



AUTOMATIZACIÓN DE LAS MÁQUINAS Y DE LOS PROCESOS TECNOLÓGICOS

AUTOMATION OF THE MACHINES AND THE TECHNOLOGICAL PROCESSES

Diseño e implementación de un prototipo no invasivo de medidor de agua para la Guadua angustifolia Kunth

Design and implementation of a non-invasive moisture meter prototype for Guadua angustifolia Kunth

Álvaro Andrés Salazar Jaramillo¹, Diana Carolina Pardo Saavedra², Mario Javier Vásquez Mesa³
y Gerardo Fonthal Rivera⁴

RESUMEN. La demanda mundial de productos maderables, el desarrollo sostenible y la globalización de la economía, han generado en los últimos tiempos alternativas a nuevos mercados con perspectivas gigantes de industrializar productos novedosos; entre los cuales se encuentran productos a base de bambú, principalmente la especie Guadua “angustifolia Kunth” oriunda de Suramérica y Centroamérica. La Guadua “angustifolia” no solo sobresale por sus excelentes propiedades físico-mecánicas aplicables en construcción, sino por la diversidad de aplicaciones que pueden ser motor de desarrollo social y económico de muchos países tropicales. Por lo tanto, lo que se plantea con este trabajo es mejorar la calidad de los diversos productos y derivados de la guadua a través de un adecuado control de la variable humedad, que determina la calidad de la materia prima; por medio de un dispositivo que pueda proporcionar una medida de cantidad de agua, sin dañar el material medido. Como valor agregado, el dispositivo se puede acoplar a las diferentes condiciones de crecimiento sin tener que cortar la planta, permitiendo así realizar medidas que verifiquen los saberes empíricos de la cultura sobre la guadua, arraigados en la población durante muchos años.

Palabras clave: humedad, capacitancia eléctrica, sensor, guadua, prototipo.

ABSTRACT. Global demand for wood products, sustainable development and globalization of the economy have generated in recent times alternatives to new markets with giant prospects to industrialize innovative products, which include products made from bamboo, mainly the kind of Guadua angustifolia Kunth, native from Central and South American countries. Guadua angustifolia not only stands out for its excellent physical and mechanical properties applied to construction, but also by the diversity of applications that can be an engine for social and economic development in many tropical countries. Therefore, the aim of this work is to improve the quality of various products and derivatives of Guadua through proper humidity control, which determines the quality of the raw material; through a device that can provide water amount measurement, without damaging the material measured. As an added value, the device can be attached to different growing conditions without cutting the plant, allowing measurements to verify the empirical knowledge about the Guadua culture, which took roots in the population for many years.

Keywords: Humidity, electrical capacitance, sensor, guadua, prototype.

INTRODUCCIÓN

Colombia y Brasil poseen el mayor número de especies de bambúes en América y dentro de ellos la guadua, la cual es un recurso natural renovable, de mucha importan-

cia para la región latinoamericana, que ofrece oportunidades tanto económicas, culturales y ambientales importantes, por su gran diversidad de usos como la construcción, artesanía y preservación de fuentes hídricas (Espinal *et al.*, 2005) Dada la importancia que la guadua tiene en el agro latinoamericano,

Recibido 29/05/10, aprobado 30/09/11, trabajo 49/11, investigación.

¹ Ingeniero Electrónico, estudiante de la Maestría en Ciencia de los Materiales, Investigador, Instituto Interdisciplinario de las Ciencias, Universidad del Quindío, Colombia. Carrera 15 Calle 12N Esquina, E-✉: gfonthal@uniquindio.edu.co

² Ingeniero Electrónico, Auxiliar de investigación Instituto Interdisciplinario de las Ciencias, Universidad del Quindío.

³ Ingeniero Electrónico, Auxiliar de investigación Instituto Interdisciplinario de las Ciencias, Universidad del Quindío.

⁴ Doctor en Física, Investigador Instituto Interdisciplinario de las Ciencias, Universidad del Quindío, E-✉: gfonthal@uniquindio.edu.co

es necesario profundizar en el conocimiento de esta gramínea para obtener una mejor y óptima explotación de este recurso y así ampliar el mercado a nivel internacional. Por esta razón es importante conocer las características óptimas para su cosecha permitiendo así obtener buenos ejemplares que produzcan derivados de excelente calidad y durabilidad, por lo que es necesario conocer cuánta cantidad de agua posee la *Guadua angustifolia* Kunth por ser ésta un factor determinante en su calidad (Giraldo y Sabogal, 1999; Moreno *et al.*, 2007). Teniendo en cuenta que la humedad del suelo afecta considerablemente el contenido de azúcar en la planta (a mayor porcentaje de humedad mayor contenido de carbohidratos), dichos carbohidratos juegan un papel muy importante en la duración y utilidad de la planta, pues la resistencia del bambú contra ataques de insectos y hongos se asocia fuertemente a la presencia de almidones (Giraldo y Sabogal, 1999). Actualmente existen estudios que afirman que la guadua debe ser cortada en menguante para asegurar la menor cantidad de agua posible en su interior, pero no existen dispositivos prácticos diseñados para estas gramíneas que permitan una medición precisa de este factor y que puedan corroborar con precisión cuál es el momento apropiado para su corte, además que permitan una completa portabilidad y uso dentro del guadual sin realizar ningún tipo de daño a los ejemplares medidos que no estén aptos para corte (Giraldo y Sabogal, 1999; Osorio *et al.*, 2004).

En el presente trabajo se realizó el diseño y la posterior implementación de un dispositivo que permite obtener el porcentaje de agua libre dentro de la guadua a través de un parámetro físico, como es la capacitancia eléctrica. El uso de este parámetro físico permite crear un dispositivo no destructivo a diferencia de los utilizados actualmente en la agroindustria, y con el valor agregado de estar calibrado para la guadua, aspecto que los higrómetros que existen en el mercado no poseen. El dispositivo desarrollado permite obtener medidas de humedad en la *Guadua angustifolia* Kunth directamente en el cultivo, sin necesidad de realizar su corte, perforaciones u otro tipo de marcas que aumenten su vulnerabilidad ante depredadores como insectos. El dispositivo permite medir en cualquier período de crecimiento de la planta, así que permitirá estudiar otros saberes inmersos en la cultura de la guadua, como el corte en menguante.

Se realizaron mediciones de humedad y capacitancia eléctrica en muestras de Guadua a través de una balanza de humedad, de un medidor LCR y con el método gravimétrico, por medio de las cuales se obtuvo la relación existente entre estas dos variables. También, se realizaron curvas de variación de humedad vs días, y se compararon las medidas obtenidas con métodos estándares de medición de humedad para su calibración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización Inicial

Se caracterizaron láminas de guadua de perfil recto de 12cm x 4cm x 1cm, obtenidas de culmos maduros escogidos al azar. Al tener las láminas preparadas se procedió a realizar la medición de capacitancia eléctrica. Este proceso se realizó colocando las muestras de guadua entre los electrodos de lámi-

nas paralelas del LCR Quad Tech 1920, logrando así obtener una medida de capacitancia eléctrica, ya que dichas láminas fueron tomadas para este caso como material dieléctrico. Para la medición fue calibrado el LCR con un voltaje de prueba (1V) y un rango de frecuencia (60 kHz), como valores óptimos para medir capacitancia, de acuerdo al manual del equipo.

Con dicha caracterización se buscó establecer un rango de capacitancia para la guadua con respecto a la pérdida de humedad, con el fin de elegir el tipo de sensor que más se acomodara a las necesidades y a los rangos establecidos por la toma de datos con el LCR.

A cada muestra que se le midió su capacitancia, pasó a una balanza de humedad, donde se le midió este parámetro, con un 1% de error. Las medidas se hicieron con intervalos de un día para asegurar el secamiento al aire de las láminas de guadua.

El estudio del comportamiento de estas dos variables (capacitancia eléctrica y porcentaje de humedad) fue realizado bajo las mismas condiciones de temperatura, de humedad relativa del aire y de tiempo.

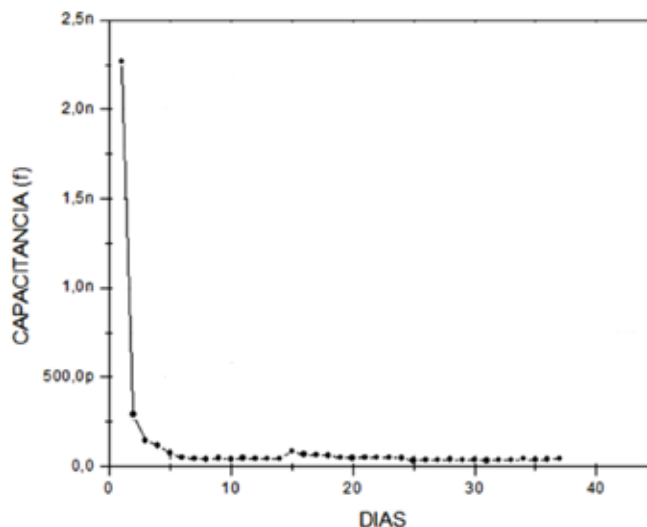


FIGURA 1. Relación capacitancia eléctrica vs días para las láminas de guadua.

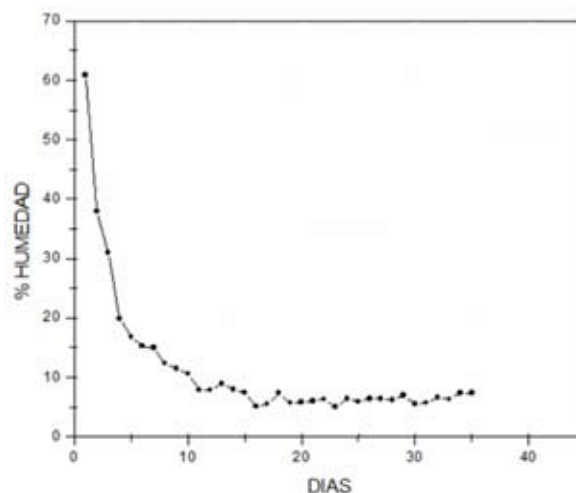


FIGURA 2. Relación porcentaje de humedad vs días para las láminas de guadua.

En las Figuras 1 y 2 se muestran los resultados realizados sobre 35 diferentes láminas, las cuales han sido dejadas secar al medio ambiente, para comparar luego capacitancia y humedad.

Debido a que la capacitancia eléctrica depende de la permitividad relativa del material dieléctrico y dado que la guadua posee porcentajes altos de agua, que tiene una de las permitividades relativas más altas ($\epsilon_r=80$); se pueden relacionar las medidas de capacitancia eléctrica y porcentaje de humedad, como se ve en la Figura 3. Como los otros materiales constitutivos de la guadua (almidón, celulosa, hemicelulosa y lignina) tienen una permitividad baja, entonces el agua dará la mayor contribución a la capacitancia. (Ryynänen, 1995)

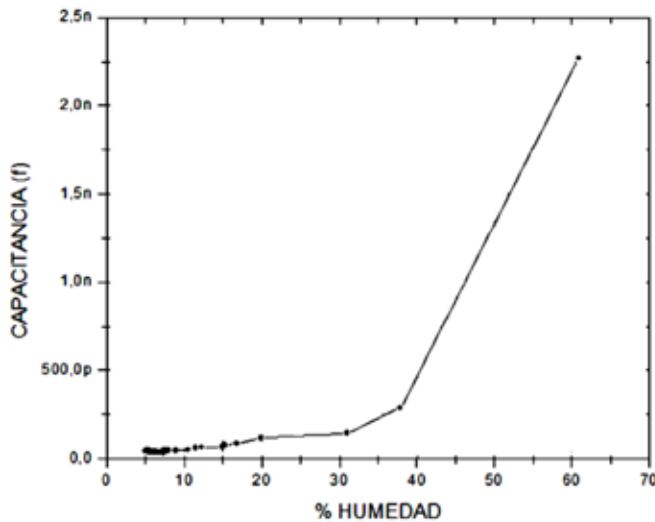


FIGURA 3. Relación de capacitancia eléctrica vs porcentaje de humedad para las láminas de guadua.

Diseño del prototipo

Por medio de la caracterización realizada a las muestras de guadua, se obtuvo el rango de capacitancia eléctrica y de porcentaje de humedad, dentro de los cuales el prototipo debe realizar las mediciones, así que se escogió el tipo de sensor EFID (Electric Fields Imaging Devices), EFID www.freescale.com (2007), que mide dentro del rango de capacitancia eléctrica obtenido.

En la Figura 4 se presenta un diagrama de bloques del prototipo sensor, el cual se diseñó en un solo circuito. El dispositivo permite la adquisición del dato captado por el sensor acoplado a los electrodos, el cual es manejado por el microcontrolador, quien traduce la señal en un número en el LCD, para una visualización adecuada.

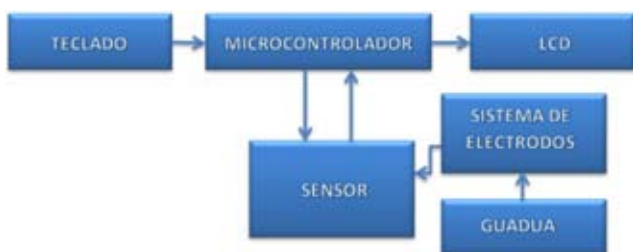


FIGURA 4. Diagrama de bloques, del prototipo sensor.

Caracterización del Dispositivo de Medición

Con el fin de obtener la debida correspondencia entre los datos de voltaje de salida dados por el sensor y la capacitancia eléctrica real medida, se realizó la caracterización del prototipo, utilizando capacitancias estándares. El resultado se presenta en la Figura 5, el cual se corresponde con las características técnicas del fabricante (MC34940 www.freescale.com 2007).

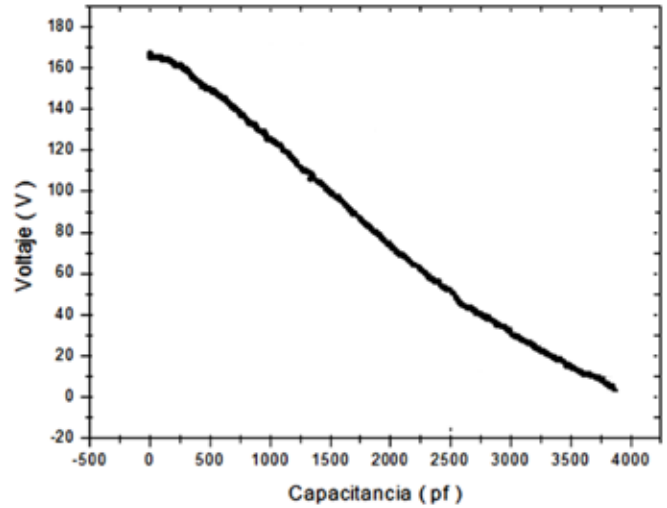


FIGURA 5. Voltaje de salida vs. capacitancia real obtenida con el sensor capacitivo.

Diseño de los electrodos de medida

Ya que el sensor utilizado es un sensor de tipo capacitivo el cual adquiere los datos a través de un sistema de electrodos, se escogió el sistema de electrodos de tipo interdigital porque permite ajustarse a la geometría cilíndrica del culmo de la guadua y adicionalmente disminuir al máximo los efectos de borde presentados por las geometrías planas de los capacitores de placas paralelas. (Simpson and Bidstrup, 1993; Sheiretov, 2001).

Las Figuras 6 y 7 muestran el tipo de electrodo flexible construido sobre una lámina de plástico, en donde se pintaron, por un lado los electrodos interdigitales y por el otro una capa a tierra, con pintura metálica, lo que le permite adaptarse a la geometría cilíndrica del culmo de la guadua.

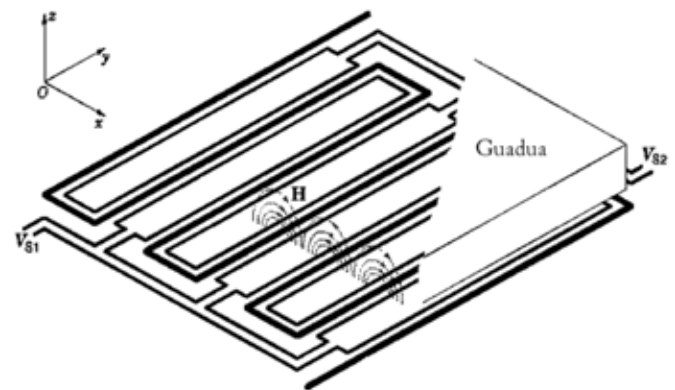


FIGURA 6. Vista del material a medir (guadua) sobre los electrodos interdigitales.

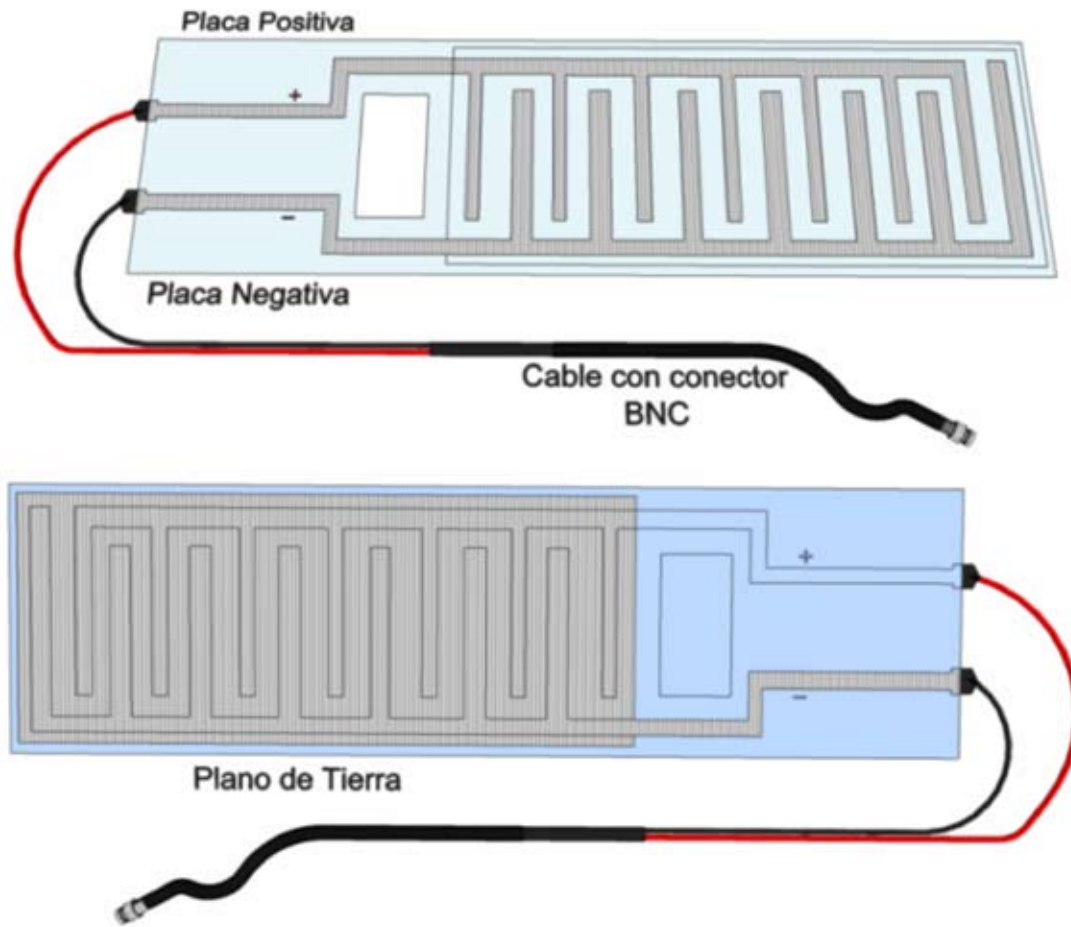


FIGURA 7. Diseño de los electrodos interdigitales para la toma de datos del sensor.

Caracterización y diseño final

Se procedió a caracterizar el prototipo con sus electrodos, teniendo en cuenta la información de voltaje–capacitancia que se obtuvo en la Figura 5 y las medidas de humedad de la guadua a través del método gravimétrico. El método gravimétrico de obtención de humedad es un método lento y destructivo pero muy exacto; el cual consiste en extraer un aro de 5 cm exactamente del tramo de guadua a medir, pesándose la muestra y determinándose su masa húmeda (m_h), posteriormente la muestra es introducida en un horno o estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta que ésta alcanza una masa constante, proceso que tarda aproximadamente 24 horas. Culminado este proceso la muestra es pesada nuevamente, determinando así su masa anhidra (m_s). Al aplicar la expresión de cálculo del contenido de humedad, de acuerdo a la ecuación (1) se determina la humedad de la pieza de guadua (Moreno, *et al.*, 2007; Montoya e Hincapié, 2008).

$$u = \frac{m_h - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (1)$$

Siguiendo el mismo proceso anterior, se tomaron 60 aros de 5cm de la misma guadua, los cuales se dejaron secar al medio ambiente. Los resultados de esta segunda caracterización se presentan en las Figuras (8, 9 y 10).

En la Figura 9 se puede observar la comparación de nuestros datos experimentales con el modelo.

$$y = 132.42e^{-0.0188x} \quad (2)$$

Obtenido por Montoya (2006) para muestras de guadua secadas al aire libre (línea roja).

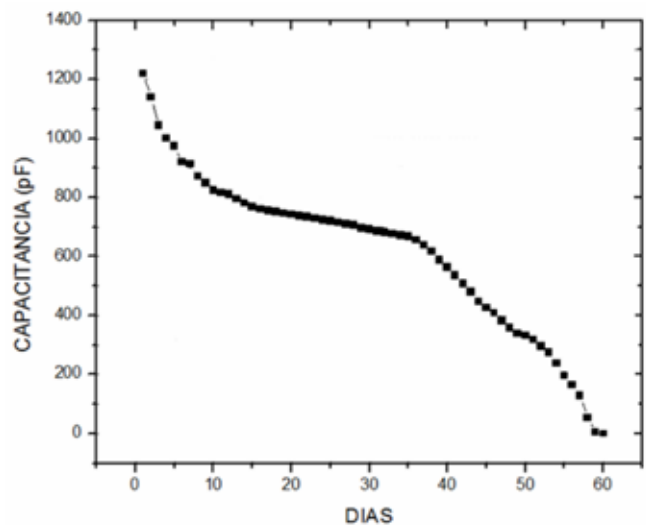


FIGURA 8. Relación capacitancia eléctrica vs. días, obtenida a través del sensor.

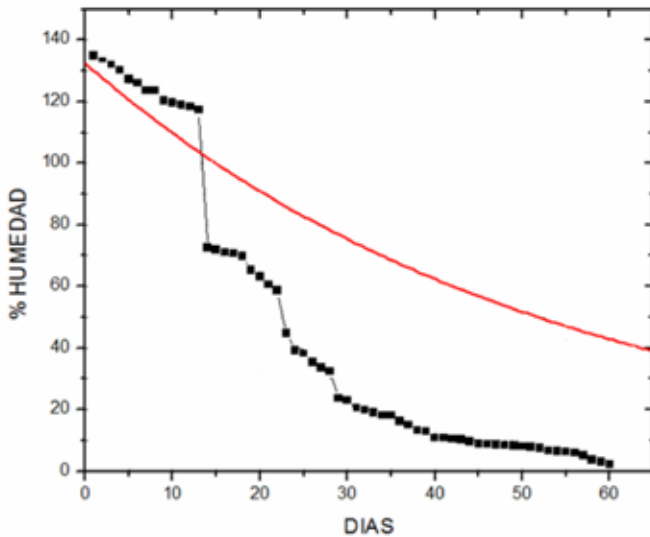


FIGURA 9. Relación de porcentaje de humedad vs días, obtenida a través del método gravimétrico. La línea roja representa el modelo obtenido por Montoya (2006).

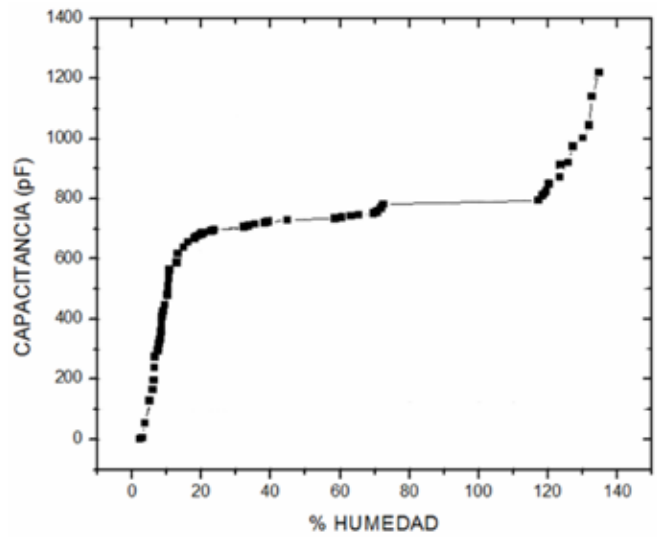


FIGURA 10. Relación capacitancia eléctrica vs porcentaje de humedad, curva patrón base de datos del dispositivo.

Con la relación capacitancia–humedad que aparece en la Figura 10, se alimentó el microcontrolador en su base de datos como curvas patrón para la realización de las medidas definitivas de porcentaje de humedad.

Dentro del diseño del prototipo se incluyó la posibilidad de ser optimizado a medida que se van ampliando los conocimientos acerca del material y mejorando las curvas de calibración, además presenta memoria interna en la cual el dispositivo guarda un dato cada 15 minutos, logrando obtener tablas de datos de humedad de la planta en el tiempo. De lo anterior se deduce que el dispositivo puede ser calibrado para otras especies vegetales que se deseen estudiar.

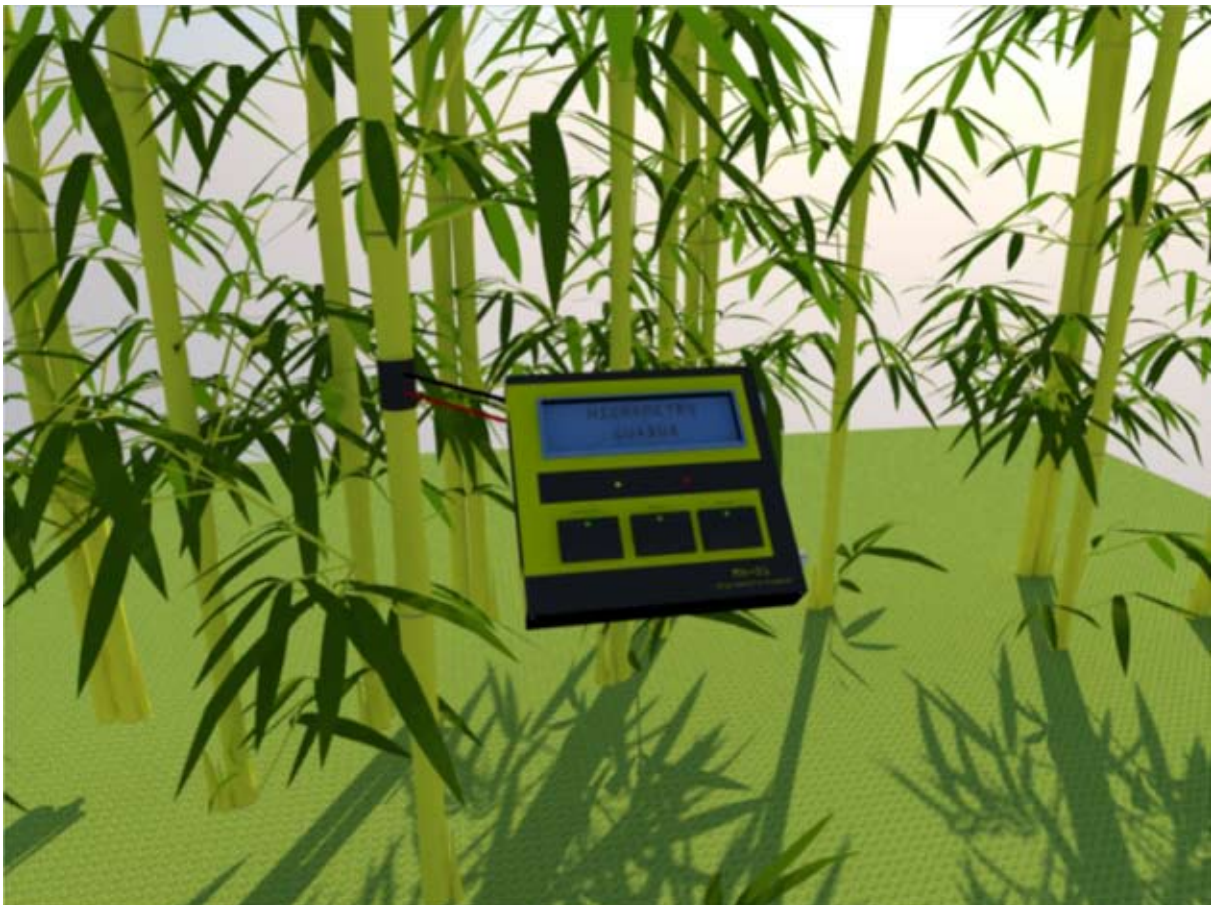


FIGURA 11. Esquema del prototipo obteniendo medidas de humedad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pruebas en Campo y Comparación

Al prototipo se le realizaron pruebas de campo en rodal en 10 diferentes guaduas para probar su correcto funcionamiento y a su vez se comparó con un higrómetro comercial. Cabe anotar que el higrómetro utilizado para realizar las comparaciones presenta unas de las mejores características que se pueden encontrar en el mercado. El higrómetro utilizado de marca *Delmhorst Instrument Co. Ref. RDM³*,³ posee una base de datos interna de 69 especies diferentes de maderas entre ellas el Bamboo, además posee un rango de medida de 5-60%.

La medidas de porcentaje de humedad fueron obtenidas en un clima húmedo con una humedad relativa del 83% y un nivel de pluviosidad de 17,02mm (Según Clima: www.clima.msn.com del 22/05/10), este nivel de pluviosidad es tres veces más alto de lo normal, ya que en la ciudad de Armenia (Quindío) donde se realizaron las pruebas el nivel de pluviosidad normal por día se encuentra entre 5,47-7,64 mm, es decir entre 2000-2792 mm por año, según Chaves *et al.* (2007), nivel pluviométrico determinado como de los más aptos para el crecimiento de la guadua (Cruz, 1994; Hidalgo, 2003). En la Tabla.1 podemos encontrar la comparación entre los datos obtenidos con el higrómetro comercial y con el prototipo.

TABLA 1. Comparación de datos de porcentaje de humedad obtenidos a través de higrómetro comercial y del prototipo

Guadua	Higrómetro comercial RDM ³	Prototipo MH-01
1	22,8%	131,78%
2	15,3%	132,41%
3	17,5%	132,73%
4	17,3%	132,63%
5	22,2%	128,71%
6	19,8%	129,30%
7	15,3%	133,67%
8	26,6%	133,90%
9	23,5%	124,74%
10	18,0%	131,25%

En las fotos de las Figuras 12 y 13 podemos ver la diferencia en el método de medida de porcentaje de humedad tomada por los dos equipos en la misma guadua.

Al comparar los datos obtenidos por el higrómetro comercial y el prototipo se puede observar que existe una gran diferencia entre ambas y esto se debe a que el higrómetro comercial no está diseñado para realizar medidas de porcentaje de humedad en campo ya que es utilizado en los centros de procesamiento días después del corte cuando los porcentajes de humedad en la planta han bajado notablemente, rango en donde estos equipos son confiables. Investigaciones realizadas por otros autores se acercan más a los valores obtenidos por nosotros, por ejemplo: Perea (2003), afirma que 5 días después del corte en menguante, tiempo en el cual existe menor porcentaje de humedad en la planta se presentan porcentajes entre 44,28% y 70,84%, muy superiores a los obtenidos con el higrómetro. Igualmente, la curva teórica de Montoya (2006)

tiende a 130% de humedad al día del corte, como se ve en la Figura 9.

Dentro de lo que conocemos, no existe en la literatura otros trabajos sobre porcentaje de humedad para la *Guadua angustifolia* Kunth obtenidos en campo sin que se haya realizado el corte previamente, por no existir equipos diseñados para tal fin.



FIGURA 12. Medida obtenida por prototipo en Guadua N.10. No se realizan ningún tipo de perforaciones a la planta.



FIGURA 13. Medida obtenida por higrómetro comercial en Guadua N.10. Se muestra perforación y adecuación para toma de medidas.

CONCLUSIONES

- Se fabricó un dispositivo portátil que a diferencia de los higrómetros para maderas que se encuentran en el mercado en la actualidad, obtiene las medidas sin afectar destructivamente el material, teniendo además en su base de datos las curvas patrón para la *Guadua angustifolia* Kunth. Los higrómetros comerciales no permiten una medición confiable del porcentaje de humedad en campo ya que dichos niveles sobrepasan aquellos para los cuales este tipo de equipos brindan una medida precisa.

- Por las características del diseño del equipo, el sensor portátil admite ser calibrado con otras curvas características para medir la humedad en campo de otras especies vegetales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el Instituto Interdisciplinario de las Ciencias, SENA regional Quindío, el Laboratorio de Investigaciones en post-cosecha y financiado con recursos de Colciencias proyecto 1113452-21176 y la Universidad del Quindío.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHAVES, M. C. *Riqueza y rareza de hormigas cazadoras en el gradiente bosque-borde-pastizal de un fragmento de bosque subandino (Quindío, Colombia)*, pp. 425, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 2007.
- CLIMA: [en línea] 2007, Disponible en: www.clima.msn.com [Consulta: mayo 22 2010].
- CRUZ, H.: *La Guadua nuestro Bambú*, 293pp., Corporación Autónoma Regional del Quindío y Centro Nacional para el estudio del bambú y la Guadua, Armenia, Quindío, Colombia, 1994.
- EFID: *Electric Fields Imaging Devices MC34940*, [en línea] 2007, Disponible en: www.freescale.com [Consulta: mayo 22 2010].
- ESPINAL, F., H. MARTINEZ, PINZÓN y D. ESPINOSA: *La cadena de la Guadua en Colombia, una mirada global de su estructura y dinámica*, pp. 1-25, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Observatorio Agroclimas, Colombia, 2005.
- GIRALDO, E. y A. SABOGAL: *Una alternativa sostenible: la Guadua técnicas de cultivo y manejo*, pp. 192 CRQ, 1999.
- HIDALGO, O.: *Bamboo, The Gift of the Gods*, 553pp., Ed. Oscar Hidalgo, Quindío, Colombia, 2003.
- MOJICA, L. M. y O. GONZALES: *Estudio Morfológico de la Guadua angustifolia Kunth biotipo Macana*, Quindío, Colombia, 2005.
- MONTOYA, J. A. e HINCAPIE C. A.: *Fundamentos prácticos de secado de Guadua –Bambú. Proyecto de energía solar para el secado industrial de Guadua angustifolia*, Universidad Tecnológica de Pereira, ISBN 978-958-722-011-7, Colombia, 2008.
- MONTOYA, J. A. y JIMENEZ E.: “Determinación de la curva de secado al aire libre, mediante modelación matemática y experimental de la Guadua angustifolia Kunth”, *Scientia et Technica* (UTP ISSN 0122-1701), Año XII, No 30, Mayo de 2006.
- MORENO, L. E., E. TRUJILLO y R. OSORIO: “Estudio de las Características físicas de haces de fibra de *Guadua angustifolia*”, Universidad Tecnológica de Pereira, *Scientia et Technica* (UTP ISSN 0122-1701), Año XIII, No 31, Mayo de 2007.
- OSORIO, J. A., J. CIRO y M. VÉLEZ: *Efectos de algunos parámetros físicos y geométricos en la resistencia de diseño a flexión de la Guadua angustifolia Kunth*, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia, 20 Agosto 2004.
- PEREA, J.: *Evaluación y documentación de prácticas sobresalientes sobre el manejo de la cosecha y maduración de la Guadua en el Departamento del Huila*, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria, Colombia, 2003.
- RYYNÄNEN, S.: “The electromagnetic properties of food materials: A review of the basic principles” *Journal of Food Engineering*, 26, 409-429, 1995.
- SIMPSON, J. O. and A. BIDSTRUP: “Modeling conductivity and viscosity changes during epoxy cure using TEA DMA and DSC,” Proc. Amer. Chemical Soc. Division of Polymeric Materials: *Science and Engineering Fall Meeting*, 69, 451-452, 1993.
- SHEIRETOV, Y.: *Deep penetration magnetoquasistatic sensors*, Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng. Comput. Sci., Massachusetts Inst. Technol., Cambridge, USA, 2001.

*Todos nuestros servicios
a su disposición*

BIBLIOTECA ANTONIO MACHADO RUIZ

UNIVERSIDAD DE GRANMA (UGR)