

RECYT

Año 22 / N° 34 / 2020 / 8–12

# Contenido de humedad en fardos de papel y cartón a través de la potencia de recepción en el rango de las microondas

## Moisture content in paper and cardboard bales through the reception power in the microwave range

Roberto E. Aedo<sup>1,\*</sup>, Ricardo Bustos<sup>2</sup>, Erik Baradit<sup>1</sup>, Mauricio Diaz<sup>2</sup>, Miguel Yañez<sup>1</sup>

1- Departamento de Física, Facultad de Ciencia, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

2- Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.

\*E-mail: raedogar@ubiobio.cl

Recibido: 22/11/2019; Aprobado: 05/06/2020

### Resumen

El presente tiene por finalidad medir el contenido de humedad en fardos de papel y cartón aplicando técnica de microonda en el espacio libre definido por la trayectoria de la onda electromagnética, particularmente en este trabajo es antena transmisora, aire, muestra, aire y antena receptora. Se realizaron a escala de laboratorio mediciones en diferentes probetas que simulan las características de los fardos a distintos contenidos de humedad. La cuantificación de la interacción entre el material y las microondas se logra a través de mediciones de potencia en recepción en un rango de frecuencia de los 3,84-12,5 GHz para luego establecer la frecuencia óptima de medición. La información obtenida experimentalmente se somete a una fase de análisis de las distribuciones medias de las variables estudiadas, en busca de una o varias curvas de calibración que permitan estimar el contenido de humedad en cada fardo. Los resultados obtenidos evidencian una relación entre la potencia de recepción a diferentes contenidos de humedad, por otra parte, la variabilidad de las muestras y el ambiente del laboratorio influye en las mediciones.

Palabras clave: Contenido de humedad; microondas; espacio libre; fardos de papel y cartón, potencia en recepción.

### Abstract

The purpose of this paper is to measure the moisture content in bales of paper and cardboard through a microwave technique in the free space defined by the path of the electromagnetic wave, which in this particular work consists on the transmitting antenna, air, sample, air and receiving antenna. Measurements were made at a laboratory scale using different test tubes that simulated bales' characteristics with various moisture content. The interaction between the material and the microwaves is quantified by measuring the reception power within a frequency range of 3,84-12,5 GHz, and then establishing the optimal measurement frequency. In order to identify one or more calibration curves for estimating the moisture content in each bale, analysis focused on the mean distribution of the variables of interest. Results show a relationship between the reception power at different humidity contents, and that the measurements are sensible to the variability of the samples and the laboratory environment.

Keywords: Moisture content; microwaves; free space; paper and cardboard bale; reception power.

### Introducción

La humedad se relaciona directamente con la cantidad de agua contenida en un material lo que afecta directamente el valor comercial en fardos de papel y cartón reciclados. Así, resulta necesario estimar el contenido de humedad en el proceso de compra-venta. Para la determinación cuantitativa del contenido de la cantidad de agua en un material usando técnicas electromagnéticas hay principalmente tres métodos: dominio de frecuencia, dominio del tiempo y resonancia magnética nuclear [1], [2].

La relación entre el contenido de humedad y las propiedades dieléctricas se describe a través de una variable física conocida por permeabilidad compleja  $\epsilon^*$ . Experimentalmente este contenido del material se logra estimar a través interacción con ondas electromagnéticas cuantificada en cambios de amplitud, fase, polarización de la señal aplicada. En particular, el uso de microondas para medir el contenido de humedad ha sido investigado en diferentes áreas industriales tales como agricultura, madera, papel, textil y otras [2], [5-8].

Las interacciones de las microondas con las moléculas

de agua se relacionan a través del fenómeno de relajación dieléctrica, el cual ha sido investigado con gran detalle a través de diferentes técnicas experimentales, así como por simulaciones en el área de la dinámica molecular [3], [9]. El estudio de los espectros dieléctricos es ampliamente utilizado en el análisis físico y químico de materiales, tales como soluciones acuosas, compuestos poliméricos, materiales porosos y otros [10-15]. Existen también investigaciones de las propiedades dieléctricas en tejidos orgánicos en áreas de la medicina [13], industria farmacéutica [14], tecnología de alimentos [15] y ciencia de los materiales [16]. Vale notar, que el estudio de estas propiedades tiene una desventaja debido a la gran inversión que se requiere en equipos. Debido a esto último, para su aplicación en la industria es necesario realizar estudios preliminares con el fin de acotar la frecuencia de operación y así conseguir abaratar los costos.

En general en una gran cantidad de procesos es importante conocer el contenido de agua de un material. Una de las formas de estimar el contenido de humedad es a partir de las variaciones que presenta la permitividad dieléctrica bajo la acción de microondas. Algunos trabajos [17-19] han profundizado la descripción física y química del agua en función de la permitividad dieléctrica.

Los datos se obtienen directamente usando desde el analizador de espectros, se procesan y acondicionan para su posterior análisis. Los resultados obtenidos se muestran en gráficos que establecen la relación entre las variables medidas y los cambios en el contenido de humedad. Se determinan los rangos de medición de potencia y como varia esta cuando cambia el contenido de humedad en las muestras de estudio. Los resultados evidencian mayor precisión a altos contenidos de humedad.

### Antecedentes Teóricos

Las microondas cubren un espectro de frecuencias que van desde 300[MHz] a 30[GHz]. Estas, como las ondas de luz, son reflejadas por objetos metálicos, absorbidos por materiales dieléctricos y se propagan por el vidrio. La absorción de energía de las microondas por el agua se debe principalmente a la interacción iónica que se puede cuantificar a través de la permitividad eléctrica compleja [20]:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) + \varepsilon''(\omega) \quad (1)$$

donde la parte real de la permitividad compleja se conoce como constante dieléctrica ) y refleja la habilidad del material para almacenar energía cuando está sometido a un campo eléctrico. La parte imaginaria de la permitividad se llama factor de pérdidas y está relacionado con el fenómeno de disipación de energía. Considerando una onda electromagnética senoidal propagándose en un medio con pérdidas [8], [20] en la dirección de un eje arbitraria Z,

con ( $\sigma \neq 0$ ) que satisface la ecuación (2):

$$\nabla^2 E(z) - \gamma^2 E(z) = 0 \quad (2)$$

donde es la constante de propagación, una solución general para campo eléctrico ( $z$ ) se muestra en la ecuación (3) por:

$$E(z) = E_0 e^{-\gamma z} \quad (3)$$

con la amplitud del campo eléctrico incidente en la probeta. Al descomponer la constante de propagación para las características del medio se tiene:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (4)$$

donde  $\alpha$  es constante de atenuación y  $\beta$  es la constante de fase las que se relacionan con la permitividad compleja. La constante de atenuación empieza a ser significativa cuando el factor de pérdidas es comparable con la constante dieléctrica [20], [21]. El modelo de Debye se utiliza para modelar la permitividad dieléctrica del agua hasta los 70 GHz [20-23], el cual se expresa por:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} - j \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (5)$$

donde es la permitividad relativa estática, la permitividad relativa a altas frecuencias,  $\omega$  la frecuencia angular y  $\tau$  el tiempo de relajación del material. El modelo de Debye, ecuación (5), establece que en el rango de las microondas el factor de pérdidas es comparable con el valor de la permitividad dieléctrica siendo cuantificado a través la potencia medida a través de las muestras [21], la que puede ser expresada por:

$$P = P_0 e^{-2\alpha z} \quad (6)$$

donde es la potencia de entrada a la muestra relacionada con el cuadrado de la intensidad del campo eléctrico incidente. La ecuación (6) muestra un decaimiento exponencial proporcional a la constante de atenuación que a su vez aumenta directamente con el factor de pérdidas que cambia a mayor contenido de humedad. Por este motivo las mediciones a través de las muestras presentaran diferentes valores a contenido de humedad distintos.

### Materiales y métodos

La técnica de medición de espacio libre consiste en la radiación de microondas a partir de una fuente interactuando con el medio de propagación (aire-muestras-aire), para posteriormente ser capturada por un sistema de detección. La distancia de las probetas respecto a la

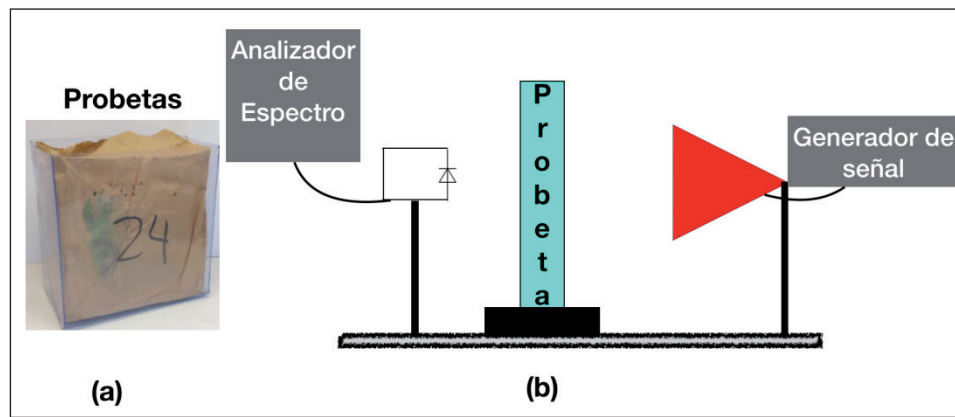


Figura 1: (a) Dispositivo bajo pruebas; (b) Esquema de sistema de medición.

antena transmisora satisface la condición de campo lejano en este caso superior a 8 cm. Para realizar las mediciones se confeccionaron muestras de dimensiones alto, ancho y espesor 15x15x9 [cm] que emulan un fardo de papel y cartón reciclados, distribuidos aleatoriamente y contenidos por una cubierta de mica transparente a las microondas, ver Fig1 (a). Como fuente de radiación se utiliza un sistema formado por un generador de señales HMC-T2100 más antenas ETS-Lindgren tipo horn en 3 diferentes rangos de frecuencia 3,85-5,85 [GHz], 5,85-8,2 [GHz] y 8,2-12,5 [GHz] con potencia de salida de 0[dBm]. El detector es un diodo detector de microondas 1N23CR cuyo rango de frecuencia es de la banda S-X, el esquema de medición se representa en la figura 1(b).

El contenido de humedad de las muestras se establece en base húmeda y se utiliza el método de gravimétrico para determinar el valor de cada una de las probetas.

$$\%H = \left( \frac{M_H - M_S}{M_H} \right) \cdot 100 = \frac{M_{H_2O}}{M_H} \quad (7)$$

Donde es la masa de agua más la masa seca. Las muestras se saturan con agua logrando un máximo de 60% de contenido de humedad. El sistema se calibra para determinar los rangos de potencias mínimo y máximo realizando mediciones de espacio libre y una muestra de las mismas dimensiones, pero llena de agua. Para tener en cuenta los cambios en el ambiente y condiciones se realizan mediciones previas del espacio libre y en una probeta con agua antes de iniciar el proceso de medición.

## Resultados

Como resultado preliminar se mide la potencia en dBm en el rango de frecuencias desde los 3,85 – 12,4 [GHz] para establecer los límites de operación. Para esto se realizan mediciones de la potencia en recepción considerando tres medios de propagación, espacio libre que fija límite superior, una muestra de agua que fija límite inferior medible

y a través del promedio antes de saturar con agua, cuyo resultado se presenta en la figura 2.

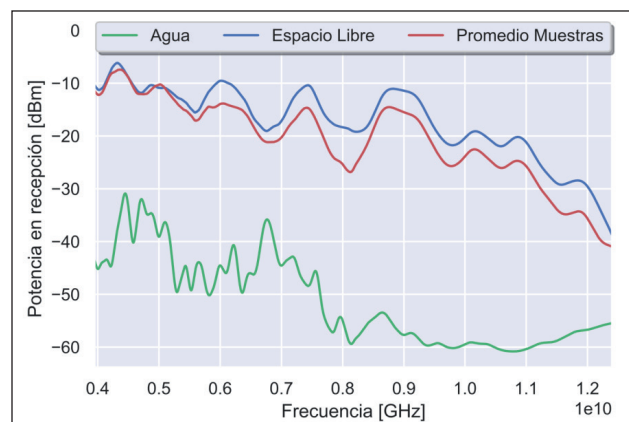


Figura 2: Límites de operación de potencia en recepción

De esta manera de la figura 2 se identifican los límites de medición entre los -9[dBm] y -60[dBm] para diferentes frecuencias en el rango de los 3.85-12.0 GHz. La diferencia en decibeles (dB) entre los límites se presenta en la figura 3.

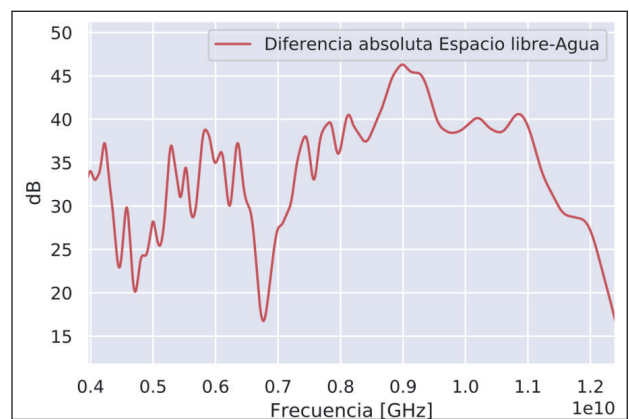


Figura 3: Diferencia en dB.

La máxima diferencia entre los límites de espacio libre y una muestra de agua se encuentra cercana en los 9 [GHz] y es de aproximadamente 30 [dB]. Con este resultado se

fija la frecuencia de medición 9[GHz].

Los resultados obtenidos para las diferentes muestras de estudio del comportamiento entre las variables contenido de humedad y potencia en recepción se presentan en figura 4.

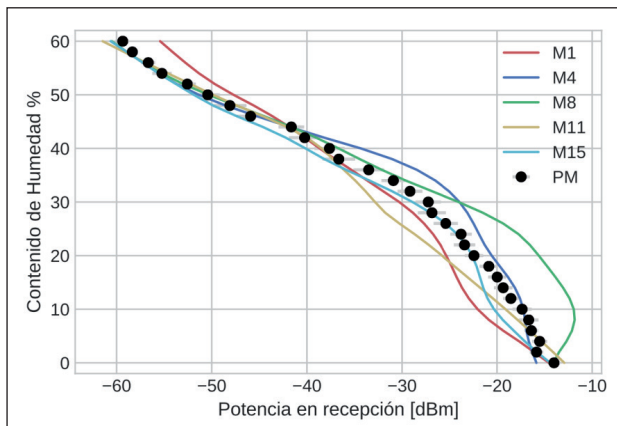


Figura 4: Contenido de humedad v/s potencia en recepción

De la figura 4 se infiere que para valores menores al 30% de contenido de humedad la variabilidad de los resultados es mayor respecto al valor promedio de las muestras. En cambio, para valores altos de contenido de humedad el comportamiento es más cercano al promedio.

Al promedio de los datos obtenidos se les aplico un modelo de regresión curvilínea obteniéndose figuras 5, lo que permite obtener una curva de calibración del contenido de humedad.

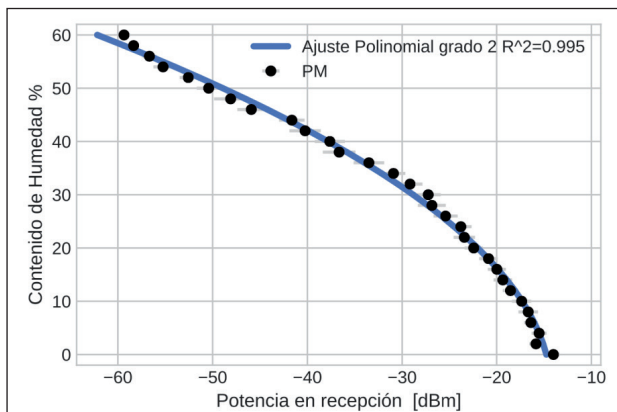


Figura 5: Contenido de humedad vs potencia media con un ajuste polinomial.

El polinomio característico se presenta en la ecuación (8).

$$CH(x) = - 0.0106x^2 - 0.1485x - 14.75 \tag{8}$$

La potencia medida en recepción explica sobre un 99.5% (obtenido por el  $R^2$ ) la variabilidad del contenido de humedad, en referencia al promedio.

Con el objetivo de disminuir la influencia del medio ambiente en el laboratorio como humedad ambiente, presión y temperatura, se realizó una calibración diaria

estableciendo los límites de operación, valores que presentan leves variaciones dependiendo de las condiciones de laboratorio al inicio de cada medición de las muestras de estudio. Con esta información se construye una tabla de datos que representa la variación de la potencia de recepción frente a los límites superior e inferior ver figura 6.

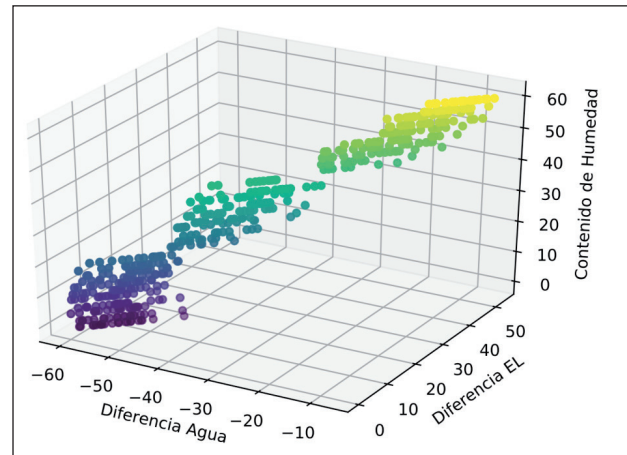


Figura 6: Dispersión versus contenido de humedad

Esta última representación gráfica establece que a bajos valores de contenido de humedad se observa una mayor dispersión entre las variables involucradas lo que es coherente con el resultado mostrado en la figura 5, donde a mayor variabilidad de los valores de potencia medidos a bajos contenidos de humedad.

### Conclusiones

De los resultados obtenidos a partir de las mediciones de la potencia en recepción se puede aseverar que la frecuencia óptima de operación es cercana a los 9 [GHz] debido a que en esta se presenta la mayor diferencia entre los límites medibles. Con el análisis de los promedios de potencia se evidencia que a altos contenidos de humedad se tiene alta relación a través de curva de calibración para la potencia en recepción versus el contenido de humedad, de la cual se concluye que el rango medible por el sistema experimental propuesto se encuentra entre los 20-60 %, con una precisión en las estimaciones de 1.1 [dbm]. Para muestras con valores del contenido de humedad bajo el 20% el sistema de medición propuesto presenta una alta dispersión por lo que en un trabajo futuro se realizaran las mediciones en una cámara anecoica para aislar el ambiente en proceso de medición.

### Agradecimiento

Al laboratorio de investigación de técnicas no Destructivas de la Universidad del Bío-Bío y al laboratorio de astro-ingeniería y microondas de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

## Referencias

1. **Martines, E.; Lira, L.** *Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos*. Simposio de Metrología. Centro Nacional de Metrología. Querétaro, México. 2010. [SEP]
2. **Kraszewski, A.** *Microwave Aquametry: An Effective Tool for Nondestructive Moisture Sensing*. Subsurface Sensing Technologies and Applications, Vol. 2, Nro. 4, ISBN:1566-0184-01-1000-0347-0, Georgia. 2001.
3. **Hasted, J.B.** *Aqueous dielectrics*. Chapman and Hall, London. 1973. [SEP]
4. **Kraszewski, A.** *Microwave instrumentation for moisture content measurement*. Journal of microwave Power. 1973.
5. **Nyfors, E.G; Vainikainen, P.** *Industrial Microwave Sensors*. Artech House: pp 201-230. 1989.
6. **Okamura, S; Tomita, F.** *Microwave moisture sensing system in drying process for green tea production*. Proc. IEEE Instrum. and Meas. Technology Conference IMTC/94: 1253-1256, ISBN:0-7803-1880-3, 2002. [SEP]
7. **Feldman, Y; Puzenko, A; Ryabov, Ya.** *Dielectric relaxation phenomena in complex materials*. In: Kalmykov YP, Coffey WT, Rice SA (eds) *Advances in chemical physics*, vol 133A. Wiley, New York, pp 125. 2006.
8. **Baradit, E; Aguilera, C; Ibañez, G; Cuevas, A; Yañez, M.** *Measurement of moisture content in cardboard bales by microwave*. In: *Journal of Nondestructive Evaluation*, Springer Science+Business Media LLC, part of Springer Nature. 2018.
9. **Trabelsi, S; Stuart, N.** *Microwave Sensing of Quality Attributes of Agricultural and Food Product*. IEEE instrumentation & measurement magazine, vol 19, IEEE. DOI: 10.1109/MIM.2016.7384959. 2016.
10. **Gutina, A; Antropova, T; Rysiakiewicz-Pasek, E; Virnik, K; Feldman, Yu.** *Dielectric relaxation in porous glasses*. *Microporous and Mesoporous Materials* Vol. 58, issue 3, pp 237-254. 2003.
11. **Hasted, J. B.; Husain, S. K; Frescura, F. A; Birch, J. R.** *The temperature variation of the near millimeter wavelength optical constants of water*. *Infrared Physics*, vol 27, issues 1, pp 11-15. 1987.
12. **Kaatze, U.** *Techniques for measuring the microwave dielectric properties of materials*. Vol 47, number 2, Gottingen-Germany, Metrology. 2010.
13. **Kremer, F; Schonhals, A.** *Broadband dielectric spectroscopy*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2003.
14. **Campbell, A; Land D.** *Dielectric properties of female human breast tissue measured in vitro at 3.2GHz*. *Physics in Medicine and Biology*, Vol 37, issues 1, pp 193-210. 1992.
15. **Smith, G; Duffy, A; Shen, J; Olliff, C.** *Dielectric relaxation spectroscopy and some applications in the pharmaceutical sciences*. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol 84, pp 1029-1044. 1995.
16. **Kent, M.** *Microwave measurements of product variables*. In *Instrumentations and sensors for the food industry*. Edited by: Erika Kress-Rogers and Christopher J.B. Brimelow, second edition, CRC Press, USA, pp. 233-279. 2001.
17. **Goy, B; Martin, P; Leban, J.M.** *The measurement of wood density by microwave sensor*. *Holz Als Roh-Und Werkstoff*, Vol 50, pp 163-166. 1992.
18. **Franks, F.** *Water, a comprehensive treatise*. Vol. 1-7. ISBN: 978-1-4684-8020-7, Springer, Boston, MA. 1979.
19. **Chaplin, M.** *Water Structure and Science*. <http://www.lsbu.ac.uk/water/>. 2007.
20. **Chen, L; Ong, C; Neo, P.** *Microwave Electronic Measurement and Materials and Characterization*. John Wiley & Sons Ltd, the Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. 2004.
21. **Komarov, V; Wang, S; Tang, J.** *Permittivity and Measurements*. *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, Edited by Kai Chang ISBN 0-471-27053-9, John Wiley & Sons, Inc. 2005.
22. **Hasted, J.B; Edmonds, P.H.** *Microwave absorption in damp bricks: Bull. RILEM*, p.15. 1962.
23. **Kaatze, U.** *Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature*. *Journal of Chemical Engineering Data*, Vol 34, issues 4, pp 371-374. 1989.
24. **Zaghloul, H; Buckmaster, H. A.** *The complex permittivity of water at 9.356 GHz from 10 to 40°C*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol 18, pp 2109-2118. 1985.