance neutro de dióxido de carbono (CO₂).

CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN DE LA HOJA DE CAÑA

El presente capítulo abarca lo concerniente a la hoja de caña, específicamente la biomasa a tratar en los ensayos. Se hablará de su origen, morfología, producción a nivel mundial y en el Perú, y mediante análisis expuestos en el capítulo 1 (análisis inmediato, elemental, porcentaje de ceniza y poder calorífico) los cuales fueron realizados en un laboratorio externo, se podrá hacer un estudio con miras a su empleo en procesos de combustión; así como un análisis de los posibles problemas que la HCA acarrea debido a su composición química, para de esta manera hablar de pre-tratamientos de mejora de propiedades a la HCA con miras a procesos de combustión.

2.1 Introducción a la hoja de caña

La hoja de caña proviene de la caña de azúcar, o también llamada *Saccharum officinarum*, la cual pertenece a la familia de las gramíneas tropicales. Se trata de una planta tropical nativa de Asia Meridional y se cultiva principalmente en Brasil, Centroamérica, África, Guyana, Martinica, Guadalupe. Posee un metabolismo C4 y es sensible a los nematodos. Se le considera un recurso natural renovable ya que es fuente de azúcar, biocombustible, fibra, fertilizante y muchos otros productos y subproductos con sustentabilidad ecológica. De los subproductos más importantes de la industria azucarera se encuentran las melazas y el bagazo.

Su tallo es leñoso, de aproximadamente 2 metros de altura y lleno de un tejido esponjoso y dulce del que se extrae el azúcar. Sus hojas son largas, lampiñas y flores purpúreas en panoja piramidal. El tallo es el que acumula un jugo rico en sacarosa, compuesto que al ser extraído y cristalizado forma el azúcar tan comercializado en el mundo.

2.2 Morfología de la hoja de caña de azúcar

La hoja de caña nace en los entrenudos del tronco. A medida que crece la caña, las hojas más bajas se secan, caen y son reemplazadas por las que crecen en los entrenudos superiores.

La hoja de caña se compone principalmente de dos partes: la lámina foliar (o limbo) y la vaina (o yagua). Tanto la lámina como la vaina están unidas por medio de una lígula, teniendo en cada extremo una aurícula con pubescencia, y separadas por la articulación de unión del limbo, el cual cubre completamente el tallo, extendiéndose casi por todo el entrenudo, como se observa en la figura 1.1. Además el tallo de la caña contiene entre 73-76% de agua, 8-15% de sacarosa y 11-16% de fibra las cuales varían según el tipo de cultivo y variedad de planta.

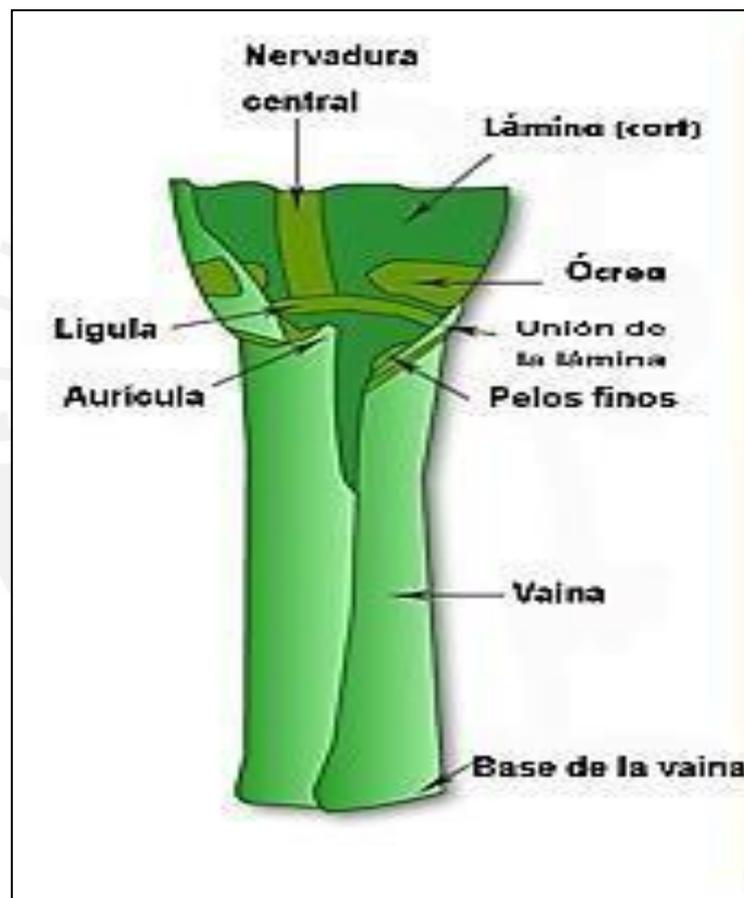


Figura 2.1
Componentes de la hoja de caña

Fuente: NETAFIM

2.2.1 Lámina foliar o limbo

La lámina foliar es la más importante para el proceso de fotosíntesis, tiene una nervadura central que recorre en toda su longitud y paralela a ella se encuentran las nervaduras secundarias. Los bordes presentan prominencias continuas en forma

aserrada. La lámina puede alcanzar una longitud de hasta 2 m y su ancho varía entre 3 y 7 cm.

2.2.2 Vaina o yagua

La vaina es la base de la hoja que envuelve el tallo y sirve de soporte de la lámina foliar, su forma es tubular y cónica hacia el cuello, su color es generalmente verde claro siendo joven, y un tono rojizo en su completo desarrollo. En ella se aprecian dos caras: una interior generalmente blanquecina y lisa y otra exterior de color verde, la cual presenta abundantes pilosidades o vellos. La intensidad de adherencia de las vainas a los tallos difiere a sus distintas variedades, siendo preferible el fácil deshoje para una mejor quema y el corte, además que disminuyen las impurezas durante la molienda.

2.3 Tipos de hojas de caña

De acuerdo a los residuos agrícolas de cosecha se pueden distinguir tipos de hojas de caña según su color, textura y tamaño.

Hojas secas: este componente de los residuos presenta un contenido de celulosa similar al de los tallos de caña, pero con mayor contenido de sílice. Su contenido de fibra seca está alrededor de 90 %. Su forma alargada y estrecha, con cierta resistencia a la flexión, hace que su presencia en un bulto de caña adquiera mayor volumen. Se puede reducir su tamaño con facilidad en molinos de martillo.

Hojas verdes: Su contenido en fibra seca está alrededor de 35 % y el contenido de sus jugos tiende a parecerse al del cogollo. Tiene las características morfológicas de las hojas secas.

Cogollo: Son las hojas verdes de las hojas enrolladas circularmente alrededor de la yema y de los canutos tiernos sin madurar. Tiene una longitud que puede variar entre los 10 y los 30 cm. con una constitución física similar al tallo de caña, pero su jugo es rico en azúcares y pobre en sacarosa.

2.4 Producción de hoja de caña en el Perú

En el Perú la siembra de caña de azúcar se da tanto en la Costa, Sierra y Selva, siendo la Costa la zona de mayor producción más específicamente en los departamentos de La Libertad y Lambayeque.

En estas zonas siempre han existido gran cantidad de pequeños agricultores independientes la mayoría de ellos haciendo agricultura con baja o nula rentabilidad. Sin embargo existe hoy en día un interés en potenciar la industria de la producción de caña de azúcar mediante la inversión privada lo cual ha tenido resultados positivos en los últimos años. Prueba de esto es la creciente

Tabla 2.1

Superficie cosechada, producción, rendimiento, precios, exportación e importación de la caña en el Perú [29]

12.8 CAÑA DE AZÚCAR - SUPERFICIE COSECHADA, PRODUCCIÓN, RENDIMIENTO, PRECIOS, EXPORTACIÓN E IMPORTACIÓN DE AZÚCAR, 2003-2013

Año	Caña de azúcar				Azúcar comercial						
	Superficie cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t/ha)	Precio pagado al productor (S/. x t)	Producción (t)	Exportación (t)	Importación (t)	Valor unitario de Exportación (US\$ x t)	Valor unitario de Importación (US\$ x t)		
									FOB	CIF	
2003	77 720	3 863 958	114	...	958 808	61 129	10 977	314	220	270	
2004	71 291	3 945 686	97	...	747 571	41 354	180 944	352	242	277	
2005	61 547	3 304 065	102	...	694 599	32 188	252 475	395	264	294	
2006	62 064	7 245 833	117	...	805 133	108 565	244 459	396	407	437	
2007	67 650	3 228 623	122	...	915 636	48 272	246 529	389	340	370	
2008	69 127	3 395 959	136	...	1 007 170	61 964	208 163	346	347	382	
2009	75 348	3 936 945	132	...	1 064 499	82 120	146 020	435	392	429	
2010	76 983	3 857 855	128	...	1 038 176	93 615	210 547	577	576	619	
2011	80 069	3 884 936	123	...	1 076 215	56 240	190 025	761	714	758	
2012 PV	81 126	10 368 866	128	...	1 106 280	46 610	302 002	651	624	661	
2013 PV	82 205	10 992 240	134	...	1 174 068	74 511	147 916	532	528	560	

t = tonelada. ha = hectárea.

El Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) dio a conocer en el 2013 que la producción de caña de azúcar fue de 924 mil 512 toneladas, cantidad que representó un incremento de 35,0% en comparación a lo registrado el año anterior que totalizó 684 mil 752 toneladas.

Además, los departamentos que presentaron resultados favorables fueron Lambayeque (63,3%), La Libertad (44,6%), Arequipa (31,7%) y Áncash (12,1%).

Esta tendencia se observa claramente en la tabla 1.1 en el cual el crecimiento de la industria cañera ha ido en aumento desde el 2005 hasta el 2012 en donde la producción de caña de azúcar llegó hasta las 10.368,866 toneladas, augurando la misma tendencia en años venideros.

Cabe destacar que también en el 2013, el Perú se ubicó en el puesto 18 de mayores productores de caña de azúcar como se observa en la tabla 2.3.

Tabla 2.2
Producción de la caña de azúcar en departamentos del Perú
Fuente: MINAG-OEEE

Departamentos	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Lambayeque	1,274,400	1,689,427	2,111,538	2,689,532	2,982,819	2,824,848	2,748,163	2,767,051
La Libertad	2,888,892	3,284,025	3,760,283	4,345,865	4,807,415	4,911,755	4,977,202	5,234,476
Ancash	512,587	585,778	613,892	628,015	519,197	578,284	663,722	722,001
Lima	1,545,207	1,591,248	1,681,884	1,641,862	1,560,444	1,293,061	1,445,758	1,582,958
Arequipa	82,979	95,354	116,090	90,685	67,069	52,947	50,091	62,380
TOTAL	6,304,065	7,245,833	8,283,686	9,395,959	9,936,945	9,660,895	9,884,936	10,368,866

En la figura 2.2. Se muestran las equivalencias en TEP (toneladas equivalentes de petróleo) de la producción de hojas de caña en los departamentos con mayores residuos agrícolas de cosecha.



Figura 2.2
Producción de la caña de azúcar en departamentos del Perú
Fuente: Grupo de investigación CARBÓN-BIOMASA PUCP

Tabla 2.3

Países productores de caña de azúcar en el 2013

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación



	País	Toneladas		País	Toneladas
1	Brasil	739'267,042	21	El Salvador	7'179,000
2	India	341'200,000	22	Ecuador	7'158,265
3	China	126'136,000	23	Nicaragua	7'026,599
4	Tailandia	100'096,000	24	Sudán	6'797,900
5	Pakistán	63'749,900	25	Venezuela	6'700,000
6	México	61'182,077	26	Irán	6'200,000
7	Colombia	34'876,332	27	Honduras	6'096,000
8	Indonesia	33'700,000	28	Kenya	5'900,000
9	Filipinas	31'874,000	29	Paraguay	5'544,797
10	EEUU	27'905,943	30	Swazilandia	5'450,000
11	Australia	27'136,082	31	Rep. Dom.	4'771,211
12	Guatemala	26'334,667	32	Bangladesh	4'434,000
13	Argentina	23'700,000	33	Costa Rica	4'411,088
14	Vietnam	20'018,400	34	Zambia	4'000,000
15	Sudáfrica	18'000,000	35	Zimbabue	4'000,000
16	Egipto	16'100,000	36	Mauricio	3'815,782
17	Cuba	14'400,000	37	Mozambique	3'395,000
18	Perú	10'992,240	38	Madagascar	3'350,000
19	Myanmar	9'900,000	39	Uganda	3'350,000
20	Bolivia	8'065,889	40	Tanzania	3'000,000

En la actualidad existen empresas azucareras peruanas las cuales están dispuestas a invertir unos \$700 millones de dólares a mediano plazo para la renovación de sus plantas productoras de azúcar, su transformación en productoras de etanol, y su implementación para cogenerar energía.

Una de estas grandes empresas como Grupo Gloria, que concentra la mayor producción azucarera del país, con sus operaciones en las empresas Cartavio, San Jacinto y Casa Grande además de sus empresas en Ecuador y Argentina, planea invertir US\$ 330 millones entre el 2012 y 2015 para construir un ingenio y plantar caña de azúcar en 9 mil de un total de 15 mil hectáreas adquiridas recientemente en el Proyecto Olmos.

La hoja de caña ocupa un lugar importante en cuanto a residuos agroindustriales no aprovechados. De la producción en toneladas métricas de caña de azúcar producida anualmente, aproximadamente el 31,8% son residuos en hoja y cogollo como se muestra en la Tabla 2.5.

Tabla 2.4
 Principales residuos agroindustriales [40]

Producto	Producción TM	Residuos	Porcentaje%
Arroz con cascara	837.614	Cascarilla - HUSK	22
		Polvillo (COARSE POWDER)	8,5
Caña de Azucar	5.354.667	Hoja y Cogollo (LEAVES)	31,8
		Bagazo (BAGASSE)	36,3
Palma Africana (fruto)	1.434.037	Raquis (Bundel)	20
		Fibra y cascarrilla	15-8
Grano Maiz Duro	700.000	Hoja, tallo y tusa (LEAVES, STALKS, COBS)	68
Soya	78.211	Hoja, tallo y tusa (LEAVES, STALKS, COBS)	67

2.5 Caracterización de la hoja de caña

En la tabla 2.5 se aprecia las propiedades químicas de la hoja de caña tanto para el bagazo como para los residuos agrícolas de la caña con valores aproximados.

Tabla 2.5
 Valores aproximados de las propiedades químicas de la hoja de caña [30]

Elementos químicos	Bagazo (%)	RAC (%)
Carbono	47,00	48,28
Hidrógeno	6,50	5,55
Oxígeno	44,00	45,61
Cenizas	2,50	9,50
Azufre	0,00	0,13
Nitrógeno	-	0,43

Tabla 2.6

Efectos de las propiedades físicas en el proceso de combustión [31]

Propiedades	Efectos
Humedad relativa	Almacenamiento, pérdidas de materia seca, PCI, auto ignición, diseño de planta.
PCI, PCS	Utilidad del combustible, diseño de la planta.
Volátiles	Comportamiento de descomposición térmica.
Contenido de cenizas	Emisiones de polvo: manipulación, uso y depósito de cenizas; tecnología de combustión.
Comportamiento de fusión de ceniza	Seguridad operacional, tecnología de combustión, sistemas de control de procesos, formación de depósitos.
Hongos	Riesgos de salud.
Densidad aparente	Logística de combustible (almacenamiento, transporte, manejo).
Densidad de partículas	Conductividad térmica, descomposición térmica.
Dimensiones, forma y tamaño	Transporte, tecnologías de combustión, seguridad operacional, secado, formación de polvo.
Resistencia a la abrasión	Cambio en la calidad del combustible, segregación, partículas finas.

Tabla 2.7

Efectos de las propiedades químicas en el proceso de combustión [31]

Propiedades	Efectos
Carbón (C)	PCS.
Hidrógeno (H)	PCS, PCI.
Oxígeno (O)	PCS.
Nitrógeno (N)	Emisiones de NO _x -.
Cloro (Cl)	Emisiones de HCl, PCDD/F, corrosión.
Azufre (S)	Emisiones de SO _x -, corrosión.
Fluor (F)	Emisiones de HF, corrosión.
Potasio (K)	Corrosión (intercambiadores de calor, recalentadores), disminución del punto de fusión de las cenizas, formación de aerosoles.
Sodio (Na)	Corrosión (intercambiadores de calor, recalentadores), disminución del punto de fusión de las cenizas, formación de aerosoles.
Magnesio (Mg)	Aumento del punto de fusión de las cenizas, uso de cenizas.
Calcio (Ca)	Aumento del punto de fusión de las cenizas, uso de cenizas.
Fósforo (F)	Uso de cenizas, punto de fusión de cenizas, formación de aerosoles.
Metales pesados	Emisiones, uso de cenizas, formación de aerosoles.

La tabla 2.7 muestra los efectos de las propiedades químicas de la HCA en los procesos de combustión.

En el capítulo 1 se explicó la caracterización de las diferentes biomásas, específicamente en la tabla 2.8 se realiza una comparación de las características más resaltantes de diferentes biomásas, como el poder calorífico, porcentaje de humedad y de cenizas, las cuales son utilizadas con fines energéticos.

Se puede observar que, como era de esperarse, el carbón mineral es más propenso a combustionar debido a su poder calorífico el cual supera a las demás biomásas. Además de su alto poder calorífico, el carbón también posee un bajo contenido de cenizas, y su humedad es cambiante dependiendo de las condiciones con las que se haya trabajado. En cuanto a la cascarilla de arroz, madera, paja, existen rangos de valores de poder calorífico que dependen de las condiciones con las que se haya trabajado, los RAC poseen valores cercanos a las biomásas antes presentadas con ligera ventaja en cuanto a poder calorífico.

Tabla 2.8

Propiedades de diferentes biomásas con fines energéticos. [32]

Tipo	PCI (kJ/kg)	Humedad(%)	Cenizas (%)
Bagazo	7,700–8,000	40–60	1.7–3.8
Cáscaras de cacao	13,000–16,000	7–9	7–14
Cáscaras de coco	18,000	8	4
Cáscaras de café	16,000	10	0.6
Residuos de algodón			
Tallos	16,000	10–20	0.1
Desechos de algodón desmotado	14,000	9	12
Maíz			
Mazorcas	13,000–15,000	10–20	2
Tallos			3–7
Residuos de aceite de palma			
Tallos de fruta	5,000	63	5
Fibras	11,000	40	
Cáscaras	15,000	15	
Desecho	15,000	15	
Turba	9,000–15,000	13–15	1–20
Cascarillas de arroz	14,000	9	19
Paja	12,000	10	4.4
Madera	8,400–17,000	10–60	0.25–1.7
Carbón	25,000–32,000	1–10	0.5–6

Otro aspecto importante son las propiedades químicas de distintas biomásas, como se muestra en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9

Propiedades químicas de diferentes biomásas con fines energéticos. [41]

Tipo de biomasa	Porcentaje del peso (sin humedad)						
	C	H	N	O	S	Cl	Ceniza
Sauce	47,66	5,2	0,3	44,70	0,03	0,01	1,45
Madera suave	52,10	6,10	0,20	39,90	-	-	1,70
Corteza de madera dura	50,35	5,83	0,11	39,62	0,07	0,03	3,99
Madera dura	50,48	6,04	0,17	42,43	0,08	0,02	0,78
Eucalipto	50,43	6,01	0,17	41,53	0,08	0,02	1,76
Roble	49,89	5,98	0,21	42,57	0,05	0,01	1,29
Corteza de pino	52,30	5,80	0,29	38,76	0,03	0,01	2,90
Asserín pino	52,49	6,24	0,15	40,45	0,03	0,04	0,60
Sub-productos agrícolas							
Brizna de trigo	39,07	4,77	0,58	50,17	0,08	0,37	4,96
Caña de azúcar	44,80	5,35	0,38	39,55	0,01	0,12	9,79
Bagazo de caña	46,95	5,47	0,38	39,55	0,01	0,12	9,79
Paja de arroz	39,65	4,88	0,92	35,77	0,12	0,50	18,16
Cascarrilla de arroz	38,68	5,14	0,41	37,45	0,05	0,12	18,15
Paja de maíz	46,91	5,47	0,56	42,78	0,04	0,25	3,99
Olote de maíz	47,79	5,64	0,44	44,71	0,01	0,21	1,2
Fibra de coco	50,29	5,05	0,45	39,63	39,63	0,28	4,14
Carbón mineral	71,70	4,70	1,3	8,30	0,64	0,060	20,70

Tabla 2.10

Característica de las hojas de caña de azúcar virgen

Fuente: ARPL TECNOLOGÍA INDUSTRIAL S.A.

ENSAYOS		HV1-INV			MÉTODO
		base de análisis	base seca	base recibida	
humedad recepción ADL	%			3,0	ASTM D 2013
humedad	%	12,0	-	14,6	ASTM D 3173
cenizas	%	15,1	17,1	14,6	ASTM D 3174
materia volátil	%	60,7	68,9	58,9	ASTM D 3175
carbón fijo	%	12,0	14	12	ASTM D 3172
TOTAL	%	100	100	100	

Poder calorífico bruto	cal/g	3207	3,642	3,111	ASTM D 5865
Poder calorífico neto	cal/g	-	-	2,798	Cálculo

ANÁLISIS ÚLTIMO					
Carbono	%	35,9	40,8	34,9	ASTM D 3178
Hidrógeno	%	5,91	5,19	6,07	-
Azufre	%	0,31	0,35	0,30	ASTM D 3177, met B
Nitrógeno	%	0,26	0,30	0,25	ASTM D 3179
Cloruros	%	0,17	0,20	0,16	ASTM D 3179

ENSAYO		HV1-INV	MÉTODO
Dióxido de silicio, SiO ₂	%	54,8	ARPL PEX-0,4
Trióxido de aluminio, Al ₂ O ₃	%	8,0	-
Trióxido de hierro, Fe ₂ O ₃	%	3,7	-
Óxido de calcio, CaO	%	8,1	-
Óxido de magnesio, MgO	%	2,9	-
Trióxido de azufre, SO ₃	%	8,5	-
Óxido de sodio, Na ₂ O	%	1,6	-
Óxido de potasio, K ₂ O	%	7,6	-
Dióxido de titanio, TiO ₂	%	0,5	-
Pentóxido de fósforo, P ₂ O ₅	%	1,0	-
Óxido de manganeso, MnO	%	0,1	-
Óxido de estroncio, SrO	%	0,1	-
Pérdida por calcinación	%	3,3	-
TOTAL	%	100	

Según la Tabla 2.10 se puede deducir que las HCA poseen porcentajes de azufre (S) y cloro (Cl) muy bajos, lo cual es un punto a favor al momento de la combustión ya que no permite la formación de óxidos contaminantes. A partir de los valores promedios de las biomásas, se puede determinar que presenta bajo porcentaje de carbón (C), mientras que los valores porcentuales de hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N) están dentro de la media.

En cuanto al tamaño de partícula es relativamente grande, la densidad es baja y la humedad ligeramente alta (lo más favorable es que sea menor a 30%). Del análisis

Inmediato se puede observar que las HCA poseen menor materia volátil que el promedio; al igual que la cantidad de cenizas.

2.6 Aprovechamiento de la HCA con miras a su empleo en procesos termoquímicos

Existen diversas razones por las que el aprovechamiento energético de la biomasa es conveniente. Por un lado, porque reduce las emisiones netas de CO₂ a la atmósfera, siempre que la biomasa vuelva a generarse (típicamente, por crecimiento de la planta quemada) y que la energía introducida en el ciclo de combustión-regeneración (por

ejemplo, para recoger o transportar la biomasa hasta las plantas de incineración) sea pequeña frente a la producida en la combustión.

Por otro, porque en muchos casos la biomasa es un residuo de un proceso agrícola, industrial o ganadero del que es necesario deshacerse. Tratarlos como combustibles o fuentes de combustible es una opción con la ventaja añadida de producir energía aprovechable. En el caso de la madera de bosques, por ejemplo, la limpieza de los montes puede contemplarse como un beneficio suficiente que compense la baja eficiencia del proceso de recogida y traslado a planta. [37]

Durante los últimos veinte años se han desarrollado tecnologías que hacen posible introducir saltos importantes en la eficiencia de los procesos basados en combustibles renovables, como el bagazo y la paja de caña. Hoy existen instalaciones capaces de elevar la eficiencia entre 10 y 15 %; al mismo tiempo, se desarrollan otras tecnologías más avanzadas aún, como las turbinas de gas integradas con gasificadores de biomasa, que podrían entonces elevar los valores en veinte o treinta veces

Dentro de los diversos usos alternativos a la quema a campo abierto que se le pueden dar a estos residuos agrícolas de cosecha (RAC), se encuentran algunos que se emplean a gran escala y donde la inversión por lo tanto es mayor, y otros de menor escala con menores inversiones para uso doméstico o en pequeñas producciones. A continuación se detallan los usos más estudiados hasta el momento y los que aún se están evaluando. Para el caso de la hidrólisis no aplica en este capítulo debido a que se tratarán procesos exclusivos de combustión.

2.6.1 Pirolisis

La pirolisis consiste en un calentamiento severo de la biomasa en ausencia de aire. La etapa previa antes de comenzar con el proceso, comprende la limpieza de los RAC y el picado del mismo, con el objetivo de reducir el contenido de humedad por debajo del 10% y disminuir el tamaño de partícula a niveles admisibles por el pirolizador. La pirolisis consiste en la descomposición físico-química de la materia orgánica bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante (O₂); es un proceso térmico de conversión en el que se utiliza un material con alto contenido de carbono para producir compuestos más densos y con mayor poder calorífico, que pueden ser empleados como combustibles directamente o luego de un tratamiento posterior. Los productos de la pirolisis son gases, líquidos y un residuo carbonoso, cuyas cantidades relativas

dependen de las propiedades de la biomasa a tratar y de los parámetros de operación del equipo. En los últimos años la pirolisis se viene utilizando para la obtención de combustibles líquidos y productos químicos a partir del carbón y residuos orgánicos.

Una técnica para generar biocombustibles líquidos consiste en realizar una pirolisis rápida de biomasa, con la cual se producen bio-aceites, que luego de etapas posteriores de refinado, pueden generar compuestos con propiedades similares a las de los combustibles fósiles, tales como el diesel o la gasolina. La tecnología de pirolisis se clasifica de acuerdo con el tiempo de residencia de la biomasa, la temperatura máxima y el producto principal.

Tabla 2.11

Tipos de pirolisis y sus características

Fuente: Los combustibles y el desarrollo sostenible – Universidad de Manizales

Tipo de Pirólisis	Tiempo de residencia	Velocidad Calentamiento	Presión (Bares)	Temperatura máxima (°C)	Producto mayoritario
Carbonización	Días	Muy baja	1.0	400	Sólido
Convencional	5' - 30'	Baja	1.0	600	Gas, Liq. Sol.
Fast	0,5" - 5"	Muy alta	1.0	650	Líquido
Flash-Líquido	< 1"	Alta	1.0	< 650	Líquido
Flash-Gas	< 1"	Alta	1.0	> 650	Gas
Ultra	< 0.5"	Muy alta	1.0	1000	Gas
Vacío	2"-30"	Media	1.0	400	Líquido

2.6.2 Gasificación

La gasificación de la biomasa es un conjunto de reacciones termoquímicas, que se produce en un ambiente pobre en oxígeno (combustión incompleta) a altas temperaturas (600-1500 °C), y que da como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases posibles de ser utilizados en una caldera, en una turbina o en un motor, tras su debido acondicionamiento. En este proceso, la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, incluso en monóxido de carbono e hidrogeno. A esa mezcla de gases se la denomina gas de síntesis o *syngas* y tiene un poder calorífico inferior equivalente a la sexta parte del PCI del gas natural (de 1000 a 1100 Kcal/m³), cuando se emplea aire como agente gasificante. El agente gasificante es un gas, o mezcla de ellos, que aporta calor para iniciar la reacciones, y oxígeno. La gasificación puede aplicarse para sintetizar combustibles líquidos de alta calidad.

El rendimiento del proceso de gasificación varía dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice, en el rango de 70-80% (según bibliografía), aunque en la planta piloto que se está construyendo en la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC Tucumán) se habla de rendimientos térmicos cercanos al 89%. El resto de la energía introducida en el combustible se invierte en las reacciones endotérmicas, en las pérdidas de calor de los reactores, en el enfriamiento del syngas, necesario para su secado y filtración, y en el lavado (cuando es necesario eliminar los alquitranes). Entre los factores que intervienen en la gasificación de un tipo específico de biomasa se pueden citar los siguientes:

- Temperatura: el aumento de la temperatura favorece la producción de H₂ y CO, en detrimento de CH₄ y H₂O.
- Presión: el aumento de la misma va en contra de las reacciones de gasificación, aumentando los alquitranes y los hidrocarburos. Los gasificadores de lecho móvil trabajan a presión atmosférica mientras que los de lecho fluidizado lo hacen con presiones que pueden alcanzar los 30 bares.
- Relación agente gasificante/biomasa: la relación óptima aire/biomasa se sitúa alrededor de 1,5 y para lecho fluidizado entre 0.5 y 1.6.
- Composición química: está directamente relacionada con los gases producidos.
- Poder calorífico: depende del punto anterior.
- Tamaño de partícula: influye en el tiempo de calentamiento y en la difusión de los reactivos hacia y desde la partícula. Los tamaños adecuados para lecho móvil en contracorriente son de unos mm a 15 cm; para el de lecho móvil en corriente paralela de 3 a 10 cm y para el de lecho fluidizado de unos mm a 4 cm.
- Densidad, forma y dureza de las partículas: afecta el movimiento de las partículas en el lecho y sobre la formación de bóvedas y canales preferenciales.
- Humedad: para gasificadores de lecho móvil son convenientes humedades entre el 10- 20% y para los de lecho fluidizado hasta el 40%.

Según el tipo de gasificador existen dos tipos de tecnologías utilizadas:

Calderas de lecho fijo o parrilla: El combustible, en astillas o trozos de varios centímetros, se introduce sobre unas placas vibrantes o parrillas inclinadas, en las que se quema al tiempo que se desplaza hacia un colector de cenizas en el extremo opuesto a la inyección. [37]

Calderas de lecho fluido burbujeante: Opera con bajas velocidades del aire de fluidización y se caracteriza por permanecer en el lecho la mayor parte de los sólidos y solamente una parte, normalmente inferior al 10%, pasan al ciclón. Este tipo de fluidización se denomina en fase densa, caracterizándose por la superficie libre del lecho que permanece definida. [35]

Calderas de lecho fluido circulante: Opera con velocidades muy elevadas del aire de fluidización lo cual produce el arrastre de gran cantidad de sólidos del lecho, pudiéndose reciclar una gran parte de éstos mediante un ciclón o multi-ciclón. En este caso, se dispone de una corriente de aire que impulsa arena y la mantiene flotando en el horno formando un lecho. El combustible se introduce en el interior de este lecho, donde se mantiene la suspensión. La temperatura existente en el mismo, del orden de 850°C, provoca su combustión inmediata. Se produce un reparto de aire uniforme, lo que impide una atmósfera reductora, minimizando el rozamiento mecánico, así como la formación de depósitos. [35]

Calderas de combustible pulverizado o lecho arrastrado: El combustible se muele hasta tamaños típicamente menores de un milímetro, y se introduce en la caldera a través de quemadores junto con el aire de combustión. Las partículas se van quemando a lo largo de la caldera, y salen junto con los gases hacia las etapas de filtrado y limpieza. [37]

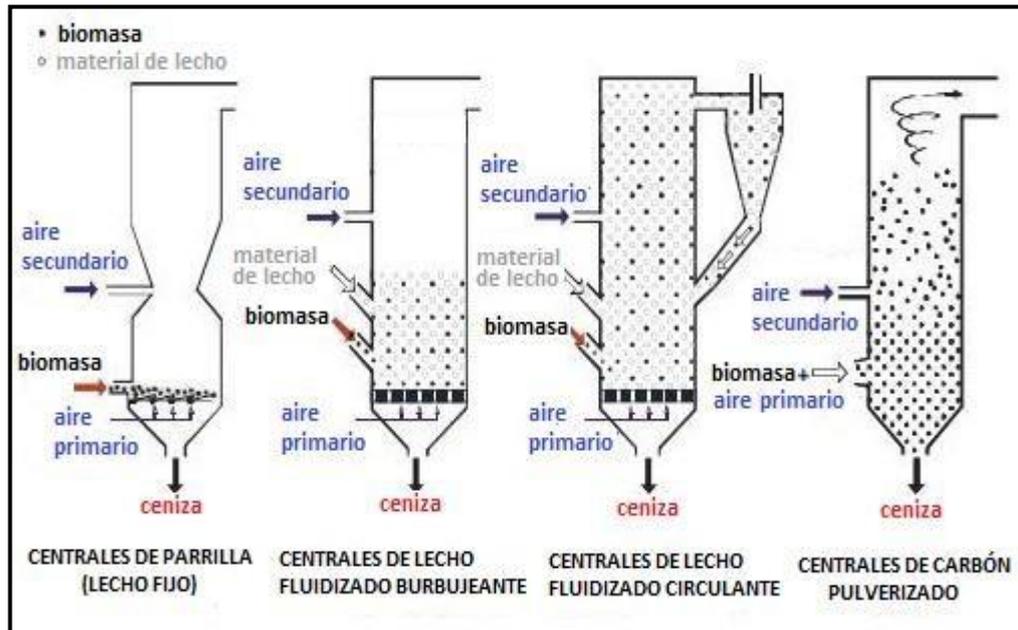


Figura 2.3

Tipos de tecnologías para la generación de energía eléctrica [35]

En cuanto al tamaño de la materia prima utilizada debe ser homogénea y lo suficientemente pequeña para que las reacciones se produzca a una velocidad adecuada. Un tamaño de partícula pequeño permite aumentar la calidad del syngas, reducir el tamaño del reactor o bien aumentar el tiempo de permanencia para el craqueo de las fracciones más pesadas y condensables (alquitranes). Si el tamaño es excesivamente pequeño, la biomasa se puede atascar en los conductos o ser arrastrada junto con las cenizas volantes al exterior del reactor antes de tiempo. Cada gasificador precisa de un determinado tamaño de partícula que, en general, no debe ser inferior a 2-3 mm de diámetro.

En cuanto a los requerimientos de la biomasa para gasificación se encuentran:

- Humedad entre 10 y 15% (90% MS). Si está más seca que su punto de equilibrio tiende a recuperar humedad al contacto con el aire ambiente.
- La humedad facilita la formación de hidrogeno pero reduce la eficiencia térmica.
- La cantidad de cenizas debe ser lo más reducida posible. Las cenizas absorben calor, ensucian filtros, erosionan los conductos, etc.

2.6.3 Combustión

La combustión es un proceso por el que la biomasa directamente o sus biocombustibles son oxidados hasta convertirse en dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). Este proceso se realiza a altas temperaturas ($800\text{-}1000^\circ\text{C}$), utilizando aire como agente oxidante e involucra una etapa instantánea inicial de pirolisis y otra de gasificación de la biomasa previas a la combustión propiamente dicha.

En la combustión a condiciones reales se utiliza un exceso de aire necesario para generar la oxidación total del biocombustible que se utilice en cada caso. En general, el término combustión de biomasa suele referenciarse a la combustión directa de la biomasa o de los biocombustibles sólidos.

La combustión de la biomasa transcurre con liberación de energía en forma de calor y productos resultantes, como los ya mencionados dióxido de carbono y agua (en forma de vapor a la salida del equipo de combustión) y las sales minerales contenidas en la biomasa empleada como combustible, además de pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno y azufre, así como el monóxido de carbono, partículas de carbono y otros productos orgánicos (hidrocarburos) resultantes de la combustión incompleta de la biomasa, denominados “inquemados”.

Las sales minerales junto con los inquemados constituyen las cenizas del proceso que, bajo determinadas condiciones, pueden ser restituidas al suelo como fertilizantes. [36]

Sistemas de combustión (hornos): Un horno es básicamente un espacio recubierto de un material aislante en el que se introduce el combustible y el comburente para producir la combustión, obteniendo como producto humos calientes a una determinada temperatura y residuos (cenizas). La calidad de un proceso de combustión de biomasa se puede caracterizar por la relación CO/CO_2 en los humos o por el contenido de CO en los mismos. Una buena combustión tiene una relación $\text{CO}/\text{CO}_2 < 0.07$ y un contenido de CO que varía entre un 0.15% y un 0.85%. Existen dos flujos de aire en los hornos, llamados primario y secundario.

En la mayoría de los equipos modernos de combustión, el combustible se sitúa sobre una parrilla a través de la cual caen las cenizas, y las entradas de aire primario y secundario están separadas. Según la disposición relativa de las entradas de aire

primario y secundario se pueden dar tres tipos de sistemas: de combustión ascendente, de combustión horizontal y de combustión inversa.

Calderas y recuperadores de calor: En las calderas se absorbe parte del calor de los gases de combustión y se transfiere al agua, que pasa al estado de vapor y aumenta su entalpía a una presión determinada. El vapor separado de la fase acuosa se hace fluir por los tubos sobrecalentadores donde aumenta su temperatura hasta los límites deseados. Las calderas pueden estar integradas en el horno o separadas de él. En el primer caso pueden formar parte de las paredes (paredes de agua) o de la propia parrilla (parrilla refrigerada) y reciben el calor directamente de la cámara de combustión.

Generación de electricidad y cogeneración con turbina de vapor: El vapor generado en las calderas puede ser utilizado como fuente de calor para la industria, para la generación de electricidad a través de un turbo-grupo o ambos usos en conjunto (cogeneración). El turbo-grupo consiste en una turbina que va unida a por un rotor a un alternador que, al girar, produce energía eléctrica. La turbina gira accionada por la expansión del vapor procedente de la caldera, el cual, tras ceder parte de su energía a la turbina, se condensa y se vuelve a introducir en la caldera, funcionando prácticamente en circuito cerrado. En la condensación del vapor se pierde una parte importante de la energía que llevaba el vapor inicial, lo que condiciona el rendimiento general del sistema. En las plantas dedicadas exclusivamente a generación de electricidad, la refrigeración del vapor para su condensación se efectúa mediante intercambiadores de calor en los que la refrigeración se consigue con aire, agua corriente o un sistema agua-vapor.

Existen dos grupos principales de turbinas: las que trabajan a contrapresión, cuyo vapor de salida tiene todavía una cierta entalpía y puede ser utilizado en procesos que necesiten vapor a baja presión, y las de condensación, en las que la entalpía del vapor se aprovecha al máximo en la turbina y sale con las mínimas condiciones para su entrada en el condensador, por lo que no se puede usar como vapor de proceso.

2.6.4 Co-combustión

Se trata de una opción particularmente interesante, en la que la biomasa se introduce en una caldera alimentada, en esencia, con carbón o un combustible similar, sustituyendo parte de la potencia del hogar (10-15%). La principal ventaja es el

aprovechamiento de la estabilidad y eficiencia del conjunto de la caldera y la reducción de incertidumbres tanto en el comportamiento como en el suministro de la biomasa (muchas se caracterizan por variaciones estacionales o de otro tipo)

Otra ventaja es que se necesita de una menor inversión económica al utilizar los mismos sistemas que se empleaban con otros combustibles, con lo que se obtiene una gran flexibilidad de operación, pudiendo utilizarse solo combustible fósil si en algún momento no se contara con biomasa. En países en desarrollo, la co-combustión de residuos agrícolas incrementa la actividad económica en el entorno rural, por lo que no solo crea un buen impacto ambiental sino también crea un equilibrio comercial, ya que impulsa la creación de puestos trabajos y mayor rentabilidad para las empresas.

La viabilidad técnica y medioambiental de la co-combustión ya ha sido demostrada en el ámbito internacional, en todo tipo de sistemas y con los más diversos tipos de biomasa. Esto debido a que al co-combustionar, se disminuye la cantidad de emisión de dióxido de carbono (CO₂) por cada unidad de energía que se produce, principalmente porque la biomasa consume la misma cantidad de dióxido de carbono que produce mientras se quema, por lo que se dice es neutral y por lo tanto más ecoeficientes. [15]

Además, puede disminuir los niveles de óxido nítrico (NO_x) y óxido sulfúrico (SO_x), (principales contaminantes del aire como resultado de la quema de carbón) existentes en las plantas de generación energética que utilizan carbón pulverizado. Asimismo minimiza la cantidad de contaminación producida tanto en tierra como en agua, como ha sido demostrado en diversos estudios, dependiendo del tipo de biomasa que se utiliza. [34]

Sin embargo su implementación también genera problemas, debido principalmente al tipo de combustible usado, los cuales son el incremento de suciedad, de corrosión, pérdida de rendimiento, cambio en la composición de cenizas o empeoramiento del funcionamiento de los sistemas de limpieza de fases. A pesar de eso, la co-combustión sigue siendo una opción muy interesante, ya que dichos problemas técnicos parecen poder superarse solo con algún ajuste de operación o modificaciones de diseño de los sistemas de generación de energía. [17]

2.6.5 Mezcla de biomasa y carbón

La biomasa se introduce en la caldera mezclada con el carbón, para lo cual los dos combustibles se mezclan previamente (a), existiendo dos posibilidades:

- La mezcla se puede llevar a cabo antes de la molienda y los combustibles se muelen de manera conjunta. (a1)
- La mezcla se lleva a cabo después de la molienda y antes de introducir el combustible a los quemadores. La molienda se lleva a cabo por separado. (a2). [15]

2.6.6 Biomasa y carbón sin mezclar

La biomasa y el carbón se introducen de manera independiente en la caldera empleando diferentes quemadores (b). En este caso se puede utilizar los propios quemadores de carbón u otros conductos disponibles. (b1); Se instalan quemadores especialmente diseñados para la biomasa. (b2); Incorporación de una parrilla específica para la biomasa en la parte inferior de la caldera, con lo que la alimentación de la biomasa y su posterior combustión es independiente de la del carbón (c2). También es denominada co-combustión paralela. [15]

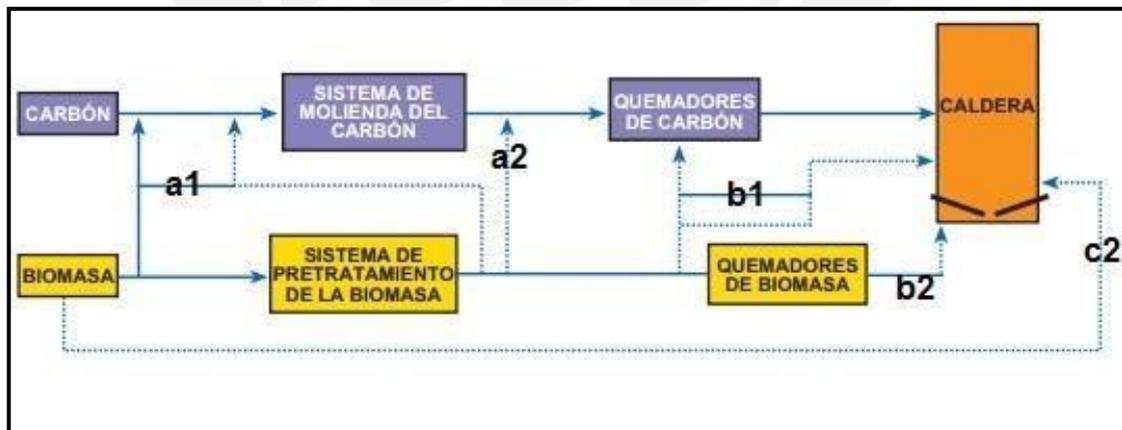


Figura 2.4

Opciones de co-combustión directa [15]

Tabla 2.12

Ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías de combustión de biomasa [31]

Ventajas	Desventajas
Centrales de parrilla (lecho fijo) – rango de capacidad: 100 kW – 50 MW	
<ul style="list-style-type: none"> • Gran flexibilidad concerniente al contenido de humedad (10 – 60% en base húmeda) y tamaño de partícula (5 a 100 mm). • Permite la mezcla de diferentes combustibles provenientes de la madera. • Bajos costos de inversión en plantas con capacidad menores a 20 MW. • Bajos costos de operación. • Menos propenso a la formación de escorias. 	<ul style="list-style-type: none"> • La mezcla de combustibles madereros y herbáceos es limitada. • Un gran exceso de oxígeno (5 – 8 Vol %) decrece la eficiencia. • Las condiciones de combustión no tan homogéneas que la central de lecho fluidizado.
Central de lecho fluidizado – rango de capacidad: 20 MW – cientos de MW	
<ul style="list-style-type: none"> • Gran flexibilidad concerniente al contenido de humedad (10 – 55% en base húmeda) y al tipo de biomasa a usar como combustible. • No partes móviles en la cámara de combustión. • Una alta capacidad de transferencia de calor específico debido a la alta turbulencia. • Un bajo exceso de oxígeno (1 – 4 Vol %) aumenta la eficiencia y disminuye flujo de gas de combustión 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de inversión; aconsejable en plantas con capacidad mayores a 20 MW. • Altos costos de operación. • Poca flexibilidad concerniente al tamaño de partícula (<80 mm en LFB, 40 mm en LFC). • Alta concentración de polvo. • Operación a carga parcial requiere tecnologías especiales. • Muy propenso a la formación de escorias.
Central de carbón pulverizado – capacidad: 500 kW – cientos de MW (co-comb)	
<ul style="list-style-type: none"> • Un exceso medio de oxígeno (4 – 6 Vol %) aumenta la eficiencia. • Muy buen control de la carga y rápida alternancia de carga 	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido de humedad usualmente < 20% en base húmeda; tamaño de partícula es limitado (< 10 – 20 mm). • Alto desgaste de aislamiento. • Es necesario un quemador de puesta en marcha extra.

2.6.7 Conclusiones de las experiencias del proceso de combustión

A partir de las experiencias descritas, se concluye que las plantas de carbón pueden ser adaptadas para el uso de la combustión sin realizar ninguna modificación importante aunque esto genera una reducción en la disponibilidad y flexibilidad de operación. Respecto a la preparación de la biomasa, pueden existir problemas en su manejo (almacenamiento, pre-tratamientos) y uso; así como los relacionados a la combustión, entre los cuales se encuentra la estabilidad y consumo de llama.

Por último, los problemas de cenizas se incrementan generando formación de escoria, ensuciamiento y corrosión; y las emisiones e impacto ambientales deben ser constantemente regulados, ya que la presencia principalmente de nitrógeno y álcalis generan gases contaminantes perjudiciales para el equipo como para el medio ambiente.

CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

En el siguiente capítulo se detalla el trabajo experimental desarrollado en el laboratorio del grupo de investigación Carbón-Biomasa en el cual se tomaron datos de 54 ensayos de la HCA expuesta al pre-tratamiento de lavado con diferentes variables tanto de Temperatura, Tiempo y agitación. Mediante todas estas variables se obtuvo un total de 18 ensayos y tomando en cuenta que cada ensayo se debe evaluar tres veces para una mejor aproximación es que se llega a desarrollar 54 ensayos en total. Además, previamente se preparó la HCA molida sin ningún tipo de tratamiento para ser enviado a un laboratorio en el cual se le harían análisis para servir como base de comparación de las HCA lavadas.

3.1 Plan de trabajo del desarrollo experimental

Las pruebas desarrolladas en el Laboratorio del Grupo de Investigación Carbón Biomasa estuvieron sujetas a un plan de trabajo elaborado con el objetivo de comparar de manera veraz y concisa los resultados de la HCA virgen llevados a analizar con los ensayos de la HCA luego del pre tratamiento aplicado que en este caso es el lavado con agua. Para esto, en primer lugar se definió una matriz de los ensayos, además de los parámetros de lavado (tiempo, velocidad de agitación, temperatura, concentración).

Matriz de trabajo de ensayos en laboratorio

Se determinó la matriz de trabajo basándose en investigaciones previas realizadas en la PUCP las cuales concluyeron que existe una tendencia de mejora de propiedades utilizando variables de tiempo (10 y 20 minutos), temperatura de lavado (20, 40 y 80°C) y velocidad de agitación (V1, V2 y V3) detallada en la Tabla 3.5 para una concentración fija de 3,33%. La matriz abarca un total de 18 combinaciones posibles y cada combinación se desarrolló 3 veces para una mayor precisión del valor final de conductividad, haciendo un total de 54 ensayos.

Tabla 3.1

Matriz de ensayos con variación de tiempo, velocidad de agitación y temperatura a una concentración de 3,33%

Ensayos	Concentración	Temperatura	Tiempo	Velocidad
1,2,3	3,33%	20°C	10 min	V1
4,5,6			10 min	V2
7,8,9			10 min	V3
28,29,30			20 min	V1
31,32,33			20 min	V2
34,35,36			20 min	V3
55,56,57		40°C	10 min	V1
58,59,60			10 min	V2
61,62,63			10 min	V3
82,83,84			20 min	V1
85,86,87			20 min	V2
88,89,90			20 min	V3
109,110,111		80°C	10 min	V1
112,113,114			10 min	V2
115,116,117			10 min	V3
136,137,138			20 min	V1
139,140,141			20 min	V2
142,143,144			20 min	V3

Parámetros de ensayo de lavado

Luego de haber presentado la matriz de trabajo se analiza los parámetros establecidos para el lavado de la HCA definiendo las variables de velocidad de agitación, temperatura y tiempo, para un porcentaje de concentración definido de 3,33%.

Tabla 3.4. Definición de porcentaje de concentración establecido para los ensayos de lavado

Tabla 3.2

Descripción de concentración sólido/líquido

Concentración	Cantidad de HCA y agua
Cw1 = 3.33%	0.1 kg de HCA por 3 litros de agua

Dónde:

$$C_w = \frac{HCA \text{ en kg}}{\text{volumen de agua litros}}$$

Tabla 3.3

Descripción de velocidades de agitación utilizadas en los ensayos de lavado

Velocidad de agitación: V1	Sin agitación
Velocidad de agitación: V2	Mover de manera giratoria por 30 segundos cada 5 minutos, con velocidad de giro de 5 vueltas en 10 segundos
Velocidad de agitación: V3	Mover de manera giratoria por 30 segundos cada 2 minutos, con velocidad de giro de 5 vueltas en 10 segundos

Plan de trabajo de los ensayos en laboratorio

- Condiciones iniciales de la HCA
- Acondicionamiento de las HCA vírgenes
- Análisis de las propiedades de la HCA sin tratamiento
- Lavado de las HCA con variables de tiempo, temperatura y velocidad de agitación a una concentración de 3,33%
- Selección de la mejor muestra lavada
- Acondicionamiento de la mejor muestra de HCA lavada
- Análisis de las propiedades de la HCA con tratamiento de lavado
- Comparación de los resultados obtenidos

3.2 Condiciones iniciales de las HCA recibidas

Este sub tema abarca las condiciones iniciales con las que se recibió la materia prima, es decir, la HCA proveniente de los residuos agrícolas de cosecha.

Recepción de la HCA

La materia prima fue recibida por medio de 5 costales negros cada uno con un peso diferente. Para homogeneizar las hojas de caña recibidas se tomará muestras de diferentes bolsas para el preparado de HCA molidas para ser llevados a analizar en el laboratorio.

En la figura se detalla el modo de recepción de las hojas de caña en costales con los que se trabajó el acondicionamiento y todos los ensayos de lavado.



Figura 3.1

Costales con HCA de azúcar

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

Pesado de la HCA

Con ayuda de una balanza electrónica se procedió con el pesado de los 5 costales consiguiendo un valor lo más exacto posible. Como resultado de este proceso se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 3.4

Resultado del pesado de las bolsas recibidas

BOLSA	PESO (gr)
BOLSA 1	9,750 ± 0.5
BOLSA 2	6,460 ± 0.5
BOLSA 3	10,630 ± 0.5
BOLSA 4	7,140 ± 0.5
BOLSA 5	9,060 ± 0.5

En la figura 3.2 se observa el pesado de las bolsas con ayuda de una balanza electrónica.



Figura 3.2

Pesado de costales con HCA de azúcar

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

Almacenamiento de las HCA seleccionadas

Luego del pesado general se extrajo 1 Kg. de las bolsas número 1,2 y 4 seleccionadas al azar para realizar el molido. A continuación se observa en la figura cómo se obtuvo los 3 Kg. necesarios para la molienda de las HCA y el almacenamiento de estas.



Figura 3.3

Almacenamiento de las HCA seleccionadas

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

3.3 Acondicionamiento de las HCA vírgenes

Este sub tema abarca todo lo correspondiente al procedimiento empleado para acondicionar las HCA vírgenes con el objetivo de realizar los análisis respectivos como base para comparar luego con las HCA lavadas. Las HCA acondicionadas fueron analizadas en ARPL TECNOLOGÍA INDUSTRIAL S.A. en donde se realizó los análisis último, inmediato, poder calorífico y densidad aparente.

Diagrama de procesos del acondicionamiento de las HCA vírgenes

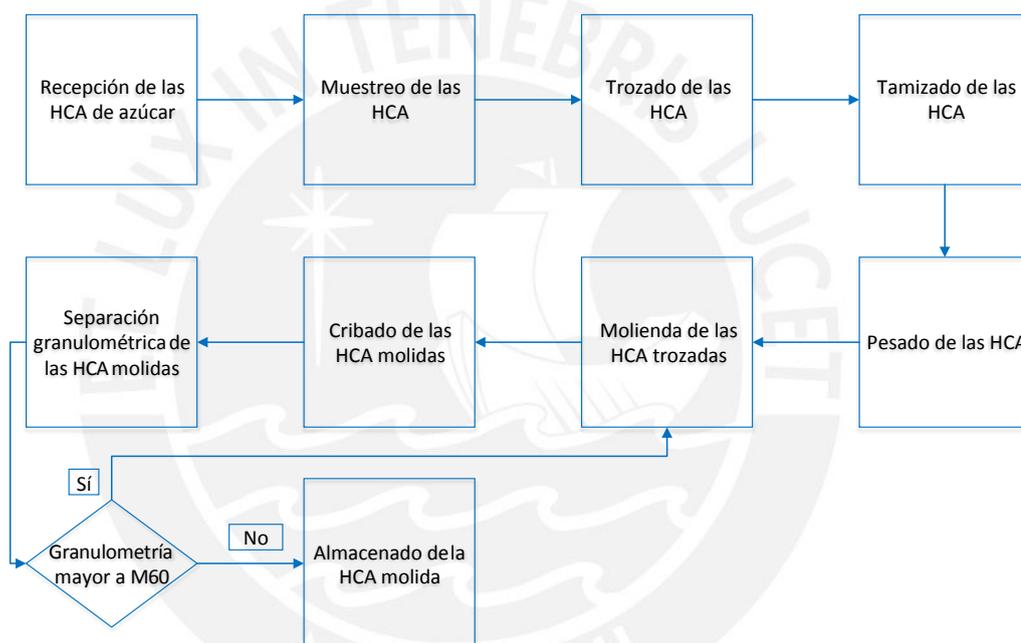


Figura 3.4

Diagrama de procesos para el acondicionamiento de las HCA vírgenes

Fuente: Elaboración propia

Acondicionamiento de las HCA vírgenes

Las HCA fueron seleccionadas, pesadas, trozadas, tamizadas, molidas y cribadas hasta producir 700 gramos de HCA molida lista para realizar los análisis correspondientes. A continuación se explican los procesos desarrollados para la consecución de los 700 gramos de HCA molida.

- Trozado de la HCA

Para esta operación se contó con los 3 Kg. sacados de las bolsas número 1,2 y 4 seleccionadas al azar para una mejor homogeneización.

Por medio de la guillotina manualmente se procedió a disminuir la longitud de las HCA hasta alcanzar medidas entre 1 a 2 cm. Luego se procedió a su posterior homogeneización por lo antes explicado respecto a las variables de tamaño de las muestras recibidas.

La reducción granulométrica es importante en el estudio del efecto del lavado en la HCA debido a que permite un comportamiento más estable frente a los tratamientos y optimiza los parámetros de los ensayos.

Luego del trozado se obtuvo que de los 3.000 Kg. iniciales el resto fuera de 2.851 Kg. netos.

A continuación se detalla el trozado de la HCA por medio de una guillotina y la caja organizadora donde se deposita la hoja ya trozada.



Figura 3.5

Proceso de trozado de la HCA

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

- Tamizado de la HCA

Mediante una zaranda vibratoria se procedió a tamizar los 2.851 Kg. de HCA con el objetivo de remover todo polvo, tierra, piedras, y cualquier otro desperdicio no utilizable para los ensayos. Este procedimiento es importante para que los ensayos no se vean perjudicados por la presencia de otro elemento que no sea la HCA en sí.

En la figura 3.6 se observa el proceso de tamizado de la HCA.



Figura 3.6

Tamizado de las HCA en zaranda

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

- Molido de la HCA

Con ayuda de una licuadora con vaso de vidrio y cuchilla de 6 filos se procedió a moler los 2.851 Kg. de HCA picadas y tamizadas por un lapso aproximado de 10 minutos unos 20 gramos para luego guardarlos en un envase de plástico para su posterior cribado. En la figura se observa el molido de la HCA por medio de una licuadora.



Figura 3.7

Molido de las HCA en la licuadora

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

- Cribado de la HCA

Luego del molido en la licuadora la HCA ingresa a una cribadora vibratoria la cual dispone de tres niveles a diferentes tamaños de malla M16, M30 y M50 para finalmente obtener la HCA a un tamaño granulométrico de M60. Para este proceso la cribadora se mantuvo encendida por 4 minutos por 50g de HCA.



Figura 3.8

Cribado de las HCA en la cribadora

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

Finalmente se obtuvo la cantidad necesaria para llevar a analizar en el laboratorio.

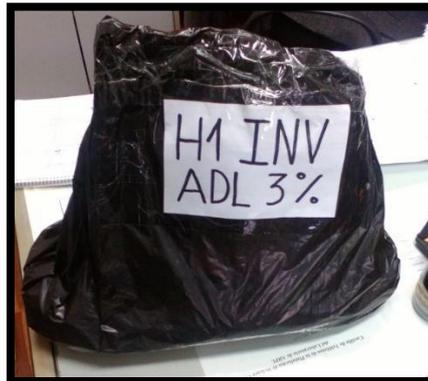


Figura 3.9

Presentación final de las HCA molidas

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

3.4 Análisis de las propiedades de la HCA sin pre-tratamiento

Luego de enviada la muestra al laboratorio para que se le realicen los respectivos análisis, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 3.5

Resultados de ensayos realizados en muestra de HCA virgen

Fuente: ARPL TECNOLOGÍA INDUSTRIAL S.A.

ENSAYOS		HV1-INV			MÉTODO
		base de análisis	base seca	base recibida	
humedad recepción ADL	%			3,0	ASTM D 2013
humedad	%	12,0	-	14,6	ASTM D 3173
cenizas	%	15,1	17,1	14,6	ASTM D 3174
materia volátil	%	60,7	68,9	58,9	ASTM D 3175
carbón fijo	%	12,0	14	12	ASTM D 3172
TOTAL	%	100	100	100	

Poder calorífico bruto	cal/g	3207	3,642	3,111	ASTM D 5865
Poder calorífico neto	cal/g	-	-	2,798	Cálculo

ANÁLISIS ÚLTIMO					
Carbono	%	35,9	40,8	34,9	ASTM D 3178
Hidrógeno	%	5,91	5,19	6,07	-
Azufre	%	0,31	0,35	0,30	ASTM D 3177, met B
Nitrógeno	%	0,26	0,30	0,25	ASTM D 3179
Cloruros	%	0,17	0,20	0,16	ASTM D 3179

ENSAYO		HV1-INV	MÉTODO
Dióxido de silicio, SiO ₂	%	54,8	ARPL PEX-0,4
Trióxido de aluminio, Al ₂ O ₃	%	8,0	-
Trióxido de hierro, Fe ₂ O ₃	%	3,7	-
Óxido de calcio, CaO	%	8,1	-
Óxido de magnesio, MgO	%	2,9	-
Trióxido de azufre, SO ₃	%	8,5	-
Óxido de sodio, Na ₂ O	%	1,6	-
Óxido de potasio, K ₂ O	%	7,6	-
Dióxido de titanio, TiO ₂	%	0,5	-
Pentóxido de fósforo, P ₂ O ₅	%	1,0	-
Óxido de manganeso, MnO	%	0,1	-
Óxido de estroncio, SrO	%	0,1	-
Pérdida por calcinación	%	3,3	-
TOTAL	%	100	

3.5 Cálculo e interpretación de índices de *slagging* & *fouling* para la HCA virgen

Con los resultados de los análisis de la muestra enviada de HCA virgen se puede conocer mediante las ecuaciones explicadas en el capítulo 1 la tendencia de la muestra ante el fenómeno de *slagging* y *fouling*.

Aplicando la ecuación 1 y con los datos de la tabla 1 de anexos se obtuvo el índice de álcali el cual se debe interpretar ayudado de la tabla 3.6.

Tabla 3.6
Índice de álcali para muestra de HCA virgen

Muestra	Índice de Álcali	Resultado
HV1-INV	1,03	Alta posibilidad de <i>slagging</i>

Seguidamente se realizó el cálculo de R_s mediante la ecuación 2 y de igual manera se interpretó ayudado de la tabla 3.7.

Tabla 3.7
 R_s para muestra de HCA virgen

Muestra	R_s	Resultado
HV1-INV	0,20	Alta posibilidad de <i>slagging</i>

Luego se determinó el porcentaje de cloruros de la muestra y se interpretó ayudado de la tabla 3.8.

Tabla 3.8
%Cl para muestra de HCA virgen

Muestra	%Cl	Resultado
HV1-INV	0,16	Baja posibilidad de <i>slagging</i>

Mediante la ecuación 3 se obtuvo el SR y se interpretó ayudado de la tabla 3.9.

Tabla 3.9
S_R para muestra de HCA virgen

Muestra	S _R	Resultado
HV1-INV	78,84	Baja posibilidad de <i>slagging</i>

Finalmente con la ecuación 4 se obtuvo el F_u el cual se interpretó con ayuda de la tabla 3.10.

Tabla 3.10
F_u para muestra de HCA virgen

Muestra	F _u	Resultado
HV1-INV	3,474	Alta posibilidad de <i>fouling</i>

Luego de interpretar los resultados se confirma que la muestra enviada de HCA virgen tiene una alta probabilidad de formación de escorias (*slagging*) y formación de incrustaciones (*fouling*).

3.6 Pre-tratamiento de lavado de las HCA

Este tema aborda el procedimiento desarrollado para el lavado con agua potable de la HCA para diferentes variables con el fin de disminuir compuestos con cenizas y bajo punto de fusión (alcális), fósforo y cloro; los cuales generan problemas de corrosión, ensuciamiento y escorificación luego de la combustión. Cabe indicar que para este tratamiento se utilizó agua potable la cual tiene una conductividad de 0.5 ms/cm y afecta en la toma de medida de conductividad.

Diagrama de procesos de lavado de la HCA

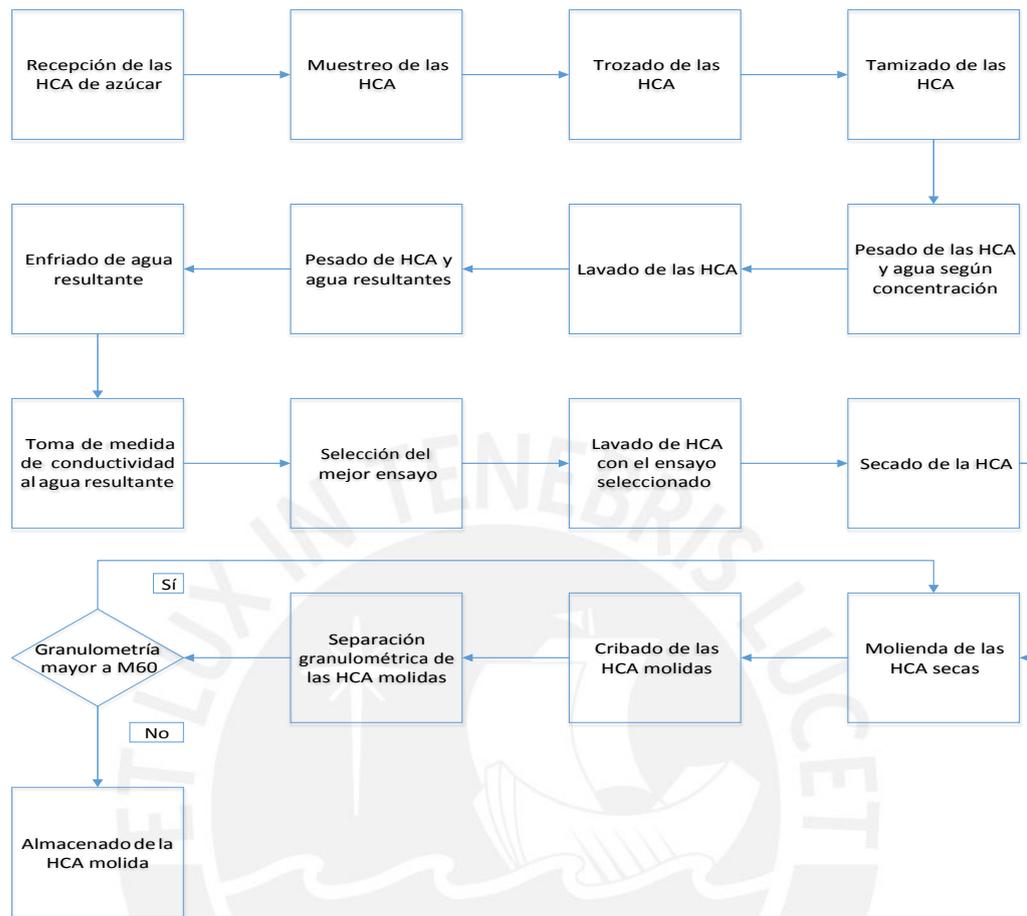


Figura 3.10

Diagrama de procesos para el lavado de las HCA a tratar con lavado en agua

Fuente: Elaboración propia

Concepto de conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica de una sustancia se define como la habilidad o capacidad de conducir o transmitir calor, electricidad o sonido. Las unidades son Siemens por metro [S/m] en el sistema de medición SI. La corriente eléctrica resulta del movimiento de partículas cargadas eléctricamente y como respuesta a las fuerzas que se ejercen sobre estas partículas debido a un campo eléctrico aplicado. Dentro de la mayoría de los sólidos existe un flujo de electrones que provoca una corriente, y a este flujo de electrones se le denomina conducción electrónica.

En el agua y materiales iónicos o fluidos puede generarse el movimiento de una red de iones cargados. Este proceso produce corriente eléctrica y se denomina conducción

iónica. Se pudo comprobar mediante los ensayos en el laboratorio que a mayor conductividad eléctrica medida en el agua residual usada para el lavado o lixiviación, mayor cantidad de álcalis ha sido removida de la hoja de caña, esto debido a la gran capacidad de conducción eléctrica que poseen los metales alcalinos por naturaleza.

La norma mexicana NMX-AA-093-SCFI-2000 estableció en el año 2000 los métodos de prueba para determinar la conductividad eléctrica tanto en agua potable, natural, tratada, residual, salina y residual tratada. En la tabla 3.11 se muestra los resultados de conductividad eléctrica para diferentes concentraciones de Cloruro de Potasio elaborados según la norma mexicana. Como se observa existe una tendencia creciente de conductividad eléctrica a medida que la concentración de Cloruro de Potasio aumenta. [44]

Tabla 3.11

Conductividad electrolítica de disoluciones de Cloruro de Potasio [44]

Concentración de Cloruro de Potasio (KCl) mol/L	Conductividad electrolítica a 25°C mS/m
0,000 5	7,4
0,001	14,7
0,005	72
0,01	141
0,02	277
0,05	670
0,1	1 290
0,2	2 480

Asimismo, en la tabla 3.12 Se muestra las pruebas realizadas por la misma norma pero esta vez midiendo la conductividad eléctrica del Cloruro de Sodio, con el mismo resultado que ocurrió con el Cloruro de Potasio, ya que la conductividad aumentó al aumentar la concentración de Cloruro de Sodio.

Tabla 3.12

Conductividad electrolítica de disoluciones de Cloruro de Sodio [44]

Concentración de Cloruro de Sodio (NaCl) mol/L	Conductividad electrolítica a 25°C mS/m
0,001	12,4
0,01	118,6
0,1	1 066
0,5	4 665

La conductividad eléctrica del agua

El agua pura es un buen conductor de la electricidad, debido a que la corriente eléctrica se transporta por medio de iones en solución, la conductividad aumenta cuando aumenta la concentración de iones. De esta manera la conductividad aumenta cuando el agua disuelve compuestos iónicos.

Tabla 3.13
Conductividad en distintos tipos de aguas

Tipos de agua	Conductividad eléctrica
Agua destilada	20 dS/m
Agua tratada (ultra pura)	$5.5 \cdot 10^{-6}$ S/m
Agua potable	0.005 – 0.05 S/m
Agua de mar	5 S/m

Conductividad eléctrica y TDS (*Total Dissolved Solids* / Sólidos totales disueltos)

El término TDS describe la cantidad total de sólidos disueltos en el agua. La TDS y la conductividad eléctrica están estrechamente relacionadas. Cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será el valor de la conductividad eléctrica. La mayoría de los sólidos que permanecen en el agua tras una filtración de arena, son iones disueltos.

El cloruro de sodio por ejemplo se encuentra en el agua como Na^+ y Cl^- . El agua de alta pureza que en el caso ideal contiene solo H_2O sin sales o minerales tiene una conductividad eléctrica muy baja. La temperatura del agua afecta a la conductividad eléctrica de forma que su valor aumenta de un 2 a un 3 % por grado Celsius. [28]

Conversión de la conductividad eléctrica a TDS:

Si el análisis del agua tratada indica la TDS y la conductividad eléctrica, entonces debería ser posible el establecimiento de la siguiente relación:

$$+500 \text{ ppm corresponden a } 1000 \text{ mS/cm}$$

Lo que conlleva a la siguiente ecuación:

$$\text{TDS (mg/l)} = 0.5 * 1000 \times \text{CE (mS/cm)} \quad (1)$$

La relación expresada en la fórmula de arriba también se puede usar para determinar la aceptabilidad de un análisis químico del agua. No se aplica en agua residuales crudas sin ningún tratamiento o en aguas residuales industriales con amplia contaminación. Esto es porque, cuando la solución está más concentrada (TDS >1000 mg/l), la proximidad de los iones en solución inhibe su actividad y en consecuencia su habilidad para transmitir corriente, a pesar de que la concentración física de sólidos disueltos no queda afectada.

A amplios valores de TDS, la relación TDS/CE aumenta y la relación tienen a ser en torno a

$$\text{TDS (mg/l)} = 0.9 * 1000 \times \text{CE (mS/cm)} \quad (2)$$

En estos casos, la relación anterior no debe usarse y cada muestra debe caracterizarse de manera separada. Para propósitos de uso en agua en agricultura e irrigación los valores de EC y TDS están relacionados y se pueden convertir con una precisión de aproximadamente un 10% usando la siguiente ecuación:

$$\text{TDS (mg/l)} = 0.64 \times \text{EC (mS/cm)} \quad (3)$$

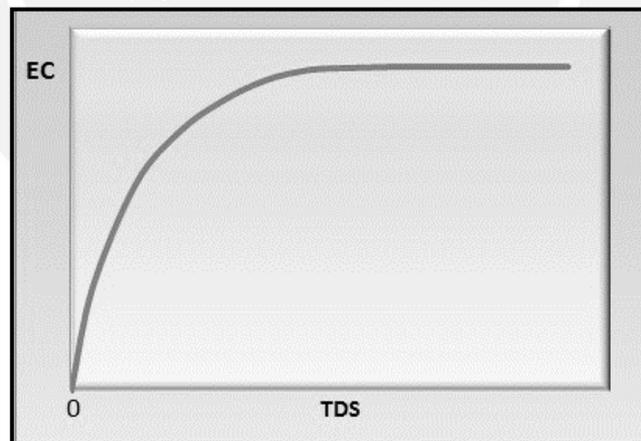


Figura 3.11

Curva entre la conductividad eléctrica y la cantidad de sólidos totales [28]

3.7 Lavado de las HCA

Luego de haber definido la matriz de trabajo de los ensayos así como los parámetros utilizados se procedió a realizar los ensayos siguiendo los procedimientos paso a paso que a continuación se describen.

Trozado de la HCA

Al igual que en el proceso de preparación de la muestra a enviar al laboratorio, se cortó la HCA con ayuda de una guillotina hasta obtener trozos aproximadamente entre 1-2 cm.

Tamizado de la HCA

Al igual que en el proceso de preparación de la muestra a enviar al laboratorio, se tamizó la HCA con ayuda de una zaranda vibratoria hasta lograr desechar polvo e impurezas presentes en la hoja.

Pesado de la HCA y agua corriente para el lavado

Se procedió a medir con ayuda de una balanza la cantidad de agua y HCA requerida según el ensayo. La concentración con la que se realizó los ensayos fue de 3,33% la cual determina la proporción de masa de agua y HCA respectiva.

El las figuras se observa la cantidad de agua y HCA necesaria para la concentración requerida.



Figura 3.12

Pesado de la HCA

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa



Figura 3.13

Pesado de agua corriente

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

Lavado de la HCA

Luego de haber realizado el pesaje respectivo de las HCA según el ensayo a elaborar, se procede a depositar en una olla metálica, y de ser el caso de un ensayo a una temperatura de 40°C u 80°C se utiliza una hornilla eléctrica a fuego máximo para iniciar el aumento de temperatura hasta llegar al valor deseado, de no ser el caso se trabaja sin hornilla eléctrica a temperatura ambiente de 20°C.

Luego de llegar a la temperatura deseada y mediante una graduación de intensidad de calor de la hornilla se trata de mantener la temperatura constante por el lapso que indica el ensayo ya sea de 10 o 20 minutos según las variables de tiempo estipuladas.

Para poder llevar un registro de la variación de la temperatura durante el tiempo que indica el ensayo se realizó un control de la misma cada 2 minutos por medio de un termómetro digital. Además, y según haya sido el caso del ensayo, se realizaron las velocidades de agitación respectivas.

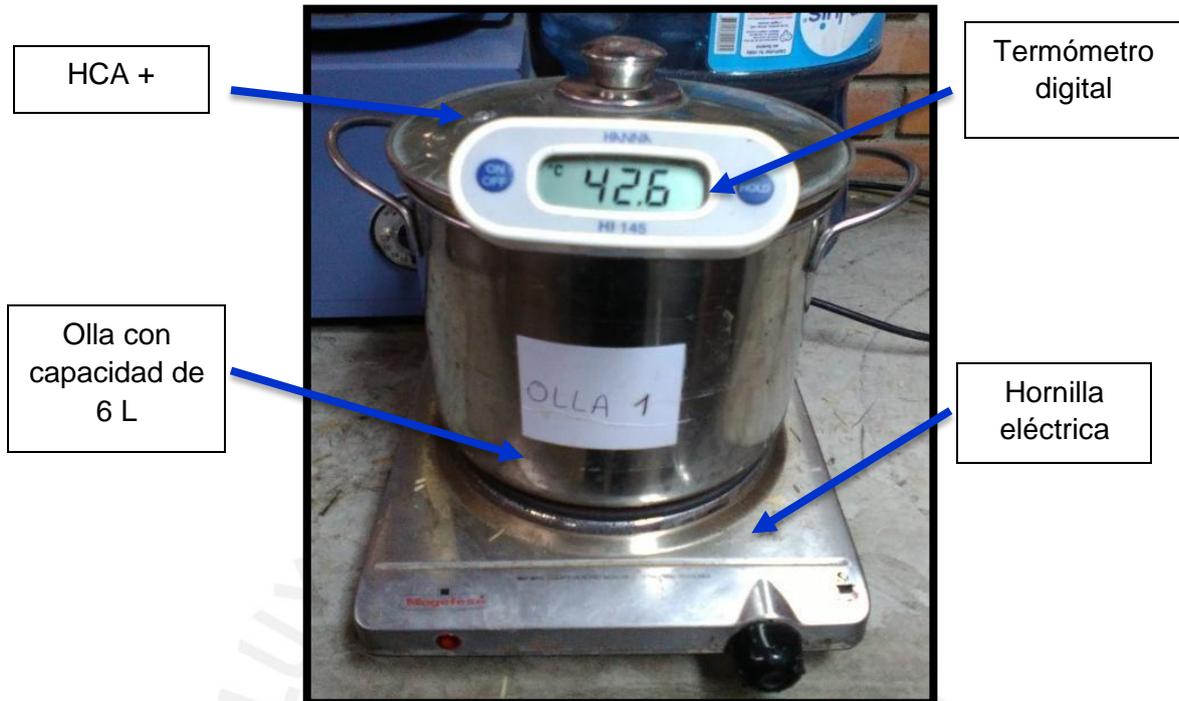


Figura 3.14

Ensayo con código 80 de lavado de HCA

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa



Figura 3.15

Aplicación de velocidad de agitación V2 a ensayo número 80

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

Ecurrido de la HCA luego del lavado

Finalizado el ensayo de lavado se procedió a escurrir la HCA para analizar la conductividad del agua residual.



Figura 3.16

Ecurrido de la HCA luego del lavado

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

Pesado de la HCA y agua residuales para balance de masas

Luego de finalizado el ensayo se realiza un pesado de la cantidad de materia obtenida y de agua residual, esto para poder determinar la eficiencia del proceso mediante balance de masas.



Figura 3.17

Pesado de la HCA luego del lavado

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa



Figura 3.18

Pesado del agua residual luego del lavado

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

Toma de medida de conductividad eléctrica de los ensayos realizados

El agua residual es almacenada en envases de vidrio para la toma de medida de conductividad, en el cual mediante un conductímetro digital se determina la conductividad eléctrica del agua residual.

El razonamiento es que a mayor conductividad medida en el agua residual, mayor número de alcális presente en esta, quiere decir que la HCA ha cedido mayor cantidad de alcális al agua residual, de esta manera se puede determinar el ensayo óptimo.



Figura 3.19

Presentación de agua luego de los ensayos de lavado 1, 2 y 3

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa



Figura 3.20

Presentación de agua luego de los ensayos de lavado 142, 143 y 144

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

Luego de esto se procedió a tomar la medida de la conductividad mediante un conductímetro digital. En las figuras se observan las medidas de conductividad para los ensayos número 1, 2 y 3.



Figura 3.21

Toma de medida de conductividad del ensayo de lavado número 1

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa



Figura 3.22

Toma de medida de conductividad del ensayo de lavado número 2 y 3

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa



Figura 3.23

Toma de medida de conductividad del ensayo de lavado número 31 y 32

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

3.8 Selección de la mejor muestra lavada

Luego de realizada la toma de medida de conductividad de todos los ensayos se procedió a determinar la mejor muestra, esto es, la muestra que generó mayor conductividad eléctrica en el agua residual, removiendo así la mayor cantidad de alcalis presente en las HCA.

Tabla 3.14
Resultados de conductividad eléctrica promedio
Fuente: Elaboración propia

Ensayos	Concentración	Temperatura	Tiempo	Velocidad	Conductividad promedio (ms/cm)
1,2,3	3,33%	20°C	10 min	V1	1.40 ± 0.02
4,5,6			10 min	V2	1.47 ± 0.02
7,8,9			10 min	V3	1.51 ± 0.02
28,29,30			20 min	V1	1.49 ± 0.02
31,32,33			20 min	V2	1.52 ± 0.02
34,35,36			20 min	V3	1.54 ± 0.02
55,56,57		40°C	10 min	V1	1.59 ± 0.02
58,59,60			10 min	V2	1.60 ± 0.02
61,62,63			10 min	V3	1.66 ± 0.02
82,83,84			20 min	V1	1.61 ± 0.02
85,86,87			20 min	V2	1.67 ± 0.02
88,89,90			20 min	V3	1.64 ± 0.02
109,110,111		80°C	10 min	V1	1.76 ± 0.02
112,113,114			10 min	V2	1.74 ± 0.02
115,116,117			10 min	V3	1.84 ± 0.02
136,137,138			20 min	V1	1.71 ± 0.02
139,140,141			20 min	V2	1.81 ± 0.02
142,143,144			20 min	V3	1.82 ± 0.02

3.9 Gráficas de curva de conductividad eléctrica (CE)

Luego de haber hallado la conductividad eléctrica de todos los ensayos se procede a determinar la mejor muestra, esto es, la muestra que obtuvo una mayor conductividad eléctrica con un mínimo de consumo energético lo cual confirma que hubo una mayor extracción de alcális siendo beneficioso para las expectativas del trabajo.

A continuación, se determinó mediante una gráfica las curvas de conductividad eléctrica con los diferentes parámetros para ubicar los puntos y trazar la tendencia de las curvas de cada ensayo de lavado. Al observar las 6 curvas, estas se podrían aproximar a una curva de segundo grado con una ecuación de tipo:

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

Al usar los puntos de las 6 curvas de conductividad, las ecuaciones serían

Para la curva 10 min a V1:

$$y = -0.0000875x^2 + 0.01475x + 1.14$$

Para la curva 10 min a V2:

$$y = -0.00005x^2 + 0.0095x + 1.26$$

Para la curva 10 min a V3:

$$y = -0.00005x^2 + 0.0105x + 1.32$$

Para la curva 20 min a V1:

$$y = -0.0000583x^2 + 0.0095x + 1.323$$

Para la curva 20 min a V2:

$$y = -0.0000667x^2 + 0.0115x + 1.31667$$

Para la curva 20 min a V3:

$$y = -0.00000833x^2 + 0.0055x + 1.433$$

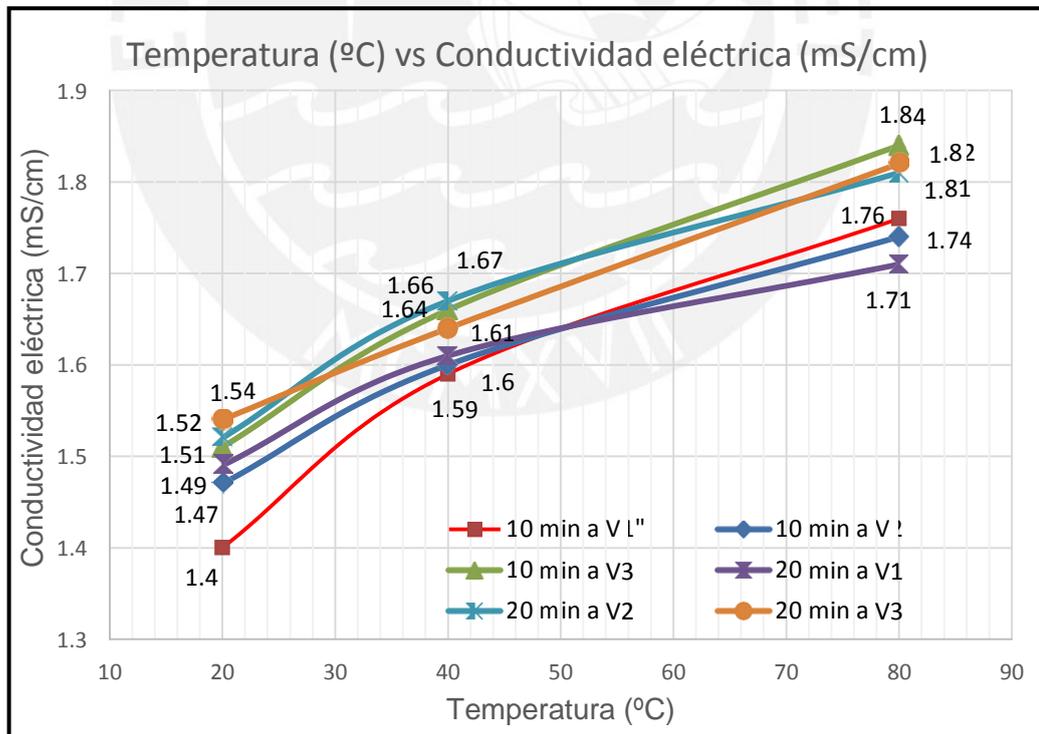


Figura 3.24

Curva de Temperatura vs Conductividad Eléctrica para todos los ensayos

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la gráfica, para un mismo tiempo de 10 minutos y una misma velocidad V1 (10 min a V1) la tendencia de la curva de conductividad va aumentando conforme aumenta la temperatura de trabajo. Lo mismo ocurre con las curvas a diferente velocidad y tiempo (10 min a V2), (10 min a V3), (20 min a V1), (20 min a V2), (20 min a V3).

Analizando las curvas a una misma temperatura de trabajo y un mismo tiempo de trabajo, se observa que una mayor agitación de lavado (V1, V2, V3) genera una mayor conductividad eléctrica, esto es, una mayor remoción de álcalis.

Al comparar las tres curvas a 10 minutos en tiempo de trabajo con las tres curvas a 20 minutos de temperatura de trabajo se observa que a mayor tiempo de HCA expuesta en agua para el lavado (10 minutos más), la conductividad aumenta ligeramente, con lo que el parámetro de tiempo podría no ser tan determinante en la búsqueda de obtener el mejor resultado a la hora de remover el alcális en las HCA.

Caso contrario ocurrió con el parámetro de temperatura de trabajo en el cual se observa que existe un aumento notable de conductividad eléctrica, con lo cual se afirma que la temperatura de trabajo es el parámetro más importante y necesario para la remoción de alcális.

Finalmente, comparando las curvas de conductividad se observa que la velocidad de agitación (V1, V2, V3) si influye en la remoción de álcalis mas no tanto como la temperatura de lavado, sin embargo se podría tomar en cuenta que a mayor velocidad de agitación efectuada en las HCA habrá una mayor remoción de alcális presente en el agua residual

3.10 Acondicionamiento de la HCA óptima lavada

Luego de haber escogido la muestra que generó los mejores resultados se procede al acondicionamiento de la HCA lavada bajo las condiciones de la mejor muestra.

Instrumentación para el acondicionamiento de la HCA óptima

En este caso se utilizarán los mismos instrumentos usados para el acondicionamiento de la HCA virgen con el adicional del horno de secado detallado en los anexos.

Lavado de la HCA óptima

Al igual que en los ensayos elaborados, se lavó la HCA con la misma concentración de 3,33%, por un periodo de tiempo de 20 minutos, a 80°C.



Figura 3.25

Lavado de la HCA óptima

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa



Figura 3.26

Supervisión del lavado de la HCA óptima

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

Escurredo de la HCA óptima

Similarmente luego del lavado se procedió a escurrir la HCA en un colador para posteriormente secar estas y proceder al molido.



Figura 3.27

Escurredo de la HCA óptima

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

Secado de la HCA óptima

Las HCA fueron secadas en un horno de secado. En la figura. Se observa la presentación de la HCA antes de ingresar al horno de secado, posteriormente en la figura. Las HCA son secadas en el horno.



Figura 3.28

Presentación de la HCA antes de ingresar al horno

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa



Figura 3.29

Secado de las HCA en horno

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

Molienda de la HCA óptima

Como se explicó antes, la HCA luego de ser secada procede a molerse en licuadoras eléctricas por 12 minutos aproximadamente hasta obtener tamaños de grano lo más pequeños posibles.



Figura 3.30

Molienda de la HCA óptima

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

Cribado de la HCA molida

La HCA luego de ser molida ingresa a la cribadora para la separación granulométrica en donde se necesita obtener HCA molida con tamaño de malla M60 para ser enviado al laboratorio.



Figura 3.31

Cribado de la HCA molida

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa



Figura 3.32

Presentación final de la HCA molida con tamaño de grano M60

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

Verificación de conductividad en agua residual

Si bien se comprobó que la muestra explicada fue la que mejores resultados generó, es necesario comprobar que la conductividad eléctrica sea la misma que la hallada en los ensayos, o al menos que se acerque al valor.



Figura 3.33

Agua residual del lavado de la HCA óptima

Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio de investigación del Grupo Carbón-Biomasa

3.11 Cálculo e interpretación de índices de *slagging* & *fouling* para la HCA lavada

Habiendo seleccionado la muestra con los mejores resultados, se procedió a calcular e interpretar los índices de *slagging* & *fouling* esta vez a la hoja de caña tratada.

El índice de alcalí se sitúa en una alta posibilidad de *slagging* según los rangos.

Tabla 3.15

Índice de alcalí para muestra de HCA lavada óptima

Muestra	Índice de Alcalí	Resultado
HL3-INV	0,384	Alta posibilidad de <i>slagging</i>

El radio de contenido o R_s se sitúa en una baja posibilidad de *slagging*.

Tabla 3.16

R_s para muestra de HCA lavada óptima

Muestra	R_s	Resultado
HL3-INV	0,073	Baja posibilidad de <i>slagging</i>

El porcentaje de cloro se sitúa en una baja posibilidad de *slagging*.

Tabla 3.17

%CI para muestra de HCA lavada óptima

Muestra	%CI	Resultado
HL3-INV	0,14	Baja posibilidad de <i>slagging</i>

El índice de viscosidad o S_R se sitúa en una baja posibilidad de *slagging*.

Tabla 3.18

 S_R para muestra de HCA lavada óptima

Muestra	S_R	Resultado
HL3-INV	82,080	Baja posibilidad de <i>slagging</i>

Finalmente el índice de incrustaciones se sitúa en una alta posibilidad de *fouling*.

Tabla 3.19

 F_u para muestra de HCA lavada óptima

Muestra	F_u	Resultado
HL3-INV	1,001	Alta posibilidad de <i>fouling</i>

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de haber analizado los resultados de los ensayos del lavado, se pudo comprobar que según la tendencia de las curvas en las gráficas 1.A. y 1.B. la velocidad de agitación de lavado no juega un rol importante al momento de la extracción de alcális ya que la conductividad eléctrica aumentó de manera mínima conforme la agitación era mayor, esto debido a que el agua se satura y no puede absorber más alcális sin importar cuánto se agite el agua.

De igual manera ocurrió con el tiempo de lavado, en el cual se puede observar de las mismas gráficas que el aumento de la conductividad eléctrica no fue significativo al aumentar el tiempo de lavado, inclusive se observa que este aumento de conductividad eléctrica disminuye conforme aumenta la velocidad de agitación.

Caso contrario ocurrió con la temperatura de lavado en la cual se observó un aumento significativo de conductividad eléctrica conforme aumentaba la temperatura de los ensayos.

4.1 Resultados del análisis elemental

Los análisis elementales de la hoja de caña virgen como de la hoja de caña luego del tratamiento de lavado muestran una disminución considerable de Azufre y Cloro en menor magnitud lo cual es favorable ya que existe un menor riesgo de formación de escoria y ensuciamiento (*slagging & fouling*). Además, se observa un aumento de poder calorífico luego del lavado de la hoja de caña lo cual es beneficioso para generar una mejor combustión.

Tabla 4.1

Tabla comparativa de análisis elemental de HCA virgen y HCA lavada

Elementos	HCA virgen	HCA lavada
C (%)	35,9	-
H (%)	5,91	-
N (%)	0,26	-
O (%)	57,45	-
S (%)	0,31	0,16
Cl (%)	0,17	0,14
Humedad (%)	12	-
PC(cal/g)	3207	3572

4.2 Resultados de análisis de cenizas

Al comparar los resultados de análisis de cenizas se puede observar una disminución de óxido de potasio (K_2O) en un 61% aproximadamente, además de una disminución de óxido de sodio (Na_2O) en un 25%. Esta variación resulta lógica debido a que durante el lavado se removieron estas sustancias las cuales acarrear problemas de generación de escoria e incrustaciones, mejorando así la operatividad del aprovechamiento energético de la hoja de caña.

Tabla 4.2

Tabla comparativa de análisis de ceniza de la HCA virgen y HCA lavada

ENSAYO		HV1-INV	HL3-INV
Dióxido de silicio, SiO_2	%	54,8	65,5
Trióxido de aluminio, Al_2O_3	%	8,0	9,3
Trióxido de hierro, Fe_2O_3	%	3,7	4,3
Óxido de calcio, CaO	%	8,1	7,8
Óxido de magnesio, MgO	%	2,9	2,2
Trióxido de azufre, SO_3	%	8,5	2,1
Óxido de sodio, Na_2O	%	1,6	1,2
Óxido de potasio, K_2O	%	7,6	2,9
Dióxido de titanio, TiO_2	%	0,5	0,6
Pentóxido de fósforo, P_2O_5	%	1,0	0,8
Óxido de manganeso, MnO	%	0,1	0,1
Óxido de estroncio, SrO	%	0,1	0,1
Pérdida por calcinación	%	3,3	2,7
TOTAL	%	100	99,4

Como se observa en la tabla 4.2 el porcentaje de sales extraídas de la HCA lavada varió respecto a la HCA virgen, disminuyendo en mediana cantidad en el caso del óxido de calcio, óxido de magnesio, óxido de sodio, pentóxido de fósforo y en gran cantidad en el caso del trióxido de azufre y óxido de potasio. Esto no hace más que corroborar la relación entre la conductividad eléctrica y el porcentaje de sales extraídas, a mayor conductividad eléctrica medida en el agua residual, mayor extracción de sales presentes en la hoja de caña.

4.3 Resultados de análisis inmediato

Se comprueba que existe un aumento del poder calorífico a partir del pre-tratamiento de lavado, específicamente un aumento de alrededor de 10%, con lo que el lavado no

solo disminuye los problemas de operación sino también influye favorablemente en el poder energético de las HCA.

Tabla 4.3

Comparativa de poder calorífico de la HCA virgen y HCA lavada

Elemento	HCA virgen	HCA lavada
PC(cal/g)	3207	3572

Asimismo mediante el análisis inmediato se pudo calcular los índices de *slagging* & *fouling* para la hoja de caña lavada y así elaborar una comparación con la hoja de caña virgen.

El índice de álcali sigue manteniendo una alta probabilidad de *slagging* luego del lavado según el rango pero está en el límite de tener una mediana probabilidad de *slagging*. En total la disminución fue de 62% aproximadamente.

Tabla 4.4

Comparación del índice de álcali de la HCA virgen y HCA lavada

Muestra	Índice de álcalis	Resultado
HCA virgen	1,032	Alta posibilidad de <i>slagging</i>
HCA lavada	0,384	Alta posibilidad de <i>slagging</i>

El porcentaje de cloro sigue manteniendo una baja probabilidad de *slagging* a pesar de haber reducido su cantidad en 12% respecto a la HCA virgen.

Tabla 4.5

Comparación del %Cl de la HCA virgen y HCA lavada

Muestra	%Cl	Resultado
HCA virgen	0,16	Baja posibilidad de <i>slagging</i>
HCA lavada	0,14	Baja posibilidad de <i>slagging</i>

El radio de contenido (Rs) disminuyó en un 65% y se sigue manteniendo con una baja probabilidad de *slagging*.

Tabla 4.6

Comparación del R_s de la HCA virgen y HCA lavada

Muestra	R_s	Resultado
HCA virgen	0.208	Baja posibilidad de <i>slagging</i>
HCA lavada	0.073	Baja posibilidad de <i>slagging</i>

El índice de viscosidad (S_R) aumentó en un 4% aproximadamente lo cual mejora el índice y lo coloca con una muy baja probabilidad de *slagging*.

Tabla 4.7

Comparación del S_R de la HCA virgen y HCA lavada

Muestra	S_R	Resultado
HCA virgen	78,849	Baja posibilidad de <i>slagging</i>
HCA lavada	82,080	Muy Baja posibilidad de <i>slagging</i>

Finalmente el índice de incrustaciones (F_u) se vio disminuido en un 70% aproximadamente lo cual lo sitúa aún con alta posibilidad de *fouling*, esto debido a que el rango es amplio (0.6 a 40) sin embargo hubo una reducción sustancial y el valor luego del lavado se encuentra cerca de convertirse en una baja posibilidad de *fouling*.

Tabla 4.8

Comparación del F_u de la HCA virgen y HCA lavada

Muestra	F_u	Resultado
HCA virgen	3,474	Alta posibilidad de <i>fouling</i>
HCA lavada	1,001	Alta posibilidad de <i>fouling</i>

CONCLUSIONES

1. El lavado o lixiviación requiere, además, de pre-tratamientos adicionales como la reducción de HCA (trozado) y separación de partículas no aptas para el proceso (tamizado) con la finalidad de mejorar su eficiencia como proceso.
2. La conductividad eléctrica como método para inferir indirectamente en el rendimiento del pre-tratamiento del lavado en la remoción de álcalis resultó muy importante en el presente proyecto. Se pudo comprobar que al aumentar la conductividad eléctrica, el contenido de álcalis presente en la HCA disminuyó (6,4% menos de SO₃ y 4,7% menos de K₂O), permitiendo realizar un continuo seguimiento de las muestras de agua residual, a un menor costo y con una mayor frecuencia, de una manera precisa y confiable.
3. Mediante el pre-tratamiento de lavado se logró extraer un significativo porcentaje de álcalis (62%), responsable de problemas operacionales de la caldera (corrosión, escorias, ensuciamiento). El proceso de lavado resultó ser un método simple, útil y a un costo menor al de otros pre-tratamientos, que permitió que las HCA se ubiquen en un rango donde los problemas por formación de escorias (*slagging*) sean mínimos (de 1,032 a 0,384 al límite de tener una mediana probabilidad), el índice de formación de incrustaciones (*fouling*) se reduzca de 3,474 a 1,001 y disminuyan los problemas por corrosión.
4. Tanto la temperatura de trabajo como la velocidad de agitación de lavado influyeron en la conductividad eléctrica, por sobre todo la temperatura a 80°C obtuvo valores elevados de hasta 1.84 ds/cm en conductividad comparando con los valores de conductividad a 20°C. En cuanto al tiempo de lavado, esta variable no tuvo mucha influencia ya que los valores no cambiaron en gran sentido, esto debido a que el agua se satura a cierto punto y ya no tiene la capacidad de absorber más metales alcalinos.
5. Al comparar los resultados de los indicadores tanto para la hoja de caña virgen como para la hoja de caña sometida al pre-tratamiento de lavado, se pudo concluir que la hoja de caña virgen presentaba un índice de álcalis de 1,032 indicando una alta probabilidad de *slagging*, y luego de ser sometida al lavado, el índice de álcalis fue de 0.384 indicando aún una alta probabilidad de *slagging* pero muy cerca al límite de tener una mediana probabilidad de *slagging*, habiendo disminuido en un 62% aproximadamente. De igual manera

ocurrió con el porcentaje de cloro el cual disminuyó en un 12%; el radio de contenido disminuyó en un 65%; el índice de viscosidad aumentó un 4% siendo beneficioso ya que reduce aún más la probabilidad de formación de escorias; y finalmente el índice de incrustaciones disminuyó en un 70% disminuyendo la probabilidad de formación de incrustaciones.

RECOMENDACIONES

1. Para un mejor rendimiento del proceso, se puede analizar el uso de la técnica del prensado de las HCA durante el lavado. Esto debido a que se ha demostrado que al presionar las HCA, éstas tienden a expulsar una mayor cantidad de álcalis lo cual permitiría una mayor eficiencia.
2. En cuanto al agua residual, siendo esta rica en potasio y sodio debido al alcális absorbido de la hoja de caña, esta podría ser reutilizada en sistemas de regadío de la caña de azúcar, permitiendo de este modo generar un ciclo cerrado al utilizar el agua residual como una manera de fertilizante para el cultivo de la caña de azúcar.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ELÍAS CASTELLS, Xavier y Santiago BORDAS ALSINA
2012 “Biomasa y Bioenergía”. *Energía, Agua, Medioambiente, territorialidad y Sostenibilidad*. Madrid: Diaz de Santos S.A., pp. 745
- [2] GARCÍA GARRIDO, Santiago
2012 “La Biomasa”. *Centrales Termoeléctricas de Biomasa*. Madrid: Renovetec, pp. 1-2
- [3] VASSILEV, Stanislav y otros
2010 “An overview of the chemical composition of biomass”. *Fuel*. Bulgaria: ELSEVIER, pp. 913-933
- [4] EVENOR VELASQUEZ, Wilfredo
2009 “Biomasa: características y clasificación del estado físico”. *Biomasa. Energías renovables*. s/l: s/e.
- [5] OPEX ENERGY
Plantas de biomasa. Consulta: 20 de Septiembre de 2015.
<http://opex-energy.com/biomasa/>
- [6] ENERGIZA
Situación actual de la biomasa en el mundo. Consulta: 2 de Octubre de 2015
<http://www.energiza.org/eolica/20-biomasa/953-situaci%C3%B3n-actual-de-la-biomasa-en-el-mundo>
- [7] JENKINGS, B.M. y otros
1998 “Combustion properties of biomass”. *Fuel Processing Technology* 54. California: ELSEVIER, pp. 17-46

[8] DEMIRBAS, Ayhan

2004 "Combustion characteristics of different biomass fuels". *Progress in Energy and Combustion Science* 30. s/l: ELSEVIER, pp. 219-230

[9] ASTM D3172-13

2013 *Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke.*

[10] ENDESA

Las centrales de biomasa. Consulta: 21 de Septiembre de 2015

http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xiv.-las-centrales-de-biomasa

[11] SEQUERA, Martín

2015 "Un mundo con biomasa". *El blog de la energía.* Consulta: 3 de Diciembre de 2015

<http://unmundoconbiomasa.blogspot.pe/2015/02/situacion-actual-de-la-biomasa.html>

[12] BAXTER, Larry

2004 "Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy". *Fuel* 84. USA: ELSEVIER, pp. 1295-1302

[13] URIEN PINEDO, Andrea

2013 "Obtención de biocarbones y biocombustible mediante pirolisis de biomasa residual". *Trabajo de fin de máster de investigación*, pp. 18-21

[14] NOGUES, Fernando, Daniel GARCÍA y Adeline REZEAU

2010 "Energía de la biomasa. Volumen II". *Energías renovables.* Zaragoza: Prensas universitarias de Zaragoza, pp. 47-67

[15] CANALÍS, P., J. ROYO y SEBASTIÁN F.

2011 "Co-combustión de carbón y biomasa en calderas de combustible pulverizado". *Biomasa.* s/l: Fundación Circe, pp. 56-59

[16] MEDIAVILLA, Irene y Luis ESTEBAN

2010 “Aplicaciones de la biomasa en la generación de calor en el sector doméstico”. *Calderas de biomasa*. s/l: CEDER-CEMET, pp. 23-25

[17] IEA BIOENERGY

2010 “Thermal Pre-treatment of biomass for large-scale applications”. *Energy Technology Network*. Consulta: 3 de Noviembre de 2015

<http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/ExCo66-Thermal-pre-treatment-of-biomass-for-large-scale-applications-summary-and-conclusions1.pdf>

[18] BLOMBERG, T.E.

2007 “Free alkali-index for optimizing the fuel mixture in biomass co-firing”. En MULLER-STEINHAGEN, Hans, REZA MALAYERI, M. y WATKINSON, Paul (Editores). *Heat Exchanger Fouling and Cleaning VIII*. Finland: The Berkeley Electronic Press, pp. 97-102

[19] HALD, Pia

s/f “The behaviour of alkali metals in biomass conversion systems”. *Department of Combustion Research (Risoe National Laboratory)*. Denmark: s/e

[20] YANQING, N., YIMING, Z., y HOUZHANG, T.

2014 “Investigations on biomass slagging in utility boiler: Criterion numbers and slagging growth mechanisms”. *Fuel processing technology*. s/l: ELSEVIER, volumen 128, pp. 499-508

[21] TEIXEIRA, Paula y otros

2012 “Evaluation of slagging and fouling tendency during biomass co-firing with coal in a fluidized bed”. *Biomass and Bioenergy*. s/l: ELSEVIER, volumen 39, pp. 192-203

[22] PRONOBIS, Marek

2005 “Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations”. *Biomass and Bioenergy*. s/l: ELSEVIER, volumen 24, pp. 375-383

[23] DÍEZ, Luis E.

2006 *Aspectos críticos del diseño básico de calderas de combustión de biomasa en parrilla* [diapositiva]. Consulta: 5 de Enero de 2016

<http://www.fundacionenergia.es/pdfs/Biomada%2006/L.Diez.pdf>

[24] NOGUÉS, Fernando, Daniel GARCÍA y Adeline REZEAU

2010 “Energía de la biomasa volumen I”. *Energías renovables*. Zaragoza: Pressas universitarias de Zaragoza, pp 47-67

[25] DAVIDSSON, K.O. y otros

2002 “The effects of fuel washing techniques on alkali release from biomass”. *Fuel*. s/l: ELSEVIER, volume 81, pp. 137-142

[26] VAN LOO, Sjaak y Jaap KOPPEJAN

2008 *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Segunda edición. USA: Fish Books, Enfield

[27] XINGLIANG, Liu y Bi XIAOTAO

2011 “Removal of inorganic constituents from pine barks and switchgrass”. *Fuel processing technology*. s/l: ELSEVIER, pp. 1273-1279

[28] LENNTECH

TDS y conductividad eléctrica. Consulta: 13 de Noviembre de 2015

<http://www.lenntech.es/calculadoras/tds/tdsyconductividad-electrica.htm>

[29] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

2014 *IV Censo Nacional Agropecuario. Compendio estadístico Perú 2014*. s/l: Agrario. Consulta: 9 de Diciembre de 2015

https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaes/Est/Lib1173/cap12/cap12.pdf

[30] REYES MONTIEL, J. L., R. PEREZ BERMÚDEZ y J. BETANCOURT MENA

s/a “Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental”. En *cubasolar*. Consulta: 13 de Noviembre de 2015

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar05/HTML/articulo01.htm>

[31] HUGHES, Evan

2000 “Biomass co-firing: economics, policy and opportunities”. *Biomass and bioenergy*. s/l: ELSEVIER, volumen 19, pp. 457-465

[32] QUAACK, Peter, Harrie KNOEF y Stanssen HUBERT

1999 “Energy from biomass: A review of combustion and gasification technologies”. s/l: Energy Series, pp. 1-99

[33] JORAPUR, Rajeev M. y Anil K. RAJVANSHI

1995 “Development of a sugarcane leaf gasifier for electricity generation”. *Biomass and Bioenergy*. s/l: ELSEVIER, volumen 8, pp. 91-98

[34] HEIN, K. R. G. y J. M. BEMTGEN

1998 “EU clean coal technology-co-combustion fo coal and biomass”. *Fuel Process Technology*. s/l: ELSEVIER, volumen 54, pp. 159-169

[35] OBERNBERGER, Ingwald

2010 “The Present state and future development of industrial biomass combustion for heat and power generation”. Ponencia presentada en *Conference on Thermal and Environmental Issues in Energy Systems*. BIOENERGY. Sorrento, 16 de Mayo.

[36] CARRASCO GARCÍA, Juan

2007/2008 *Combustión directa de la biomasa*. Master en Energías Renovables y Mercado energético. s/l: Escuela de Negocios

[37] JIMÉNEZ, S.

s/a *Combustión de biomasa*. Laboratorio de investigación en tecnologías de la combustión. Consulta: 16 de Diciembre de 2015

<http://www.energia2012.es/sites/default/files/Combusti%C3%B3n%20de%20biomasa.pdf>

[38] GUZMÁN, A. y otros

2011 *Valoración puzolánica de la hoja de caña de azúcar*. s/l: s/e, volumen 61, pp. 213-225.

[39] Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca

s/a *La caña de azúcar como cultivo energético*. En *cosechaypostcosecha*. Consulta: 21 de Enero de 2016

<http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/agoindustrializacion/La-Cana-De-Azucar-Como-Cultivo-Energetico.pdf>

[40] PROYECTO LATIN

2013 *Introducción al estudio de fuentes renovables de energía*. Consulta: 28 de Diciembre de 2015

<http://escritura.proyectolatin.org/introduccion-al-estudio-de-fuentes-renovables-de-energia/63-determinacion-de-produccion-de-biomasa/>

[41] UNIÓN CALOR

2002 *Características de la biomasa*. Consulta: 21 de Noviembre de 2015

<http://www.unioncalor.com/consejos-ahorro/ahorre-energia-6-caracteristicas-de-la-biomasa.html>

[42] THE CENTRE FOR BIOMASS TECHNOLOGY

1998 *Straw for Energy Production, Technology - Environment – Economy*. Segunda edición. s/l: Danish Enery Agency. Consulta: 2 de Noviembre de 2015

http://www.videncenter.dk/gule%20halm%20haefte/Gul_Engelsk/halm-UK01.pdf

[43] ASSUREIRA, Estela y Marco Antonio ASSUREIRA

s/a *Potencial energético de la biomasa residual en el Perú.* Lima

[44] QUINTANILLA, Carmen

2000 *Análisis de agua – determinación de la conductividad electrolítica – método de prueba.* Consulta: 16 de Diciembre de 2015

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-093-SCFI-2000.pdf>

