



Máster en Biotecnología Aplicada a la Conservación y Gestión Sostenible de Recursos Vegetales

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DE ORIGEN FORESTAL MEDIANTE TECNOLOGÍA MICROONDAS



Susana Expósito González
21 de julio de 2015

Máster en Biotecnología Aplicada a la Conservación y Gestión
Sostenible de Recursos Vegetales

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN
BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DE ORIGEN FORESTAL MEDIANTE
TECNOLOGÍA MICROONDAS

MOISTURE CONTENT DETERMINATION IN FORESTRY SOLID
BIOFUELS BY MICROWAVE TECHNOLOGY

Susana Expósito González

Firma

Alba Fanjul Espinar

Juan Majada Guijo

Firma

Firma

Determinación del contenido de humedad en biocombustibles sólidos de origen forestal mediante tecnología microondas.

Resumen

En la actualidad, con la preocupación del cambio climático y los precios al alza del petróleo se están buscando nuevas fuentes de energías alternativas. Una de las de mayor auge es el empleo de los biocombustibles, y dentro de estos la biomasa forestal es el más representativo. La energía de la biomasa proviene de la combustión de la misma, y su calidad depende fundamentalmente de la cantidad de agua existente en el material. De cara a la mejor comercialización de la biomasa forestal empleada como biocombustible, es necesario conocer el porcentaje de humedad, algo que con los métodos normalizados que se emplean en la actualidad resulta laborioso costoso. Por este motivo, en este trabajo se ha evaluado una nueva tecnología, basada en la medición de la humedad de la biomasa con energía microondas, con el fin de obtener una nueva metodología que facilite todo el proceso de caracterización.

La determinación de humedad en biocombustibles sólidos de origen forestal se lleva a cabo gracias a la interacción entre los dipolos de las moléculas de agua con las microondas emitidas por el equipo. Se ha evaluado la eficacia y precisión de este método con el equipo "Moisture Scan" de Döschner & Döcher comparándolo con el método normalizado del secado en estufa. Para la realización de este ensayo, se tomaron diferentes tipologías de astillas con diferentes rangos de humedad. Esta nueva tecnología es más rápida, no es destructiva y no presenta problemas producto de las características físicas del material de estudio, aunque debe ser calibrada para las distintas configuraciones que puede presentar un biocombustible de biomasa forestal.

Palabras clave: biocombustibles sólidos de origen forestal, contenido de humedad, microondas, biomasa.

Moisture content determination in forestry solid biofuels by microwave technology

Abstract

Today, with the concern about climate change and the increase of the oil price, new energy sources are being searching for. One of the most booming is the use of biofuels, and within these forest biomass is the most representative. The biomass energy comes from its combustion, and the quality of this combustion depends mostly from the moisture content of the material. In regards to get a better commercialization of the forestry biomass used as biofuel, knowing the percent of moisture content is required, but with the standardized methods that are currently in use it is tough and expensive. Therefore, this study has evaluated a new technology based on measuring biomass moisture with microwave energy, in order to obtain a new methodology that facilitates the process of characterization.

The determination of the moisture content in solid forestry biofuels is carried through by the interaction between the dipoles of the water's molecules with the microwaves emitted by the equipment. The efficacy and precision of this method has been evaluated with "Moisture Scan" equipment by Döschner & Döcher being compared with the standardized method of the heater dryer. To perform this project, different wood chips typologies has been taken at different moisture levels. This new technology is faster, nondestructive and don't give problems related with the physical characteristics of the study product, but it should be calibrated for the different states that could have a biofuel from the biomass forestry.

Keywords: forestry solid biofuels, moisture content, microwave, biomass

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. El aprovechamiento de la biomasa forestal con fines energéticos.	3
1.4. Especificaciones de productos y variables que afectan a la calidad de los biocombustibles.	5
1.5. Métodos para la determinación de humedad. Antecedentes y situación actual. .	8
1.6. Determinación del contenido de humedad mediante la tecnología microondas..	9
2. MATERIAL Y MÉTODOS	11
2.1. Caracterización de biocombustibles sólidos para fines energéticos.....	11
2.2. Determinación de humedad mediante tecnología microondas.....	11
Fundamento	11
Metodología.....	13
2.3. Procesado de datos y estadística	14
3. RESULTADOS	15
3.1. Modelización de los datos	16
3.2. Relación de la humedad determinada en estufa y la densidad aparente	16
3.3. Predicción de la humedad determinada por microondas por el equipo microondas a partir de la densidad aparente.....	18
3.4. Predicción de la humedad determinada en estufa a partir de la humedad determinada por microondas por el equipo microondas.	21
4. DISCUSIÓN	23
5. CONCLUSIONES	25
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

La biomasa en general, y la biomasa forestal en particular, es un recurso energético renovable en pleno auge, debido principalmente a la escasez de los combustibles fósiles y a la mayor preocupación por el medio ambiente (INTRADER, 2010). Se prevé que la escasez de las fuentes de energía tradicionales dé lugar a un aumento de los precios del petróleo y del gas natural, por lo que los países con déficits energéticos, buscan soluciones a la demanda de energía dentro de sus fronteras, centrando la atención en fuentes alternativas de energía (Silver *et al.*, 2015).

Para poder obtener un producto biomásico de calidad, que permita su introducción y competir en el mercado energético actual, resulta esencial realizar una adecuada caracterización de sus propiedades, para lo cual se deben utilizar unas normas específicas para las distintas tipologías de biocombustibles. En España este papel está asignado a la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), en la cual existe un comité técnico dedicado a la adaptación y publicación de las normativas internacionales (Normas UNE-EN e ISO), entre las cuales se encuentran los biocombustibles sólidos españoles. Esta caracterización da fiabilidad a la calidad de estos biocombustibles, permite establecer su precio en el mercado y define su comportamiento en los procesos de conversión energética, indispensable para optimizar el diseño de los equipos energéticos y definir sus especificaciones técnicas (IDAE, 2007).

En la actualidad, podemos encontrar en el mercado energético biomasa forestal con rangos de humedad entre el 15 y el 60 por ciento (en base húmeda). Concretamente en Asturias, por sus condiciones meteorológicas, es complicado conseguir biocombustibles con humedades por debajo del 30 por ciento, excepto empresas que la generan en otras CCAA y la comercializan en Asturias. Sin embargo, la mayor parte de la biomasa se comercializa tras su generación en verde, y no se lleva a cabo un almacenamiento y secado de la biomasa forestal con el objetivo de obtener un combustible de la más alta calidad posible. Todo esto genera al productor dificultades para entrar en el mercado de energía térmica, mucho más exigente al competir con otros combustibles tradicionales como el gas y lo que es peor la baja calidad del producto también se refleja en el precio final del producto.

Para la comercialización de estos productos de calidad, la determinación de la humedad de la biomasa es fundamental, ya que influye sobre el poder calorífico. Cuando se emplean biomásas con alto contenido de agua, en el proceso de combustión parte de la energía liberada se emplea en la evaporación del agua y en consecuencia no se traduce en energía eléctrica o térmica. Además, la humedad reduce la temperatura de combustión por debajo de la óptima dando lugar a una combustión incompleta del combustible, lo que puede generar problemas en calderas debido a escorias y exceso de producción de humos.

Por todo ello, es importante conocer el grado de humedad del material empleado como biocombustible, para lo cual existen distintas metodologías de análisis normalizadas o no. Las tecnologías existentes de medición rápida y eficiente no están normalizadas, por lo que el desarrollo de un método robusto, fiable, reproducible y repetitivo que

abarate costes resultará esencial de cara al asentamiento de los biocombustibles como fuente de energía.

Los métodos normalizados que se están utilizando actualmente para la determinación de humedad presentan el inconveniente de su laboriosidad y tiempo necesario para su finalización. Por otro lado las distintas tipologías de biomasa de especies frondosas y coníferas presentan una gran variabilidad de densidad básica, la cual puede aún aumentar mucho más en función de la formulación del biocombustibles (tronco, cortezas, astillas con distintas granulometrías, etc.). Aunque las recomendaciones de países con más conocimiento de las renovables de biomasa, indican que este recurso debe ser pagado por energía recibida o en el peor de los casos por estéreos (volumen adquirido), lo cierto es que España la mayoría de las transacciones se están realizando y pagando por peso.

Por todo ello, en este trabajo de investigación se busca poner a punto un método de que permita evaluar la relación entre tipologías de astillas, volumen aparente y humedad del producto y en segundo lugar desarrollar y validar modelos de calibración para medición de humedad en astillas mediante tecnología microondas como alternativa tanto para el método del secado en estufa usado actualmente como método normalizado para la determinación de humedad en los biocombustibles.

1.2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es el de generar conocimiento acerca de la relación entre la densidad de astillas y su contenido de humedad, así como optimizar nuevos métodos para la determinación de humedad en biomasa forestal de una forma rápida y eficiente, principalmente de cara a su utilización como biocombustible en calderas de biomasa de acuerdo con la actual normativa, pero también de cara a un uso más amplio. Para dicho objetivo, se empleará un equipo basado en tecnología microondas que se encuentra actualmente en el mercado, pero que no ha sido desarrollado para la determinación de humedad del material objeto de estudio.

Los objetivos específicos son:

1. Relación entre tipologías de astillas, volumen aparente y humedad del producto
2. Estudio del comportamiento del equipo en laboratorio con diferentes tipologías de biomasa forestal a diferentes porcentajes de humedad.
3. Calibración y configuración del equipo para un mayor ajuste en la determinación de humedad en el laboratorio del material de estudio.
4. Evaluación de la precisión del equipo para las diferentes tipologías de producto.
5. Identificar los puntos críticos del equipo y metodología, analizando las causas y estableciendo posibles soluciones.

1.3. El aprovechamiento de la biomasa forestal con fines energéticos.

1.3.1. La materia prima de los biocombustibles

Los biocombustibles provienen de la biomasa o materia orgánica que constituye a todos los seres vivos del planeta (ArgenBio,2004). Concretamente, según UNE-EN CEN 14588 de septiembre de 2011, se define biocombustible como: “combustible producido directa o indirectamente de biomasa”. El concepto de biomasa al cual se hace referencia, se determina como “el material de origen biológico excluyendo el material embebido en formaciones geológicas o transformado en fósil”. En cuanto a su clasificación, se puede hacer una distinción elemental entre biocombustibles primarios (sin elaborar o con una manipulación mínima) y secundarios (mayor grado de elaboración, manipulación química, producto de una síntesis...).

A continuación se muestra una tabla resumen con la terminología unificada de los biocombustibles:

Tabla 1. Terminología Unificada de Biocombustibles (UBET)

		Biomasa leñosa	Biomasa herbácea	Biomasa de frutos y semillas	Varios (incluidas las mezclas)
		WOODFUELS	AGROFUELS		
Cultivo energético	Directos	- Árboles de bosques energéticos	- Plantas herbáceas	- Cereales energéticos	
		- Árboles de plantaciones energéticas	- Cultivos energéticos de cereales enteros		
Subproductos	Indirectos	- Subproductos de la selvicultura	- Pajas	- Huesos, cáscaras, vainas	- Subproductos animales
		- Subproductos del aprovechamiento			- Subproductos hortícolas
Materiales derivados de otros usos	De recuperación	- Subproductos de la industria de la madera	- Subproductos de la elaboración de fibras	- Subproductos de la industria de la alimentación	- Subproductos paisajísticos
		- Licor negro			- Biolodos
		- Madera usada	- Productos de fibra usados	- Productos de frutas y semillas usadas	- Subproductos de origen municipal
					- Desperdicios de cocina
					- Fangos de aguas residuales

Fuente: adaptado de UBET (FAO 2004; <http://www.fao.org/docrep/009/j6439s/j6439s00.htm>).

A partir de la publicación de la norma europea UNE EN 15234-1: 2011, que abarca tanto el control de calidad del producto como el aseguramiento de la calidad, se consideran biocombustibles sólidos a los originados a partir de las siguientes fuentes:

- ❖ Productos agrícolas y forestales.
- ❖ Residuos vegetales agrícolas y forestales.
- ❖ Residuos vegetales procedentes de la industria de procesamiento de alimentos.
- ❖ Residuos de madera, con la excepción de los residuos de madera que pueden contener compuestos orgánicos halogenados o metales pesados como consecuencia de su tratamiento con conservantes de madera o recubrimiento, y que incluyen, en particular, los residuos de madera que proceden de la construcción y demoliciones.
- ❖ Residuos vegetales fibrosos procedentes de la producción de pulpa virgen y de la producción de papel a partir de pasta, con la condición de que sean co-incinerados en el lugar de producción y la generación de calor se recupere.
- ❖ Residuos de corcho.

Según los datos publicados por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente; adelantando datos del cuarto Inventario Forestal Nacional, el Principado de Asturias posee más de un millón de hectáreas, de las que el 73% corresponde al uso forestal, siendo un valor superior al 55% correspondiente a la media nacional. Además, durante estos últimos años se ha producido un incremento de la cantidad de árboles y el volumen de madera de las especies arbóreas presentes en los montes asturianos de entre un 24 y un 29 por ciento con respecto al Tercer Inventario Forestal Nacional (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, 2013).

➤ **La situación del sector energético**

De cara a la producción de biocombustibles se ha de tener en cuenta la situación del sector energético actual y las tendencias de consumo para poder comprender mejor el mercado y adecuar este producto a la demanda existente, lo que justifica un mayor estudio de este material.

En los últimos datos disponibles de Eurostat, correspondientes a 2012, se observa que el consumo total de energía en Europa bajó ligeramente, excepto en el caso del carbón y energías renovables. Si nos centramos en nuestro país, respecto a la evolución de las energías renovables, y concretamente en energía procedente de la biomasa, en el año 2013 se produjo un incremento del 3,0% en su demanda, alcanzando el 74,5% de la aportación total de las energías renovables a la demanda final de energía. Esta mayor demanda se encuentra asociada al consumo producido en centrales de cogeneración con biomasa y/o biogás, y el resto a instalaciones térmicas ubicadas en los sectores residencial, industrial y servicios (Ministerio de Industria Energía y Turismo, 2014).

En cuanto al consumo de energía producido en el Principado de Asturias durante el 2013, casi el 10 % del consumo fue cubierto con energía procedente de energía renovables, lo que supuso un incremento el 19,5% respecto al año 2012 (Fundación asturiana de la energía, 2013). La Fundación CETEMAS desarrolló un estudio para determinar el "Primer balance de oferta y demanda de biocombustibles del Principado

de Asturias” empleando la metodología Wisdom. Este trabajo, publicado recientemente (Sánchez-García et al., 2015) permite elaborar mapas GIS con oferta real de combustible, demanda y balances energéticos con una escala espacial previamente definida (Figura 1). De acuerdo con este estudio la biomasa potencial existente en Asturias es de 1.475.852 t/año de biomasa, susceptibles de ser empleadas como biocombustibles y esto sólo teniendo en cuenta la biomasa residual procedente de los aprovechamientos forestales (parte aérea y raíces).

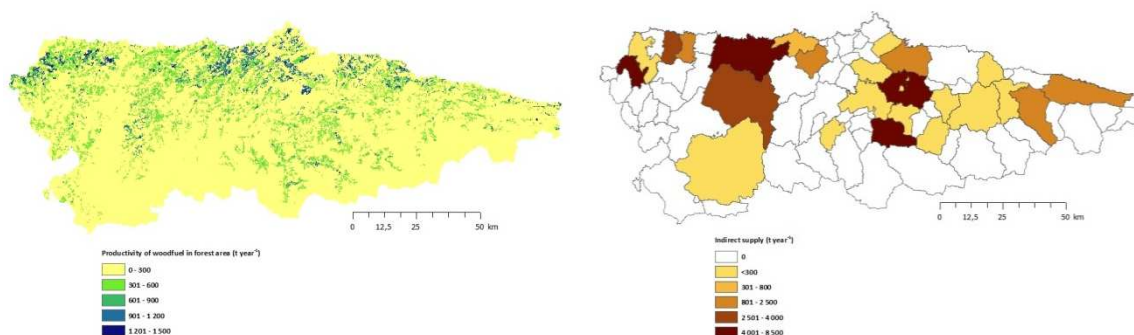


Figura 1: Ejemplo de información gráfica con representación de oferta forestal e industrial de biocombustibles en el Principado de Asturias Fuente: Sánchez-García et al., 2015.

1.4. Especificaciones de productos y variables que afectan a la calidad de los biocombustibles.

Entre las características más importantes de los biocombustibles forestales se encuentra la humedad, responsable principal del poder calorífico y la densidad del producto. El poder calorífico de un combustible expresa la cantidad de energía liberada durante la combustión completa de una unidad de masa del combustible. El contenido en humedad de la madera cambia el poder calorífico reduciéndolo. Esto se debe a que una parte de la energía liberada durante el proceso de combustión se gasta en la evaporación del agua y en consecuencia no está disponible para ningún uso térmico.

De las distintas tipologías de combustibles forestales, la comercialización de astillas es junto con los pellets el sector de mayor interés por su potencial uso tanto industrial como doméstico. El presente estudio se centra en el uso de aprovechamientos intermedios y residuos forestales de astillas como fuente de energía. Por ello centramos la introducción en la caracterización de parámetros de calidad relacionados con astillas forestales. En la (Tabla 2) se presentan las especificaciones de las propiedades de las astillas de madera. Desde un punto de vista normativo las dimensiones de la astilla que afectan a la densidad aparente y la humedad son las variables que mayor variabilidad presentan en los biocombustibles presentes en el mercado. No existe mucha información acerca del efecto del tamaño de la astilla sobre la evolución de la densidad aparente con distintos niveles de humedad. En la tabla 3 se presenta información densidad básica y densidad aparente de las principales especies arbóreas, aunque referido a un formato genérico de astilla, en el cual no se especifica la granulometría de la misma (AVEBIOM, 2008).

Tabla 2: Especificaciones de las propiedades de las astillas de madera de las astillas de madera.

DECLARACIÓN DE PRODUCTO (ISO 17225-1 e ISO 17225-4)		
Productor		
Localización		
Clase	A1, A2, B1 o B2	
Normativo	Clase de propiedad. Método de análisis	Tipos de clases
	Origen y fuente, EN 17225-1	Ej: 1. Biomasa leñosa. 1.1. Biomasa procedente del monte, plantación y otra madera virgen. 1.1.3. Fuste. 1.1.3.1. Frondosas con corteza.
	Forma comercializada, EN 17225-1	Ej: Astillas de madera
	Dimensiones, P (mm) ISO 17827-1	<i>P16, P16S, P31S, P31, P45S, P45, P63, P100, P200 y P300.</i>
	Fracción fina, F (% en masa < 3,15 mm) ISO 17827-1	<i>F05; F10; F15; F20; F25; F30 y F30+</i>
	Humedad, M (% en masa según se recibe) ISO 18134-2	<i>M10; M15; M20; M25; M30; M35; M40; M45; M50; M55; M55+</i>
	Cenizas, A (% en masa en base seca) ISO 18122	<i>A0.5; A0.7; A1.0; A1.5; A2.0; A3.0; A5.0; A7.0; A10.0; A10.0+</i>
Normativo/informativo	Nitrógeno, N (Normativo para la biomasa tratada químicamente) ISO 16948	<i>N0.2; N0.3; N0.5; N1.0; N1.5; N2.0; N3.0; N3.0+</i>
	Azufre, S (Normativo para la biomasa tratada químicamente) ISO 16994	<i>S0.02; S0.03; S0.04; S0.05; S0.08; S0.10; S0.10+</i>
	Cloro, Cl (Normativo para la biomasa tratada químicamente) ISO 16994	<i>Cl0.02; Cl0.03; Cl0.05; Cl0.07; Cl0.10 y Cl0.10+</i>
Informativo	Poder calorífico neto, Q o Densidad energética, E ISO 18125	Se indica el valor mínimo
	Densidad a granel, BD ISO 17828	Se recomienda indicarla si se comercializa en base al volumen.
	Comportamiento a la fusión de cenizas CEN/TS 15370-1	Debería declararse
	Otros (Tratamiento químico, Presencia de piedras, etc.)	

Fuente: UNE-EN ISO 17225-1. (* Especifica la granulometría técnica europea (3,15 mm, 16 mm, 45 mm, 63 mm y 100 mm)). Las dimensiones reales pueden diferir de esos valores, especialmente la longitud del apartado (** A partir del 40% de humedad existe riesgo en el almacenamiento)

Tabla 3: Densidad básica y densidad aparente

Humedad % H	Haya			Roble			Pícea			Pino		
	m ³	m ³ apilado	m ³ aparente	m ³	m ³ apilado	m ³ aparente	m ³	Fw m ³ apilado	Cw m ³ aparente	m ³	Fw m ³ apilado	m ³ aparente
Densidad y densidad aparente en kg*												
0	680	422	280	660	410	272	430	277	177	490	316	202
10	704	437	290	687	427	283	457	295	188	514	332	212
15	716	445	295	702	436	289	472	304	194	527	340	217
20	730	453	300	724	450	298	488	315	201	541	349	223
30	798	495	328	828	514	341	541	349	223	615	397	253
40	930	578	383	966	600	397	631	407	260	718	463	295
50	1117	694	454	1159	720	477	758	489	312	861	556	354

Se ha utilizado la equivalencia 1m³ de madera en rollo = 2,43 m³ aparentes (índice volumétrico =0,41 m³/m³ aparente) de astillas. Fuente AVEBIOM, 2008.

La relación de la humedad de los biocombustibles con su poder calorífico ha sido más estudiada (Figura 2), existiendo curvas de relación incluso a nivel especie. Los niveles de poder calorífico en una astilla forestal pueden oscilar entre 60% y 10% de humedad lo que implica variaciones de energía entre 1.8 kWh/kg y 4.6 kWh/kg (Francescato *et al.*, 2008).

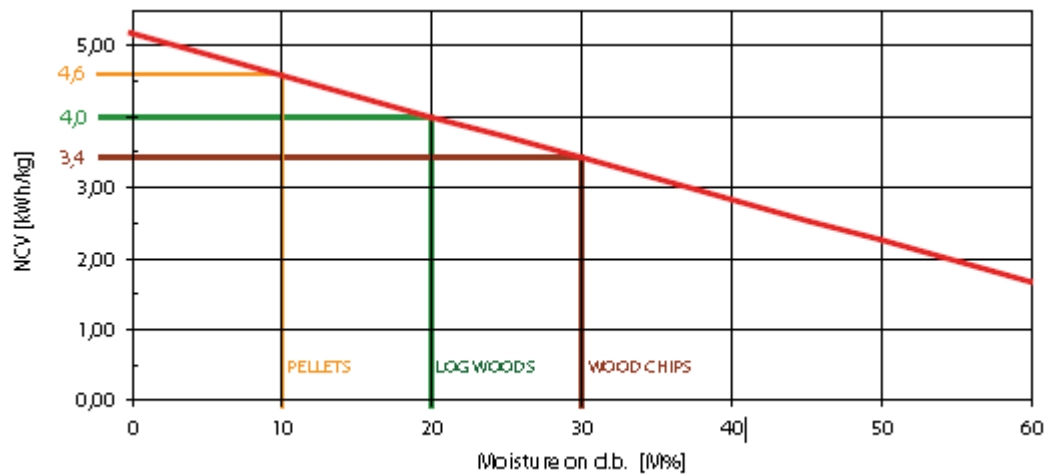


Figura 2: Relación de humedad y poder calorífico en biocombustibles.

1.5. Métodos para la determinación de humedad. Antecedentes y situación actual.

El contenido de humedad se considera el parámetro de calidad más importante para los biocombustibles sólidos. El método más utilizado para su determinación es el método normalizado, en el cual se mide la humedad de los productos mediante la diferencia de masa tras haber sido sometidos a un secado en estufa (AVEBIOM 2013; Hartley y Marchant, 1995; López Vicens *et al.*, 2013).

Este método gravimétrico para la determinación de la humedad presenta algunas desventajas: de acuerdo a los procedimientos normalizados, se requieren más de 24 horas para determinar la humedad de un producto, consumiendo tiempo y mano de obra (AVEBIOM 2013; López Vicens *et al.*, 2013). Es un método destructivo con alta precisión, pero que puede dar lugar a error cuando se relaciona el contenido en humedad con el poder calorífico, principalmente en algunas biomásas con elevados contenidos de extractivos que se pueden volatilizar en estufa y que también poseen un poder calorífico (Hartley y Marchant, 1995). Además este método requiere tener un equipo de secado con capacidad suficiente para todo el material a analizar, lo que puede suponer problemas logísticos, además de un elevado consumo eléctrico.

Debido a los inconvenientes que posee el método normalizado de secado en estufa, se están evaluando alternativas, no sólo para los biocombustibles, que puedan mejorar la eficiencia del mismo. Así pues, podemos clasificar a estos métodos alternativos en dos grupos: métodos directos e indirectos. Los métodos directos de medición de humedad, miden el contenido de humedad tras eliminar completamente el agua contenido en el material de estudio. Los métodos indirectos basan su determinación en la alteración de alguna característica física o química del material afectada por el contenido de humedad (Chen, 2003).

En la actualidad se pueden emplear numerosos métodos para la determinación del contenido de humedad en los biocombustibles sólidos de origen forestal, a continuación se presenta de forma breve las características de los métodos más representativos. (Antikainen, 2014; AVEBIOM, 2013; Baettig *et al.*, 2007; Florentino 2006; Hartley y Marchant ,1995; Järvinen, 2012; Luz, 2002; Samuelsson *et al.*, 2006; Suehara *et al.*,1999).

Tabla 3: Características de diferentes métodos de determinación de humedad.

	Método	Fundamento	Ventajas	Desventajas
Métodos directos	Termo-báscula	Variación de masa	- Báscula y lámpara de secado en el mismo equipo	- Se debe moler la muestra (método destructivo). - Cantidad de muestra reducida
	Destilación	Separación del agua del resto de sustancias y determinación de su volumen.	- Empleado frecuentemente en otros campos	- Método destructivo - Complicado - Lento - No preciso - Tóxico

	Valoración de Karl Fisher	Reacción química (ánodo y cátodo)	- Exacto	- Método destructivo
Métodos indirectos	NIR	Espectrometría	- No destructivo - Espectro distinto por material	- Necesita calibración - Mide el agua superficial - Sensible a las variaciones de color
	Cámara de infrarrojos	Imágenes térmicas	- No destructivo - Primer análisis comparativo	- Difícil aplicación para análisis cuantitativo - Sensible a las variaciones de color
	Rayos x y gamma	Interacción entre los fotones del rayo y los átomos del material	- No destructivo - Determinación de varios elementos - Preciso - Rápido - Medición en continuo	- Conocer la densidad - No para porcentajes pequeños de humedad - Perjudicial - Necesita calibración - Costoso - Técnico especializado
	Medición eléctrica simple	Resistividad del material	- No destructivo - Rápido	- Poco exacto - En desuso - Problemas con material poroso
	RF	Impedancia compleja	- No destructivo - Rápido - Bajo costo	- Poca cantidad de muestra
	NMR	Resonancia magnética nuclear	- No destructivo - Empleado habitualmente en otros campos	- Poco empleado - Problemas con ciertos componentes
	Radiación de neutrones	Interacción entre neutrones y los átomos de hidrógeno del agua	- No destructivo - Rápido - Cualquier rango de humedad - Uso en campo	- Problemas de diferenciación entre el hidrógeno del agua y el estructural de la madera

1.6. Determinación del contenido de humedad mediante la tecnología microondas

La determinación de humedad mediante tecnología microondas se basa en que la velocidad de absorción de potencia de las ondas microondas en la mayor parte de los materiales es proporcional al contenido de agua del material. Esta variación en la velocidad de propagación a su vez produce variaciones en el campo electromagnético de la microonda, a partir de las cuales se puede determinar el contenido de humedad. (Baden Fuller, 1979; Collin R., 1992; Skinner y Collier, 2007 citados por Antikainen 2014; Fridh *et al.*, 2014)

Comportamiento de las ondas microondas en la madera.

Las ondas microondas, pertenecen a las ondas de radio con una frecuencia muy alta, estando definidas por un rango entre 300 MegaHz y 300 GigaHz (Figura 3), que corresponden a longitudes de onda desde 1 mm a 30 cm (Escobar Morales, 2011). Las ondas electromagnéticas poseen una frecuencia de resonancia y un ancho de

banda propias, que se ven afectadas por la composición del medio que atraviesa, modificando su campo electromagnético (Knöchel *et al.*, 2007; Skoog, 1995, citado por Fernández Diez, 2010). La pauta final de estas ondas también se puede ver afectado por la energía generada debida a la interacción que se puede dar entre ella y ciertos átomos y moléculas, siendo este el caso de la molécula de agua (Morales, 2011).

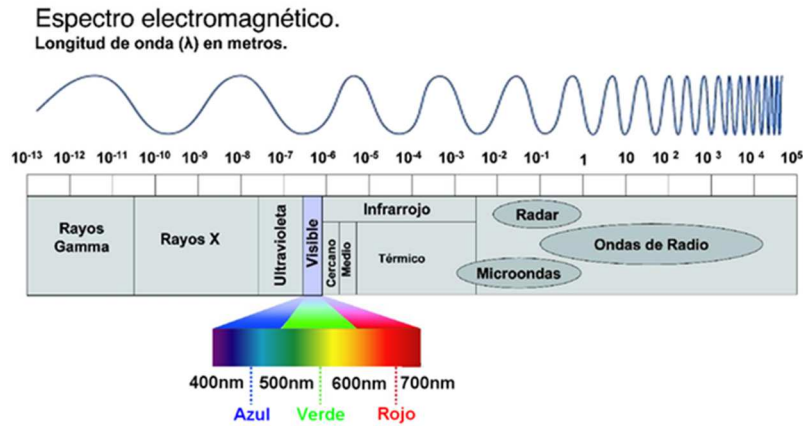


Figura 3: “Espectro electromagnético”. Tomado de: <http://cs-fs-primero.blogspot.com.es/2011/04/espectroelectromagnetico.html> (29 abril, 2015)

El análisis para la determinación de la humedad se fundamenta en que el agua posee una configuración de dipolo, y que a diferencia de otro tipo de moléculas, posee una frecuencia de resonancia propia (Díaz Cid 2005; Luz, 2002). La exposición de una muestra que se encuentra en un campo magnético estático, a un campo electromagnético dinámico, corto, potente y perpendicular al primer campo excita los dipolos del agua y se produce la denominada rotación dipolar, que es una interacción en la cual las moléculas polares intentan alinearse sobre sí mismas a medida que el campo eléctrico de la radiación microondas cambia (Figura 4). El movimiento rotacional de la molécula intenta orientarse en la dirección del campo, consiguiendo de esta forma una transferencia de energía, que hace que la frecuencia de resonancia propia del agua se vea afectada (Sjöström, 2011 citado por Fridh *et al.* 2014; Pérez Gracia, 2001; Zapata Aradilla *et al.*, 2009). Es decir, la onda se desintoniza y amortigua en función del contenido de agua del producto (Luz, 2002) (Figura 5).

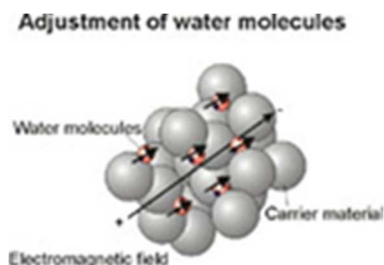


Figura 4: Rotación dipolar. Fuente Döcher & Döcher.

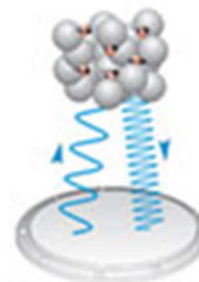


Figura 5: Modificación del campo electromagnético al entrar en contacto con el dipolo del agua. Fuente Döcher & Döcher.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Caracterización de biocombustibles sólidos para fines energéticos.

En una fase inicial se realizaron caracterizaciones iniciales con los principales tipos de biocombustibles sólidos de origen forestal que se producen en la actualidad en el Norte de España: *astillas de madera* de fuste o de árbol completo (incluyendo fuste con corteza, ramas y hojas o acículas) y *triturado de madera*, ambas procedentes por empresas productoras de Galicia y Asturias. Dada la variabilidad en densidades y humedad existentes en estos productos se decidió realizar este proyecto con productos normalizados granulométricamente. Para ello se seleccionaron astillas forestales procedentes de trituración de Pino radiata y se clasificaron las astillas de madera por tamaño de partícula siguiendo la metodología propuesta en la Norma *UNE-EN 15149*, con nombre general: *Biocombustibles sólidos. Determinación de la distribución del tamaño de partícula*. Se clasificaron las astillas usando una tamizadora analítica, modelo Restch SM 400 Control, con los tamices con los siguientes tamaños de apertura: 3,15; 8; 16; 31,5; 45 y 63 mm.

De cada tipo de tamaño de partícula de astilla, 5 en total, se obtuvo un mínimo de 10 litros, permitiendo la calibración y su posterior verificación. En la Tabla 5 se presentan los diferentes tipos de producto utilizados en este trabajo, de los que los cuales, los tres últimos son equivalentes a los definidos por la norma *UNE-EN ISO 17225-1* como *P16S*, *P31S* y *P45* (astillas de madera de máxima calidad para fines residenciales):

Tabla 5: Tipología de producto objeto de estudio.

Tipo producto	Tamaño de partícula
Astilla 3,15	3,15 - 8 mm
Astilla 8	8 - 16 mm
Astilla 16	16 - 31,5 mm
Astilla 31,5	31,5 - 45 mm
Astilla 45	45 - 63 mm

Para definir el sistema experimental cada tipología de granulometrías fue secada para posteriormente establecer distintos grados de humedad mediante la humectación controlada de las astillas.

2.2. Determinación de humedad mediante tecnología microondas

Fundamento

En el desarrollo de modelos de calibración para medida de humedad por microondas se ha empleado el equipo "MoistureScan" (Döschner & Döschner). El equipo se controla desde un ordenador con software, diseñado también por el fabricante.

El principio de funcionamiento del equipo microondas se basa en la medición de la vibración de las moléculas de agua al ser excitadas por estas ondas pertenecientes al espectro electromagnético de carácter no ionizante (Wilkinson y Manager 2004).

Este equipo posee un resonador microondas en forma de anillo que emite un campo electromagnético propio, que tal y como se observa en la *Figura 6*, ve afectada su frecuencia de resonancia y ancho de banda por la energía producida por el comportamiento dipolar de las moléculas de agua (Knöchel *et al.*, 2007).

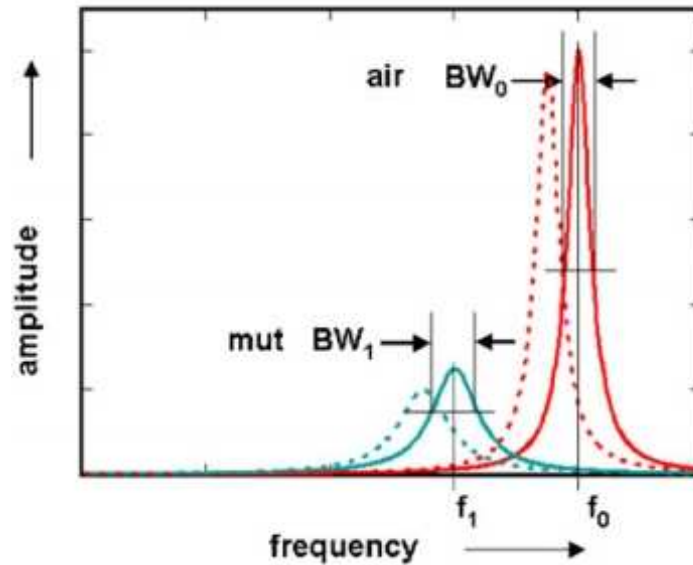


Figura 6: Cambio de la frecuencia de resonancia y del ancho de banda entre el resonador vacío (air) y con un material de prueba (mut). Fuente: Knöchel *et al.*, 2007.

A partir del registro y procesado de estas señales, el equipo proporciona los valores correspondientes a la diferencia de energía generada en cada momento se calcula humedad a partir de la Ecuación 1, tomada de Knöchel *et al.*, 2007:

$M = \frac{\Delta B}{\Delta f}$	(Ec. 1)
---------------------------------	---------

donde,

M , porcentaje de humedad estimado por el microondas, en base húmeda.

ΔB , la diferencia del ancho de banda medida, en MHz.

Δf , la diferencia de la frecuencia de resonancia, en MHz.

El equipo microondas, que registra 600 mediciones por segundo ha sido instalado en una tolva fabricada para medir en condiciones de laboratorio con 4 litros de capacidad acoplada al sensor, que permita exponer el material de forma estática sobre el sensor de medición.

Metodología

El estudio consta de dos partes: calibración del equipo y verificación de la calibración.

Una vez clasificado el material, se realizó la calibración para cada tipo de producto. Se tomó el material objeto de análisis, se humedeció hasta saturación y se realizó una primera medición. Para cada medición se tomaron un mínimo de 4 repeticiones. A continuación se realizaron seis intervalos de secado, de una hora cada uno y se registraron valores para cada intervalo. Tras sacar cada vez el material de la estufa se extendió y se dejó enfriando durante unos 10 minutos. Esto fue realizado para generar mediciones que permitieran abarcar un rango de humedad del 0 al 65 por ciento de humedad (en base húmeda), con el fin de cubrir todos los valores de humedad que se encuentran en las situaciones reales de mercado.

Con el fin de comprobar el rango de fiabilidad de las mediciones de humedad obtenidas a través del equipo microondas, se tomaron tres submuestras tras cada medición para determinar su contenido de humedad mediante el método de secado en estufa, aplicando la norma que mejor se ajustaba para cada tipo de tamaño de partícula: para las muestras analizadas con un calibre mayor la norma UNE-EN 14774-2, y para las de menor UNE-EN 14774-3.

En ambas normas, se calcula el porcentaje de humedad de la muestras de biocombustible a partir de la pérdida de masa de la mismas, tras ser secadas a una temperatura de (105 ± 2) °C hasta que alcanza una masa constante de acuerdo con la Ecuación 2. Se emplearon balanzas distintas para ambos tipos de materiales, aquellas que permitan realizar una aproximación de 0,1g y de 0,1 mg respectivamente.

$$M_{ad} = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

donde,

M_{ad} es el contenido de humedad de la muestra expresada como porcentaje de humedad, en base húmeda,

m_1 es la masa en gramos del recipiente,

m_2 es la masa en gramos del recipiente y la muestra antes del secado,

m_3 es la masa en gramos del recipiente y la muestra después del secado.

Para comprobar que la calibración realizada por el equipo para cada una de las tipologías era la correcta, se hicieron pruebas de lecturas de humedad posteriores a la misma, empleando de nuevo diferentes rangos de humedad para cada tipología del producto.

2.3. Procesado de datos y estadística

Se realizaron dos fases de mediciones de humedad con el equipo microondas, la primera de cara a su calibración para cada tipología de producto, y una segunda de verificación de dicha calibración para cada tipo de producto.

Una vez finalizados los trabajos en el laboratorio, se exportaron los datos de las mediciones con el equipo microondas con el software y se compararon con los valores obtenidos con el método de referencia para la validación (Normas UNE-EN 14774-2 y UNE-EN 14774-3).

Como técnica analítica de control a la tecnología microondas se ha trabajado con la normativa vigente de secada en estufa aplicable para la producción y comercialización de biocombustibles sólidos con fines energéticos: Norma *UNE-EN ISO 17225-1:2014* y todas sus normas de consulta. Estas normas son la versión oficial, en español, de la Norma Europea *EN ISO 17225-1:2014*, que a su vez adopta la Norma Internacional *ISO 17225-1:2014*. Todas las muestras analizadas mediante microondas fueron analizadas posteriormente en estufa para comparar ambas metodologías.

Se analizaron los valores que comprendían todas las mediciones que realiza el equipo y se procedió a la depuración de los datos para la detección de datos anómalos o errores de medición originados por el técnico de laboratorio. En el caso de que dichas anomalías afectaran a la integridad de los resultados, se procedió a repetir el procedimiento completo.

Finalmente, una vez procesados los datos de medición obtenidos durante el estudio con el programa se exportaron a una base de datos para su modelización con los programas *PAWS Statistics 18 (SPSS Inc)* y *SigmaPlot 11.0 (Systac Software Inc.)*. Los datos fueron analizados previamente para comprobar su normalidad y homocedasticidad.

3. RESULTADOS

En la Tabla 6 se recogen los estadísticos descriptivos de las variables de cada tipo de producto, calculados a partir de los datos obtenidos durante la fase de la calibración del equipo microondas.

En esta tabla, si se observan los valores medios ya se puede apreciar que la diferencia entre la humedad determinada por microondas y la humedad determinada en estufa obtenida según la normas UNE-EN 14774-2 y UNE-EN 14774-3, es más elevada en las astillas de mayor granulometría (P31S y P45S), que en el resto.

Tabla 6: Estadísticos descriptivos del conjunto de datos.

		N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ
Astilla 3.15	Energía absorbida (V)	22	0,3331	0,5159	0,406	0,0661
	% Humedad determinada en estufa	22	8,450	66,820	39,556	21,472
	% Humedad microondas	22	5,828	60,064	33,981	22,131
Astilla 8	Energía absorbida (V)	24	0,157	,989	,398	0,295
	% Humedad determinada en estufa	24	1,350	56,690	17,197	22,086
	% Humedad microondas	24	3,178	32,119	13,033	11,558
P16	Energía absorbida (V)	24	0,194	1,0836	0,442	0,324
	% Humedad determinada en estufa	24	1,400	53,120	16,677	19,270
	% Humedad microondas	24	0,976	42,726	11,735	15,126
P31S	Energía absorbida (V)	24	0,159	0,961	0,463	0,328
	% Humedad determinada en estufa	24	0,910	53,44	15,628	20,300
	% Humedad microondas	24	1,676	26,639	6,933	9,126
P45S	Energía absorbida (V)	24	0,1881	1,4638	,643	0,484
	% Humedad determinada en estufa	24	1,740	52,09	18,140	19,100
	% Humedad microondas	24	1,292	24,438	6,263	8,463

Nota: "Temperatura" la temperatura de la muestra medida por el equipo, "Energía absorbida" la variable a partir de la cual el microondas estima la humedad expresada en voltios, "Humedad determinada en

estufa”, la calculada a partir de la norma UNE-EN 14774-3, “Humedad determinada por microondas” humedad medida por el microondas, “Densidad aparente” densidad aparente de la astilla analizada para cada rango de humedad, en kg/m³.

3.1. Modelización de los datos

De la muestra inicial de todos los valores registrados en las distintas fases, tras la depuración de datos se detectaron anomalías en las mediciones, por lo que se decidió repetir el procedimiento completo. Los valores finalmente utilizados para la realización de los ajustes fueron un total de 118 mediciones registradas por el equipo microondas, con sus correspondientes datos complementarios.

3.2. Relación de la humedad determinada en estufa y la densidad aparente

Para el ajuste de ecuaciones de predicción la humedad determinada en estufa, se analizó la relación entre esta variable y las variables medidas de forma paralela, tales como la humedad determinada por microondas por el equipo microondas, la densidad aparente de cada tipo de producto en cada grado de humedad, energía registrada por el equipo, etc.

Mediante regresión lineal, se evaluaron diferentes ecuaciones para determinar modelos que estimasen las variables dependientes a partir de las variables independientes. De entre todos los modelos evaluados, los mejores resultados se lograron para los valores de densidad aparente, humedad determinada en estufa (determinada en base a UNE-EN 14774-2 y UNE-EN 14774-3), y humedad medida por el equipo (en adelante, humedad determinada por microondas).

En la Tabla 7 se muestran las ecuaciones para la determinación de la humedad determinada en estufa en función de la densidad aparente. Todas las ecuaciones presentaron un buen ajuste, explicando en torno a un 90% de la variabilidad total, con errores medios inferiores al 4% de humedad (en base húmeda).

Tabla 7: Ecuaciones evaluadas para la humedad determinada en estufa.

Tipo producto	Ecuación	R²	
Astilla 3,15	$H_{real} = 0,257 \times \rho_{ap} - 11,000$	0,911	(Ec.3)
Astilla 8	$H_{real} = 0,225 \times \rho_{ap} - 29,375$	0,931	(Ec.4)
Astilla P16S	$H_{real} = 0,187 \times \rho_{ap} - 15,676$	0,992	(Ec.5)
Astilla P31,5S	$H_{real} = 0,303 \times \rho_{ap} - 47,162$	0,994	(Ec.6)
Astilla P45S	$H_{real} = 0,251 \times \rho_{ap} - 39,994$	0,953	(Ec.7)

En la Tabla 8 se presentan los valores obtenidos en el análisis de la varianza de la variable dependiente y la variable predictora:

Tabla 8: Análisis de la varianza (ANOVA) para humedad determinada en estufa y densidad aparente.

Tipo producto		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Astilla 3,15	Regresión	8822,626	1	8822,626	205,433	>0,0001
	Residual	858,928	20	42,946		
	Total	9681,553	21			
Astilla 8	Regresión	9935,914	1	9935,914	296,002	>0,0001
	Residual	738,476	22	33,567		
	Total	10674,389	23			
Astilla P16S	Regresión	8476,669	1	8476,669	2903,053	>0,0001
	Residual	64,238	22	2,920		
	Total	8540,907	23			
Astilla P31,5S	Regresión	8340,008	1	8340,008	3653,124	>0,0001
	Residual	50,226	22	2,283		
	Total	8390,234	23			
Astilla P45S	Regresión	9032,970	1	9032,970	450,994	>0,0001
	Residual	440,638	22	20,029		
	Total	9473,608	23			

Para comprobar el comportamiento de las diferentes tipologías de astillas, reflejado en las ecuaciones anteriores se ha hecho un estudio de la homocedasticidad (Figuras 7, 8, 9, 10 y 11).

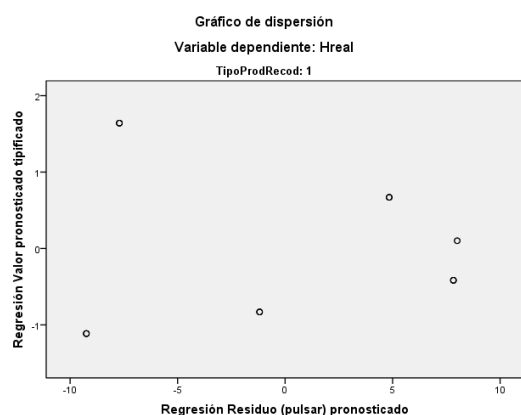


Figura 7: Astilla 3,15

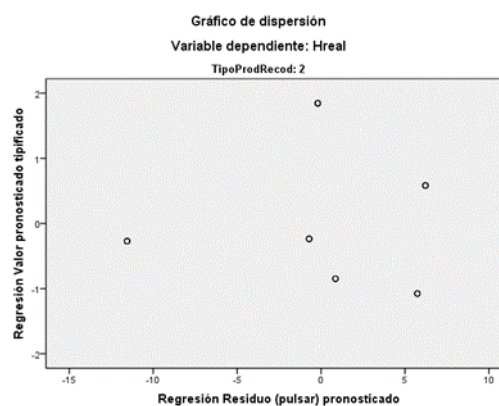


Figura 8: Astilla 8

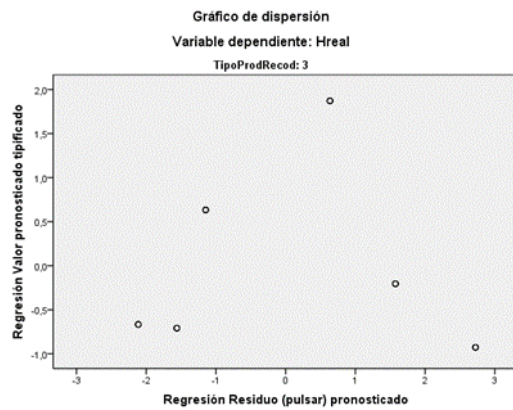


Figura 9: Astilla P16S

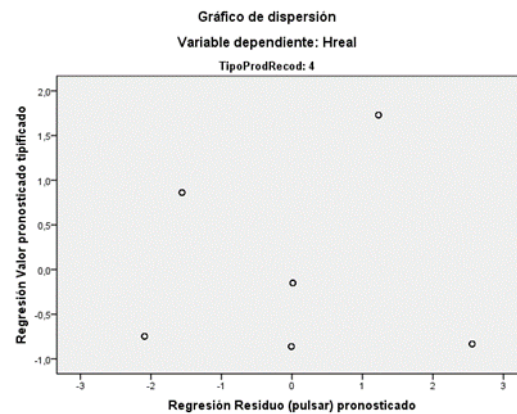


Figura 10: Astilla P31S

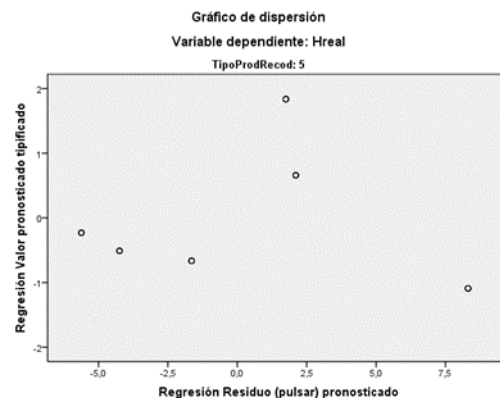


Figura 11: Astilla P45S

Es importante de cara a la predicción de valores en los cuales la desviación tipo de los residuos forma parte del cálculo del intervalo de confianza. Para comprobar la homocedasticidad se muestran los Residuos frente a Valores predichos. Habrá heterocedasticidad si la configuración de la nube de puntos tiene forma de "embudo", bien a la derecha o a la izquierda, lo que es indicativo que la magnitud de los residuos varía en un sentido o en otro. Como se puede comprobar en los gráficos existe homocedasticidad para todas las clases de astillas evaluadas.

3.3. Predicción de la humedad determinada por microondas por el equipo microondas a partir de la densidad aparente

Para el ajuste de ecuaciones de predicción la humedad determinada por microondas, se llevó a cabo la misma metodología que en el apartado anterior. En la Tabla 3 se presentan las ecuaciones para la determinación de la humedad determinada por microondas que obtienen un mejor ajuste, explicando un mínimo del 82% de la variabilidad total, con errores medios inferiores al 5% de humedad (en base húmeda).

Tabla 8: Ecuaciones evaluadas para la humedad determinada por microondas por el equipo.

Tipo producto	Ecuación	R ²	
Astilla 3,15	$H_{estimada} = 0,263 \times \rho_{ap} - 17,782$	0,948	(Ec.8)
Astilla 8	$H_{estimada} = 0,103 \times \rho_{ap} - 8,985$	0,827	(Ec.9)
Astilla P16S	$H_{estimada} = 0,144 \times \rho_{ap} - 13,238$	0,980	(Ec.10)
Astilla P31,5S	$H_{estimada} = 0,119 \times \rho_{ap} - 19,322$	0,882	(Ec.11)
Astilla P45S	$H_{estimada} = 0,104 \times \rho_{ap} - 16,219$	0,904	(Ec.12)

En la Tabla 9 se presentan los valores obtenidos en el análisis de la varianza de la variable dependiente y la variable predictora:

Tabla 9: Análisis de la varianza (ANOVA) para humedad determinada por microondas por el equipo y densidad aparente.

Tipo producto		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Astilla 3,15	Regresión	9249,520	1	9249,520	178,571	>0,0001
	Residual	1035,949	20	51,797		
	Total	10285,470	21			
Astilla 8	Regresión	2102,877	1	2102,877	47,702	>0,0001
	Residual	969,836	22	44,083		
	Total	3072,713	23			
Astilla P16S	Regresión	5050,762	1	5050,762	524,749	>0,0001
	Residual	211,752	22	9,625		
	Total	5262,514	23			
Astilla P31,5S	Regresión	1280,208	1	1280,208	76,719	>0,0001
	Residual	367,112	22	16,687		
	Total	1647,319	23			
Astilla P45S	Regresión	1565,025	1	1565,025	98,188	>0,0001
	Residual	350,658	22	15,939		
	Total	1915,683	23			

Se observa que la estimación de humedad por microondas a mayor densidad, mayor es la humedad estimada por el equipo microondas, lo que aparece reflejado en la pendiente de cada uno de los gráficos, siendo menor que en el caso anterior (humedad determinada por estufa). Esto quiere decir que para los mismos valores de densidad aparente, la humedad determinada por microondas aprecia un porcentaje diferente al de la humedad determinada en estufa, siendo para la mayor parte de los casos inferior. Al igual que en el caso anterior, se volvió realizar un estudio de la

homocedasticidad, cuyos gráficos de dispersión se muestran a continuación para cada tipología de producto (Figuras 12, 13, 14, 15 y 16).

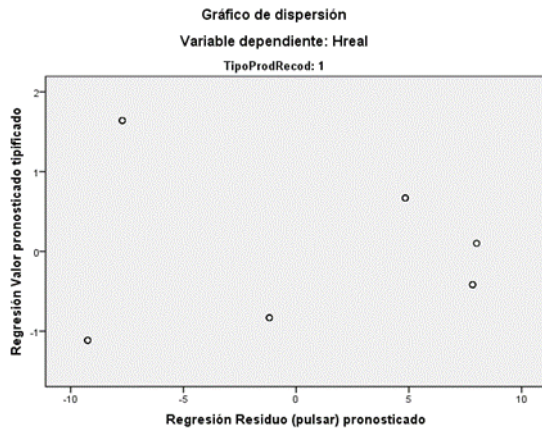


Figura 12: Astilla 3,15

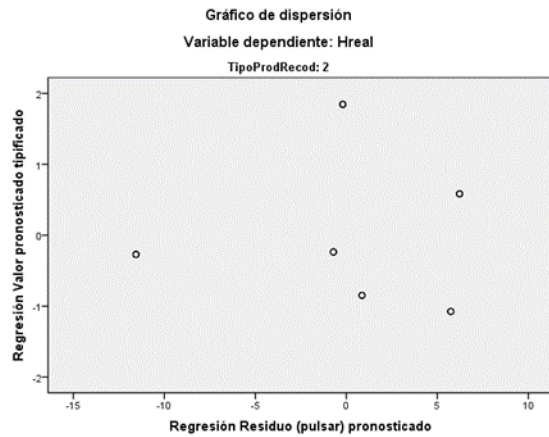


Figura 13: Astilla 8

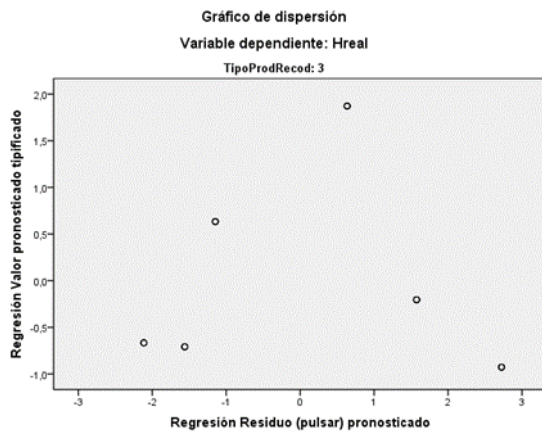


Figura 14: Astilla P16S

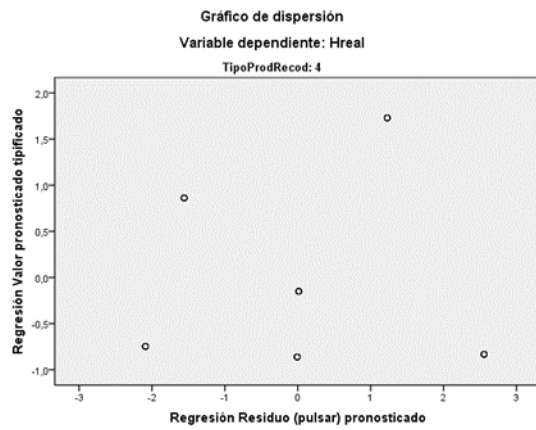


Figura 15: Astilla P31S

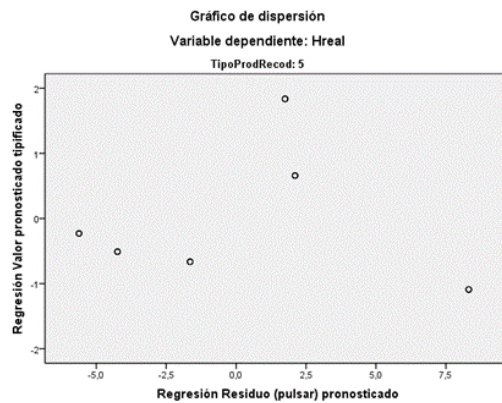


Figura 16: Astilla P45S

El recurso empleado para el cálculo de la homocedasticidad es el mismo al descrito en el estudio de las ecuaciones predictivas anteriores, y de nuevo, al igual que en el caso anterior, se puede comprobar que existe homocedasticidad para todas las tipologías estudiadas.

3.4. Predicción de la humedad determinada en estufa a partir de la humedad determinada por microondas por el equipo microondas.

En la Tabla 10 se presentan las ecuaciones para la determinación de la humedad determinada por microondas que obtienen un mejor ajuste, explicando un mínimo del 82% de la variabilidad total, con errores medios inferiores al 5% de humedad (en base húmeda).

Tabla 10: Ecuaciones evaluadas para la humedad en función de la estimada por el equipo.

Tipo producto	Ecuación	R ²	
Astilla 3,15	$H_{real} = 1,007 \times H_{estimada} - 5,853$	0,977	(Ec.13)
Astilla 8	$H_{real} = 0,478 \times H_{estimada} + 4,195$	0,891	(Ec.14)
Astilla P16S	$H_{real} = 0,769 \times H_{estimada} - 1,091$	0,980	(Ec.15)
Astilla P31,5S	$H_{real} = 0,396 \times H_{estimada} - 0,925$	0,894	(Ec.16)
Astilla P45S	$H_{real} = 0,416 \times H_{estimada} + 0,431$	0,925	(Ec.17)

En la Tabla 6 se presentan los valores obtenidos en el análisis de la varianza entre la variable dependiente y la variable predictora.

Tabla 11: Análisis de la varianza (ANOVA) entre la humedad determinada en estufa y la humedad determinada por microondas por el equipo y densidad aparente.

Tipo producto		Suma de	gl	Media	F	Sig.
Astilla 3,15	Regresión	9818,698	1	9818,698	420,706	>0,0001
	Residual	466,772	20	23,339		
	Total	10285,470	21			
Astilla 8	Regresión	2439,859	1	2439,859	84,817	>0,0001
	Residual	632,854	22	28,766		
	Total	3072,713	23			
Astilla P16S	Regresión	5051,814	1	5051,814	527,480	>0,0001
	Residual	210,700	22	9,577		
	Total	5262,514	23			
Astilla P31,5S	Regresión	1317,223	1	1317,223	87,789	>0,0001
	Residual	330,096	22	15,004		
	Total	1647,319	23			
Astilla P45S	Regresión	1639,950	1	1639,950	130,848	>0,0001
	Residual	275,732	22	12,533		
	Total	1915,683	23			

En la siguiente figura (Figura 17), se puede observar la relación entre la humedad determinada en estufa y la humedad determinada por microondas por el microondas, siendo especialmente llamativo el correspondiente al de la astilla de 3,15, por presentar un valor de la pendiente muy próximo a 1, lo que implica que el microondas se asemeja más en sus estimaciones de humedad que en el resto de tipologías.

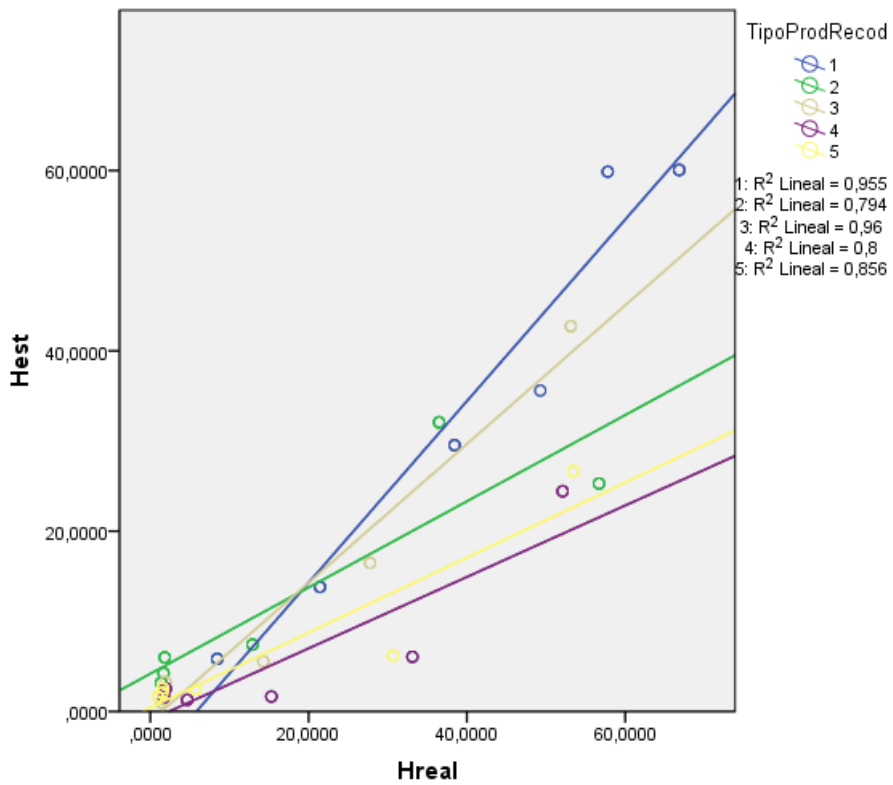


Figura 17: Relación entre la humedad determinada por la estufa y la determinada por el microondas.

La precisión y el sesgo de los distintos modelos de calibración se mantienen con la misma dinámica, donde cambia principalmente la pendiente en función del tamaño de astilla evaluada. El sesgo permite observar una desviación entre el valor evaluado con el método normalizado y la medida observada microondas, aunque los elevados niveles de correlación permitirían emplear las microondas sin problemas.

4. DISCUSIÓN

Los mayores rangos de variación se observaron con las muestras de las tipologías con mayor nivel de humedad. Resultados similares fueron encontrados por Hartmann y Böhm (2000), los cuales realizaron un estudio comparativo de distintas tipologías (estufa, infrarrojos, microondas, balanza de humedad y sondas de capacitancia). En todos ellos la variación de señal se ampliaba con niveles altos de humedad, aunque analizando unidades relativas no observaron una tendencia clara en la precisión de cada tecnología. Este trabajo puso también de manifiesto que los resultados se ven afectados por la densidad aparente, y que existen dificultades prácticas para evaluar este parámetro en el proceso de estimación de la humedad. Los resultados obtenidos en este proyecto coinciden en la importancia de la densidad aparente, ya que la variación de tipologías configura distintas densidades aparentes y condicionan los modelos de calibración.

La precisión y el sesgo de los distintos modelos de calibración se mantienen con la misma dinámica, donde cambia principalmente la pendiente en función del tamaño de astilla evaluada. El sesgo permite observar una desviación entre el valor evaluado con el método normalizado y la medida observada microondas, aunque los elevados niveles de correlación permitirían emplear las microondas sin problemas. El papel de la calidad del tamaño de la astilla no ha sido muy estudiado para su uso energético, aunque algunos trabajos del sector de producción de pasta de celulosa sí indican la importancia del tamaño de la astilla, densidad aparente y humedad (entre otros) como factores críticos en su comportamiento industrial (Ding *et al.*, 2005).

El sesgo en las mediciones de humedad también ha sido observado en distintos trabajos. Así por ejemplo, (Roise *et al.*, 2013) realizaron una comparación utilizando tecnologías de detección de humedad en línea con tres tecnologías: MoistTech (Infrarrojo equipado con sensor de proximidad); Process Sensors (Infrarrojo) y Malcam (Microondas). Se evaluaron muestras con distinto grado de humedad y muestras parcialmente secas sobre los distintos equipos de medición. Además tal y como se ha realizado en este trabajo se contrastaron los resultados con métodos normalizados mediante evaluación en estufa. Para la tecnología de microondas, sus resultados indican que existe sesgo entre la medición por estufa y la medición por microondas con astillas de baja humedad, tal y como sucede en este proyecto, a medida que aumenta la humedad de la biomasa aumenta el sesgo (por ejemplo 30% en estufa respecto a 22% en MO y 40% en estufa respecto a 30% en MO).

Todos los productores de biomasa, desde los productores de energía eléctrica hasta los fabricantes de pellets no quieren pagar por el agua que reciben en sus fábricas. Sin embargo, todavía se mantiene predominantemente la compra por peso. El comprador asume una compra con contenido de humedad variable y paga una cantidad por tonelada entregada. Esta práctica premia a los proveedores que entregan la madera tan pronto como se corta y penaliza a los proveedores que entregan la madera seca. Es decir, premia a las personas que entregan más agua y penaliza a las personas que entregan menos agua. Diversos estudios recientes, indican que es necesario introducir esta variable en el precio, así como su logística, secado de biomasa, recolección, transporte y entrega. Se asume que el comprador de la biomasa paga sobre la base

de una medida de la energía neta de la biomasa (donde la energía es una función del contenido de humedad), ya que la compra de la biomasa en peso no recompensa al productor para la entrega seca. Para que el mercado pueda pagar por contenido neto de energía es preciso disponer de métodos rápidos y eficientes para estimar el contenido de humedad.

Un problema importante asociado con el uso de la madera como fuente de energía es que los recursos forestales se distribuyen a través del territorio y el suministro de madera implica múltiples operaciones que incluyen la plantación, cultivo, cosecha, almacenamiento, pre- procesamiento, transporte, descarga y medición del valor de la biomasa entregada. En la agricultura, la logística de suministro se caracteriza por una materia prima distribuida por el territorio; el tiempo y estado de maduración de los cultivos sensibles al clima; contenido de humedad variable y una ventana de tiempo corto para la recolección (Ravula *et al.*, 2007). La logística de suministro de productos forestales es similar a la de los productos agrícolas, con excepción de la ventana de tiempo para la explotación, que generalmente es superior al de los productos agrícolas.

Disponer de métodos rápidos que permitan evaluar el porcentaje de humedad de astillas en una fábrica es importante para poder caracterizar cada lote que entra en fábrica. De no realizar un muestreo sistemático, se suele inducir errores que provocarán un exceso de pago de las astillas (Olson, 2006). La determinación inmediata de la humedad permite aplicar criterios de cálculo casi en tiempo real para determinar la energía de cada lote de biocombustible. Así por ejemplo, (Koftman, 2007), indica una relación de cálculo de energía; $X \text{ GJ} = 19.2 - (0.2164 * \text{contenido en humedad en porcentaje}) * \text{peso en toneladas}$.

Los resultados obtenidos en este proyecto indican que algunos métodos de medición rápida, los cuales han sido diseñados habitualmente para medir el material o biomasa en un flujo continuo de material, tienen un gran potencial para ser rediseñados con equipamiento de medición rápida en laboratorio. Sin embargo la calibración de biocombustibles de biomasa forestal debe ser realizada muy cuidadosamente. Los resultados obtenidos coinciden con otros autores (Hartmann y Böhm, 2000) que indican que la precisión de las mediciones puede ser mejorada incorporando la densidad aparente como un parámetro adicional en la función de calibración. Estos resultados permitirán optimizar las calibraciones para cada granulometría y generar a corto plazo funciones de calibración a través de análisis de regresión múltiple.

5. CONCLUSIONES

- Es necesario disponer de un método rápido y eficiente para la determinación del contenido de humedad en la comercialización de los biocombustibles.
- La variación de señal de las microondas se amplía a niveles altos de humedad, y también, a medida que aumenta la humedad en la biomasa, lo hace el sesgo en la medición entre la estufa y el microondas.
- La densidad aparente del material influye directamente en la determinación del contenido de humedad mediante la tecnología microondas.
- A pesar del sesgo existente a niveles de humedad altos y al debido a la densidad aparente, los elevados niveles de correlación permitirían emplear la tecnología microondas para la determinación de humedad sin problemas.
- Este método de determinación de humedad posee un gran potencial, sin embargo sería necesario incluir una calibración previa de los biocombustibles incorporando la densidad aparente de los mismos para mejorar la precisión en las mediciones.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), 2010. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 2: Humedad total. Método simplificado. UNE-EN 14774-2.
2. AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), 2010. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3: Humedad de la muestra para análisis general. UNE-EN 14774-3.
3. AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), 2011. Biocombustibles sólidos. Determinación de la distribución de tamaño de partícula. Parte 1: Método del tamiz oscilante con abertura de malla igual o superior a 1mm. UNE-EN 15149-1.
4. AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), 2014. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 1: Requisitos generales. UNE-EN ISO 17225-1.
5. AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), 2014. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 4: Clases de astillas de madera. (ISO 17225-4:2014). UNE-EN ISO 17225-4.
6. Antikainen, J., 2014. State-of-the-art survey of biomass measurement technologies in the bioenergy supply chain. , pp.1-54.
7. ArgenBio, 2004. Biotecnología. Por Qué Biotecnología (Programa educativo de ArgenBio). Disponible en: <http://www.porquebiotecnologia.com.ar/index.php?action=cuaderno&opt=5&tipo=1¬e=58> [Accedido marzo 9, 2015].
8. AVEBIOM (Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa), 2008. Manual de biocombustibles de madera.
9. AVEBIOM (Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa), 2013. Promoción de estándares de calidad y criterios de sostenibilidad. , pp.1-34.
10. Baettig, R., Perré, P. y Rémond, R., 2007. Aplicación de espectrometría de rayos x para el estudio de la madera: algunos resultados iniciales. Maderas. Ciencia y tecnología, 9(3), pp.271-283. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2007000300007&lng=es&nrm=iso&tlng=es [Accedido abril 15, 2015].
11. Chen, C., 2003. Evaluation of Air Oven Moisture Content Determination Methods for Rough Rice. Biosystems Engineering, 86(4), pp.447-457.
12. Contreras Arroyo, B. y Martínez Jiménez, P., 2008. Impedancia compleja. Análisis de un circuito en serie R-L-C. Universidad de Córdoba. Disponible en: http://rabfis15.uco.es/lelavicecas/modulo_tutorial/modulo_ct/ImpedanciaCompleja.pdf.
13. Díaz Cid, J., 2005. Medición de Humedad en Línea para la Industria de pellets, granos y áridos. Revista Electroindustria. Disponible en: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=262&tip=7> [Accedido abril 15, 2015].
14. Ding, F.; Benaoudia, M.; Bédard, P.; Lanouette, R. ; Lejeune, C. ; Gagné, P. (2005). Wood chip physical quality definition and measurement. Pulp & Paper Canada T 25 106(2):27-32.
15. Escobar Morales, J., 2011. Radiación electromagnética. Disponible en: <http://astrojem.com/radiacionelectromagnetica.html> [Accedido junio 11, 2015].
16. Fernández Díez, Y., 2010. Tratamientos Térmicos Asistidos Con Microondas En Procesos De Valoración Energética. Universidad de Oviedo.
17. Florentino, A., 2006. Métodos para medir el contenido de agua en el suelo. Venesuelos, 14, pp.48-70.
18. Francescato, V.; Antonini, E. y Bergomi, L.Z., 2008. Manual de biocombustibles de madera. Publicado en España por AVEBIOM Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa.
19. Fridh, L., Volpé, S. y Eliasson, L., 2014. An accurate and fast method for moisture content determination. International Journal of Forest Engineering, 25(3), pp.222-228. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14942119.2014.974882>.
20. Fundación asturiana de la energía, 2013. Energía en Asturias 2013.

21. Hartley, J. y Marchant, J., 1995. Methods of determining the moisture content of wood. Research Division.
22. Hartmann, H.; Böhm, T. 2000. Rapid moisture content determination of wood chips results from comparative trials. Proceedings 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, 5-9 June 2000 in Sevilla, James & James Ltd., London, 2001, pp. 571-574
23. I.E.S. Hernández Pérez del Pulgar. Departamento de tecnologías, 2008. Resistividad eléctrica. Disponible en: http://tecnologias.ieshernanperezdelpulgar.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=287:resistividad-electrica&catid=46:tema-4&Itemid=112 [Accedido junio 28, 2015].
24. IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía)., 2007. Energía de la biomasa
25. INTRADER (Innovación y Transferencia para el Desarrollo Rural), 2010. Estudio de las características de la astilla forestal y buenas prácticas para su aplicación energética.
26. Järvinen, T., 2012. Rapid and accurate biofuel moisture content gauging using magnetic resonance measurement technology. , pp.0-38.
27. Knöchel, R.; Wolfgang, T. y Döcher, C.; 2007. Stray field ring resonators and a novel trough guide resonator for precise microwave moisture and density measurements. *Measurement Science and Technology*, 18, pp. 1061-1068.
28. Kofman, P.D. (2007) Ordering and receiving wood chip fuel. Coford connects, Processing / Products No. 8. COFORD, Ireland.
29. López Vicens, I.; Gaspá Company, I.; Codina Palou, M y Navarro Maroto, P.J., 2013. Estimación de la humedad de biocombustibles sólidos mediante tablas de densidad aparente y humidímetros. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, pp.1-12.
30. Luz, M.L., 2002. Medidores de humedad. *SEED News*, febrero-v., pp.1-8.
31. Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente., 2013. Nota de prensa.
32. Ministerio de Industria Energía y Turismo., 2014. La energía en España, 2013.
33. Olson, D., 2006. Chip moisture testing: How often is often enough?. *Pulp & Paper Canada* T-77;107:31-34.
34. Ravula, Grisso, Cundiff, 2007. Cotton Logistics as a model for a biomass transportation system. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 32(4), pp. 314-325
35. Roise, J.P.; Catts. G.; Hazel, D.; Hobbs, A.; Hopkins, C. 2013. Balancing biomass harvesting and drying tactics with delivered payment practice. Internal report North Carolina State University support by the USDA Forest Service and the U.S.
36. Samuelsson, R., Burvall, J. y Jirjis, R., 2006. Comparison of different methods for the determination of moisture content in biomass. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), pp.929-934.
37. Sánchez-García, S.; Canga, E; Tolosana, E. y Majada, J., 2015. A spatial analysis of woodfuel based on WISDOM GIS methodology: Multiscale approach in Northern Spain. *Applied Energy*, 144, pp.193-203. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191500135X>.
38. Silver, E.J.; Leahy, Jessica E.; Noblet, Caroline L. y Weiskittel, Aaron R. et al., 2015. Maine woodland owner perceptions of long rotation woody biomass harvesting and bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 76(207), pp.69-78. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953415000860>.
39. Suehara, K.; Ohta, Y; Nakano, Y y Yano, T., 1999. Rapid measurement and control of the moisture content of compost using near-infrared spectroscopy. *Journal of bioscience and bioengineering*, 87(6), pp.769-774.
40. Wilkinson, N. y Manager, C., 2004. Microwaves and wood processing. *Microwaves*.
41. Zapata Aradilla, D., Pujol, R.O. y Estrany Coda, F., 2009. La química de la radiación de microondas. , pp.55 - 58.