



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

“ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE LABORATORIO PARA MEDIR EL CONTENIDO DE HUMEDAD EN FARDOS DE CARTONES PARA RECICLAJE”

ALEJANDRA CHARLOT CUEVAS MOLINA

GERARDO ESTEBAN IBÁÑEZ GONZÁLEZ

SEMINARIO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO DE EJECUCIÓN EN ELECTRÓNICA

CONCEPCIÓN – CHILE
AÑO 2015



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

“ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE LABORATORIO PARA MEDIR EL CONTENIDO DE HUMEDAD EN FARDOS DE CARTONES PARA RECICLAJE”

ALEJANDRA CHARLOT CUEVAS MOLINA

GERARDO ESTEBAN IBÁÑEZ GONZÁLEZ

CRISTHIAN ALEJANDRO AGUILERA CARRASCO

LUIS HUMBERTO VERA QUIROGA

ERIK BARADIT ALLENDES

JUAN BAUTISTA ANTIPIIL IBÁÑEZ

ÍNDICE

ÍNDICE	iii
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
OBJETIVOS	3
CAPÍTULO I: ESTUDIO DE TÉCNICAS Y MÉTODOS PARA MEDIR EL PORCENTAJE DE HUMEDAD EN FARDOS DE CARTONES	4
1.1 Método gravimétrico.....	6
1.2 Método resistivo	7
1.3 Método capacitivo.....	11
1.4 Método de radiación de neutrones	14
1.5 Método de infrarrojos	15
1.6 Método de microondas.....	16
1.6.1 Tipos de sensores.....	18
1.6.1.1 Método de espacio libre	18
1.6.1.2 Método de transmisión.....	19
1.6.1.3 Método de reflexión.....	19
1.6.1.4 Método de resonancia	19
1.6.1.5 Método de reflectometría de dominio de tiempo.....	20
CAPÍTULO II: ANÁLISIS DE SISTEMAS DISPONIBLES EN EL COMERCIO QUE DETERMINAN EL CONTENIDO DE HUMEDAD EN FARDOS DE CARTONES	21
2.1 Sensores e instrumentos resistivos.....	22
2.1.1 Sensor SH-6/120, Measure Instruments.....	22
2.1.2 Sensor Digital TDT, Acclima.....	23
2.2 Sensores e instrumentos capacitivos.....	24
2.2.1 Instrumento de medición RP5, Schaller	24
2.2.2 Sensor PR2, Delta T Devices	25

2.3	Sensores e instrumentos infrarrojos	28
2.3.1	Transmisor MCT460, Process Sensors.....	28
2.4	Sensores e instrumentos microondas	29
2.4.1	Instrumento de medición MW-T, Tews Elektronik.....	29
2.4.2	Sensor Moist PP, hf sensor	30
2.4.3	Sensor Moist Bio P, hf sensor	31
2.4.4	Sensor Hydro - Mix, Hydronix.....	33
2.4.5	Sensor HydraProbe, Stevens.....	34
2.4.6	Sensor TRIME - PICO IPH/T3, IMKO.....	35
 CAPÍTULO III: FORMULACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO MÁS ADECUADO DESDE LA PERSPECTIVA TÉCNICA Y ECONÓMICA		 38
3.1	Análisis técnico.....	39
3.1.1	Método gravimétrico	39
3.1.2	Método resistivo	40
3.1.3	Método capacitivo	40
3.1.4	Método de radiación de neutrones.....	41
3.1.5	Método de infrarrojos	41
3.1.6	Método de microondas	41
3.2	Análisis económico.....	43
 CAPÍTULO IV: FUNDAMENTOS BÁSICOS DE ANTENAS		 44
4.1	Definición	45
4.2	Funcionamiento	45
4.2.1	Generación de la señal.....	45
4.2.2	Propagación	49
4.2.2.1	Guías de onda	49
4.2.2.2	Modos de propagación	51
4.2.2.2.1	Modos transversales eléctricos (TE).....	51
4.2.2.2.2	Modos transversales magnéticos (TM).....	54
4.2.2.3	Frecuencia de corte.....	54
4.3	Parámetros fundamentales de una antena	55

4.3.1	Regiones de campo	55
4.3.1.1	Región de campo cercano reactivo	55
4.3.1.2	Región de campo cercano radiante	56
4.3.1.3	Región de campo lejano.....	56
4.3.2	Patrón de radiación	57
4.3.2.1	Planos de radiación	57
4.3.2.1.1	Plano H	58
4.3.2.1.2	Plano E	58
4.3.2.2	Lóbulos	59
4.3.2.2.1	Lóbulo mayor.....	59
4.3.2.2.2	Lóbulo menor.....	59
4.3.2.2.3	Lóbulos laterales	60
4.3.2.2.4	Lóbulo posterior.....	60
4.3.3	Polarización	60
4.3.4	Vector de Poynting	64
4.3.5	Intensidad de radiación.....	66
4.3.6	Directividad	67
4.3.7	Ganancia	67
4.3.8	Eficiencia del haz.....	67
4.3.9	Ancho de banda antena.....	68
4.3.10	Atenuación espacio libre	68

CAPÍTULO V: DISEÑO DEL PROTOTIPO PARA MEDIR PORCENTAJE DE HUMEDAD EN MUESTRAS DE CARTÓN		70
5.1	Descripción del prototipo.....	71
5.2	Diseño experimental	73
5.2.1	Instrumentos y aparatos	73
5.2.1.1	Generador de microondas	73
5.2.1.2	Antena.....	74
5.2.1.3	Receptor de microondas.....	75
5.2.1.4	Diodo	77
5.2.1.5	Osciloscopio.....	80

5.2.2	Mediciones y cálculos	81
5.2.2.1	Determinación de la frecuencia de operación.....	82
5.2.2.2	Caracterización del patrón de radiación de la antena.....	84
5.2.2.3	Dimensiones arreglo y determinación de la ubicación de los sensores	87
5.2.2.4	Caracterización de las muestras	89
5.2.2.5	Caracterización del SAD	92
5.2.2.5.1	Determinación del número de canales	92
5.2.2.5.2	Determinación del rango de voltaje	93
5.2.2.5.3	Elección SAD	94
 CAPÍTULO VI: IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO PARA MEDIR PORCENTAJE DE HUMEDAD EN MUESTRAS DE CARTÓN.....		97
6.1	Descripción sistema de pruebas	98
6.2	Procedimiento y resultados con el prototipo microondas	99
6.3	Comparación con sonda capacitiva.....	105
6.3.1	Procedimiento y resultados con la sonda capacitiva	106
6.3.2	Comparación prototipo microondas con sonda capacitiva	110
 CONCLUSIONES		112
 PROYECCIONES		114
REFERENCIAS		116
ANEXOS		121
ANEXO A: Determinación espesor máximo para potencia máxima.		121
ANEXO B: Mediciones prototipo de medición humedad para fardos de cartón		124
ANEXO C: Mediciones lanza PR2/4 para muestras de cartón.....		150
ANEXO D: Cálculo errores de aproximación		157

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestra profunda gratitud a todos aquellos quienes contribuyeron de una u otra forma durante la ejecución y término de este proyecto.

A nuestros profesores guías; Dr. Cristian Aguilera y al ingeniero Luis Vera por habernos propuesto el tema de este trabajo y por el tiempo cedido para nuestras consultas cuando estas fueron requeridas. Al Dr. Erik Baradit también por su disposición, confianza depositada en nosotros y en general por su ayuda que resultó, para nosotros, vital.

Al Mg. Roberto Aedo, por sus consejos y experiencia puesta al servicio de nuestro trabajo.

Al Dr. Miguel Yáñez, Mg. Ricardo Pavez, Mg. Rodrigo Oñate, futuro ingeniero Cristian Hidalgo, Sr. Pedro Inostroza, Sr. Ernesto Astete, Sr. Carlos Sandoval, compañeros, familia y amigos. Todos fueron parte de esto.

RESUMEN

El problema de medición de humedad en fardos de cartón para reciclaje precisa la búsqueda, en un principio, de los distintos métodos y técnicas utilizadas en la determinación de contenido de humedad en sólidos, cuestión que se realiza en el capítulo I con el fin de conocer las distintas opciones existentes.

En el capítulo II se analizan instrumentos y sensores basados en los métodos y técnicas estudiadas en el capítulo anterior, lo que ayuda a conocer sus ventajas y desventajas al momento de llevarlas al plano práctico.

Tomando como base la información entregada por los anteriores capítulos, se opta por el método más adecuado para su diseño e implementación, esto se realiza en el capítulo III.

La decisión anterior encamina hacia la necesidad de revisar y considerar parámetros básicos de dispositivos involucrados en el diseño e implementación del prototipo. Es por lo anterior que en el capítulo IV se revisan los fundamentos básicos de antenas.

En el capítulo V se realiza el diseño del prototipo para la medición de humedad. Se incluyen detalles técnicos, cálculos y mediciones necesarios para la implementación práctica del método para determinar la humedad.

En el último capítulo de este informe se detalla la puesta en marcha del prototipo, los resultados obtenidos y la evaluación de estos.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe consenso y preocupación por el cuidado del medio ambiente, por lo que una forma de colaborar en este aspecto es el reciclaje de materiales, en particular cartones. Las empresas derivadas de las productoras de celulosa, como las recolectoras de material para reciclaje, almacenan cartones en grandes volúmenes mediante fardos que presentan distintos niveles de humedad. Esta humedad afecta directamente el valor del fardo por lo que es necesario determinar con exactitud el contenido de humedad para su almacenamiento y posterior reciclaje.

La importancia de la medición de humedad radica en que la adquisición de cartón se efectúa mediante la compra por el peso de este, por lo que existe la posibilidad, en casos en que la humedad sea alta, de que no sólo se esté recibiendo y/o pagando por cartón, sino que también por agua.

Además de lo anterior, el proceso de medición utilizado actualmente demanda demasiado tiempo y personal, pues para la determinación del contenido de humedad, trabajadores perforan el fardo, que posee dimensiones cercanas al metro cúbico, en distintos sectores para obtener muestras que serán pesadas y comparadas con una muestra de referencia y así saber qué tan seco se encuentra.

Se propone en este trabajo de título la búsqueda de métodos adecuados y el diseño de un prototipo a escala de laboratorio, que permita determinar el contenido de humedad en los fardos de cartones de forma eficiente y eficaz.

OBJETIVOS

Objetivo general

Estudio, diseño e implementación de un prototipo a escala de laboratorio para medir el contenido de humedad en fardos de cartones para reciclaje.

Objetivos específicos

- Buscar técnicas y métodos para medir el contenido de humedad en cartones.
- Elegir la técnica y método más apropiado para medir el contenido de humedad en cartones.
- Diseñar el sistema, a escala de laboratorio, para medir el contenido de humedad en fardos de cartones.
- Implementar y evaluar el desempeño del sistema de medición de humedad.

CAPÍTULO I:
ESTUDIO DE TÉCNICAS Y MÉTODOS PARA
MEDIR EL PORCENTAJE DE HUMEDAD EN
FARDOS DE CARTONES

1. Estudio de técnicas y métodos para medir el porcentaje de humedad en fardos de cartones

Existen conceptos que están relacionados intrínsecamente con la medición de humedad en sólidos, los que se detallan a continuación con el propósito de entregar una base teórica que de pie a una comprensión detallada de los temas tratados en este trabajo.

La **humedad** se define como la cantidad de agua contenida en algún cuerpo. De aquí se desprende el concepto de **contenido de humedad**, el cual se refiere a la relación entre la masa del agua y la masa del cuerpo que la contiene. Por lo anterior, la medición del contenido de humedad puede realizarse de dos maneras:

Base seca: Es el cociente entre la masa de agua en el material y su masa seca. [1]

$$H_{BS} (\%) = \frac{m_{H_2O}}{m_S} \times 100 \quad (1.1)$$

Donde:

$H_{BS} (\%)$: Contenido de humedad en base seca, expresado en forma porcentual

m_{H_2O} : Masa de agua del cuerpo

m_S : Masa seca del cuerpo

Base húmeda: Es el cociente entre la masa de agua dentro del material y su masa total. [1]

$$H_{BH} (\%) = \frac{m_{H_2O}}{m_H} \times 100 \quad (1.2)$$

Donde:

$H_{BH} (\%)$: Contenido de humedad en base húmeda, expresado en forma porcentual

m_{H_2O} : Masa de agua del cuerpo

m_H : Masa húmeda del cuerpo

La búsqueda de técnicas y métodos utilizados para la medición del porcentaje de humedad tiene el propósito de dar a conocer, para asimilar profundamente, los distintos procesos que aprovechan la variación de alguna variable física con el fin de determinar la humedad.

Es necesario acotar la búsqueda de las técnicas y métodos según su aplicación, ya que gran parte de éstas se aplican en el ámbito meteorológico, es decir, en la medición de humedad (y punto de rocío) en el aire. Por lo anterior y por la naturaleza de los cuerpos sometidos a control, este estudio previo se enfoca en las técnicas que puedan ser aplicadas en sólidos.

1.1 Método gravimétrico

Consiste en el uso de un horno, en el cual se aplica calor al material en estado sólido, granular, fibroso, e incluso en forma líquida hasta que no pueda liberarse más agua a no ser que se aumente la temperatura. El agua se evapora mientras la presión de vapor dentro del material es mayor que la del aire que la rodea; de este modo puede mejorarse las condiciones de secado trabajando a temperaturas altas y manteniendo baja la humedad dentro del horno (con sustancia absorbente del agua o en hornos al vacío). La muestra del producto debe mantenerse un cierto tiempo a la temperatura de secado para llegar a un equilibrio de humedad en su interior, pudiendo variar este tiempo de 2 horas a 15 horas. [2]

Para la determinación del contenido de humedad, entonces, se relaciona el peso del cuerpo húmedo con el peso del cuerpo seco de la siguiente manera:

$$H(\%) = \frac{(P_H - P_S)}{P_S} \times 100 \quad (1.3)$$

Donde:

$H(\%)$: Humedad del cuerpo, expresado en forma porcentual

P_H : Peso del cuerpo húmedo

P_S : Peso del cuerpo seco

La instalación para el secado consiste en un sistema de ingreso del material, una cámara donde se realiza el proceso y un sistema para enfriar y evacuar el material sólido. En la cámara se aplica el calor necesario para eliminar la humedad y se controlan parámetros como la velocidad y rendimiento del secado y la humedad del producto final.

En la siguiente figura se muestra el esquema de un secador de platos o secador de compartimiento, el cual consta de un gabinete que contiene platos móviles sobre los cuales se coloca el cuerpo por secar. Una vez cargado, el gabinete se cierra y se introduce aire calentado con vapor a través y entre los platos, para evaporar la humedad. Cuando el cuerpo alcanza el grado de sequedad querido, el gabinete se abre y los platos se reemplazan con un nuevo lote. [3]

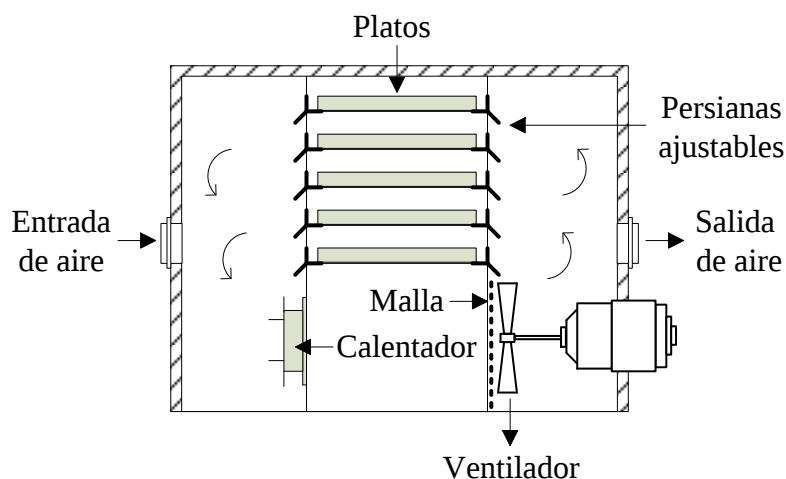


Figura N° 1.1: Vista lateral de un secador de platos

1.2 Método resistivo

Se basa en la variación de la intensidad de corriente que circula por un material según su contenido de humedad, es decir, se mide de manera indirecta la variable en cuestión.

Se tiene un voltaje determinado entre dos electrodos, por los cuales circula una corriente que permite calcular la resistencia y, por lo tanto, la conductividad eléctrica del cuerpo sensado.

La variación de la resistencia eléctrica en materiales sólidos es distinta según su contenido de humedad; para materiales con bajo contenido de humedad, la resistencia cambia de manera muy brusca, en contraste con lo que sucede cuando la humedad es muy alta, donde las variaciones son mínimas, en consecuencia, la precisión de un sensor resistivo será mayor mientras menor sea el contenido de humedad del cuerpo medido. En términos prácticos, y para distintos materiales, este método arroja resultados con una precisión cercana al $\pm 3\%$ para valores de humedad no mayores al 30%. [4]

El cálculo de la resistencia eléctrica del material, se realiza de la siguiente manera:

$$v(t) = i(t) \times R \rightarrow R = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (1.4)$$

Donde:

$v(t)$: Voltaje entre los electrodos

$i(t)$: Intensidad de corriente que circula por los electrodos

R : Resistencia eléctrica del cuerpo

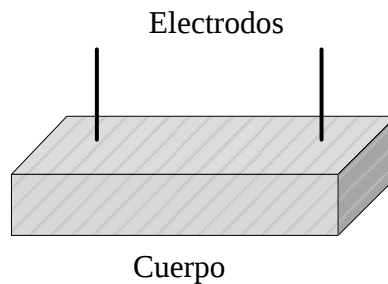


Figura N° 1.2: Método resistivo

En primera instancia, se toma como referencia un electrodo hemisférico enterrado a ras del material (para nuestro caso en un fardo) y se asume al material como un medio homogéneo conductor (semi-infinito) de resistividad ρ como muestra la figura 1.3.

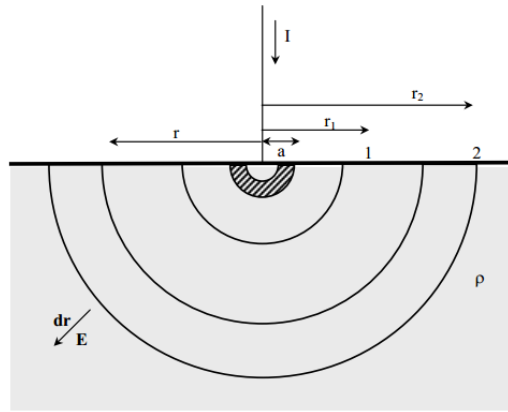


Figura N° 1.3: Electrodo para medición de tierra

Donde:

I: Corriente circulante a través del conductor o electrodo

r: Radio arbitrario

a: Radio del electrodo hemisférico

r_1 : Radio 1

r_2 : Radio 2

ρ : Resistividad del material en Ohm-m

Calculando la diferencia de potencial entre los puntos 1 y 2 de la figura 1.3 se tiene que el módulo del campo eléctrico con dirección radial perpendicular a la superficie del electrodo, queda descrito como:

$$E = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (1.5)$$

La diferencia de potencial queda expresada mediante:

$$V_{12} = \int_1^2 E dr = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.6)$$

La idea tras la igualdad de la ecuación 1.6 es que haciendo $r_2 \rightarrow \infty$ solo queda el potencial 1 respecto a una referencia infinita, por lo tanto cualquier punto dentro de un radio r_1 tendrá el mismo potencial.

De la misma forma, para un radio $r = a$ con referencia al infinito, la caída de potencial queda dada por la siguiente expresión:

$$V_a = \frac{\rho I}{2\pi a} \quad (1.7)$$

Aplicando la ley de Ohm, la resistencia obtenida por el instrumento de medición es:

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (1.8)$$

El principio de medición con dos electrodos, de la figura 1.4, se basa exactamente en el mismo principio que se ha planteado anteriormente, esto quiere decir que mientras una distancia D sea mucho mayor al radio a de un electrodo A ($D \gg a$) o una distancia D sea mucho mayor al radio b de un electrodo B ($D \gg b$), la distribución de corriente se hace más uniforme, donde, según el principio de superposición si $I_B = 0$ e $I_A \neq 0$ entonces la resistencia mutua entre los electrodos queda dada por:

$$V_B = \frac{\rho I_A}{2\pi D} \rightarrow R_{AB} = \frac{\rho}{2\pi D} \quad (1.9)$$

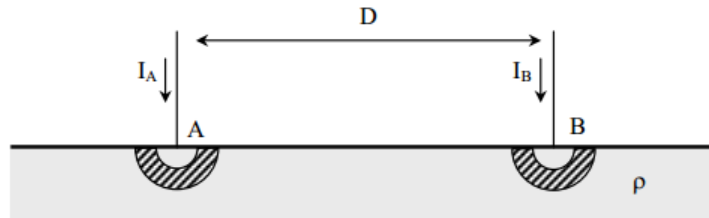


Figura N° 1.4: Principio de medición con dos electrodos

1.3 Método capacitivo

Este método no invasivo se asimila al anterior, ya que se mide de forma indirecta el contenido de humedad de un material, fijándose en la variación de la constante dieléctrica de éste en función de su cantidad de humedad. Al aumentar la humedad del cuerpo que se ubica entre las placas o electrodos que forman el campo eléctrico, aumenta también la constante dieléctrica de éste.

Una variación de la presente técnica consiste en obtener la frecuencia de un oscilador que hace uso de un capacitor de anillos. Éste genera un campo disperso en el sustrato a medir, utilizándolo como dieléctrico y variando su capacidad en función del contenido de agua. Esta variación del dieléctrico genera un cambio en la frecuencia del oscilador pudiendo así utilizarlo como transductor. O sea que la variación del contenido volumétrico de agua en el cuerpo produce un cambio en la frecuencia de oscilación del sensor. [5]

El cálculo de la constante dieléctrica se realiza a partir de la siguiente expresión:

$$C = \varepsilon_r \times \varepsilon_0 \times k \times \frac{A}{d} \quad (1.10)$$

Donde:

C : Capacitancia del cuerpo

ε_r : Permitividad relativa del cuerpo

ε_0 : Permitividad del vacío ($8,85 \times 10^{-12}$ [F/m])

k : Factor de forma

A : Área de placas del condensador

d : Distancia entre las placas

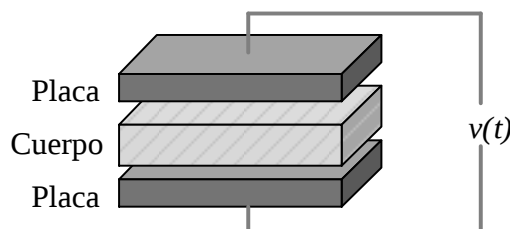


Figura N° 1.5: Método capacitivo

Los sensores capacitivos, están constituidos en base a un filtro RC, donde la resistencia R es una constante, y la Capacitancia C permanece variable dependiendo del porcentaje de humedad a analizar. La idea de esta configuración, es que la capacitancia varíe dependiendo de la constante dieléctrica del material aislante (dieléctrico entre las dos placas del condensador), consiguiendo una alteración en esta constante a medida que el contenido de humedad a medir varía.

El principio de operación de estos sensores, se basa en el uso de circuitos osciladores con una señal de voltaje de entrada y una frecuencia fija, donde el efecto de la capacitancia debido a la cercanía de un material determinado, se traduce en una atenuación del valor peak to peak de la señal de salida, con respecto a la señal de entrada con un desfase α . La figura 1.6 representa de forma gráfica lo planteado.

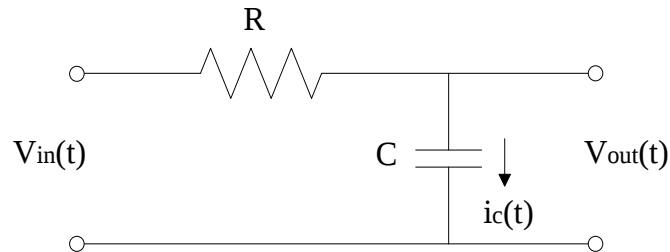


Figura N° 1.6: Filtro RC

La corriente $i_c(t)$ del circuito anterior, se define de la siguiente forma:

$$i_c(t) = C \frac{dV_{OUT}(t)}{dt} \quad (1.11)$$

Despejando $V_{OUT}(t)$:

$$V_{OUT}(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt = \frac{q(t)}{C} \quad (1.12)$$

Aplicando Ley de Voltajes de Kirchhoff, se tiene:

$$\sum V = -V_{IN}(t) + R \times i_R(t) + V_{OUT}(t) = 0 \quad (1.13)$$

Reemplazando 1.6 en 1.8, se tiene:

$$\frac{dV_{OUT}(t)}{dt} + \frac{1}{RC}V_{OUT}(t) = \frac{1}{RC}V_{IN}(t) \quad (1.14)$$

$$\frac{dV_{OUT}(t)}{dt} + a \times V_{OUT}(t) = b \times V_{IN}(t) \quad (1.15)$$

Donde:

a : Recíproco de la constante de tiempo capacitiva τ_C , donde τ_C = un quinto del tiempo de carga total del condensador.

b : Ganancia propia del sistema.

Aplicando transformada de Laplace, para trabajar bajo el dominio de la frecuencia, se tiene:

$$sV_{OUT}(s) + a \times V_{OUT}(s) = b \times V_{IN}(s) \quad (1.16)$$

$$(s + a) \times V_{OUT}(s) = b \times V_{IN}(s) \quad (1.17)$$

De la relación entre V_{OUT} con V_{IN} , se obtiene la función de transferencia $G(s)$ que define el comportamiento del circuito RC de la figura 1.4.

$$G(s) = \frac{b}{s + a} \quad (1.18)$$

Identificado el modelo de Laplace, es fácil hacer un análisis frecuencial reemplazando s por $j\omega$, donde j es $\sqrt{-1}$ y ω es la frecuencia en $[rad/s]$ constante.

$$\frac{V_{OUT}(\omega)}{V_{IN}(t)} = \frac{b}{j\omega + a} \quad (1.19)$$

Finalmente, luego de racionalizar, se obtiene el siguiente vector:

$$G(\omega) = \frac{b}{\omega^2 + a^2}(-j\omega + a) \quad (1.20)$$

El módulo y ángulo del vector resultante se obtienen de la siguiente manera:

$$\|G(\omega)\| = \frac{b}{\sqrt{\omega^2 + a^2}} = \frac{1}{\sqrt{(\omega RC)^2 + 1}} \quad (1.21)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{-\omega}{a}\right) = \tan^{-1}(-\omega RC) \quad (1.22)$$

Del análisis matemático anterior, se puede inferir que existen cambios de fase y amplitud en función de los valores de frecuencia y capacitancia en el circuito, obteniendo mayor atenuación (Producto de la ganancia) y desfase conforme se incrementa la capacitancia, siempre y cuando las demás variables permanezcan constantes.

1.4 Método de radiación de neutrones

El aparato consta de un emisor de neutrones (generalmente, una fuente de americio – berilio) rápidos y un detector de neutrones lentos. Este sistema estima el contenido en humedad del cuerpo midiendo la densidad de neutrones lentos. Una vez emitida la radiación, los neutrones rápidos entran en colisión con las moléculas de agua presentes en el cuerpo y pierden gradualmente su energía cinética, como se muestra en la figura 1.7. Un determinado número de ellos vuelve a la fuente y es registrado por el detector, siendo este número directamente proporcional al contenido de humedad, como por ejemplo del suelo, en el punto de medida. [6]

Se define como neutrones rápidos a aquellos que tienen alta energía, de 0.1 a 15 MeV, y alcanzan velocidades de hasta 1600 km/s.

A medida que los neutrones interactúan con los núcleos de la materia son dispersados al azar. En cada colisión existe una liberación de energía y un cambio de trayectoria; este proceso se conoce como "termalización de neutrones", por la conversión de la energía cinética (velocidad) en energía térmica (calor) que tiene lugar en dicho proceso. Neutrones lentos, por lo tanto, son aquellos ya termalizados, cuya energía es del orden de 0 a 1000 eV, y son aquellos registrados por el detector. Esta interacción sigue la Ley de Conservación de la Energía o Momentum. [7]

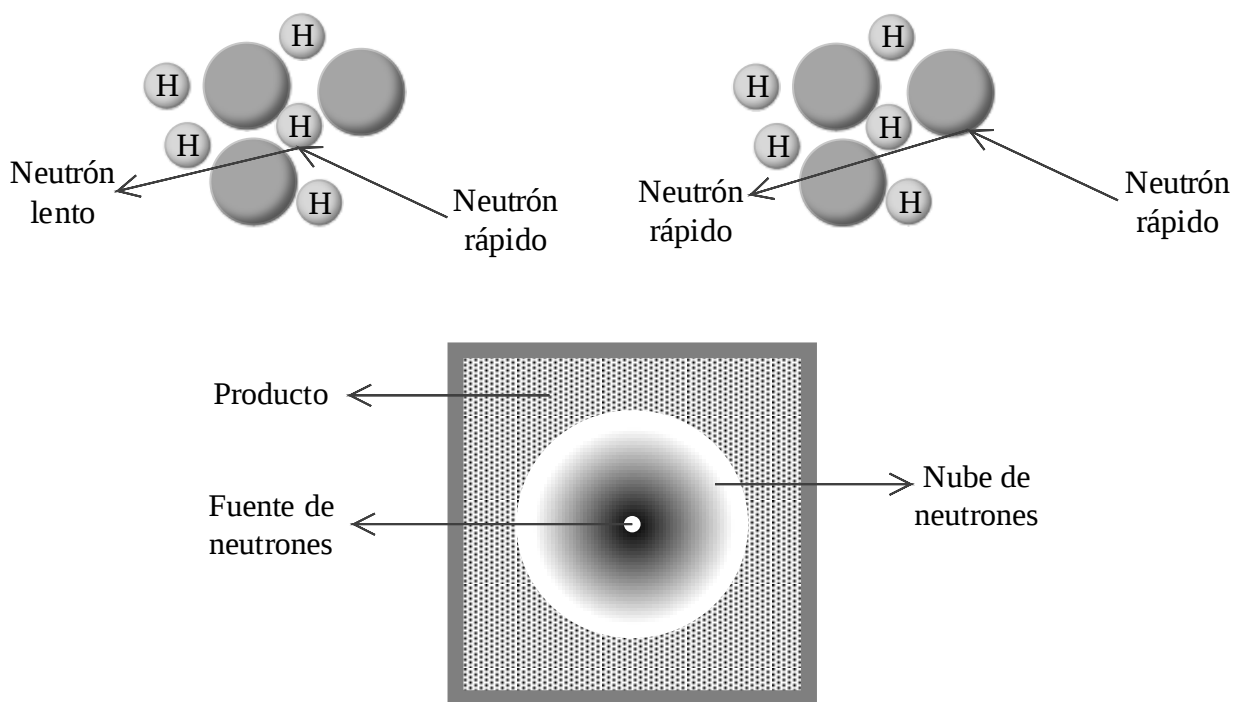


Figura N° 1.7: Método de radiación [8]

1.5 Método de infrarrojos

Un haz de luz infrarroja es generado y dividido en dos rayos. Uno pasa por la muestra, y el otro por una referencia que suele ser la sustancia en la que está disuelta o mezclada la muestra. Ambos haces se reflejan hacia el detector, pero primero pasan a través del separador, que alterna rápidamente cuál de los dos rayos entra en el detector, como se muestra en la figura 1.8. Las dos señales se comparan y, a continuación, se registran los datos. Hay dos razones por las que se utiliza una referencia:

- Evita que las fluctuaciones de energía eléctrica de la fuente afecten a los resultados finales, ya que tanto la muestra como la referencia se ven afectadas del mismo modo. Por esa misma razón, también impide la influencia de variaciones sobre el resultado final, debido al hecho de que la fuente no necesariamente emite la misma intensidad de luz para todas las longitudes de onda.
- Permite que los efectos del disolvente se anulen, porque la referencia es normalmente la forma pura del disolvente en el que se encuentra. [9]

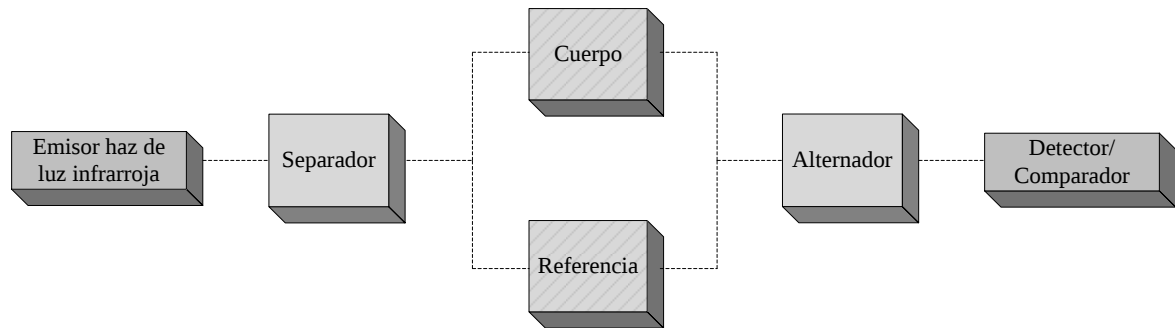


Figura N° 1.8: Método de infrarrojos

1.6 Método de microondas

Las microondas se propagan a través de los materiales con algunas interacciones, es decir, la onda produce información acerca del material. El grado de interacción con un material es representado por la permitividad del material. La permitividad relativa ε es compleja en rangos de frecuencia de microondas y tiene la siguiente forma.

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1.23)$$

Donde:

ε' : Parte real de la permitividad relativa

ε'' : Parte imaginaria de la permitividad relativa

El campo eléctrico de una onda viajera $E(x)$ en un material, se expresa usando la permitividad de la siguiente manera:

$$E(x) = E_0 e^{-k''x} \cdot e^{-jk'x} \quad (1.24)$$

Donde:

$$k' = k_0 \sqrt{\varepsilon'}$$

$$k'' = k_0 \sqrt{\varepsilon''}$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

λ_0 : Longitud de onda en el vacío.

E_0 : Intensidad del campo eléctrico

Cuando la condición de permitividad es $\epsilon''^2 \gg \epsilon'^2$, el campo eléctrico queda expresado como:

$$E(x) = E_0 e^{-\frac{\pi \cdot \epsilon''}{\lambda \sqrt{\epsilon'}} x} \cdot e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'} x} \quad (1.25)$$

De la ecuación 1.25 se puede ver que la intensidad del campo eléctrico depende de la parte real e imaginaria de la permitividad compleja, y la fase solo depende de la parte real. Si la condición no se mantiene, la fase también depende de ambas partes. Por lo tanto, la interacción de la humedad contenida en el material es conocida de la medición de la intensidad o de la fase de la onda, porque la permitividad del material es una función de la humedad. La permitividad relativa del agua es cercana a 80 en el rango de frecuencia de microondas, esto es mucho mayor a la mayoría de los materiales que se les suele medir humedad, es decir, la onda es fuertemente afectada por la humedad. La onda también es afectada por la frecuencia, temperatura y el estado molecular del agua que se encuentra dentro del material a medir, sin embargo esto no afecta demasiado la medición.

La microonda que se propaga a través del material sufre una atenuación en su amplitud de campo eléctrico y su velocidad de propagación es disminuida por el contenido de humedad del material, como se muestra en la ecuación 1.25. Lo anterior se expresa en la ecuación 1.26:

$$\begin{aligned} \Delta A &= A(M, d, \rho, f, T) \\ \Delta \phi &= \phi(M, d, \rho, f, T) \end{aligned} \quad (1.26)$$

Donde:

ΔA : Atenuación de amplitud

$\Delta \phi$: Variación de fase

M : Contenido de humedad

d : Distancia de propagación

ρ : Densidad de la muestra

f : Frecuencia de microondas

T : Temperatura

Lo anterior se puede aproximar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\Delta A(\text{dB}) &= g_a(M) \cdot d \cdot R_a(\rho) \cdot F_a(f) \cdot q_a(T) \\ \Delta \phi(\text{rad}) &= g_p(M) \cdot d \cdot R_p(\rho) \cdot F_p(f) \cdot q_p(T)\end{aligned}\tag{1.27}$$

Donde:

$g(M)$, $R(\rho)$, $F(f)$, y $q(T)$: Dependencia de una muestra a M , ρ , f , y T , respectivamente.

a y p : Amplitud y fase, respectivamente.

Las ecuaciones anteriores representan una aproximación que relaciona linealmente todas las variables, sin embargo en una ecuación más precisa, esta relación se complejiza debido al efecto de la reflexión en los límites de la superficie del material y la intensidad de la combinación entre el material y las moléculas de agua.

Es obvio que la variación de amplitud y fase son función del contenido de humedad, pero también éstas se ven afectadas por la distancia o espesor, densidad, frecuencia y temperatura de las muestras, por lo tanto, todas las mediciones deben realizarse manteniendo constante estas variables, lo que dificulta las mediciones en línea.

1.6.1 Tipos de sensores

Los sensores se clasifican según el método y dispositivos utilizados para realizar la medición.

1.6.1.1 Método de espacio libre

Es el método fundamental. El material a ser medido se sitúa en la trayectoria de la onda. La microonda es transmitida de una antena y se propaga a través del material bajo medición, luego es recibida y detectada por otra antena. El contenido de humedad del material es medido de la atenuación o variación de fase de la onda, o de ambos parámetros. Como se muestra en la figura 1.9A, una característica de este método es que permite la medición de todo el contenido de humedad incluso en la parte interna de la muestra. En sistemas de medición de humedad en línea,

el material sujeto a medición es movido por correas transportadoras. En la figura 1.9A se muestra el montaje más básico de este método.

1.6.1.2 Método de transmisión

En este método se utiliza una línea de transmisión para las mediciones, el material a ser sensado se ubica cerca de la línea, la onda propagada a través de la línea es afectada por el material, y la amplitud de la onda es atenuada por la humedad contenida en el material al igual que la fase de la onda, la que es retrasada. Lo que caracteriza a este método es lo simple de su implementación, sin embargo, una desventaja de esto es que la onda solamente se ve afectada en las cercanías de la línea de transmisión, además de que la ubicación de la muestra manteniéndola siempre cerca de la línea puede resultar dificultoso. En la figura 1.9B se muestra un montaje utilizando stripline.

1.6.1.3 Método de reflexión

Es un método de medición que utiliza la impedancia de una línea de transmisión abierta, ubicando el objeto que se desea medir en la superficie de la línea abierta, como se muestra en la figura 1.9C. El contenido de humedad puede ser medido mediante el cambio de la impedancia de la línea de transmisión. La aplicación de este método requiere gran atención en las condiciones del contacto entre la línea y el material. Una característica de este método es que se puede medir la humedad utilizando solo un lado del material.

1.6.1.4 Método de resonancia

Este método utiliza un resonador en el cual se ubica el material a ser medido. La medición de contenido de humedad se relaciona con la frecuencia de resonancia y el factor de calidad del resonador. La permitividad relativa del material es calculada a partir de las frecuencias de resonancia y el factor de calidad con y sin el material y es convertido en contenido de humedad mediante una curva de calibración. La aplicación de este método requiere gran atención en las

condiciones del contacto entre la línea y el material. Una característica de este método es que se puede medir la humedad utilizando solo un lado del material, como se muestra en la figura 1.9D. La fuerte sensibilidad del material cerca de los extremos hace que este método no sea bueno para aplicaciones de medición en línea.

1.6.1.5 Método de reflectometría de dominio de tiempo

La reflectometría de dominio de tiempo (TDR) es un método que mide la humedad mediante la onda reflejada de una sonda insertada en el material. Esta sonda puede estar hecha de cualquier tipo de línea de transmisión abierta en un extremo. Una característica de este método de medición es que mide humedad en un amplio rango y que puede utilizarse solo un lado del material para realizar esta medición, como se muestra en la figura 1.9D [10].

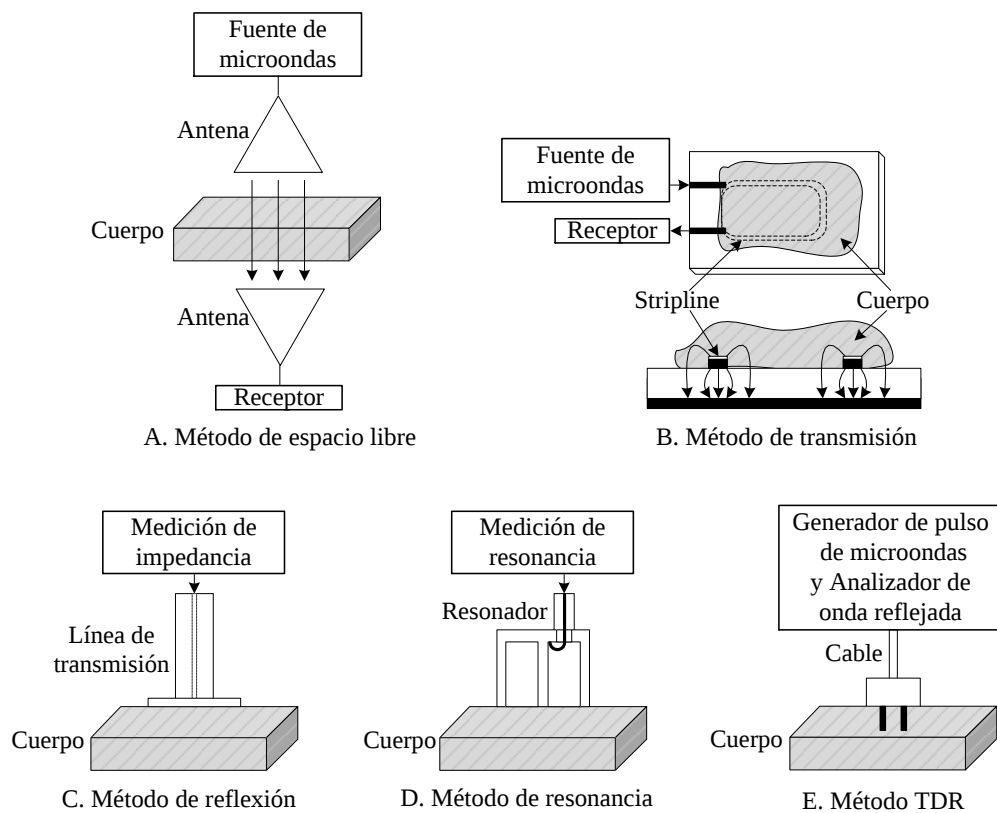


Figura 1.9: Tipos de sensores del método de microondas

CAPÍTULO II:
ANÁLISIS DE SISTEMAS DISPONIBLES EN EL
COMERCIO QUE DETERMINAN EL CONTENIDO
DE HUMEDAD EN FARDOS DE CARTONES

2. Análisis de sistemas disponibles en el comercio que determinan el contenido de humedad en fardos de cartones

En base a las técnicas y métodos mostrados en el capítulo anterior, se han desarrollado distintos tipos de sensores o instrumentos utilizados para medir la humedad en variadas aplicaciones. Estas se presentan a continuación junto a un resumen de su funcionamiento y sus especificaciones técnicas más significativas, con lo que se pretende lograr un acercamiento necesario a la aplicación de las técnicas ya revisadas, con motivo de observar y analizar sus alcances y limitaciones.

2.1 Sensores e instrumentos resistivos

2.1.1 Sensor SH-6/120, Measure Instruments

Instrumento tipo lanza, su zona sensible para medir humedad es entre la punta y el cuerpo de la sonda. Posee un solo lector y distintos sensores intercambiables para determinar humedad en productos como en forraje, heno, alfalfa, fardos y rollos de pasto. [11]



Figura N° 2.1: SH-6/120

Tabla N° 2.1: SH-6/120

Rango de medición	0% – 100%
Profundidad de medición	120 cm

Lector MI-7, Measure Instruments

Almacena en la memoria las 25 últimas mediciones y éstas no se pierden al sacar la batería. Además, es programable para algodón, papel, tierras, maderas y mediciones superficiales. [11]

Observación: Es necesaria la inclusión de este lector ya que el sensor previo (SH-6/120) necesita de este para indicar su medición.



Figura N° 2.2: MI – 7

Tabla N° 2.2: MI – 7

Rango de medición	0% – 100%
Resolución	0,1%
Alimentación	9 V

2.1.2 Sensor Digital TDT, Acclima

El sensor de humedad de suelo Acclima Digital TDT es el primer sensor de humedad en incorporar la precisión de transmisiometría de dominio de tiempo digitalizada en un instrumento de bajo costo, proporcionando lecturas absolutas de gran precisión en humedad de suelo bajo cualquier condición de temperatura y química de suelo bajo cualquier cultivo. [12]



Figura N° 2.3: Digital TDT Sensor

Tabla N° 2.3: Digital TDT Sensor

Rango de medición	0% – 100% base húmeda
Precisión	± 3%
Temperatura de operación	0,5° - 50° C
Alimentación	24 V _{AC}

2.2 Sensores e instrumentos capacitivos

2.2.1 Instrumento de medición RP5, Schaller

Esta herramienta indica el porcentaje de agua contenido en el material referido a su peso total en base seca. Se somete al producto bajo un campo eléctrico de alta frecuencia, cuyas características cambian según el contenido de agua en el material medido.

El instrumento posee compensación automática de temperatura, función de registro de datos (15.000 registros aproximadamente) con grabación de fecha automática y función de calibración de usuario para tipos de materiales específicos. Incluye cable USB para PC. Idiomas de menú: español, alemán, inglés, italiano, francés y ruso. [13]



Figura N° 2.4: RP5

Tabla N° 2.4: RP5

Rango de medición	1% – 50% de contenido de agua
Precisión	± 0,5%
Resolución	0,5% de humedad en el material
Temperatura de operación	0° – 40° C
Protección	IP40
Interfaces	USB (Almacenamiento de datos a través de software)
Profundidad de medición	Máx. 50 cm
Alimentación	90 – 260 V _{AC}

2.2.2 Sensor PR2, Delta T Devices

El sensor PR2 es una sonda de precisión para medición de humedad en suelos, capaz de leer la humedad a distintas profundidades en una perforación vertical en el suelo. Cada sonda tiene múltiples sensores (cuatro sensores en sondas de 40 cm y seis sensores en sondas de 100 cm). Las sondas se utilizan dentro de tubos de acceso, los que permiten una inserción y extracción rápida. Los tubos de acceso tienen un diámetro de 28 mm, haciendo así su instalación fácil y minimizando perturbaciones en el suelo. Las sondas tienen un doble propósito: cuando se usan con un medidor de humedad HH2 forman un sistema portable. Alternativamente, cuando se usan con un registrador de datos, se vuelven parte de una instalación fija. Esta flexibilidad, combinada con su baja sensibilidad, bajo costo y precisión, hace que estas sondas sean una buena opción para investigadores y productores. [14]



Figura N° 2.5: PR2/4

HH2 Medidor de Humedad, Delta T Devices

El HH2 es una unidad lectora versátil que provee una fácil y conveniente manera de mostrar y almacenar las lecturas de las sondas. Con la combinación del HH2 y el PR2, una sonda puede ser movida entre varios tubos de acceso permitiendo así grandes cantidades de información de la humedad del suelo en múltiples sitios. [14]

Observación: Es necesaria la inclusión de este lector ya que el sensor previo (PR2) necesita de este para indicar su medición.



Figura N° 2.6: HH2

DL2e Data Logger, Delta T Devices

El registrador de datos DL2e, es un registrador de datos versátil, muy adecuado para aplicaciones de sitios remotos y de laboratorio. El sistema DL2e es fácil de usar y es compatible con una amplia variedad de sensores, intervalos de registros de datos, recopilación de datos e instalaciones de análisis. [14]

Observación: Es necesaria la inclusión de este registrador ya que el sensor previo (PR2) necesita de este para su utilización.



Figura N° 2.7: DL2e

Tabla N° 2.5: PR2/4

Rango de medición	$0 - 0,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}*$
Precisión	$\pm 0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$
Temperatura de operación	$0^\circ - 40^\circ \text{ C}$
Protección	IP68
Salida	$0 - 1 \text{ V}_{\text{DC}}$ correspondiente a $0 - 0.6 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (calibración mineral)
Profundidad de medición	40 – 100 cm, 10 cm de diámetro
Alimentación	5,5 V_{DC} con cable de 2 m 7,5 V_{DC} con cable de 100 m Consumo < 120 mA a un máximo de 15 V_{DC}

*: Volumen de agua por volumen del sólido que lo contiene. Utilizado como unidad para la medición de humedad en suelos.

2.3 Sensores e instrumentos infrarrojos

2.3.1 Transmisor MCT460, Process Sensors

La luz de lámpara se dirige a través de los filtros pasa bandas NIR. Los filtros separan la luz en longitudes de ondas NIR, seleccionadas específicamente por PSC para la medición y la aplicación que se requiere. La luz NIR es dirigida hacia el producto que se está midiendo normalmente en una cinta transportadora o en una banda transportadora. Posteriormente la luz reflejada del producto es capturada por un espejo y enfocada sobre un detector de sulfuro de plomo. La salida en microvolts del detector es tomado por la placa del circuito ‘inteligente’ y se convierte en porcentaje de humedad. [15] Cabe señalar que para operar como instrumento de medición de humedad, este transmisor necesita de una interfaz de operador (pantalla táctil) o ser conectado a un PLC.



Figura N° 2.8: MCT460

Tabla N° 2.6: MCT460

Rango de medición	0,1% – 95 %
Precisión	Sujeta a la aplicación y tipo de producto
Resolución	+/- 0,1 % de humedad en el material
Temperatura de operación	0° – 50° C
Interfaces	4 – 20 mA / 0 – 10 V, RS – 232 y RS – 485 ProfiNet, ProfiBus, Ethernet IP, Modbus, TCP o DeviceNet
Distancia del producto	20 – 45 cm
Alimentación	90 – 260 V _{AC} , 50/60 Hz, 40 W

2.4 Sensores e instrumentos microondas

2.4.1 Instrumento de medición MW-T, Tews Elektronik

Posee dos antenas, las cuales son montadas a los lados del producto que se desea medir. La antena emisora genera y emite microondas, que atraviesan el producto y alcanzan la antena receptora. La unidad electrónica del MW-T analiza la señal recibida y calcula la humedad y densidad del producto, estos valores son almacenados y pueden ser impresos en etiquetas. La medición de humedad es independiente de la densidad y de la posición de los productos que se desee medir. Ni la distancia al sensor ni la posición oblicua alteran el valor de medición, por lo que se puede determinar la humedad y densidad en reflexión y sin contacto físico. [16]



Figura N° 2.9: MW – T

Tabla N° 2.7: MW – T

Temperatura de operación	0° – 40 ° C
Protección	IP54
Interfaces	2 USB (memoria, impresora, mouse etc.) 4 entradas/salidas digitales 4 entradas/salidas análogas 4 – 20 mA Modbus TCP/IP output
Alimentación	230 V _{AC} (115 V _{AC} opcional), 50 – 60 Hz, 180 VA
Velocidad de medición	30 lecturas por segundo

2.4.2 Sensor Moist PP, hf sensor

El cabezal sensor robusto es usado en la medición de humedad en sólidos y productos a granel, donde el volumen a medir se encuentra alrededor de $0,01 \text{ m}^3$. Moist PP es un radiador de microondas con una penetración en el material de hasta 20 cm. Este sensor es un cabezal sensor inteligente ya que posee un microcontrolador. Puede ser operado de forma autónoma en aplicaciones simples o en combinación con la unidad de control Moist Control 100. [17]. La calibración del cliente para materiales específicos permite mediciones exactas y consistentes.



Figura N° 2.10: Moist PP

Tabla N° 2.8: Moist PP

Rango de medición	0% – 400% base seca, 0% – 80% base húmeda
Precisión	0,1 % – 1,5%
Temperatura de operación	0° – 70° C
Interfaces	4 – 20 mA (activa), RS 485 (opcional) 3 entradas de conmutación aisladas (opcional) 2 salidas de conmutación aisladas (opcional)
Profundidad de medición	25 cm
Alimentación	24 V _{DC}

2.4.3 Sensor Moist Bio P, hf sensor

El cabezal sensor robusto es usado en la medición de humedad en sólidos y productos a granel, donde el volumen a medir se encuentra entre 50 a 100 litros. Moist Bio P es un radiador de microondas con una penetración en el material de hasta 50 cm. Fue diseñado para medición de humedad en grandes bultos.

Este sensor es un cabezal sensor inteligente ya que posee un microcontrolador. Puede ser operado de forma autónoma en aplicaciones simples o en combinación con la unidad de control Moist Control 100. [18]. La calibración del cliente para materiales específicos permite mediciones exactas y consistentes.



Figura N° 2.11: Moist Bio P

Tabla N° 2.9: Moist Bio P

Rango de medición	0% – 400% base seca, 0% – 80% base húmeda
Precisión	0,5% – 3%
Temperatura de operación	0° – 70° C
Interfaces	RS 232, 4 – 20 mA RS 422, 4 – 20 mA
Profundidad de medición	50 cm
Volumen de medición	50 – 100 L
Alimentación	8 – 28 V _{DC}

Unidad de Control Moist Control 100, hf sensor

El Moist Control 100 está diseñado para controlar y evaluar hasta 31 sensores de la serie Moist xP. Esta unidad de control obtiene la lectura de humedad mediante diferentes algoritmos matemáticos. Es posible la configuración específica del Moist Control 100 por el cliente. [19]

Observación: Es necesaria la inclusión de este controlador ya que los dos sensores previos (Moist PP y Moist Bio P) necesitan de este para su utilización en todo tipo de aplicaciones.



Figura N° 2.12: Moist Control 100

Tabla N° 2.10: Moist Control 100

Temperatura de operación	0° – 50° C
Protección	IP20
Interfaces	2x RS 485 4 – 20 mA (activa) 6 entradas de conmutación aisladas 2 salidas de conmutación aisladas 1 salida a fusible de 24 V, máx. 200 mA
Alimentación	24 V _{DC} , máx. 200 mA

2.4.4 Sensor Hydro - Mix, Hydronix

El Hydro-Mix es un sensor robusto de medición de humedad por microondas, diseñado para instalarlo alineado con el suelo de una mezcladora, en un conducto de descarga o en una cinta transportadora, en entornos de control de procesos. [20]

Ofrece una amplia variedad de modos de medición para optimizar el rendimiento del sensor con minerales como arena, áridos y hormigón o para medir la humedad en materiales orgánicos como grano, frutos secos y aceite. [21]

Con una lectura de 25 veces por segundo y combinado con las funciones que incluye, como la de procesamiento de señales, de suavizado y de promediado, el Hydro-Mix mide con exactitud el contenido de humedad del material a medida que pasa por la placa frontal cerámica. Es posible ejecutar fácilmente las acciones de configuración remota, calibración, diagnóstico y actualizaciones de firmware mediante el software Hydro-Com de Hydronix.

El resultado lineal que se obtiene permite integrarlo directamente en cualquier sistema de control mediante interfaces estándar del sector. [20]



Figura N° 2.13: Hydro - Mix

Tabla N° 2.11: Hydro - Mix

Rango de medición	El sensor medirá hasta la saturación del material
Precisión	+/- 0,2%
Temperatura de operación	0° – 60° C. El sensor no funciona con materiales congelados
Interfaces	Puerto de 2 hilos RS485 optoaislado. Ethernet y USB Convertidores de RS485 a RS232.
Salidas	4 – 20 mA 0 – 20 mA 0 – 10 V _{DC}
Penetración de campo	Aproximadamente 7,5 – 10 cm, según el material
Alimentación	15 a 30 V _{DC} , 4 W

2.4.5 Sensor HydraProbe, Stevens

HydraProbe es un sensor robusto de suelo con tecnología patentada que proporciona una precisión continua, en la medición simultánea de los tres parámetros más significativos del suelo: la humedad, la salinidad y la temperatura.

Como el sensor de suelo más investigado científicamente, ha sido utilizado por el USDA, NOAA, NASA, las principales compañías de riego y muchas universidades durante más de 20 años. Se ha diseñado para ser extremadamente robusto y proporcionará datos de los que puede confiar año tras año. [22]



Figura N° 2.14: HydraProbe

Tabla N° 2.12: *HydraProbe*

Rango de medición	El sensor medirá hasta la saturación del material
Precisión	+/- $\leq 0,03\%$ para suelos de textura fina
Temperatura de operación	-10° - 55° C
Interfaces	RS485, SDI-12 Standard v.1.2
Volumen de sensaje	Región cilíndrica. Longitud: 5,7 cm, Diámetro: 3 cm
Alimentación	9 a 20 V _{DC}

2.4.6 Sensor TRIME - PICO IPH/T3, IMKO

El sensor TRIME-PICO IPH/T3 es un dispositivo de medición para la determinación continua y no destructiva de la humedad volumétrica del suelo. Está diseñado para uso de campo móvil y se puede conectar a un módulo Bluetooth BT-PICO o un registrador de datos (globeLog o cualquier registrador de datos analógico) o a un PC para fines de seguimiento y registro de datos.

IMKO fue el primer fabricante de técnicas de medición TDR en ofrecer una sonda de acceso TDR diseñada especialmente para perfiles de contenido de agua. La sonda consiste en un tubo cilíndrico de PVC, que tiene cuatro placas de aluminio montados sobre resortes como guías de onda TDR en los lados opuestos.

El dispositivo TRIME genera un impulso de alta frecuencia (hasta 1 GHz) que se propaga a lo largo de la carcasa del metal, lo que genera un campo electromagnético alrededor de la sonda. Al final de la carcasa, el pulso se refleja de nuevo a su fuente. El tiempo de tránsito resultante (3 ps – 2 ns) puede medirse y permitir la determinación de la velocidad de propagación, que depende principalmente del contenido de agua. El contenido de agua volumétrico se calcula entonces con la velocidad y se muestra en el panel de visualización inmediatamente. [23]



Figura N° 2.15: TRIME - PICO IPH/T3

Tabla N° 2.13: TRIME - PICO IPH/T3

Rango de medición	0 – 100% del contenido de agua volumétrico
Precisión	+/- 0.5%
Temperatura de operación	-15° – 50° C
Interfaces	RS485
Salidas	0 – 1 V
Volumen de medición	3 L
Alimentación	7 a 24 V _{DC}

La siguiente tabla es un resumen con las técnicas y rangos de medición de cada uno de los instrumentos mostrados anteriormente.

Tabla N° 2.15: Resumen sensores o instrumentos de humedad

Sensor o instrumento	Técnica de medición	Rango de medición
SH – 6/120	Resistiva	0% – 100%
Sensor Digital TDT	Resistiva	0% – 100% base húmeda
RP5	Capacitiva	1% – 50% base húmeda
PR2/4	Capacitiva	$0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ – $0,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$
MCT460	Infrarroja	0,1% – 95%
MW-T	Microondas	No indica
Moist PP	Microondas	0% – 400% base seca 0% – 80% base húmeda
Moist Bio P	Microondas	0% – 400% base seca 0% – 80% base húmeda
Hydro – Mix	Microondas	Hasta saturación del material
HydraProbe	Microondas	Hasta saturación del material
TRIME - PICO IPH/T3	Microondas	0 – 100% base húmeda

CAPÍTULO III:
FORMULACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO
MÁS ADECUADO DESDE LA PERSPECTIVA
TÉCNICA Y ECONÓMICA

3. Formulación del sistema propuesto más adecuado desde la perspectiva técnica y económica

Como resultado del estudio realizado de los diferentes métodos y sus aplicaciones en instrumentos, se realiza un análisis técnico con motivo de definir cuál es el más apropiado para su implementación. Luego, en base al método escogido, se efectúa un análisis económico de sus aplicaciones, pues esto ayuda a dilucidar si la implementación del prototipo es un desafío de ingeniería o es un prototipo rentable para su implementación en la industria.

3.1 Análisis técnico

3.1.1 Método gravimétrico

En un análisis inicial, puede aparecer perfilado como uno de los mejores debido a que distintos autores lo citan como un procedimiento de corroboración de cualquier otra técnica, ya que se trata de una medición directa del contenido de humedad del cuerpo, sin embargo presenta ciertas características que hacen de éste, el método menos eficiente.

Su primer inconveniente radica en el tiempo que tarda en determinarse la humedad, debido a que se necesita una evaporación completa (o no) del contenido de agua del cuerpo para poder comparar su peso inicial con el final. También, y como consecuencia de lo anterior, este método no puede ser aplicado en el cuerpo que se le desea medir su humedad (cartón) debido a su característica destructiva. Además, este medio, al ser lento, debido a la inercia térmica entre otras cosas, precisa la utilización de demasiada energía, la que no sólo se destina al cambio de estado del agua contenida en el cuerpo en cuestión, pues la energía generada se disipa a los alrededores del horno. Por último, el espacio físico destinado a los hornos es demasiado grande, lo que limita la aplicación de este método solamente a lugares espaciosos.

3.1.2 Método resistivo

Es un procedimiento rápido, ya que sólo necesita de la presencia de los electrodos para la medición de la corriente (y de forma indirecta resistencia) y, por la misma presencia de estas varillas, es posible ubicar zonas en que la humedad es mayor dentro del cuerpo, esto se logra insertándolas a distintas profundidades. Éste método también se diferencia del secado térmico en la cantidad de energía utilizada, ya que la corriente que circula por los electrodos es mínima.

La técnica resistiva es un método indirecto para determinación de humedad basado en la variación de la conductividad (resistencia) de un material, debido a su contenido de agua, y es por esto que la medición de humedad se ve perturbada por factores que afecten la conductividad del agua presente en el cuerpo. El agua químicamente pura no es conductora de electricidad por lo tanto la medición de resistencia se ve afectada por la salinidad del agua contenida en el cuerpo en cuestión. También, como se menciona anteriormente, este método permite la medición de humedad a distintas profundidades del material, lo que acarrea la desventaja de ser un método invasivo si se desea conocer la distribución de humedad en el cuerpo. Otra desventaja es que la circulación de corriente entre dos puntos siempre tomará el camino menos resistivo por lo que este método en el peor de los casos puede medir la resistencia de forma unidimensional, despreciando así la humedad de gran parte del cuerpo, haciendo inexacta la medición. Por último, el rango de medición de humedad es restringido (no mayor a 30% según ciertos autores [4] [25]), lo que condiciona la efectividad del método para cualquier tipo de sólido.

3.1.3 Método capacitivo

Muestra ciertas similitudes y ventajas respecto del resistivo. Dentro de las semejanzas se puede contar la baja energía necesaria y la rapidez para medir la constante dieléctrica del cuerpo al que se le desea sensar la humedad. Como ventaja se presenta que la medición de la permitividad de un cuerpo, que se encuentra entre placas que forman un campo eléctrico, se ve influida por la humedad contenida en todo el cuerpo y no sólo entre dos puntos como sucede en el método resistivo, entregando así una medición mas real del contenido del humedad. Las desventajas de esta técnica se remiten a la profundidad de medición y la dependencia de este parámetro debido a

la densidad del material, lo que es crítico en la aplicación requerida pues la densidad de los fardos oscila entre 265 [kg/m³] y 475 [kg/m³], lo que llevaría a tener mediciones para profundidades muy pequeñas, ignorando la mayor parte del volumen del cuerpo.

3.1.4 Método de radiación de neutrones

Es un procedimiento de laboratorio que ofrece una precisión de $\pm 0,1\%$, [8], lo que es mucho mayor a cualquier técnica analizada en los capítulos anteriores. Además de no ser una técnica destructiva y del poco tiempo necesario para obtener la medición, este método aparenta ser el indicado para su aplicación, sin embargo en la práctica existen dificultades asociadas a su ejecución. Al ser un método extremadamente técnico y muy costoso, obliga un control de seguridad acorde a una fuente radioactiva, es decir, confirmación constante del estado de la fuente de neutrones. En conclusión, esta es una técnica de difícil implementación en cualquier tipo de proceso.

3.1.5 Método de infrarrojos

Presenta bastantes similitudes con la recién analizada técnica de radiación de neutrones. En cuanto a las ventajas, se puede señalar que no es destructiva y la medición se realiza de forma instantánea, no obstante, y contribuyendo aún más a la semejanza de ambos métodos, como desventaja aparece el alto costo de implementación. Como ésta es una técnica que se basa en el reflejo de las ondas incidentes en las moléculas de agua, la medición obtenida será representativa solo del contenido de humedad presente en la superficie del cuerpo.

3.1.6 Método de microondas

Es un método no destructivo, muy rápido en la determinación de humedad, donde la medición se realiza sobre todo el cuerpo que se encuentra inmerso en el campo electromagnético, por lo que el resultado obtenido es fiel a la totalidad del contenido de humedad del cuerpo. El costo y las

medidas de seguridad necesarias para la implementación y puesta en marcha de este método son mucho menores que los exhibidos por los métodos de radiación de neutrones e infrarrojo, no obstante, éstos últimos superan a las microondas en cuanto a rango de medición y precisión pero aún así se encuentran dentro de rangos aceptables y perfectamente útiles para la aplicación deseada.

A modo de resumen se presenta la siguiente tabla con los parámetros más importantes de las técnicas y métodos analizados en este capítulo, categorizándolos según su desempeño en alto, medio o bajo.

Donde:

G: Método Gravimétrico

R: Método Resistivo

C: Método Capacitivo

RN: Método de Radiación de Neutrones

IR: Método de infrarrojos

MW: Método de Microondas

Tabla N° 3.1: Resumen técnicas para determinar contenido de humedad

Parámetros	G	R	C	RN	IR	MW
Rango medición	Alto	Medio	Medio	Alto	Alto	Medio
Profundidad medición	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Alto
Precisión	Alto	Medio	Medio	Alto	Alto	Medio
Rapidez medición	Bajo	Medio	Medio	Alto	Alto	Alto
No destructivo	Bajo	Medio	Alto	Alto	Alto	Alto
Económico	Medio	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Medio

Tomando como base estos indicadores, se decide utilizar la técnica de microondas para la medición de humedad en los fardos. Si bien este procedimiento se ve superado en el rango de

medición y precisión por otros métodos, en general es el que presenta un desempeño acorde a las circunstancias en las cuales se desea sensar el contenido de humedad.

3.2 Análisis económico

A continuación, en la tabla 3.1, se muestran algunas características técnicas y precios de instrumentos que determinan humedad en sólidos usando el método de microondas.

Tabla N° 3.1: Precios instrumentos basados en la utilización de microondas

Instrumento, Proveedor	Rango medición	Profundidad medición	Precisión	Precio
MW-T, Tews Elektronik	No indica	70 cm	No indica	\$ 60.202.242
Moist PP, hf sensor	0% - 80%	25 cm	0,1% - 1,5%	En consulta
Moist Bio P, hf sensor	0% - 80%	50 cm	0,5% -3%	En consulta
Hydro – Mix, Hidronix	Hasta Sat.	10 cm	± 2%	\$ 5.712.000
HydraProbe, Stevens	Hasta Sat.	3 cm	± 0,03%	En consulta
TRIME-PICO IPH/T3, IMKO	0% - 100%	3 L	± 0,5%	\$ 745.470

Para el caso del MW-T (el instrumento de mayor precio) se observan aplicaciones para fardos, en cambio el TRIME - PICO IPH/T3 se utiliza para medición de humedad en suelos, con un volumen máximo de 3 L y el Hydro – Mix se emplea para la medición de humedad en conductos y tiene una penetración máxima de 10 cm. Se hace evidente que para la aplicación deseada la mayoría de los instrumentos no puede utilizarse. Más allá de cierta precisión, e incluso rango de medición, es necesaria una gran profundidad de medición debido a la naturaleza del sujeto de medición; la medición debe ser real, representar el contenido de humedad del total del fardo y no solo de una parte de este.

Todo lo anterior evidencia que a mayor valor económico de los instrumentos, mejor se adecúan para la utilización detallada en el principio de este informe.

CAPÍTULO IV:

FUNDAMENTOS BÁSICOS DE ANTENAS

4. Fundamentos básicos de antenas

El diseño de un prototipo para la medición de humedad utilizando microondas implica, según lo expuesto en capítulos anteriores, la utilización de antenas de corneta. El estudio de los fundamentos básicos de estas, ya sea su funcionamiento y la comprensión de los distintos parámetros involucrados en el empleo de estos dispositivos, se hace imprescindible.

4.1 Definición

Según la IEEE, las antenas son aquella parte de un sistema de transmisión o recepción que es diseñada para radiar o recibir ondas electromagnéticas. En específico, una antena de corneta consiste en una sección de guía de onda, en la cual se aumenta el área de la sección transversal hasta un extremo abierto, que es la apertura, como se muestra en la figura 4.1 [26].

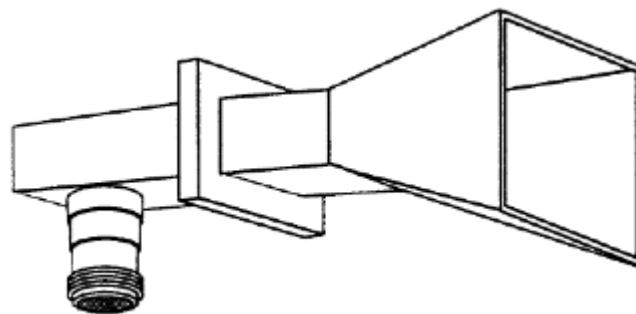


Figura N° 4.1: Antena de corneta [27]

4.2 Funcionamiento

4.2.1 Generación de la señal

Un oscilador Gunn, se compone básicamente de un dispositivo semiconductor (dispositivo Gunn) acoplado a una cavidad resonante. El principio de funcionamiento se basa en el hecho que la estructura de bandas de algunos semiconductores (GaAs, InP o CdTe) tiene la banda de conducción dividida en dos bandas muy cercanas, una de ellas de baja energía - alta movilidad y

la otra de alta energía - baja movilidad. Cuando hay más electrones en la banda de baja energía - alta movilidad la conductividad es mayor, que cuando hay más en la banda de alta energía - baja movilidad, pues la conductividad se relaciona directamente con la movilidad de los portadores de carga. En términos de comportamiento como elemento de circuito se tiene que la característica corriente-voltaje de un semiconductor de este tipo es como la de la figura 4.2.

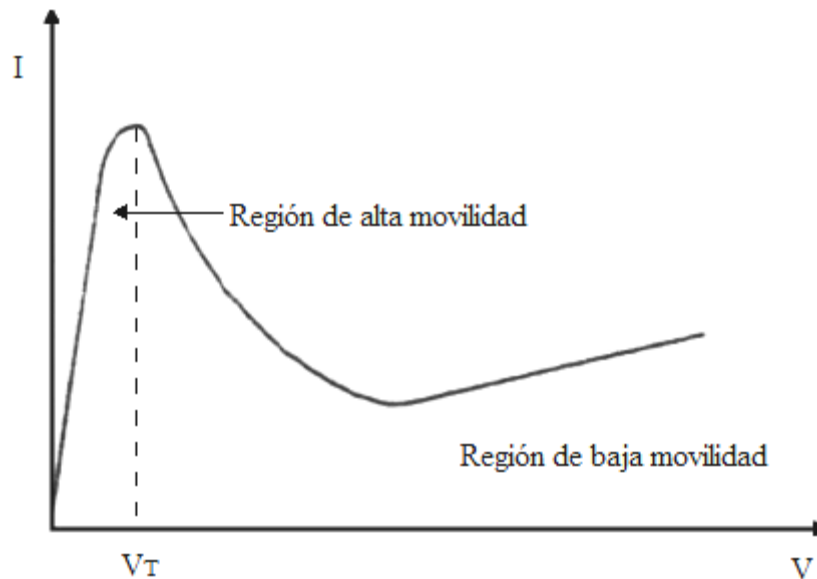


Figura N° 4.2: Curva característica oscilador Gunn [28]

Donde V_T : Voltaje umbral

En la figura se tiene una zona de resistencia diferencial negativa, que se forma cuando los electrones pasan de la banda de baja energía a la de alta, disminuyendo la resistencia.

Hay básicamente dos modos de operación que generan oscilaciones, el primero de los cuales se denomina modo de tiempo de tránsito (transit time mode) o modo Gunn y consiste en aplicar al dispositivo un voltaje mayor que el umbral, de este modo se forma un dominio dipolar (figura 4.3) que separa una región de alta movilidad de una de baja movilidad. Este dominio viaja desde el cátodo al ánodo donde se destruye. Este proceso se repite sucesivamente generando oscilaciones cuyo período está dado por el tiempo de tránsito del dominio dipolar. El principal problema de este modo de operación es que la frecuencia no puede ser controlada externamente y que no es muy eficiente en términos de generación de potencia.

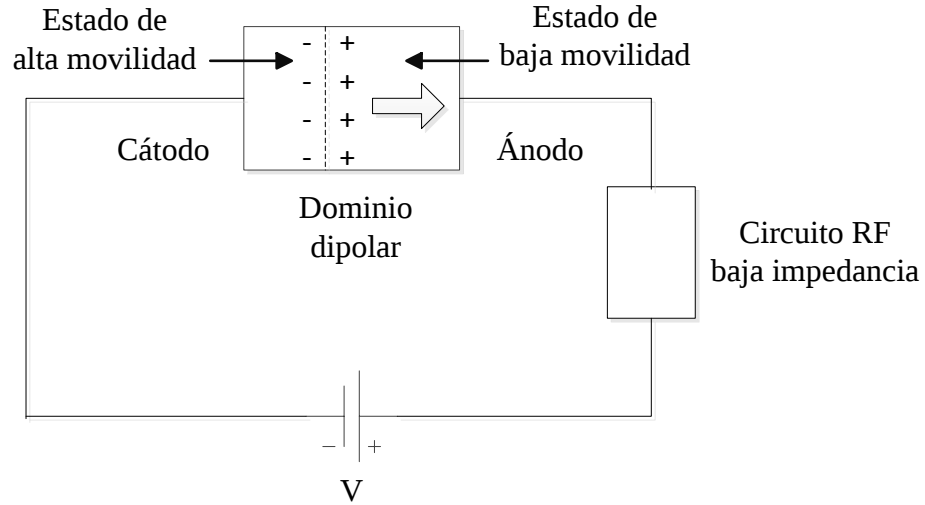


Figura N° 4.3: Modo de tiempo de tránsito

El segundo modo de operación se denomina modo de carga espacial limitada (limited space charge accumulation (LSA)) y consiste en acoplar el dispositivo Gunn a un circuito resonante con una frecuencia varias veces mayor que la frecuencia de oscilación del modo de tiempo de tránsito, de esta forma el dominio dipolar no tiene tiempo de formarse, por lo que el comportamiento del dispositivo Gunn es esencialmente el de un dispositivo de resistencia negativa. En este modo de operación el dispositivo se polariza con un voltaje ligeramente mayor al umbral, de esta forma genera oscilaciones con una amplitud tal que cubre toda la zona donde la resistencia es negativa (figura 4.4).

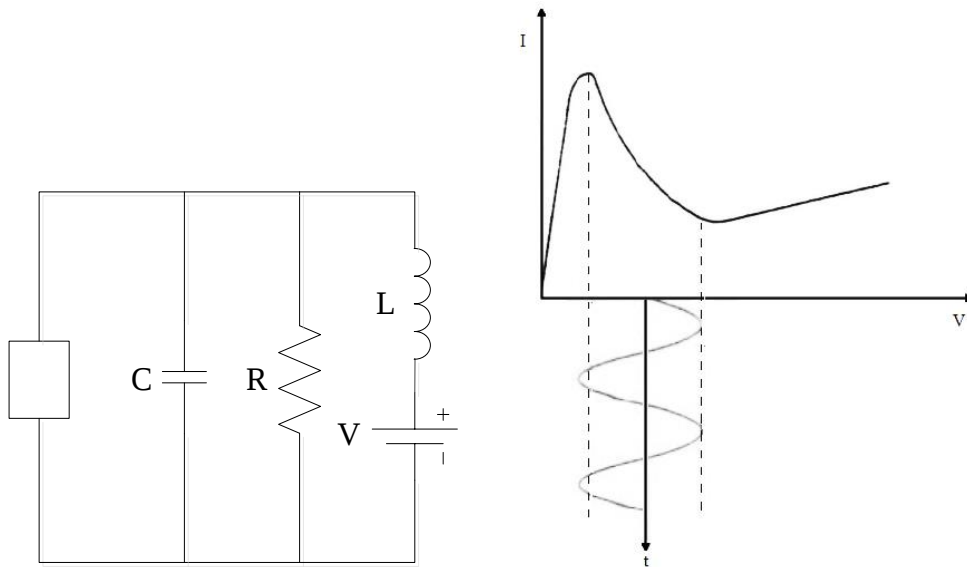


Figura N° 4.4: Modo de carga espacial limitada [28]

Algunas configuraciones usadas en la práctica se muestran en las siguientes figuras. Ambas corresponden a la operación en el modo LSA, pues este permite realizar el control de la frecuencia de las oscilaciones.

La primera configuración (figura 4.5) permite ajustar la frecuencia de oscilación por medio de un tornillo. En esta configuración los transformadores $\lambda/4$ permiten ajustar la impedancia de la cavidad a la salida. La segunda configuración (figura 4.6) permite ajustar electrónicamente la frecuencia de oscilación por medio de un diodo varactor (dispositivo de capacidad variable y controlable) [28]

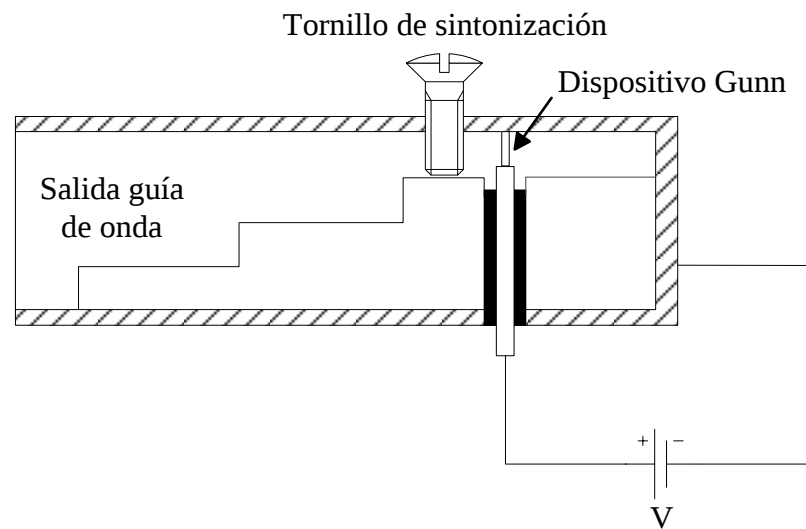


Figura N° 4.5: Ejemplo 1 configuración oscilador Gunn modo LSA

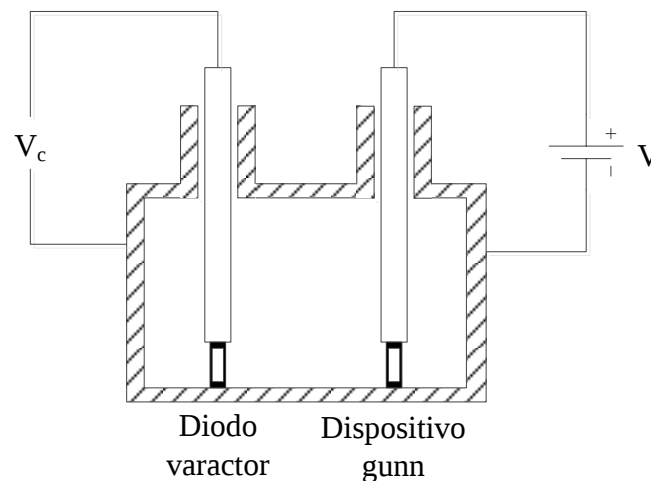


Figura N° 4.6: Ejemplo 2 configuración oscilador Gunn modo LSA

4.2.2 Propagación

4.2.2.1 Guías de onda

Una guía de onda es una región del espacio limitada por un medio material en todas sus direcciones excepto en una. En una guía de onda de sección rectangular, para el caso particular de la antena de corneta utilizada en la medición de humedad, la región está limitada por dos parejas de planos paralelos entre sí de tal manera que, visto desde los lados abiertos, se observará una sección con forma rectangular (como se muestra en la figura 4.7). Las direcciones x e y son las que están limitadas, mientras que la dirección z es la que se encuentra libre.

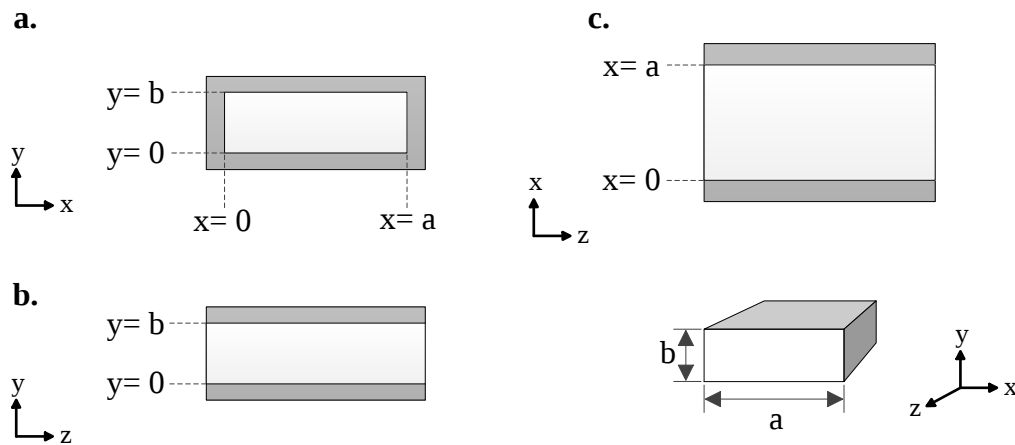


Figura N° 4.7: Secciones guía de onda

Para el análisis del comportamiento de las ondas electromagnéticas en el interior de una guía de onda rectangular se consideran las siguientes suposiciones y aproximaciones, que corresponden a las situaciones más habituales en la práctica y no afectan al resultado general de forma significativa.

- Las paredes limitadoras son de un material conductor perfecto ($\sigma \rightarrow \infty$).
- En el interior de la guía hay o bien el vacío o bien un material dieléctrico i. h. l. (isótropo, homogéneo, lineal).

- Los ejes x e y corresponden a las direcciones de los dos planos que determinan la sección rectangular, mientras que el eje z corresponde a la dirección longitudinal de la guía de onda.

Luego, la onda electromagnética, que se propaga a lo largo de la dirección longitudinal (z), se puede representar mediante las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{E}_0(x, y) \cdot e^{j(kz - \omega t)} \\ \vec{H} &= \vec{H}_0(x, y) \cdot e^{j(kz - \omega t)}\end{aligned}\tag{4.1}$$

Donde $\vec{E}_0$ y $\vec{H}_0$ son las amplitudes de oscilación de los campos eléctrico y magnético y $e^{j(kz - \omega t)}$ es el fasor correspondiente.

La ecuación 4.1 es la generalización de un número infinito de ondas posibles. No obstante, no todas se pueden propagar en una guía de onda. Las soluciones posibles están limitadas a aquellas que cumplen una serie de condiciones, las llamadas condiciones de contorno. En una guía de onda como la estudiada, estas condiciones se deben al hecho de que la región está limitada físicamente por las paredes conductoras. Las condiciones de contorno se pueden determinar a partir de las propiedades de los campos eléctrico y magnético en las regiones cercanas a un conductor, como se muestra en la figura 4.8.

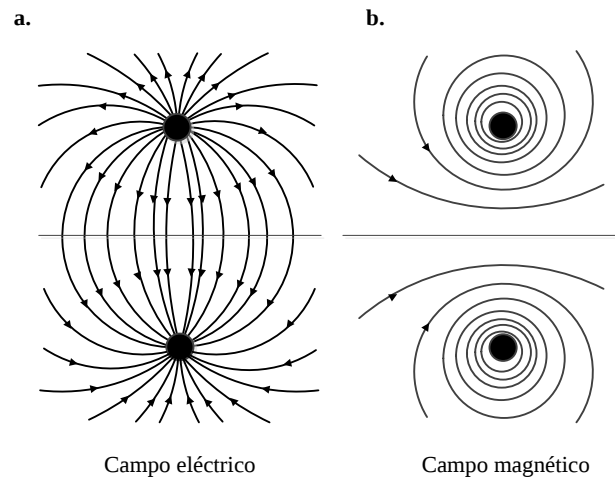


Figura N° 4.8: Campos eléctrico y magnético alrededor de dos conductores

- El campo eléctrico en la superficie de las paredes conductoras no puede tener componente tangencial.
- El campo magnético en la superficie de las paredes conductoras no puede tener componente normal. [29]

4.2.2.2 Modos de propagación

Se llama modo a cada una de las ondas electromagnéticas posibles que cumplen las condiciones de contorno y que, por tanto, se pueden propagar en una guía de onda.

Los modos correspondientes a una guía de onda son las oscilaciones “básicas” que se pueden producir en ella. Todas las oscilaciones en los campos eléctrico y magnético que se producen en una guía de onda son combinaciones de un número indefinido de estos modos.

Con tal de determinar cómo son estos modos, se clasifica según cómo sean sus campos eléctrico o magnético. Así pues, se tiene que los modos de ondas electromagnéticas en una guía de onda se pueden clasificar en modos transversales eléctricos (TE) y modos transversales magnéticos (TM).

4.2.2.2.1 Modos transversales eléctricos (TE)

En una guía de onda, un modo transversal eléctrico TE_{mn} es aquel en el que no hay componente del campo eléctrico en la dirección de propagación longitudinal (z).

Las diferentes combinaciones de valores de m y n determinan cada uno de los modos posibles en una guía de onda. Para identificar los modos, se denominan utilizando la notación TE_{mn} , donde los subíndices corresponden a los valores respectivos de m y n

Para el caso de una guía de onda de sección rectangular, los campos eléctrico y magnético en un modo TE_{mn} son:

$$\begin{aligned}
 E_x &= A_{Ex} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(kz-\omega t)} \\
 E_y &= A_{Ey} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(kz-\omega t)} \\
 E_z &= 0 \\
 H_x &= A_{Hx} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(kz-\omega t)} \\
 H_y &= A_{Hy} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(kz-\omega t)} \\
 H_z &= A_{Hz} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(kz-\omega t)}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Donde A_{Ex} , A_{Ey} , A_{Hx} , A_{Hy} y A_{Hz} son las amplitudes de oscilación o valores máximos de cada componente, a y b son las dimensiones de la guía de onda y m y n son cualquier combinación de números enteros.

Si se hace un corte transversal y se analiza la amplitud de cualquiera de las componentes del campo a lo largo de uno de los ejes, se puede comprobar que se comporta como una onda estacionaria con una longitud de onda que siempre será un divisor exacto de la distancia entre las paredes respectivas. Los valores de m y n indican precisamente el número de máximos a lo largo de las direcciones respectivas x y y . En la figura 4.9 se muestra, a modo de ejemplo, cómo sería la amplitud de la componente E_y a lo largo de la dirección x para los casos $m=1, 2, 3$ y 4 .

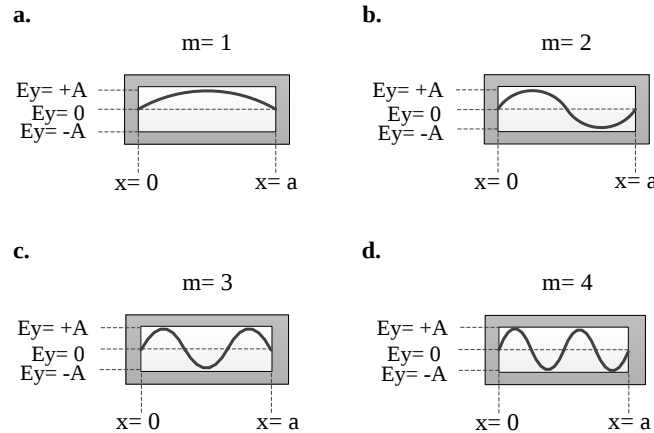


Figura N° 4.9: Esquema modos de oscilación de E_y

Ahora se analiza el caso particular del modo TE_{10} debido a que es el modo fundamental. Este es, junto con el TE_{01} , los modos más simples. Para obtener el campo eléctrico $\vec{E}$ y magnético $\vec{H}$ en este modo se debe sustituir $m=1$ y $n=0$ en las ecuaciones 4.2:

$$\begin{aligned}
 E_x &= 0 \\
 E_y &= A_{Ey} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{j(kz-\omega t)} \\
 E_z &= 0 \\
 H_x &= A_{Hx} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{j(kz-\omega t)} \\
 H_y &= 0 \\
 H_z &= A_{Hz} \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{j(kz-\omega t)}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

En la figura 4.10 se observa una representación gráfica de las amplitudes de estos campos en una sección transversal. Como $E_x = 0$ y $E_z = 0$, el campo eléctrico sólo presenta componente en la dirección y . En los esquemas a y b se puede ver que, efectivamente, el campo eléctrico siempre apunta en esta dirección (flechas continuas). En el esquema c el campo eléctrico es perpendicular al plano del papel y puede ir hacia afuera representado con el símbolo $\bullet$. [29]

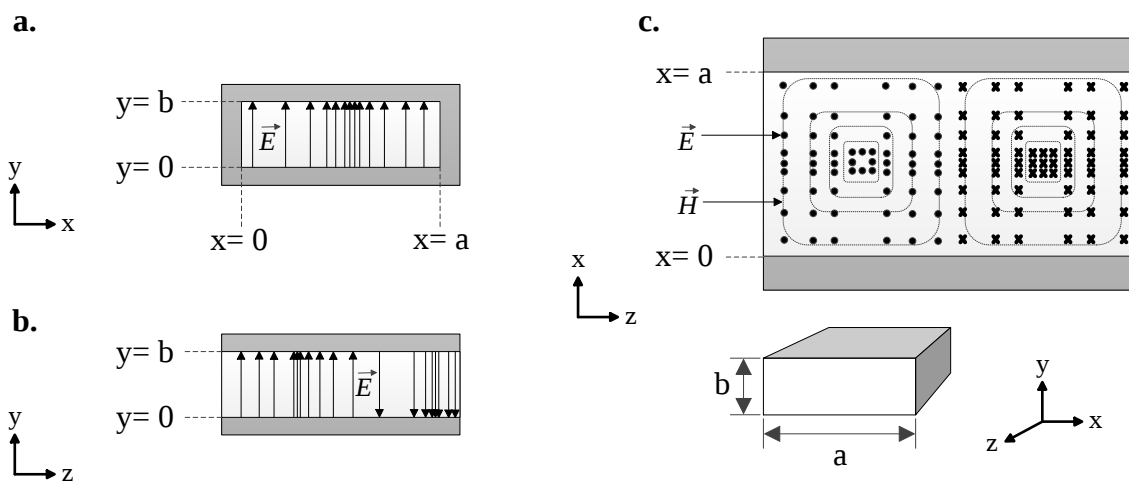


Figura N° 4.10: Esquema de campo eléctrico y campo magnético en modo TE_{10}

4.2.2.2 Modos transversales magnéticos (TM)

En una guía de onda, un modo transversal magnético TM_{mn} es aquel en el que no hay componente del campo magnético en la dirección longitudinal (z). Para una guía de onda de sección rectangular, los campos eléctrico y magnético en un modo de este tipo son:

$$\begin{aligned}
 E_x &= A_{Ex} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(kz-\omega t)} \\
 E_y &= A_{Ey} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(kz-\omega t)} \\
 E_z &= A_{Ez} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(kz-\omega t)} \\
 H_x &= A_{Hx} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(kz-\omega t)} \\
 H_y &= A_{Hy} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{j(kz-\omega t)} \\
 H_z &= 0
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Donde A_{Ex} , A_{Ey} , A_{Ez} , A_{Hx} y A_{Hy} son las amplitudes de oscilación o valores máximos de cada componente, a y b son las dimensiones de la guía de onda y m y n son cualquier combinación de números enteros. [29]

4.2.2.3 Frecuencia de corte

A cada modo, caracterizado por un conjunto de enteros m y n le corresponde una frecuencia de corte f_c . La frecuencia de corte es la frecuencia de operación por debajo de la cual ocurre atenuación y por encima de la cual ocurre propagación [24].

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left[\frac{m\pi}{a}\right]^2 + \left[\frac{n\pi}{b}\right]^2} \tag{4.5}$$

Donde:

μ : Permeabilidad absoluta [N/A^2]

ε : Permitividad absoluta [F/m]

4.3 Parámetros fundamentales de una antena

4.3.1 Regiones de campo

El espacio que rodea una antena se divide en tres regiones, la cuales se muestran en la figura 4.11 y se detallan a continuación:

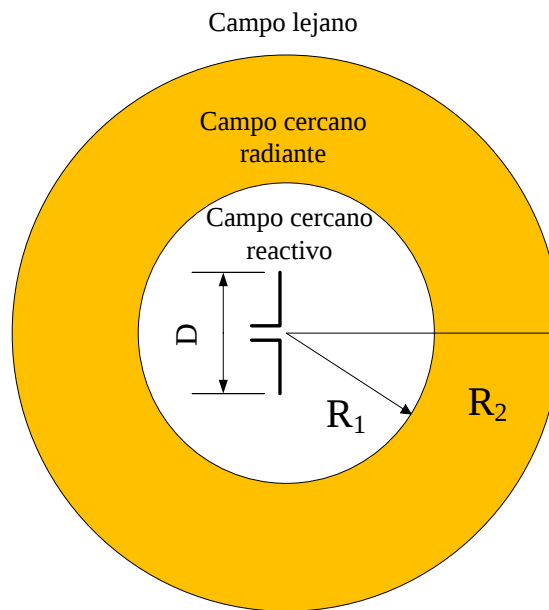


Figura N° 4.11: Regiones de campo

4.3.1.1 Región de campo cercano reactivo

La parte de la región de campo cercano que rodea inmediatamente a la antena, en el que el campo reactivo predomina [26].

$$R_1 < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (4.6)$$

Donde:

R_1 : Radio interior del borde del campo cercano reactivo [m]

D : Dimensión del dipolo [m]

λ : Longitud de onda [m]

4.3.1.2 Región de campo cercano radiante

Aquella porción del campo cercano de una antena entre el campo lejano y la parte reactiva de la región de campo cercano, en que la distribución del campo angular depende de la distancia desde la antena [26].

$$0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R_2 < 2 \frac{D^2}{\lambda} \quad (4.7)$$

R_2 : Radio del campo cercano radiante, comprendido entre el borde exterior del campo cercano reactivo y entre el borde interior del campo lejano radiante [m]

4.3.1.3 Región de campo lejano

Aquella región del campo de una antena, donde la distribución del campo angular es esencialmente independiente de la distancia desde un punto específico en la región de la antena. Es en esta región donde se determina el patrón de radiación de una antena [26].

Se debe cumplir que: $D \gg \lambda$

$$R_2 \geq 2 \frac{D^2}{\lambda} \quad (4.8)$$

Donde R_2 es el radio exterior del borde del campo lejano [m]. La región del borde exterior se da hasta el infinito.

4.3.2 Patrón de radiación

El patrón de radiación es la distribución espacial de una cantidad que caracteriza el campo electromagnético generado por una antena. La distribución se puede expresar como una función matemática o como una representación gráfica. Las cantidades que más frecuentemente se utilizan para caracterizar la radiación de una antena son proporcionales a, o igual a, la densidad de flujo de potencia, intensidad de radiación, directividad, la fase, la polarización, y la intensidad de campo. La distribución espacial sobre cualquier superficie o ruta es también un patrón de radiación de antena.

Cuando la amplitud o amplitud relativa de un componente determinado del vector del campo eléctrico se representan gráficamente, se llama patrón de amplitud, patrón de campo, o patrón de tensión. Cuando se representa el cuadrado de la amplitud o amplitud relativa, se denomina un patrón de energía. Cuando no se especifica la cantidad, un patrón de amplitud o potencia está implícito [26].

4.3.2.1 Planos de radiación

Para una antena de polarización lineal, explicado en el apartado 4.3.3, el patrón de radiación puede caracterizarse desde los planos que contienen al vector campo magnético o campo eléctrico y la dirección de máxima radiación [26].

4.3.2.1.1 Plano H

Es el plano que contiene el vector de campo magnético y la dirección de máxima radiación, como se muestra en la figura 4.12.

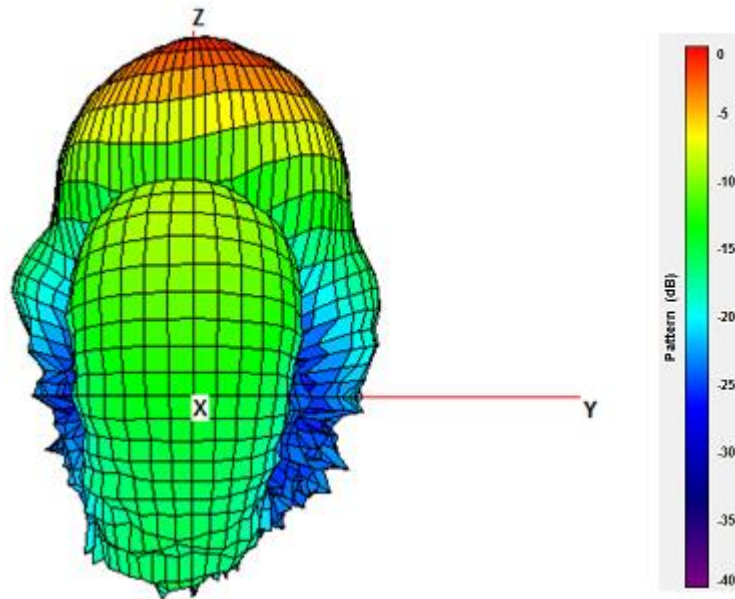


Figura N° 4.12: Patrón de radiación plano H

La figura 4.12 muestra la distribución espacial de las intensidades del campo eléctrico para la antena ETS-Lindgren 3160-7.

4.3.2.1.2 Plano E

Es el plano que contiene el vector de campo eléctrico y la dirección de máxima radiación, como se muestra en la figura 4.13

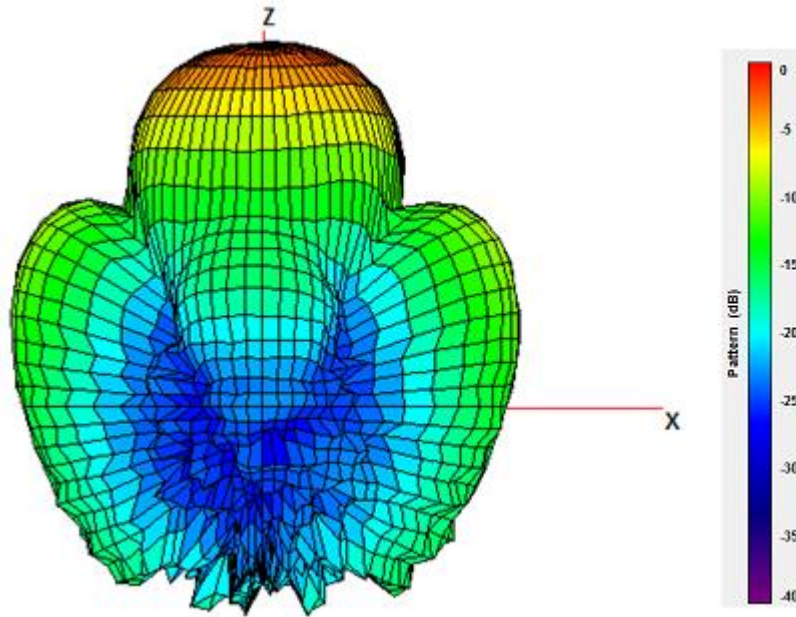


Figura N° 4.13: Patrón de radiación plano E

La figura 4.13 muestra la distribución espacial de las intensidades del campo eléctrico para la antena ETS-Lindgren 3160-7.

4.3.2.2 Lóbulos

Un lóbulo de radiación es una porción del patrón de radiación que está delimitada por regiones de menor radiación (nula) [26]. Los lóbulos son los siguientes:

4.3.2.2.1 Lóbulo mayor

El lóbulo de radiación que contiene la dirección de máxima radiación.

4.3.2.2.2 Lóbulo menor

Cualquier lóbulo de radiación, excepto un lóbulo principal.

4.3.2.2.3 Lóbulos laterales

Un lóbulo de radiación en cualquier dirección distinta de la del lóbulo mayor.

4.3.2.2.4 Lóbulo posterior

Un lóbulo de radiación cuyo eje forma un ángulo de aproximadamente 180° con respecto al eje del haz de una antena.

4.3.3 Polarización

La polarización de una onda plana uniforme describe el comportamiento variable con el tiempo del vector intensidad de campo eléctrico en un punto determinado del espacio. Por ejemplo, si el vector $\vec{E}$ de una onda plana permanece fijo en la dirección x ($\vec{E} = \hat{a}_x E_x$, donde E_x puede ser positivo o negativo), se dice que la onda está polarizada linealmente en la dirección x . No se requiere una descripción aparte del comportamiento del campo magnético, ya que la dirección de $\vec{H}$ está relacionada con la de $\vec{E}$.

En algunos casos la dirección de $\vec{E}$ de una onda plana en un punto determinado puede cambiar con el tiempo (polarización circular o elíptica). Se considera la superposición de dos ondas polarizadas linealmente, una en la dirección x y la otra en la dirección y y retardada 90° en la fase temporal. Usando la notación fasorial se tiene [30]:

$$\vec{E}(z) = \hat{a}_x E_1(z) + \hat{a}_y E_2(z) = \hat{a}_x E_{10} e^{-jkz} - \hat{a}_y j E_{20} e^{-jkz} \quad (4.9)$$

Donde E_{10} y E_{20} son números reales que denotan las amplitudes de las dos ondas polarizadas. La expresión instantánea de $\vec{E}$ es:

$$\vec{E}(z, t) = \mathbf{R} \left\{ \left[\hat{a}_x E_1(z) + \hat{a}_y E_2(z) \right] e^{jkz} \right\} = \hat{a}_x E_{10} \cos(\omega t - k z) + \hat{a}_y E_{20} \cos \left(\omega t - k z - \frac{\pi}{2} \right) \quad (4.10)$$

Es conveniente asignar $z = 0$ al examinar el cambio de dirección de $\vec{E}$ en un punto determinado a medida que varía t . Se tiene:

$$\vec{E}(0, t) = \hat{a}_x E_1(0, t) + \hat{a}_y E_2(0, t) = \hat{a}_x E_{10} \cos(\omega t) + \hat{a}_y E_{20} \text{sen}(\omega t) \quad (4.11)$$

Conforme ωt aumenta de 0 a $\pi/2$, π y $3\pi/2$ completando el ciclo en 2π , la punta del vector $\vec{E}(0, t)$ describirá una trayectoria geométrica elíptica en sentido contrario al de las agujas del reloj. En forma analítica se tiene:

$$\cos(\omega t) = \frac{E_1(0, t)}{E_{10}} \quad (4.12)$$

y

$$\text{sen}(\omega t) = \frac{E_2(0, t)}{E_{20}} = \sqrt{1 - \cos^2(\omega t)} = \sqrt{1 - \left[\frac{E_1(0, t)}{E_{10}} \right]^2} \quad (4.13)$$

Que conduce a la siguiente ecuación de una elipse:

$$\left[\frac{E_2(0, t)}{E_{20}} \right]^2 + \left[\frac{E_1(0, t)}{E_{10}} \right]^2 = 1 \quad (4.14)$$

De esta manera $\vec{E}$, la suma de dos ondas polarizadas linealmente en cuadratura tanto espacial como temporal, estará **elípticamente polarizada** si $E_{10} \neq E_{20}$ y **circularmente polarizada** si $E_{10} = E_{20}$. En la figura 4.14 se muestra un círculo de polarización genérico:

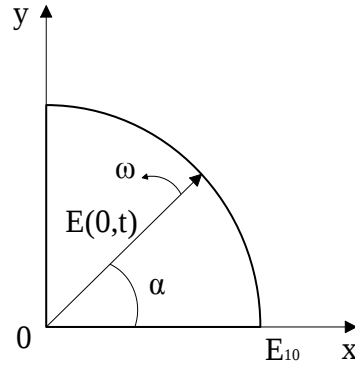


Figura N° 4.14: Polarización circular para la suma de dos ondas polarizadas linealmente en cuadratura espacial, $z = 0$

Cuando $E_{10} = E_{20}$, el ángulo instantáneo α que forma $\vec{E}$ con el eje x en $z = 0$ es:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{E_2(0,t)}{E_1(0,t)} = \omega t \quad (4.15)$$

Lo que indica que $\vec{E}$ gira a una razón uniforme con una velocidad angular ω en sentido contrario al de giro de las agujas de reloj. Esta es una onda circularmente polarizada positiva o de mano derecha. Si se comienza con un $E_2(z)$, que va 90° por delante de $E_1(z)$ en fase temporal, las ecuaciones 4.9 y 4.11 serían, respectivamente,

$$\vec{E}(z) = \hat{a}_x E_{10} e^{-jkz} + \hat{a}_y j E_{20} e^{-jkz} \quad (4.16)$$

$$\vec{E}(0,t) = \hat{a}_x E_{10} \cos(\omega t) - \hat{a}_y E_{20} \sin(\omega t) \quad (4.17)$$

Al comparar las ecuaciones 4.17 y 4.11 se nota que $\vec{E}$ todavía está polarizado elípticamente. Si $E_{10} = E_{20}$, $\vec{E}$ estará polarizado circularmente y el ángulo con respecto al eje x en $z = 0$ será $-\omega t$, lo cual indica que el vector $\vec{E}$ girará con velocidad angular ω en el sentido de las agujas del reloj; esta es una onda circularmente polarizada negativa o de mano izquierda.

Si $E_2(z)$ y $E_1(z)$ están en cuadratura espacial pero en fase temporal, la expresión instantánea del vector $\vec{E}$ en $z=0$ es:

$$\vec{E}(0,t) = (\hat{a}_x E_{10} + \hat{a}_y E_{20}) \cos(\omega t) \quad (4.18)$$

La punta del vector $\vec{E}(0,t)$ estará en el punto P_1 de la figura 4.15 cuando $\omega t=0$. Su magnitud disminuirá hacia 0 conforme ωt aumente hacia $\pi/2$. Tras esto, $\vec{E}(0,t)$ comenzará a aumentar gradualmente en dirección opuesta hacia el punto P_2 donde $\omega t=\pi$. Se dice que el vector $\vec{E}$ suma está **linealmente polarizado** a lo largo de una línea que forma un ángulo $\tan^{-1}(E_{20}/E_{10})$ con el eje x .

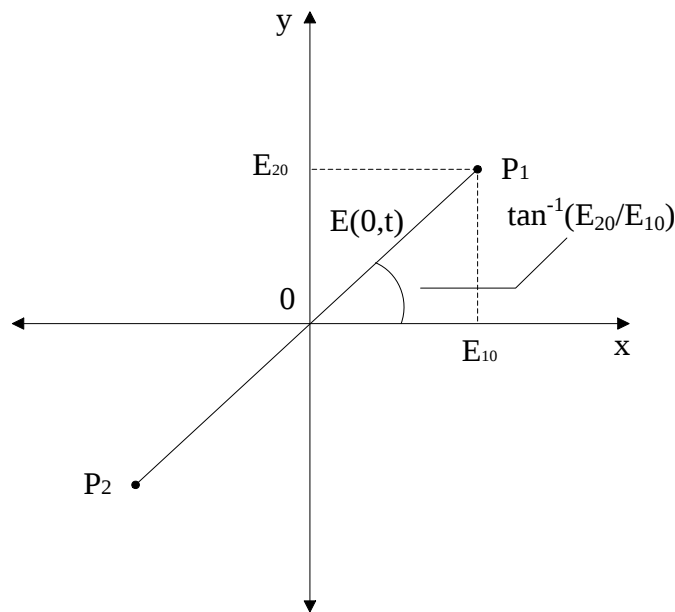


Figura N° 4.15: Polarización lineal para la suma de dos ondas polarizadas linealmente en cuadratura espacial, $z=0$

En el caso general donde $E_2(z)$ y $E_1(z)$ están en cuadratura espacial, pueden tener amplitudes diferentes ($E_{10} \neq E_{20}$) y pueden diferir en fase en una cantidad arbitraria (distinta de 0 y que no sea un múltiplo entero de 90°) su $\vec{E}$ está polarizado elípticamente [30].

En particular, la antena de corneta puede asumir una polarización vertical (figura 4.16) u horizontal (figura 4.17).

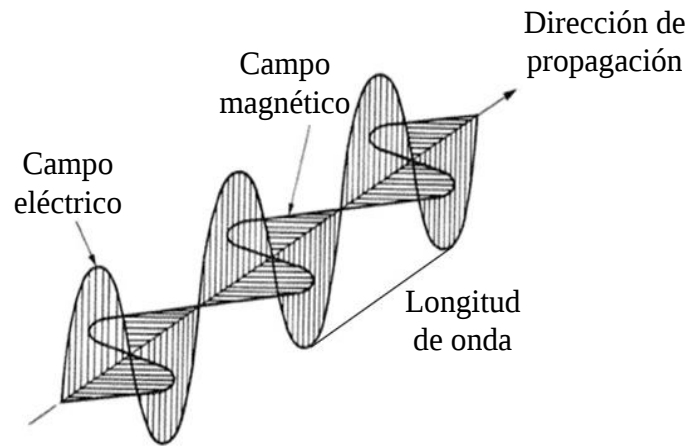


Figura N° 4.16: Polarización vertical

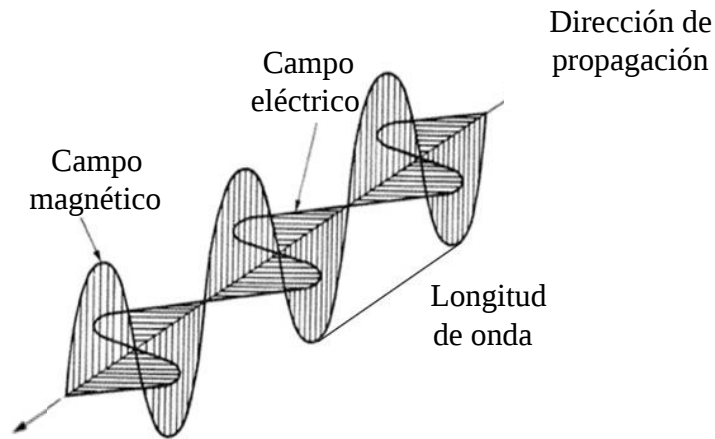


Figura N° 4.17: Polarización horizontal

4.3.4 Vector de Poynting

La cantidad $\vec{W}$ es un vector que representa el flujo de potencia por unidad de área:

$$\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (4.19)$$

Donde:

$\vec{W}$: Vector de Poynting instantáneo [W/m²]

$\vec{E}$: Intensidad del campo eléctrico instantáneo [V/m]

$\vec{H}$: Intensidad del campo magnético instantáneo [A/m]

El vector de Poynting es un vector de densidad de potencia asociado con el campo electromagnético. La afirmación de que la integral de superficie de $\vec{W}$ sobre una superficie cerrada, dada por el lado izquierdo de la ecuación 4.20, es igual a la potencia que sale del volumen encerrado, se conoce como Teorema de Poynting.

$$\oint_S (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{s} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V \left(\frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2} \mu H^2 \right) \cdot dv - \int_V \sigma E^2 dv \quad (4.20)$$

Esta afirmación no está limitada a ondas planas. Se puede escribir la ecuación 4.20 de otra manera:

$$-\oint_S \vec{W} \cdot d\vec{s} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V (w_e + w_m) dv + \int_V p_\sigma dv \quad (4.21)$$

Donde:

$$w_e = \frac{1}{2} \epsilon E^2 = \frac{1}{2} \epsilon \vec{E} \cdot \vec{E}^*$$

$$w_m = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2} \mu \vec{H} \cdot \vec{H}^*$$

$$p_\sigma = \sigma E^2 = J^2 / \sigma = \sigma \vec{E} \cdot \vec{E}^* = J \cdot J^* / \sigma$$

$\vec{E}^*, \vec{H}^*$ son los conjugados de E y H, respectivamente.

Dicho de otra manera, la ecuación 4.21 establece que la potencia total que fluye *hacia dentro* de una superficie cerrada en un instante cualquiera es igual a la suma de las razones de incremento de las energías eléctrica y magnética almacenada y de la potencia óhmica disipada dentro del volumen limitado por la superficie [30].

4.3.5 Intensidad de radiación

En una dirección dada, la potencia radiada desde una antena por unidad de ángulo sólido [26]:

$$U = R^2 W \quad (4.22)$$

Donde:

U : Intensidad de radiación [W/sr]

R : Distancia [m]

La potencia radiada total se obtiene integrando la intensidad de radiación:

$$P_R = \oint \vec{W} \cdot \vec{ds} = \oint U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta d\theta d\phi \quad (4.23)$$

Donde

P_R : Potencia radiada total [W]

$d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$: Elemento de ángulo sólido

Para una antena isotrópica P_R es independiente de θ y ϕ , esto es:

$$P_R = \oint_{\Omega} U d\Omega = U_0 \oint_{\Omega} d\Omega = 4\pi U_0 \quad (4.24)$$

Por lo tanto, la intensidad de radiación U_0 [W/sr unitario], para una fuente isotrópica es:

$$U_0 = \frac{P_R}{4\pi} \quad (4.25)$$

4.3.6 Directividad

La relación de la intensidad de radiación de la antena, en una dirección dada, a la intensidad de radiación promedio en todas las direcciones [26]:

$$D_0 = \frac{U_{MÁX}}{U_0} = \frac{4\pi U_{MÁX}}{P_R} \quad (4.26)$$

Donde:

D_0 : Directividad [adimensional]

$U_{MÁX}$: Intensidad de radiación máxima [W/sr unitario]

4.3.7 Ganancia

4π veces la razón de la intensidad de radiación en la dirección de la máxima potencia que es aceptada por la antena desde el transmisor [26]:

$$G = 4\pi \frac{U_{MÁX}}{P_{IN}} \quad (4.27)$$

Donde:

G : Ganancia [adimensional]

P_{IN} : Potencia total de entrada [W]

4.3.8 Eficiencia del haz

Es la relación de la potencia recibida, sobre un ángulo sólido específico cuando una antena se ilumina isotrópicamente, a la potencia total recibida por la antena [31]:

$$\eta = \frac{\text{Potencia transmitida o recibida dentro de un cono } \theta_1}{\text{Potencia transmitida por la antena}} \quad (4.28)$$

Donde:

η : Eficiencia del haz [adimensional]

θ_1 : Es la mitad del ángulo del cono dentro del cual el porcentaje total de la potencia se encuentra [grados o radianes]

4.3.9 Ancho de banda antena

La gama de frecuencias dentro de la cual el rendimiento de la antena, con respecto a alguna característica, se ajusta a un estándar específico. [26]

$$BW = \frac{f_{MAX} - f_{MIN}}{f_0} \cdot 100\% \quad (4.29)$$

Donde:

BW : Ancho de banda de la antena

f_0 : Frecuencia central del rango de frecuencias de trabajo, delimitado por f_{MIN} y f_{MAX}

4.3.10 Atenuación espacio libre

Es la pérdida entre dos radiadores isotrópicos en el espacio libre, expresada como una relación de potencia. La pérdida en el espacio libre no es debido a la disipación, sino más bien debido al hecho de que la densidad de flujo de potencia disminuye con el cuadrado de la distancia de separación. Por lo general se expresa en dB y está dada por la siguiente ecuación [26]:

$$A_0 = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (4.30)$$

Donde:

A_0 : Atenuación espacio libre

R : Separación de las dos antenas

λ : Longitud de onda

CAPÍTULO V:
DISEÑO DEL PROTOTIPO PARA MEDIR
PORCENTAJE DE HUMEDAD EN MUESTRAS DE
CARTÓN

5. Diseño del prototipo para medir porcentaje de humedad en muestras de cartón

En este capítulo se realiza el diseño conceptual del prototipo del sistema para la medición de humedad en muestras de cartón. Este prototipo tiene como objetivo subsanar los problemas que acarrea el método actual de medición de humedad (demasiado tiempo y poca exactitud) utilizando la implementación disponible en la universidad. Además, en este apartado se efectúan mediciones experimentales y cálculos con el fin de determinar parámetros que ayudan a dilucidar detalles sobre la implementación del prototipo.

5.1 Descripción del prototipo

Considerando los requerimientos ya mencionados, se hace necesario para mediciones a escala industrial un prototipo que permita el manejo de los fardos a través de correas transportadoras.

La medición de humedad a través de microondas es un método no invasivo, por lo que es necesaria la utilización de una estructura que le de firmeza al instrumento, teniendo en cuenta que ésta se ubica cercana a los fardos que están en constante movimiento. Dicho esto, el prototipo debe contar con un umbral metálico en el cual se monta el transmisor de microondas y frente a este, en el otro lado del umbral, se monta el receptor, tal como se muestra en la figura 5.1.

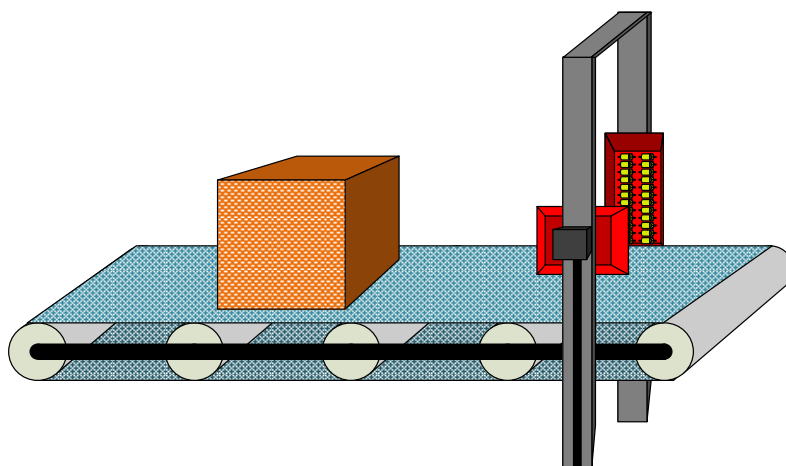


Figura N° 5.1: Prototipo completo

El transmisor debe ser un generador de microondas con su respectiva antena de corneta. Para la ubicación correcta del transmisor, es necesaria la previa caracterización del patrón de radiación de la antena. Con esto se cuida que la medición del fardo sea la correspondiente al contenido de humedad total del cuerpo y no sólo de una parte de este. Ver figura 5.2

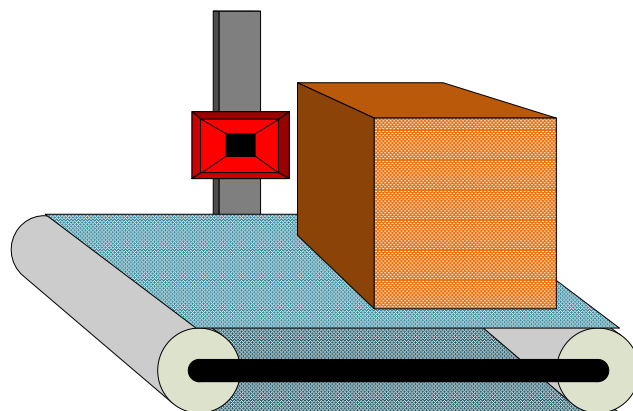


Figura N° 5.2: Prototipo antena

El receptor de microondas debe ser un arreglo de diodos Punto de contacto o Schottky montados en una estructura umbral de manera de poder sensar la señal de microondas que atraviesa el fardo. Este arreglo debe ser un grupo de diodos que formen una matriz rectangular, cuyo alto se adecúe al alto del fardo. Lo anterior facilita la medición de humedad, pues, aprovechándose del movimiento de los fardos con la correa, la matriz de diodos hará un barrido por todo el largo del cuerpo sujeto a medición (figura 5.3), de esta forma se logra caracterizar de mejor manera la distribución del contenido de agua.

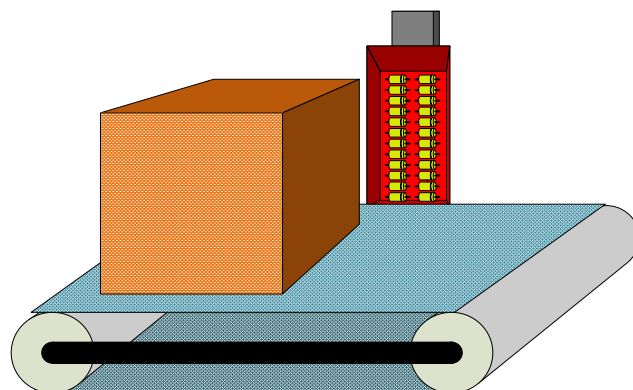


Figura N° 5.3: Prototipo arreglo diodos

La obtención de datos, teniendo en consideración la utilización de un arreglo de diodos, se debe realizar a través de un sistema de adquisición de datos (SAD) capaz de adecuarse a los requerimientos técnicos propios de la implementación del prototipo.

5.2 Diseño experimental

Mediante la utilización del equipo generador de señales de radiofrecuencia y microondas, distintos tipos de receptores de microondas, además de implementación básica de laboratorio, se deben llevar a cabo diferentes mediciones previas a las de humedad en muestras de cartones. Esto con el fin de determinar parámetros necesarios para la implementación del prototipo, como pueden ser la cantidad de diodos a utilizar, distancia entre transmisor, muestras y sensor, rango de voltaje de entrada del SAD, entre otros.

5.2.1 Instrumentos y aparatos

Para la determinación de los parámetros mencionados, se precisa la utilización de distintos instrumentos y aparatos. Sus características más importantes junto con la justificación de su empleo, se presentan a continuación.

5.2.1.1 Generador de microondas

Como ya es sabido, la aplicación del método de microondas para la determinación de humedad precisa la utilización de señales del orden de los Gigahertz, pues esta técnica se aprovecha del fenómeno de relajación dieléctrica del agua, el que ocurre en el rango de frecuencias comprendido dentro de la banda X (8,2 GHz – 12,4 GHz).

En el Laboratorio de Investigación de Técnicas No Destructivas se dispone del generador de microondas R&S SMB-B112L que se muestra en la figura 5.4, el cual cubre un rango de frecuencias de 100 kHz hasta 12,75 GHz.



Figura N° 5.4: Generador de microondas

Tabla N° 5.1: Resumen características técnicas generador de microondas [32]

Rango de frecuencia	100 kHz – 12,75 GHz
Máxima potencia de salida	+30 dBm
Mínima potencia de salida	-20 dBm
Modos de modulación soportados	AM, Profundidad AM (0% a 100%), FM/PM
Control remoto	GPB IEEE-488.2, Ethernet (TCP/IP), USB
Periféricos	USB
Alimentación	220 V _{AC} , 50 Hz

5.2.1.2 Antena

Una vez generada la señal a la frecuencia deseada, se necesita guiar la señal de manera de que la muestra sea atravesada de forma efectiva por la onda electromagnética y pueda ser sensada por el receptor de microondas.

En el Laboratorio de Investigación de Técnicas No Destructivas se dispone de una antena piramidal de corneta, la ETS-LINDGREN 3160-07, que se muestra en la figura 5.5, la cual es una antena direccional, de ganancia estándar que cubre un ancho de banda multioctava, linealmente polarizada, anchura de haz a media potencia óptimo (igual en planos E y H), y bajo VSWR.



Figura N° 5.5: Antena de corneta

Tabla N° 5.2: Resumen características técnicas antena de corneta [27]

Frecuencia	8,2 GHz – 12,4 GHz
Apertura plano E	24°
Apertura plano H	24°
Potencia continua máxima	250 W
Factor de antena	33,5 dB (1/m)
Ganancia	16,9 dBi
Intensidad de campo típica	500 V/m
VSWR	1,06 (a 10,3 GHz)
Conector	Tipo N hembra
Polarización	Lineal

5.2.1.3 Receptor de microondas

En el caso de las mediciones para la determinación de la frecuencia de operación del generador (frecuencia de relajación) y caracterización del patrón de radiación, se utiliza un receptor de microondas distinto al que se visualiza para la implementación del prototipo, esto se justifica en el punto 5.2.2.

El receptor del que se dispone en el Laboratorio de Investigación de Técnicas No Destructivas es el PASCO Scientific WA-9314B, como se muestra en la figura 5.6. Este receptor posee una

corneta de microondas que recoge y canaliza la señal a un diodo Schottky en una cavidad resonante de 10,525 GHz.



Figura N° 5.6: Receptor de microondas

Las características del receptor incluyen cuatro rangos de amplificación (de uno a treinta) y un botón de sensibilidad variable que permite el ajuste fino en la amplificación de cada rango. El montaje del receptor se realiza sobre un soporte a 18 cm de alto, lo que minimiza las reflexiones en la superficie de la mesa. Además, el WA-9314B tiene una escala de rotación que permite mediciones de ángulo de polarización facilitando así la medición de los patrones de radiación en los planos E y H. [33]

Junto con el equipo receptor de microondas WA-9314B, se utiliza el goniómetro PASCO Scientific. Este instrumento se usa deslizando sus brazos a través del agujero del soporte del receptor, como se muestra en la figura 5.7. Su empleo toma especial importancia para la toma de muestras para la caracterización del patrón de radiación.

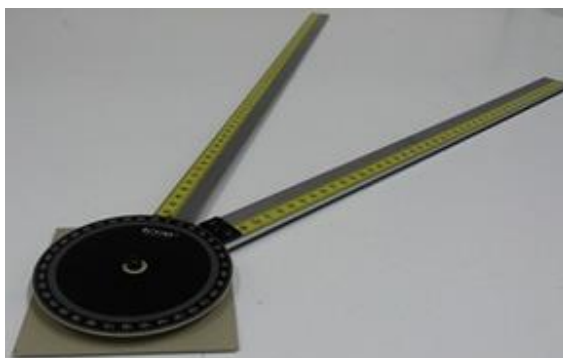


Figura N° 5.7: Goniómetro

5.2.1.4 Diodo

Para la detección de la señal de microondas en el prototipo, es necesario el empleo de diodos con una respuesta ad-hoc a la circunstancia, es decir, que trabajen en el orden de los Gigahertz, para lo cual se observan dos posibilidades: diodos Punto de contacto y diodos Schottky.

En el Laboratorio de Investigación de Técnicas No Destructivas se dispone de diodos Punto de contacto 1N23CR, como el que se muestra en la figura 5.8.



Figura N° 5.8: Diodo Punto de contacto

Este diodo utiliza un metal, conocido como “bigote de gato” (ver figura 5.9), para hacer contacto de presión contra una capa epitaxial, formando la juntura rectificadora. El contacto de presión en el diodo Punto de contacto puede dañar la unión, dependiendo de la cantidad de presión ejercida sobre el contacto.

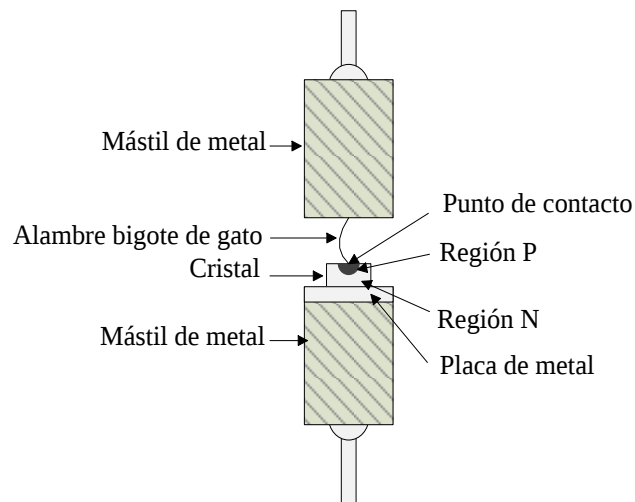


Figura N° 5.9: Diagrama diodo Punto de contacto

A diferencia del diodo de juntura P-N, el diodo Punto de contacto depende, para su funcionamiento, de la presión de contacto entre un punto y un cristal semiconductor. Durante la fabricación del diodo Punto de contacto, una corriente relativamente grande fluye desde el bigote de gato hacia el cristal de silicio. El resultado de esta gran corriente es la formación de una pequeña región de material tipo P alrededor del cristal, en las proximidades del Punto de contacto. Por lo tanto, se forma una juntura P-N que se comporta de la misma manera como una juntura P-N normal.

Las características del diodo Punto de contacto, en polarización directa e inversa son algo diferentes a las del diodo de juntura. Con polarización directa, la resistencia del diodo Punto de contacto es mayor que la de un diodo de juntura (ver figura 5.10).

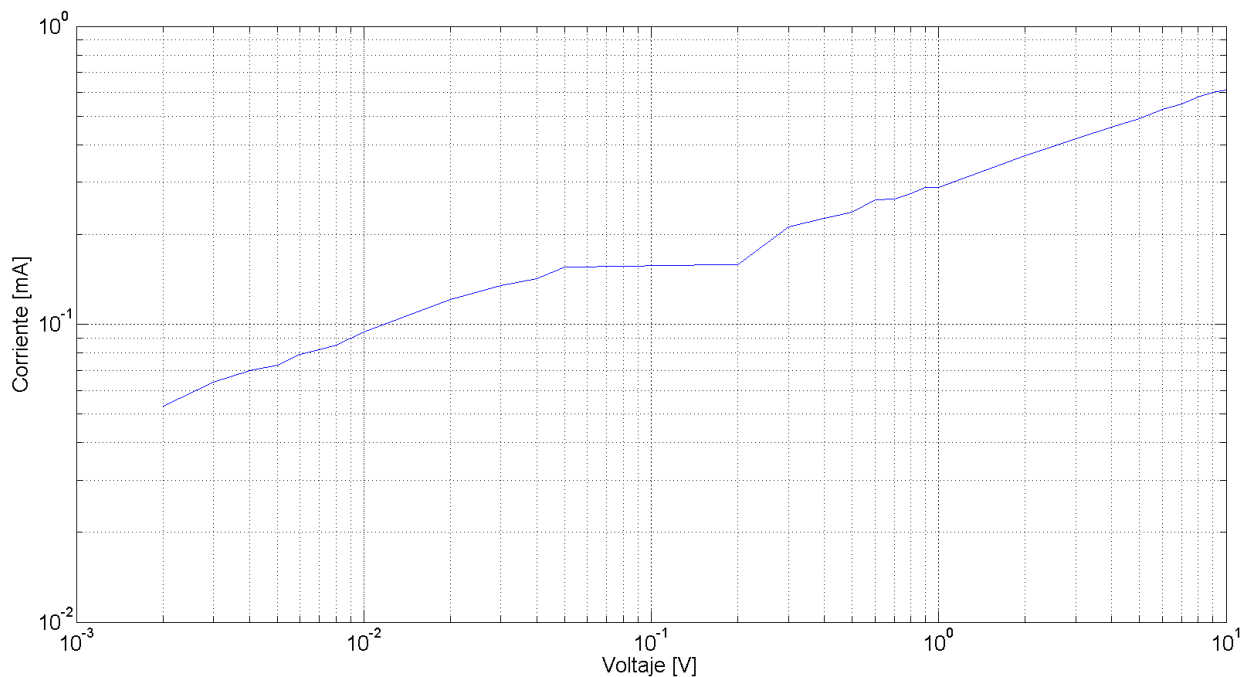


Figura N° 5.10: Característica directa 1N23CR

Con polarización inversa, el flujo de corriente a través de este diodo no es tan independiente de la tensión aplicada al cristal como lo es en el diodo de juntura.

El diodo Punto de contacto tiene una ventaja sobre el diodo de juntura P-N debido a que la capacitancia entre el bigote de gato y el cristal es menor que la capacitancia entre los dos lados

del diodo de unión. En consecuencia, la reactancia capacitiva existente en el diodo de contacto puntual es más alta y la corriente capacitiva que fluirá en el circuito a altas frecuencias es más pequeña [34].

Tabla N° 5.3: Resumen características técnicas diodo Punto de contacto [35]

Frecuencia	8 GHz – 12,4 GHz
Máxima razón de ruido	2
Máxima figura de ruido	9,5 dB
Impedancia I_F^2 mínima	325 Ω
Impedancia I_F^2 máxima	475 Ω
VSWR máximo	1,5
Pérdidas de conversión	6 dB
Abrasamiento	2 ergs
Encapsulado	DO-22

Cada 1N23CR se monta en un vástago metálico, el cual presta soporte y conexión del dispositivo con el instrumento donde se mide la señal entre los terminales del diodo. Estos vástagos del Laboratorio de Investigación de Técnicas No Destructivas constan de una pieza plástica, la cual aísla del vástago los terminales de conexión del diodo. Estos terminales prestan soporte mecánico al diodo y lo unen eléctricamente con el conector BNC, como se muestra en la figura 5.11.



Figura N° 5.11: Vástago diodo Punto de contacto. Vista soporte

La parte media del vástago es una estructura tubular de bronce que facilita su manejo o montaje. El BNC es un conector utilizado para cables coaxiales, esto lo hace muy versátil y adecuado para su utilización en equipos como osciloscopios, como se muestra en la figura 5.12.



Figura N° 5.12: Vástago diodo Punto de contacto. Vista conector

5.2.1.5 Osciloscopio

Para el caso de las mediciones en que sea necesario un montaje que incluya los diodos Punto de contacto, la visualización de las señales eléctricas se realiza a través de un osciloscopio.

En el Laboratorio de Investigación de Técnicas No Destructivas se dispone del osciloscopio Tektronix TDS 340A (ver figura 5.13), el cual es un osciloscopio de señal digital, utilizado en laboratorios y aplicaciones portátiles.



Figura N° 5.13: Osciloscopio

Tabla N° 5.4: Resumen características técnicas osciloscopio [36]

Frecuencia límite	20 MHz
Canales	2, idénticos
Frecuencia de muestreo	500 MHz
Resolución	8 bits
CAD	2, idénticos
Acoplamiento de entrada	DC, AC o GND
Sensibilidad	2 mV/div – 10 V/div
Alimentación	220 V _{AC} / 50 Hz

5.2.2 Mediciones y cálculos

En este apartado se realizan distintas mediciones que ayudan a caracterizar de mejor manera detalles del prototipo para la determinación de humedad.

Las mediciones realizadas para determinar la frecuencia de operación y el patrón de radiación del sistema de medición de humedad se realizan con el generador de microondas, la antena de corneta, y como sensor se utiliza, en vez del diodo Punto de contacto (dispositivo a utilizar en el prototipo), el receptor PASCO. Se considera que este último receptor se perfila de mejor manera para estas mediciones, pues, en contraste con el desempeño del Punto de contacto, esta corneta tiene la capacidad de recoger y canalizar de mejor manera la señal incidente, llevándola a una cavidad resonante donde se encuentra el diodo del receptor PASCO. Además, la medición del patrón de radiación tiene como objetivo caracterizar el desempeño práctico del generador de microondas y de la antena, caso similar a la determinación de la frecuencia de operación, que solo caracteriza el comportamiento del agua a cierta frecuencia y en ningún momento alguna característica del Punto de contacto.

A diferencia de los casos antes descritos, la medición de las distintas respuestas de los diodos representan una determinación crítica para el diseño del prototipo, pues en función de éstas mediciones, se determinan parámetros como por ejemplo rango de voltaje de entrada al SAD, por lo que se hace imprescindible la utilización de diodos 1N23CR.

Por último, se realizan distintos cálculos considerando algunas circunstancias que condicionan algunos aspectos de la implementación del prototipo, esto es ubicación de los diodos, número de canales y rango de voltaje a sensar.

5.2.2.1 Determinación de la frecuencia de operación

Todos los dieléctricos tienen unas frecuencias características denominadas frecuencias de relajación. A estas frecuencias los átomos y moléculas constitutivas del material se hacen especialmente eficaces en la absorción de radiación, presentando un máximo en la parte imaginaria de la permitividad dieléctrica. Existen distintos mecanismos de relajación dieléctrica. A frecuencias de microondas el mecanismo más importante es la relajación dipolar, la cual aparece en todos aquellos materiales constituidos por moléculas que tienen un momento dipolar neto. Este mecanismo está presente en el agua, cuya molécula tiene dos enlaces polares que forman un ángulo de unos 105° . De hecho, el agua libre presenta máximas pérdidas a 10 GHz como consecuencia de la relajación dipolar. [37]

Considerando que el agua potable incluye elementos o sustancias químicas en distintas concentraciones (cloro, cobre, cromo, hierro, magnesio, zinc, arsénico, etc.), se hace necesaria una medición experimental de la frecuencia a la cual se presentan pérdidas máximas debido a la presencia de agua potable en un cuerpo, para lo cual se formula el siguiente método:

1. Se monta un sistema compuesto por el transmisor de microondas, como medio se utiliza un vaso plástico lleno de agua y el receptor PASCO como sensor. Tanto el vaso con agua como el sensor de microondas se ubican frente a la antena en el ángulo de radiación máxima (0°), como se muestra en la figura 5.14. Cabe señalar que previo a la medición con el vaso lleno de agua, se compara la señal sensada con y sin este recipiente, donde se observa que no existe variación de la señal obtenida para estos dos casos.



Figura N° 5.14: Montaje frecuencia de operación

2. Se configura el generador de microondas con una señal de salida de 15 dBm.

Se utiliza una señal de 15 dBm porque la escala de medición del receptor PASCO no es capaz de sensar señales con mayor potencia a tan poca distancia. No se utiliza, en este caso, un diodo Punto de contacto por lo expuesto en el punto 5.2.2 y porque el receptor PASCO ofrece un ajuste de sensibilidad, cuestión clave en la determinación de la frecuencia de operación.

3. Se realiza un barrido de frecuencia desde 8,2 GHz hasta 12,4 GHz (rango de operación de la antena) y se observa la variación de voltaje a medida que la frecuencia cambia.

Después de realizar varios barridos y preseleccionar diversos rangos en los cuales el voltaje disminuía más notoriamente, se determina que la frecuencia de 10,3 GHz es en la cual se producen las mayores pérdidas, por lo cual se elige esta como la frecuencia de operación. Este procedimiento también se lleva a cabo con una potencia de 9 dBm y 12 dBm con el fin de corroborar que la frecuencia de operación es independiente de la potencia de la señal emitida.

Se elige la frecuencia en la cual se registra la mayor atenuación de la señal porque esto implica medir en el receptor un mayor rango de voltaje, pues la mayor parte de la atenuación es debido al contenido de agua de un cuerpo. Dicho de otra forma, se desea trabajar con la frecuencia en la cual se produzcan las mayores pérdidas porque este es el peor de los casos, es decir, en ningún otro caso existirá mayor atenuación que para un cuerpo constituido casi totalmente por agua.

Incluso cuando la frecuencia de operación es de 10,3 GHz, las variaciones de voltaje no superan el orden de los milivolts, lo que es un valor pequeño y, por lo tanto, difícil de sensor con los instrumentos disponibles en laboratorio. Para otras frecuencias de operación esta variación es aún más pequeña.

5.2.2.2 Caracterización del patrón de radiación de la antena

El patrón de radiación es una forma gráfica de representar la distribución de la energía radiada por una antena. Esta distribución generalmente se caracteriza con los patrones del plano E y H.

El patrón de radiación se determina con el sensor receptor de microondas PASCO, el que se basa en un diodo Schottky. Lo anterior se realiza de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Se monta un sistema compuesto por el transmisor y el receptor de microondas, ambos sobre el goniómetro, como se muestra en la figura 5.15.

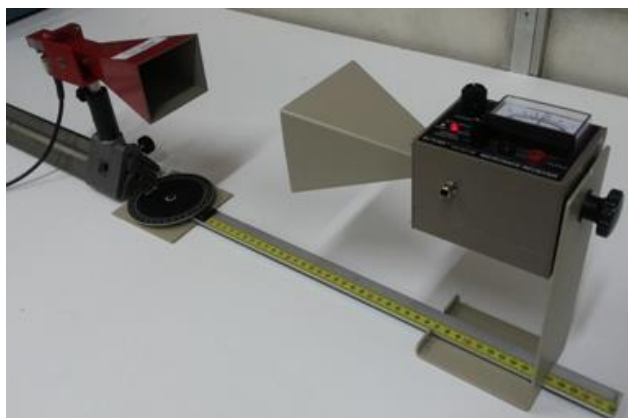


Figura N° 5.15: Montaje patrón de radiación

2. Se configura el generador de microondas con una señal de salida de 15 dBm y 10,3 GHz.
3. Se miden los patrones de radiación en los planos E y H, ubicando el emisor y el receptor adecuadamente. La distancia a la que se ubica el receptor está determinada por el rango de

medición del receptor PASCO y corresponde a la distancia a la cual se mide el máximo que puede sensor el instrumento.

4. El receptor de microondas se gira en sentido horario y antihorario, utilizando el goniómetro, y se tabulan las mediciones obtenidas cada 5°.
5. El receptor de microondas se aleja 5 cm de la antena y se repite el paso 4.

La figura 5.16, muestra el gráfico I_{DC} vs Ángulo para el plano E. Esto es la intensidad de corriente de la señal para diferentes radios (indicados en la leyenda), a distintos ángulos. Se grafica desde los -50° hasta 50° pues, para el primer radio sensado, estos son los últimos ángulos con intensidad nula.

La intensidad I_{DC} es el resultado de transformar el voltaje sensado en los terminales del diodo Schottky, a través de su resistencia dinámica, en corriente.

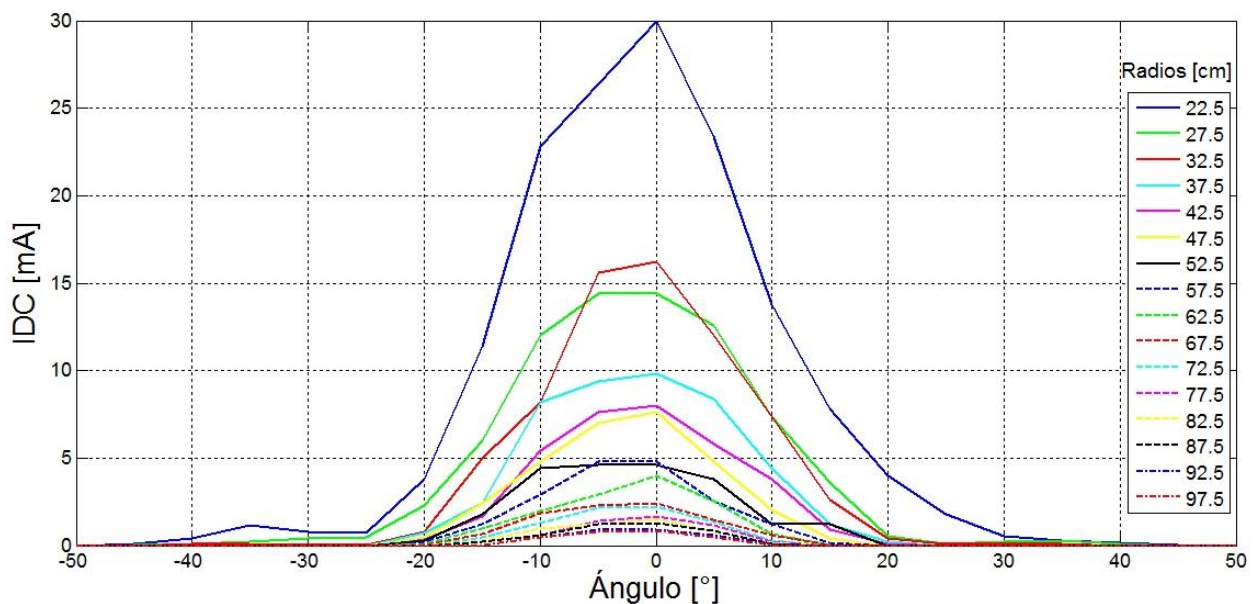


Figura N° 5.16: Intensidad señal según radios y ángulos. Plano E

La figura 5.17 muestra el gráfico I_{DC} vs Ángulo para el plano H.

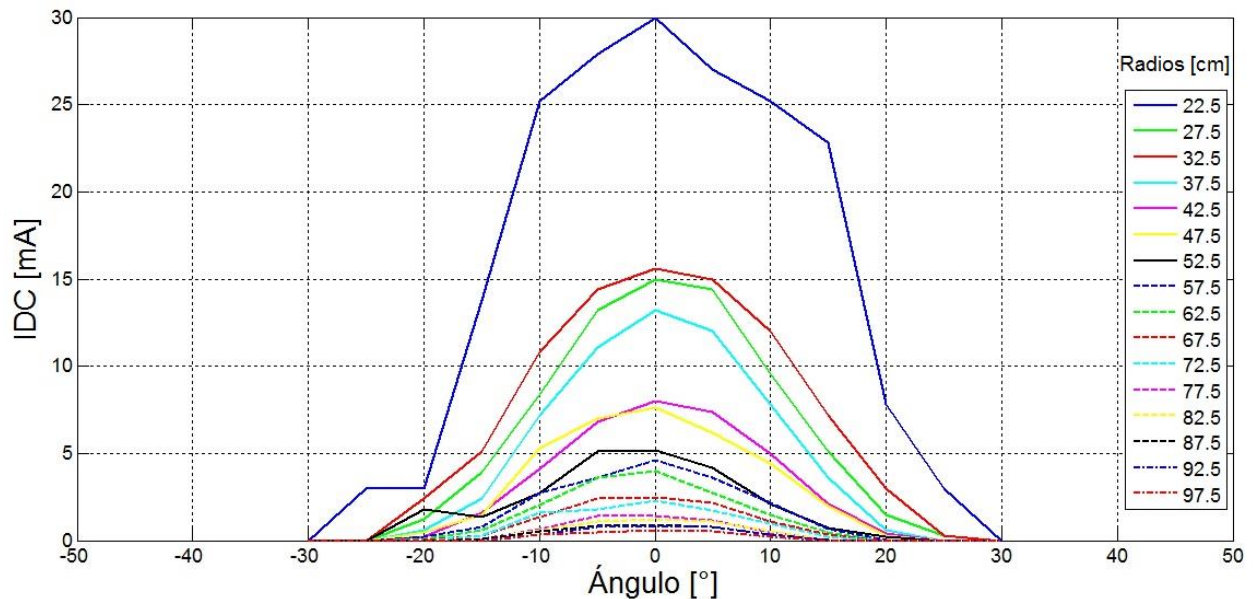


Figura N° 5.17: Intensidad señal según radios y ángulos. Plano H

Al comparar ambos gráficos, se hace evidente que en el plano E, para los radios menores, la antena radia hasta ángulos mayores que en el otro plano (lóbulos laterales), lo que se traduce en un mayor espacio con intensidades no nulas. Sin embargo, para radios desde 37,5 cm ambos planos tienen intensidades nulas para ángulos desde 25° (y -25°).

La similitud de los patrones en ambos planos, en conjunto a la información que entrega el fabricante de la antena [27] (apertura de 24° para plano E y H), permite inferir que el patrón de radiación tridimensional después de 37,5 cm está constituido totalmente por el lóbulo principal. Además, se infiere, para efectos prácticos, que las secciones transversales de este se pueden aproximar a una circunferencia.

Cabe mencionar que el patrón de radiación es el mismo para diferentes niveles del generador de microondas, no obstante, este cambia a distintas frecuencias.

5.2.2.3 Dimensiones arreglo y determinación de la ubicación de los sensores

El diodo receptor 1N23CR es el sensor de microondas del cual se dispone en el Laboratorio de Investigación de Técnicas No Destructivas. Este diodo por sí solo no es capaz de sensar las variaciones en toda la muestra, por lo que es necesario construir un arreglo “matricial” de estos dispositivos que permitan medir humedad simultáneamente en distintas ubicaciones de la muestra.

En este trabajo, se utilizan como una primera etapa, muestras de fardos de dimensiones menores a las reales.

Para medir en la dirección vertical se construye un arreglo (columna) de diodos, el cual cubre toda la altura, distribuyendo los 1N23CR de forma uniforme. La cantidad de diodos, en este caso, queda limitada por los vástagos en que se montan estos dispositivos, los cuales proveen un soporte compuesto por una pieza plástica circular, de diámetro 1,6 cm. Además se cuenta con la limitante de disponer de 8 vástagos. Considerando una separación de 0,4 cm entre cada vástago y además una distancia de 1,7 cm sobre y bajo la primera y última pieza plástica del vástago (con motivo de eliminar errores de medición debido a la difracción de la onda electromagnética), finalmente el alto del arreglo es de 19 cm. En función de las medidas recién expuestas, se construye un soporte de acrílico para el arreglo de diodos, tal como se muestra en la figura 5.18.



Figura N° 5.18: Arreglo de diodos

En cuanto a la orientación de los diodos ya montados en los vástagos, se debe considerar la polarización de la antena, la cual puede ser horizontal o vertical, es decir, los diodos tienen una orientación horizontal si la emisión radia el campo eléctrico sobre el plano horizontal y viceversa.

Respecto a la distancia entre los sensores y la muestra, se establece que debe ser la mínima posible, pues la atenuación de la señal debe ser exclusivamente causada por el contenido de agua de la muestra y no por la lejanía entre la antena y los sensores.

En relación a la distancia entre la antena y la muestra, el cálculo de esta se realiza de la siguiente manera:

Según el fabricante [27], tanto en el plano E como el H, la antena tiene una apertura de 24° , esto significa que para ángulos mayores a este, en el lóbulo principal, no se mide señal. Además, de acuerdo a los cálculos anteriores se conoce que la distancia r entre el centro del arreglo de diodos y el soporte del primer (o último) vástago, es de 7,75 cm. Por lo tanto, la distancia mínima d entre antena y muestra, se calcula como sigue:

$$\begin{aligned}\tan(24^\circ) &= \frac{7,75 \text{ cm}}{d} \\ d &= 17,4068 \text{ cm} \\ d &\approx 17,5 \text{ cm}\end{aligned}\tag{5.1}$$

Lo anterior se representa gráficamente por medio de la figura 5.19:

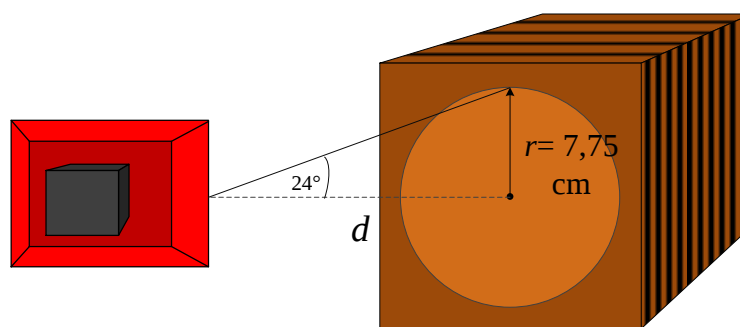


Figura N° 5.19: Distancia mínima entre antena y muestra

5.2.2.4 Caracterización de las muestras

En la industria, la medición de humedad se realiza sobre fardos de un volumen aproximado de 1 m^3 , lo que sin duda es un impedimento al momento de querer realizar mediciones prácticas de forma rápida y sencilla. Por esto, en base al cálculo realizado en el ítem anterior, en este trabajo se construyen muestras de cartón sólido no blanqueado, con un alto de 19 cm, como se muestra en la figura 5.20.

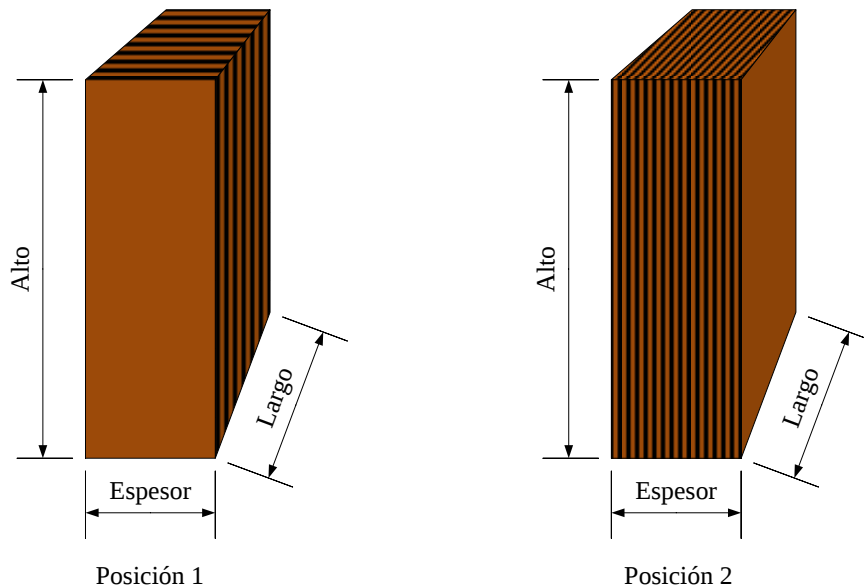


Figura N° 5.20: Muestras en distintas posiciones

Los espesores (de la posición 1 y posición 2) se determinan de acuerdo a la capacidad de la señal para traspasar la muestra en estado de saturación, es decir, cuando ésta se encuentre con un contenido máximo de humedad.

Observación: Para el caso particular de este diseño, se decide utilizar una señal de 15 dBm de potencia. Si bien el generador de microondas R&S SMB-B112L puede entregar un máximo de 18 dBm con Automatic Level Control, ALC, (condición en la que se asegura un máximo nivel de precisión para la salida del generador) y 30 dBm sin ALC, se opta por una potencia de 15 dBm. Lo anterior debido a que la caracterización práctica del desempeño de la antena (lóbulos de radiación en particular), se realiza con el receptor PASCO, el que no es capaz de sensor potencias mayores a poca distancia. Además, se considera la precisión del nivel de salida como un

parámetro crítico, pues al ser este un método experimental, en un principio no existe claridad respecto de las variaciones de voltaje debido al contenido de humedad en las muestras. No obstante lo anterior, con la intención de generar una estimación más cercana a la aplicación real del prototipo de medición de humedad, se utiliza la señal de 30 dBm para el cálculo del espesor máximo de medición (Anexo A).

Lo anterior se realiza mediante el siguiente procedimiento:

1. Se monta un sistema compuesto por el generador de microondas, antena, el arreglo de diodos y osciloscopio, como se muestra en la figura 5.21.



Figura N° 5.21: Montaje espesor de la muestra

2. Se mide la señal en el osciloscopio sin ubicar la muestra entre la antena y el arreglo de diodos y sin ninguna señal en la antena. El primer diodo de la columna se conecta al canal 1 del osciloscopio y el último diodo al canal 2. Esto debido a que ambos diodos son los que reciben menos señal ya que se encuentran a mayor distancia de la antena. Este paso se realiza con el fin de encontrar los “ceros” que sensa cada diodo.
3. Se configura el generador de microondas con una señal de salida de 15 dBm y 10,3 GHz.
4. Se construyen distintas muestras para las posiciones 1 y 2. Estas muestras varían solo su espesor (18 cm, 12 cm y 6 cm), tienen una altura de 19 cm y se ubican a 17,5 cm de la antena.

5. Las muestras son mojadas con agua hasta llegar a un estado de saturación. Se llega a este estado sumergiendo las muestras en un recipiente con agua y dejándoles reposar, esperando que el agua no absorbida pueda escurrir.
6. Se miden las señales en el osciloscopio. Al momento de ejecutar este punto se debe verificar que no se llegue al “cero” de cada diodo, es decir, que la señal sensada por los diodos sea mayor a la recibida en el caso en que no se tiene señal en la antena. Esto con el fin de poder elegir un espesor de la muestra que permita que la señal la atraviese en el peor de los casos (estado de saturación).

Los resultados de las mediciones anteriores arrojan que para la señal de 15 dBm, el espesor máximo para la posición 1 y 2 es de 6 cm.

Los resultados anteriores se resumen en la figura 5.22

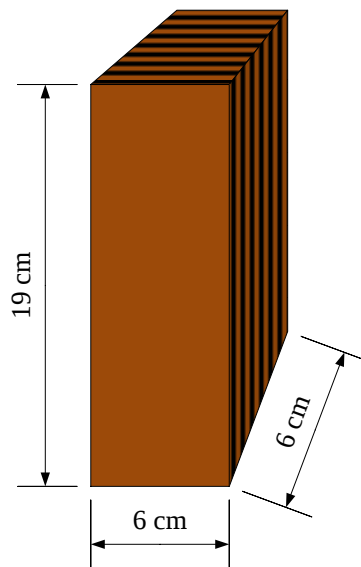


Figura N° 5.22: Dimensiones muestra

5.2.2.5 Caracterización del SAD

Los sistemas de adquisición de datos se utilizan en un gran número de aplicaciones (en constante aumento), en una variedad de áreas industriales y científicas, como la industria biomédica, aeroespacial y telemetría. El tipo de sistema de adquisición de datos, analógico o digital, depende del uso de los datos registrados. En general, los sistemas de datos analógicos se utilizan cuando se requiere un amplio ancho de banda o cuando se puede tolerar poca exactitud. Los sistemas digitales se aplican cuando el proceso físico en estudio varía poco (ancho de banda angosto) y cuando se necesita una exactitud alta y bajo costo por canal. Los sistemas digitales varían en complejidad desde sistemas de un solo canal para medición y registro de voltaje DC, hasta sistemas automáticos de múltiples canales, los cuales miden un gran número de parámetros de entrada. Estos parámetros se comparan con respecto a condiciones o límites preestablecidos y se llevan a cabo cálculos y se toman decisiones sobre la señal de entrada. Los sistemas digitales en general son más complejos que los analógicos, tanto en términos de volumen y complejidad de los datos de entrada que pueden manejar.

Los sistemas de adquisición de datos a menudo utilizan registradores de cinta magnética. Los sistemas digitales requieren convertidores para cambiar voltajes analógicos en números o cantidades discretas. Inversamente, la información digital se puede convertir de nuevo en analógica, como voltaje o corriente, con lo cual puede utilizarse como una cantidad de realimentación que controla un proceso industrial. [38]

Las especificaciones de las entradas analógicas, sirven para determinar la capacidad y precisión del dispositivo de adquisición de datos. Las especificaciones más básicas son: el número de canales y el rango de entrada.

5.2.2.5.1 Determinación del número de canales

El número de canales analógicos de entrada se especifica en número de entradas diferenciales y entradas de terminal sencilla. Las entradas de terminal sencilla están referenciadas a una terminal de tierra común. Con entradas diferenciales, cada una tiene su propia referencia a tierra. De esta

forma los errores por ruido se reducen debido a que el ruido captado normalmente por una sola terminal se cancela entre las terminales. [39]

Existe la necesidad de determinar el contenido de humedad de forma eficaz, lo que se traduce en caracterizar lo mejor posible la distribución espacial del contenido de humedad dentro de la muestra, por lo que entre mayor sea la cantidad de diodos a utilizar para el sensaje de humedad, mejor es el resultado. Sin embargo, es necesario acotar que sólo se dispone de 8 vástagos para el montaje de los diodos Punto de contacto. Por esto se decide utilizar un sistema que provea 8 canales de entrada.

5.2.2.5.2 Determinación del rango de voltaje

El rango de voltaje es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida de las entradas SAD.

La importancia de la medición de este parámetro radica en 2 puntos. El primero dice relación con la precisión en la medición del SAD, pues esta se aplica sobre la elección de este parámetro, es decir, para un rango de voltaje mayor al adecuado, el error aumenta. El segundo dice relación con la resolución, pues la conversión análogo/digital es más representativa para rangos menores, esto porque diferentes rangos de voltajes se representan con la misma cantidad de bits.

Para la determinación de este parámetro se formula el siguiente procedimiento:

1. Se monta un sistema compuesto por el generador de microondas a una frecuencia de 10,3 GHz y un nivel de 15 dBm y como receptor se utiliza el arreglo de diodos 1N23CR montados en el soporte y conectados al osciloscopio, como se muestra en la figura 5.21.
2. Los diodos se ubican a una distancia de 24 cm de la antena.
3. Se registran los distintos valores medidos por los diodos.

Para el caso de la determinación de los voltajes mínimos medidos en los diodos, se considera la medición sin señal en la antena, pues, este es el “cero” de los diodos. Para el caso de la determinación de los voltajes máximos medidos en los diodos, se considera la medición con señal en la antena y sin muestras entre antena y diodos. El mínimo obtenido es 1,13 mV y el máximo es de 179,33 mV. Esto es un rango de 178,2 mV, al cual se le considera un 10% de seguridad sobre el span, lo que nos da un rango de medición desde -16,69 mV hasta 197,15 mV. Entonces el SAD debe proveer un rango de medición ajustable o programable que comprenda el rango anterior.

Si bien, al no observar los valores medidos por cada uno de los diodos, se puede pensar que todos estos dispositivos se comportan de la misma manera, es decir, todos con el mismo rango de medición. Pero no hay que perder de vista que los diodos Punto de contacto son construidos a presión, por lo que cada uno, a pesar de ser de la misma serie, muestra un comportamiento distinto a cualquier otro. Por lo anterior, existe la necesidad de realizar una calibración de las distintas señales recibidas en el SAD, con el fin de mitigar las consecuencias que conllevan las diferencias en la construcción de los dispositivos Punto de contacto.

5.2.2.5.3 Elección SAD

En consideración de la disponibilidad y la determinación de distintos parámetros claves a la hora de elegir un sistema de adquisición de datos, se decide utilizar el SAD ADAM-4017, del cual se dispone en el Laboratorio de Sistemas Automatizados de Producción, CIMUBB. Lo anterior pues cumple los requerimientos en cuanto el número de canales (8) y rango de entrada (en orden de los milivolts). [40]



Figura N° 5.23: ADAM 4017

Tabla N° 5.1: Características técnicas ADAM 4017

Alimentación	10 - 30 V _{DC}
Canales	8 (6 diferenciales)
Rango de voltaje	± 150 mV, ± 500 mV, ± 1 V, ± 5 V, ± 10 V
Corriente de entrada	± 20 mA
Precisión	Voltaje: ± 0,1% o mejor Corriente: ± 0,2% o mejor
Frecuencia de muestreo	10 Hz
Resolución	16 bit
Impedancia de entrada	20 MΩ
Desviación del cero	± 6 µV/°C
CMR	92 dB
Conector	2 x plug-in terminal block (#14~22 AWG)
Temperatura de operación	-10 – 70°C
Humedad	5 – 95% HR
Interface	RS-485
Protección	3000 V _{DC}
Protocolo de comunicación	ASCII
Velocidad de comunicación	Serial: de 1,200 a 115.2 k
Distancia de comunicación	Serial: 1,2 km

El SAD, como se indica en la tabla, posee una interface RS-485, la cual, es convertida, para su posterior registro en PC, por el TRP-C06.



Figura N° 5.24: TRP-C06

El TRP-C06, es un conversor bidireccional de RS-232 a RS-422 o RS485. Los estándares RS-422 o RS-485 pueden transmitir a una distancia de hasta 1,2 km de distancia, superando la barrera que tiene el estándar RS-232 [41]. A la salida de este, se utiliza un adaptador Serie a USB, de un puerto, modelo ICUSB232V2, el que convierte un puerto serie RS-232 DB9 a USB para conectar, monitorear y controlar el SAD desde un PC [42].

El PC utilizado posee un procesador Intel Core i5-3470 con una CPU 3,2 GHz, de 64 bits, 12 GB de memoria RAM, SO Windows 7 Professional. La toma de datos se realiza mediante software desarrollado en lenguaje de programación Python por un estudiante de la universidad.

CAPÍTULO VI:
IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DEL
PROTOTIPO PARA MEDIR PORCENTAJE DE
HUMEDAD EN MUESTRAS DE CARTÓN

6. Implementación y evaluación del prototipo para medir porcentaje de humedad en muestras de cartón

Luego de haber realizado cálculos y mediciones previas de diferentes parámetros (capítulo V), se procede a realizar el montaje experimental. En el presente capítulo se especifican detalles del procedimiento de medición, los resultados obtenidos y una comparación del método diseñado e implementado con un instrumento utilizado para la medición de humedad en sólidos.

6.1 Descripción sistema de pruebas

La implementación, en la parte de transmisión, contempla la utilización de la antena ETS-LINDGREN 3160-07, polarizada horizontalmente y conectada en la salida RF del generador de microondas R&S SMB-B112L. Para la recepción, se utiliza el soporte de acrílico con el arreglo de diodos 1N23CR, todos polarizados horizontalmente y montados en sus respectivos vástagos. Los vástagos, además de dar sujeción mecánica a los diodos, los unen eléctricamente a una placa de conexión, desde donde salen pares de cables (positivo y negativo para cada canal) hacia las entradas del SAD ADAM-4017. Este adquisidor se alimenta con 24 V, al igual que el conversor TRP-C06, que es quien recibe los datos del SAD mediante su interfaz RS-485. Este conversor entrega los datos en una salida RS-232, la que finalmente, a través del adaptador Serie a USB ICUSB232V2, se conecta al PC, donde se utiliza un software capaz de modificar la frecuencia de muestreo y la cantidad de datos. Todo lo anterior se muestra en la figura 6.1.

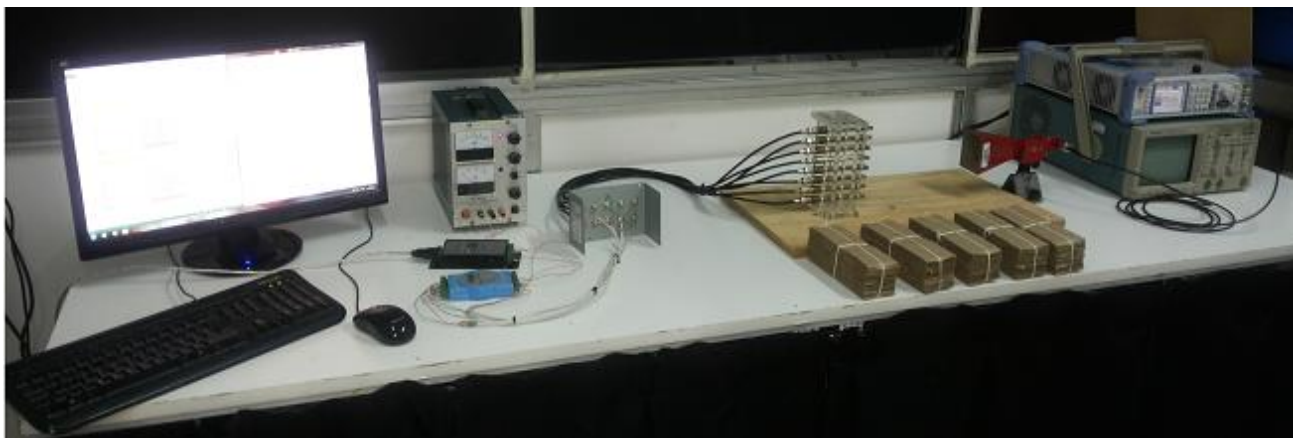


Figura N° 6.1: Montaje sistema de pruebas

En la figura anterior se observa que la antena se monta sobre la mesa, a diferencia del soporte de acrílico con los diodos, que descansa sobre un soporte de madera, esto pues la altura mínima de la antena es mayor al centro del arreglo vertical de diodos. Con esto se corrige la diferencia de alturas tanto para los diodos como para las muestras que se midan.

Las muestras son construidas con dimensiones de 19 cm x 6 cm x 6 cm. El material es cartón no blanqueado y debe ser lo más homogéneo posible, con el fin de que las atenuaciones en la señal sean debido al contenido de humedad y no a diferencias en la construcción de las muestras (zonas más densas, por ejemplo).

En el soporte de madera, se demarcan los límites sobre los cuales deben ubicarse las muestras, que es a 17,5 cm de la antena. Además del espesor de éstas, se debe considerar una distancia de 0,5 cm entre arreglo de diodos y muestra, ya que esta última, después de sumergirse en agua para su saturación, aumenta su volumen. Lo anterior deja una distancia entre antena y diodos de 24 cm.

6.2 Procedimiento y resultados con el prototipo microondas

Una vez montado el sistema antes descrito, se procede a realizar el siguiente procedimiento para la obtención de niveles de voltaje que representen el contenido de humedad en las muestras.

1. Se alimenta el SAD y conversor. El generador permanece sin salida.
2. Se registran los voltajes obtenidos, los cuales corresponden a los “ceros” de cada diodo.
3. Se pesa la muestra la cual se mantuvo largamente a una temperatura ambiente (25° C) y a una humedad constante.
4. Se configura el generador de microondas con una señal de salida de 15 dBm y 10,3 GHz.

5. Se ubica la muestra entre antena y diodos y se registran los voltajes obtenidos, los cuales corresponden a una humedad de 0% de la muestra.
6. La muestra es sumergida totalmente dentro de un recipiente lleno de agua y se le deja reposar dentro hasta que el agua la haya penetrado completamente.
7. Se saca la muestra y se le deja reposar de manera que escurra toda el agua no absorbida. Luego es nuevamente pesada, alcanzando en este estado aproximadamente un 44% de humedad. Se calcula su porcentaje de humedad en base húmeda.
8. Se ubica la muestra entre antena y diodos y se registran los voltajes obtenidos, los cuales corresponden a la humedad de la muestra para el porcentaje de humedad calculado.
9. Luego, manteniendo en todo momento una temperatura ambiente, se espera que se evapore el contenido de humedad de la muestra. Se registran los voltajes en los terminales de los diodos para los porcentajes de humedad múltiplos de 5%. Esto se realiza hasta que la muestra alcance el 5% de humedad.

Todas las mediciones de voltaje que involucren la presencia de las muestras se realizan según las posiciones que se indican la figura 5.20.

A continuación, en las figuras 6.2 y 6.3 se presentan gráficas con los voltajes obtenidos para distintos porcentajes de humedad y diferentes muestras medidas en las posiciones uno y dos, respectivamente. Los voltajes que se relacionan con el contenido de humedad corresponden al promedio de los voltajes de todos los diodos del arreglo. A su vez, los voltajes de los diodos se obtienen del promedio de 10 mediciones, tomadas con una frecuencia de 2 segundos. Cabe señalar que las tensiones graficadas son el resultado de un acondicionamiento en relación a la amplificación y corrección de offset (Anexo B).

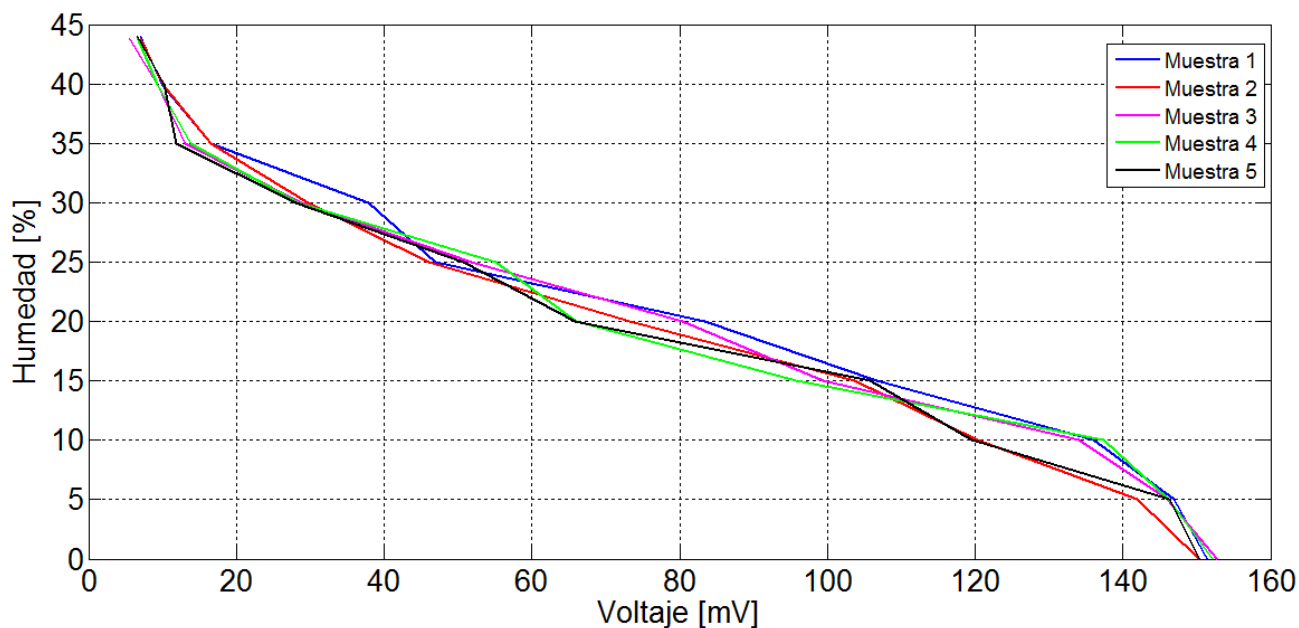


Figura N° 6.2: Mediciones muestras. Relación humedad y voltaje. Posición 1

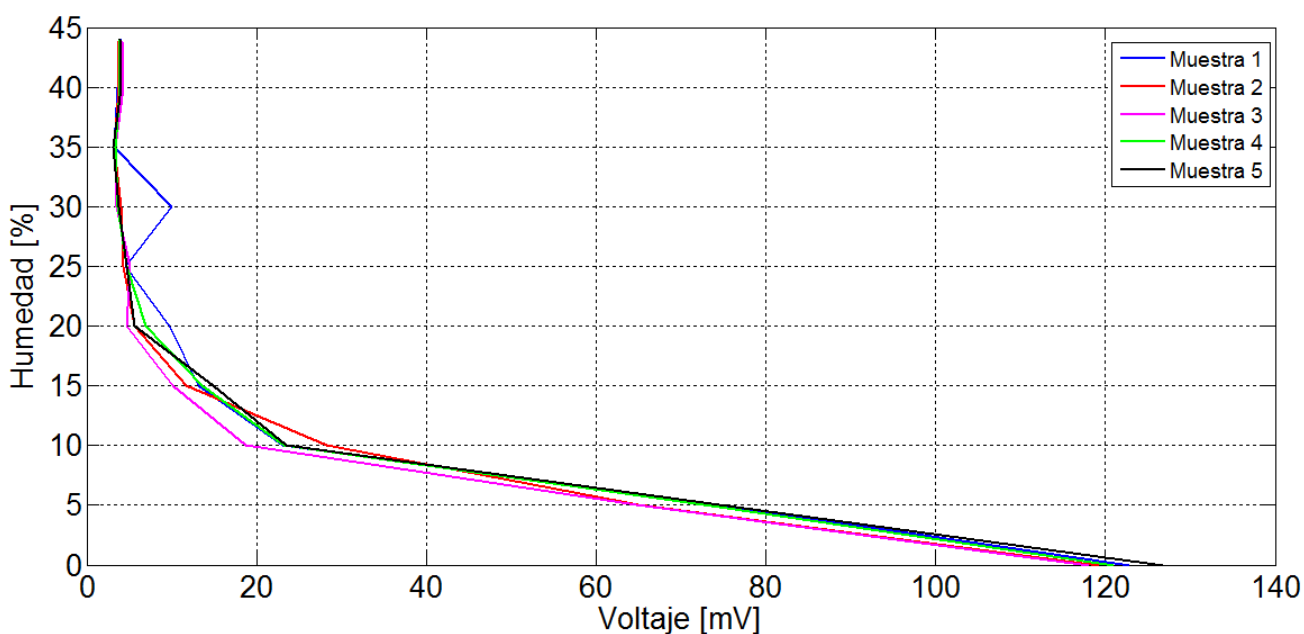


Figura N° 6.3: Mediciones muestras. Relación humedad y voltaje. Posición 2

En los gráficos se observa que el voltaje sensado por los diodos, en la gran mayoría de las mediciones, disminuye cuando la humedad de la muestra aumenta. Por lo que se comprueba de forma práctica que a una frecuencia cercana a los 10 GHz se produce la relajación dieléctrica del agua.

En general, las dos curvas se asemejan, sin embargo para la gráfica de la posición 2 existe una mayor pendiente para valores de humedad más altos, lo que implica que las mediciones con contenido de humedad mayor a 25%, se asocian a valores similares de voltaje, aumentando el error en la medición en este rango.

Para la figura 6.2 se observa, en promedio, mayores niveles de tensión en contraste con lo que sucede para la figura 6.3. lo que se explica por la disposición de las láminas de cartón. Para el caso de la posición 1, las canaletas del cartón se encuentran abiertas en la dirección de propagación de la onda, lo que no sucede para el caso de la posición 2.

Luego, se hace necesario encontrar una función que relacione cualquier voltaje sensado por los diodos con la humedad de las muestras sujetas a medición (muestras de mismas dimensiones y densidad). Para esto, con la ayuda del software Matlab R2013b, utilizando la herramienta de ajuste de curvas y después de comparar distintos tipos de ajustes para diferentes grupos de datos, se determinó la utilización de los siguientes datos mostrados en las tablas 6.1 y 6.2.

Tabla N° 6.1: Promedios de voltajes con su respectivo contenido de humedad. Posición 1

Voltaje diodos (mV)	Humedad (%)
151,448	0
145,45	5
129,49	10
102,288	15
73,758	20
50,134	25
30,554	30
14,366	35
9,73	40
6,526	43,92

Tabla N° 6.2: Medianas de voltajes con su respectivo contenido de humedad. Posición 2

Voltaje diodos (mV)	Humedad (%)
121,07	0
72,74	5
23,06	10
13,2	15
5,56	20
4,72	25
3,67	30
3,29	35
3,89	40
3,86	43,95

Así, para encontrar el mejor ajuste, se pueden utilizar la totalidad o una porción de los datos antes expuestos. Para el caso de la posición 1, se utilizan la mitad de los puntos y para el caso de la posición 2, se utilizan todos los datos. En función de esto, se obtienen las siguientes ecuaciones para cada caso, tanto para las mediciones en la posición 1 como para la posición 2, correspondientes a funciones exponenciales de dos términos, que tienen la siguiente forma:

$$f(x) = a \cdot e^{bx} + c \cdot e^{dx} \quad (6.1)$$

Para la posición 1, los coeficientes son:

$$a = 43,82$$

$$b = -0,01108$$

$$c = -1,316 \times 10^{-8}$$

$$d = 0,1337$$

Y para la posición 2, los coeficientes son:

$$a = 16,93$$

$$b = -0,02$$

$$c = 100,2$$

$$d = -0,4388$$

Las figuras 6.4 y 6.5 muestran las curvas de las ecuaciones anteriores en conjunto con los puntos de las tablas 6.1 y 6.2.

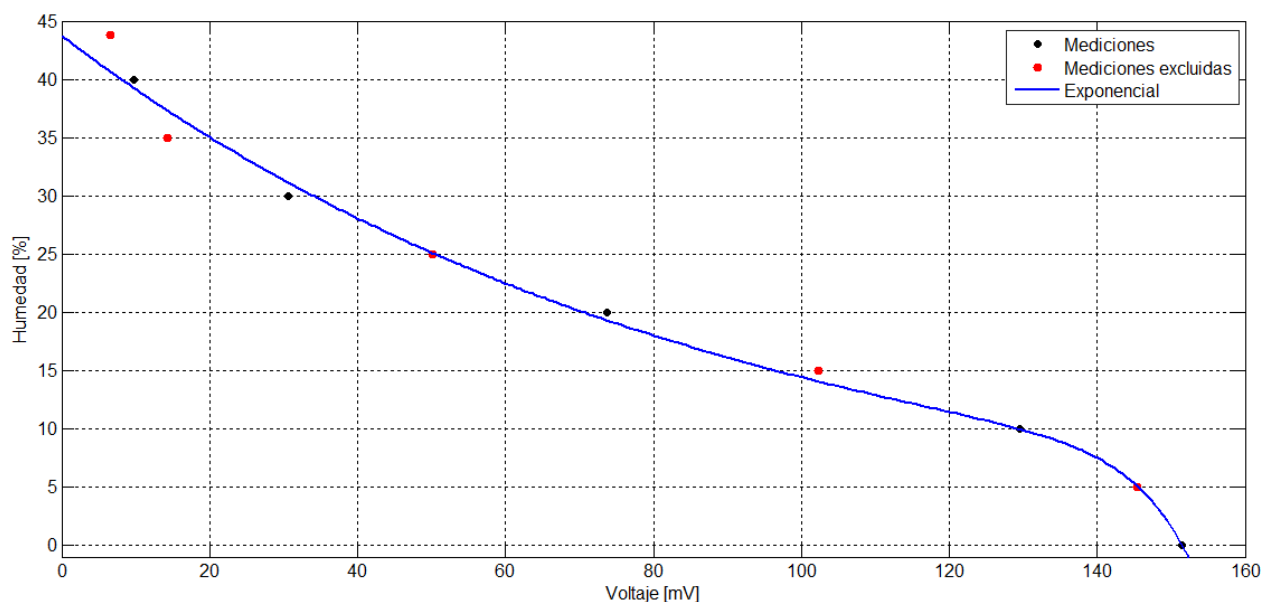


Figura N° 6.4: Relación humedad y voltaje diodos. Posición 1

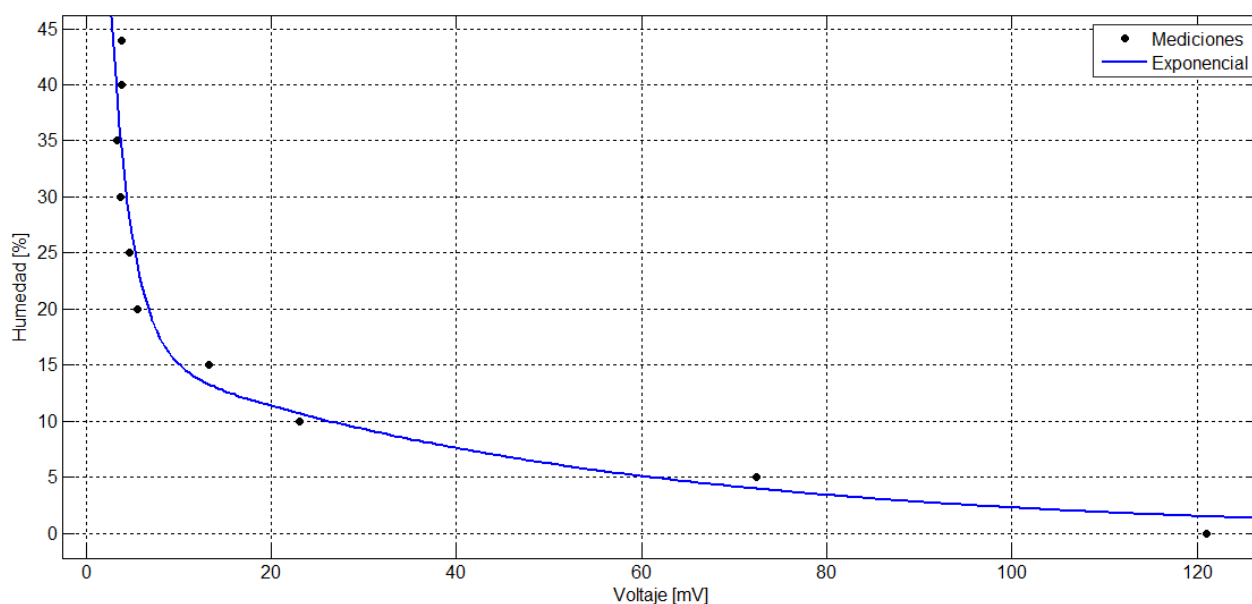


Figura N° 6.5: Relación humedad y voltaje diodos. Posición 2

De esta manera se obtuvieron dos curvas que relacionan cualquier nivel de voltaje con un contenido de humedad para todo el rango de medición.

6.3 Comparación con sonda capacitiva

Con la intención de observar las ventajas y desventajas del método desarrollado, se compara este con un instrumento utilizado en la medición de humedad en suelos, basado en la técnica capacitiva. Este instrumento es la sonda PR2/4, del CIMUBB, que ya ha sido estudiada en el ítem 2.2.2.

El sujeto de pruebas, al igual que para el caso del prototipo de microondas, corresponde a una muestra de cartón no blanqueado de dimensiones 19 cm x 6 cm x 6 cm. Sin embargo, a diferencia de los utilizados para el caso anterior, estas deben ser perforadas pues la sonda capacitiva no se aplica como un método no destructivo.

Debido a las dimensiones de las muestras (espesor) y la ubicación de los sensores de la sonda, solamente se utiliza uno de los cuatro sensores que provee este instrumento, en específico el sensor 4, como se muestra en la figura 6.4.

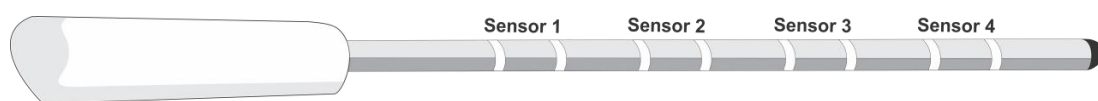


Figura N° 6.4: Sonda PR2/4. Ubicación sensores

La sonda se alimenta con 10 V y la adquisición de datos se realiza mediante los mismos SAD, conversor y PC del método anterior.

6.3.1 Procedimiento y resultados con la sonda capacitiva

Una vez montado el sistema antes descrito, se procede a realizar el siguiente procedimiento para la obtención de niveles de voltaje que representen el contenido de humedad en las muestras. Ver figura 6.5.



Figura N° 6.5: Sonda PR2/4. Ubicación muestra

1. Se alimenta el SAD y conversor.
2. Se registran los voltajes obtenidos con la sonda en el aire, los cuales corresponden al “cero” del sensor.
3. Se pesa la muestra la cual se mantuvo largamente a una temperatura ambiente (25° C) y a una humedad constante.
4. Se atraviesa la muestra hasta ubicarla justo sobre el sensor a utilizar (sensor 4) y se registran los voltajes obtenidos, los cuales corresponden a una humedad de 0% de la muestra.
5. La muestra es sumergida totalmente dentro de un recipiente lleno de agua y se le deja reposar dentro de este hasta que el agua haya penetrado en toda la muestra.

6. Se saca la muestra y se le deja reposar de manera que escurra toda el agua no absorbida. Luego es nuevamente pesada. Se calcula su porcentaje de humedad en base húmeda.
7. Se ubica la muestra sobre el sensor 4 y se registran los voltajes obtenidos, los cuales corresponden a la humedad de la muestra para el porcentaje de humedad calculado.
8. Luego, manteniendo en todo momento una temperatura ambiente, se espera que se evapore el contenido de humedad de la muestra. Se registran los voltajes en los terminales de los diodos para los porcentajes de humedad múltiplos de 5%. Esto se realiza hasta que la muestra alcance el 5% de humedad.

A continuación, en la figura 6.6 se presenta la gráfica con los voltajes obtenidos para distintos porcentajes de humedad, esto para diferentes muestras. Estas tensiones se obtienen del promedio de 3 mediciones, las que son tomadas girando la lanza, primero para 0° , luego 120° y finalmente 240° , según el procedimiento de medición indicado por el fabricante [14]. Estas 3 mediciones se obtienen del promedio de 10 datos, tomados con una frecuencia de 2 segundos.

Cabe señalar que las tensiones graficadas son el resultado de un acondicionamiento de corrección de offset (Anexo C).

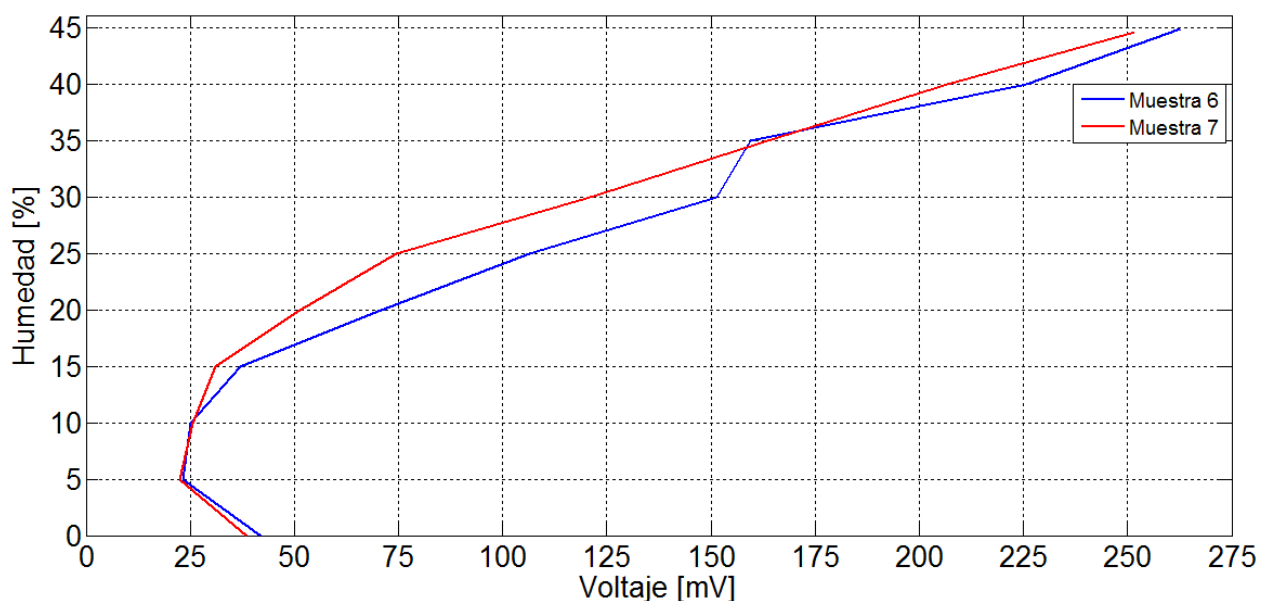


Figura N° 6.6: Mediciones muestras. Relación humedad y voltaje. Sensor 4

A diferencia de las curvas obtenidas para el método de microondas, la medición con la PR2/4 relaciona el voltaje de forma directa con la humedad.

Para el rango entre 0% y 15% (aproximadamente) se observa que el voltaje no es una función de la humedad, pues para un mismo nivel de tensión se tiene más de un contenido de humedad, sin embargo, para una humedad mayor al rango anterior, se observa un comportamiento prácticamente lineal.

Luego, al igual que para el prototipo de microondas, se hace necesario encontrar una función que relacione cualquier voltaje con la humedad de las muestras (muestras de mismas dimensiones y densidad). Para esto, con la ayuda del software Matlab R2013b, utilizando la herramienta de ajuste de curvas y después de comparar distintos tipos de ajustes para diferentes grupos de datos, se utilizan los siguientes datos, mostrados en la tabla 6.3.

Tabla N° 6.3: Promedios de voltajes con sus respectivos contenidos de humedad. Sensor 4

Voltaje sensor (mV)	Humedad (%)
40,275	0
22,825	5
25,44	10
33,94	15
61,105	20
90,375	25
136,155	30
161,605	35
216,26	40
257,255	44,75

En este caso se utilizan la mitad de los puntos, obteniéndose la siguiente función exponencial de dos términos:

$$f(x) = a \cdot e^{bx} + c \cdot e^{dx} \quad (6.2)$$

Donde:

$$a = 19,77$$

$$b = 0,003222$$

$$c = -86,63$$

$$d = -0,07338$$

De los valores de la tabla 6.3 y de función exponencial de la ecuación 6.2, se obtiene gráficamente lo que se muestra en la figura 6.7.

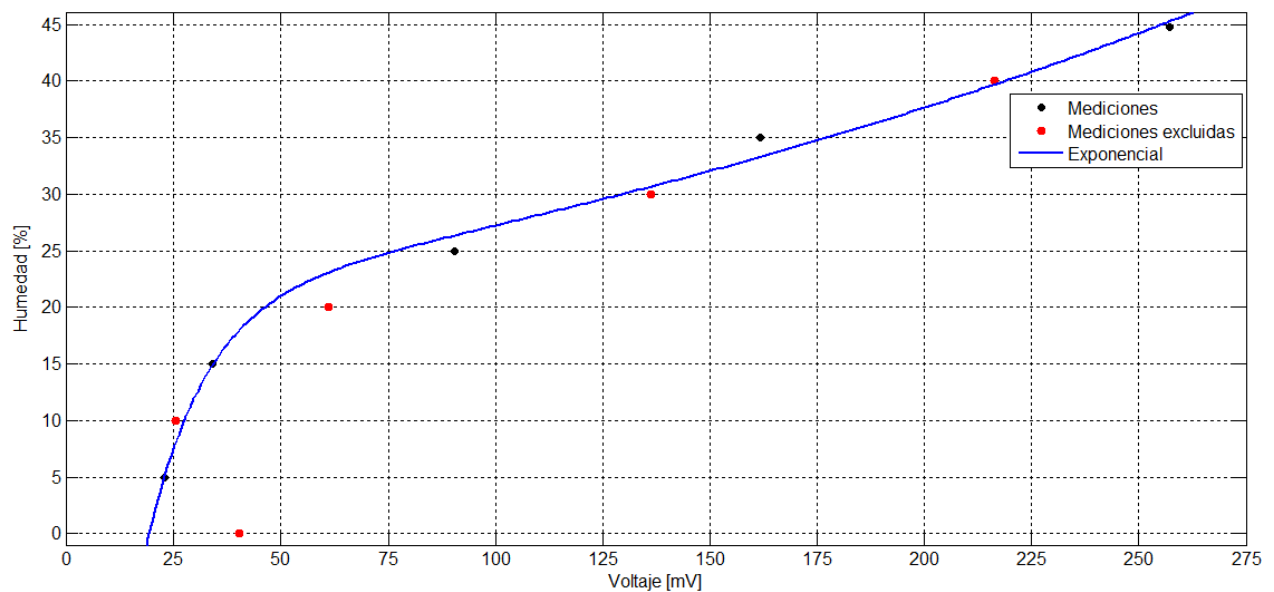


Figura N° 6.7: Relación humedad y voltaje. PR2/4

Con lo anterior, se consigue una función que relaciona cualquier nivel de voltaje con un contenido de humedad para todo el rango de medición.

6.3.2 Comparación prototipo microondas con sonda capacitiva

Finalmente, utilizando los datos obtenidos en las mediciones de humedad a través de los métodos de microondas y de la sonda, se determinan los errores relativos (E_r) y absolutos (E_a) con el fin de comparar ambos instrumentos. Estos errores se determinan reemplazando los voltajes obtenidos de las mediciones de todas las muestras en las ecuaciones que modelan el funcionamiento de ambos instrumentos. Luego se comparan los contenidos de humedad reales vs los obtenidos con las ecuaciones de ajuste (Anexo D).

El cálculo de los errores se realiza de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} E_r(\%) &= \text{Humedad real}(\%) - \text{Humedad aproximada}(\%) \\ E_a(g) &= m_{H_2O} \text{ real} - m_{H_2O} \text{ aproximada} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Tabla N° 6.4: Comparación errores

Método			Error Relativo Máximo (%)	Error Absoluto (g)
Prototipo Microondas	Posición 1	Muestra 1	-3,44	-7,77
		Muestra 2	-3,47	-7,54
		Muestra 3	2,9	5,42
		Muestra 4	-3,19	-7,26
		Muestra 5	3,44	6,48
	Posición 2	Muestra 1	-14,84	-18,8
		Muestra 2	-8,73	-18,13
		Muestra 3	-12,38	-24,2
		Muestra 4	-9,86	-20,15
		Muestra 5	-9,91	-20,26
PR2/4	Muestra 6		18,66	16,32
	Muestra 7		17,26	14,91

Como se observa en la tabla 6.4, para el caso de la posición 1, en todas las muestras se observa un error relativo máximo y su correspondiente error absoluto muy similar. Esto contrasta con lo sucedido para el caso de la medición en posición 2, donde para todas las muestras se presentan mayores errores. Además en la posición 2, al observar los gráficos, se evidencia que existen variaciones muy pequeñas de voltaje para los niveles de humedad más altos, lo que acentúa los errores en la medición. Por todo lo anterior se puede inferir en primera instancia que la medición debe realizarse en la posición 1.

Comparando el método de microondas con la sonda capacitiva, se observa que el primero ofrece una mejor performance, pues los errores relativos máximos de todas sus muestras son menores que los errores relativos de la técnica destructiva. Cabe señalar que a diferencia de la lanza, la utilización de microondas ofrece la posibilidad de medición en distintas posiciones de la muestra sin destruirla, lo que da la posibilidad de elegir la manera más eficaz de realizar la medición.

Por último, se observa que la medición con la lanza no permite mediciones de contenido de humedad de 0% hasta 15% aproximadamente. Algo similar ocurre con la medición con microondas con la muestra en posición 2, pero esta vez para rangos mayores a 25% aproximadamente. En este sentido, la medición del prototipo la muestra en posición 1 toma ventaja respecto de los otros dos casos, pues la variación de voltaje tiende a ser más lineal en todo el rango de medición.

CONCLUSIONES

Existen muchos métodos aplicados a la medición de humedad en sólidos, sin embargo muy pocos pueden aplicarse a volúmenes de 1 m^3 aproximadamente. Para la aplicación deseada, el método de microondas resulta más adecuado por la posibilidad de alcanzar una mayor profundidad de medición. Esto sumado a la velocidad de medición para la toma de muestras permitiría la posibilidad de realizar la medición de humedad en línea.

En base a los instrumentos analizados en el segundo capítulo, se puede entender que la tecnología de microondas aunque se aplica a sólidos, existe sólo un instrumento que pueda medir toda la humedad del fardo, pero su valor comercial es excesivamente alto, lo que motiva el desarrollo de una alternativa a escala de laboratorio.

El diodo Punto de contacto, si bien se adecúa de buena manera al prototipo a escala de laboratorio, es evidente que su desempeño (irregular) puede afectar la medición en el caso de una implementación industrial. Según el fabricante, este diodo en comparación con el diodo Schottky, que también es utilizado en la detección de microondas, posee la desventaja de presentar una baja homogeneidad en la construcción en serie de estos dispositivos, lo que conlleva a que cada diodo tenga una curva característica distinta a cualquier otro diodo de la misma serie.

Durante el desarrollo se logra comprobar de manera práctica que el espesor máximo de la muestra queda limitado a la potencia de la señal del generador. La profundidad de medición, se ve afectada por el contenido de humedad, lo que resulta crítico en el caso de una muestra totalmente saturada. Así, si se varía la frecuencia de operación, es decir, se elige una frecuencia cerca a los 10 GHz en la cual no existen las mayores pérdidas en la presencia de moléculas de agua, puede lograrse una medición en muestras de mayor espesor.

En particular, la aplicación del método permite ubicar las zonas más y menos húmedas de la muestra cuando se comparan las mediciones de cada diodo con la media de todas las mediciones del arreglo.

La medición a través del prototipo de microondas, permite la determinación de humedad para las muestras que ha sido calibrado. Un cambio en las dimensiones o densidad de las muestras implica una recalibración.

El método es viable para una implementación de medición de humedad en línea, a escala industrial, si es que se dispone de un SAD lo suficientemente rápido en la toma de datos, considerando la velocidad del fardo sobre una correa transportadora y la disposición de los diodos.

Comparando el método de microondas con la aplicación del método capacitivo en una lanza de medición de humedad de suelos, se observan las diferencias en cuanto a las posibilidades de medición que ofrece la aplicación de microondas versus la PR2/4. El método invasivo puede adoptar una sola orientación para realizar la medición en las muestras, en contraste con la posibilidad de medir en más de una posición al utilizar el prototipo basado en microondas.

La PR2/4 según lo detallado en el datasheet, ofrece una profundidad de medición (diámetro) de 10 cm. Para el método de microondas esta profundidad depende del material a medir y de la potencia utilizada (Anexo A).

Por último, se hace evidente que la medición a través de microondas favorece una implementación para la determinación de humedad en línea al ser una técnica no destructiva y capaz de determinar el contenido de humedad de las muestras con una gran resolución.

PROYECCIONES

Para una implementación industrial se propone considerar los siguientes asuntos:

1. La utilización de diodos Schottky como sensores de microondas, ya que tienen una construcción más homogénea en comparación con los diodos Punto de contacto. Además, presenta una menor susceptibilidad a errores de medición causados por golpes (de acuerdo a la implementación ideada en el diseño experimental del capítulo V, los Puntos de contacto podrían estar sujetos a vibraciones o pequeños movimientos).
2. La utilización de una antena con mayor apertura, pues conlleva al aumento del área “iluminada” por la antena a la misma distancia, necesario para la medición de humedad en fardos de mayor altura. Además, se debe considerar la utilización de una señal con mayor potencia, si lo que se desea es un mayor espesor penetrado.
3. Para el caso de fardos con dimensiones de nivel industrial, considerar la utilización de una mayor cantidad de diodos. Dependiendo de las necesidades específicas al momento de implementar, considerar una distribución de los diodos en un arreglo con más de una columna, de manera que la segunda columna se encuentre desplazada respecto a la primera de manera que los diodos se ubiquen justo en la mitad de la distancia entre dos diodos de la primera columna. Con lo anterior se logra una mayor resolución, y por lo tanto una mejor caracterización del contenido de humedad del fardo.
4. En este mismo sentido, si se desea identificar zonas más o menos húmedas, se debe considerar el desarrollo de un software que entregue la ubicación de estas zonas, por ejemplo mediante escala de colores, basándose en la variación de la magnitud de la señal sensada por los diodos respecto de la media del arreglo.

Finalmente, cabe hacer notar que si se desea implementar este método de medición de humedad para un material distinto al cartón, el cual pueda tener una saturación de humedad más baja

(menor al 45% aproximadamente), la profundidad de transmisión de la microonda puede ser mayor.

De esta manera, el método de microondas al ser un procedimiento indirecto de medición de humedad, precisa de una calibración para cada tipo de material, por lo que este método no es cerrado a la aplicación realizada en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] MARTINES L., Enrique y LIRA C., Leonel. Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos. Querétaro, Centro Nacional de Metrología, 2010. 2p.
- [2] CREUS Solé, Antonio. Instrumentación Industrial. 8a ed. Barcelona, España, MARCOMBO, S.A, 2011. pp. 341 – 342. ISBN: 978-84-267-1668-2
- [3] TREYBAL, Robert E. Operaciones de transferencia de masa. 2ª ed. McGraw-Hill, 1988. 731p.
- [4] MEDRANO, Silvia, ARANDA, Víctor, VELASCO, Norma. Calibración de Higrómetros para madera, métodos y trazabilidad. Jalisco, México, MetAs & Metrólogos Asociados, 2004. 3p.
- [5] LEGUIZAMO, Ignacio, ABDALA, Juan C., TRAD Jairo N., RIVA Guillermo G. Desarrollo de Sonda Capacitiva para Medición Distribuida de Humedad de Suelo. En: CONGRESO Argentino de AgroInformática (VI, 2014, Buenos Aires, Argentina). X. Argentina, Universidad de Palermo. INSUS, Laboratorio de Comunicaciones Digitales-UNC, UTN-FRC, CONICET.
- [6] PÉREZ Gutiérrez, Pedro y MUÑOZ Nieto, Ángel Luís. Teledetección: Nociones y Aplicaciones. 260p.
- [7] TORRES Quintero, Ernesto, MEDINA, Yazmín, GONZÁLEZ, Jamed. Estudio de las técnicas nucleares aplicadas a la medición de la humedad del suelo. INGENIO Libre (6): 68-84, 2007.
- [8] CREUS Solé, Antonio. Instrumentación Industrial. 8a ed. Barcelona, España, MARCOMBO, S.A, 2011. 346p. ISBN: 978-84-267-1668-2

- [9] PÉREZ, Guillermo. Espectrometría Infrarroja. [en línea] <http://www.espectrometria.com/espectrometra_infrarroja> [consulta: 03 junio 2015]
- [10] OKAMURA, Seichil. Microwave Technology for Moisture Measurement. Subsurface Sensing Technologies and Applications 1(2): 208-213, 2000.
- [11] Measure Instruments. Medidor de humedad para fardos y rollos de pasto. [en línea] <http://www.measureinstruments.com.ar/Medidor_humedad_fardos_pasto_MI-7_SH-6.html> [consulta: 28 de febrero 2015]
- [12] Acclima. Digital TDT Sensor. [en línea] <<http://acclima.com/wd/acclimadocs/MoistureSensor/TDT%20Moisture%20Sensor%20Cut%20Sheet.pdf>> [consulta: 28 de febrero 2016]
- [13] Schaller GmbH. Humimeter RP5 and RP4 recycling paper moisture meter for detecting moisture in recycling paper bales suitable for the measurement of pressed piles, rolls and pulp. [en línea] <http://www.humimeter.com/fileadmin/user_upload/documents/product-pdfs/en/paper/humimeter__RP5_RP4__en.pdf> [consulta: 18 mayo 2015]
- [14] Delta-T Devices Ltd. Leaders in Environmental Measurement: Soil Moisture Measurement. [en línea] <<http://www.delta-t.co.uk/product-downloads.asp?%=Product%20Datasheets>> [consulta: 18 mayo 2015]
- [15] Process Sensors Corporation. MCT460. Near Infrared (NIR) Transmitter. [en línea] <<http://www.processsensors.com/products/2013%20MCT460%20Brochure.pdf>> [consulta: 18 mayo 2015]
- [16] TEWS Elektronik. MW-T. [en línea] <http://bales.moisture-density-measuring.com/fileadmin/user_upload/MW-T/Download/TEWS_PR_MW-T-1207.pdf> [consulta: 18 mayo 2015]

[17] hf sensor. MOIST PP – Process Microwave Sensing Head for Moisture Measurement in medium volumes of material under test. [en línea] <<http://www.hf-sensor.de/englisch/moistppxe.html>> [consulta: 18 mayo 2015]

[18] hf sensor. MOIST BIO P – Process Microwave Sensing Head for Moisture Measurement in large material volumina. [en línea] <<http://www.hf-sensor.de/englisch/moistbiopxe.html>> [consulta: 18 mayo 2015]

[19] hf sensor. MOIST CONTROL – Process Control Unit for Microwave moisture sensors of MOIST xP series. [en línea] <<http://www.hf-sensor.de/englisch/moistcontrolxe.html>> [consulta: 18 mayo 2015]

[20] Hydronix. Hydro-Mix. [en línea] <https://www.hydronix.com/downloads/brochures/hydro_mix/hm08/sl0028sp_1_0_0.pdf> [consulta: 28 febrero 2016]

[21] Hydronix. Hydro-Mix para medir la humedad en mezcladoras y cintas transportadoras. [en línea] <<https://www.hydronix.com/es/productos/hydromix.php>> [consulta: 28 febrero 2016]

[22] STEVENS. HydraProbe. Reliable soil insight [en línea] <http://www.stevenswater.com/resources/datasheets/hydraprobe_brochure_web.pdf> [consulta: 28 febrero 2016]

[23] IMKO. TRIME®-PICO IPH/T3 for accurate measurements of soil moisture profiles. [en línea] <<http://imko.de/en/products/soilmoisture/soil-moisture-sensors/trimepicoipht3>> [consulta: 28 febrero 2016]

[24] SADIKU, Matthew. Elementos de electromagnetismo. 3ª ed. México, Oxford University Press, 2003. 776p.

[25] PETERSON, Charles. Hand Held Moisture Meters. Woodflooringedu, 2008, 4p.

- [26] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas. IEEE Std 145-1993, 1983. Estados Unidos, 1993. 40p.
- [27] ETS-LINDGREN. Model 3160 Series, Pyramidal Horn Antenna [en línea] <<http://www.ets-lindgren.com/specs/3160>> [consulta: 3 abril 2016]
- [28] COLLIN, Robert E. Foundations for Microwave Engineering. 2ª ed Wiley-IEEE Press, 2001. 944p.
- [29] Bonastre, Jordi. Propagación de ondas electromagnéticas. [en línea] <https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Fisica/Fisica_II_ES/Fisica_II_ES_%28Modulo_5%29.pdf> [consulta: 3 abril 2016]
- [30] CHENG, David K. Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería. Pearson, 1998. 509p.
- [31] FERNÁNDEZ, Washington R. Curso Moderno en Teoría y Diseños de Antenas. 156p.
- [32] ROHDE&SCHWARZ. R&S®SMB100A RF and Microwave Signal Generator Specifications [en línea] <http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/SMB100A_dat-sw_en_5213-8396-22_v0800.pdf> [consulta: 3 abril 2016]
- [33] PASCO. Instruction Manual and Experiment Guide for the PASCO scientific Model WA-9314B [en línea] <<http://facultyweb.cortland.edu/douglas.armstead/S15/intermediate/Lab11Microwaves.pdf>> [consulta: 3 abril 2016]
- [34] BAYLISS, Robert; CABRERA, Eduardo; HOWE, Stanley. Diodes... Why a Schottky-barrier? Why a Point-contact? [en línea] <<http://mwrf.com/rf-classics/microwave-diodes-why-schottky-barrier-why-point-contact>> [consulta: 30 noviembre 2015]

[35] Unclassified Manufacturers. Silicon Point Contact Mixer Diodes [en línea] <<http://html.alldatasheet.es/html-pdf/122032/ETC1/1N23CR/95/1/1N23CR.html>> [consulta: 30 noviembre 2015]

[36] Tektronix. User Manual [en línea] <<http://www10.ujaen.es/sites/default/files/users/ingele/manualtds340.pdf>> [consulta: 3 abril 2016]

[37] ANTENAS por Ángel Cardama Aznar “et al”. 2ª ed. Ediciones UPC, 2002. 55p

[38] COOPER D., William y HELFRICK D., Albert. Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición. México, Prentice Hall, 1991. pp 381-383.

[39] RAMÍREZ Neyra, Fernando Gabino. Sistema de adquisición de datos de sensores analógicos y digitales. Tesis (Ingeniero en Control y Automatización). México D.F. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”. 2009. 111h.

[40] ADVANTECH. ADAM-4017 [en línea] <http://www.advantech.com/products/gf-5vtd/adam-4017/mod_170c40f4-e6ac-485e-9df9-1e6ef60f971f> [consulta: 28 febrero 2016]

[41] TRYCOM. TRP-C06 RS-232 to RS-422/485 Isolated Converter [en línea] <<http://www.trycom.com.tw/TRP-C06.htm>> [consulta: 20 abril 2016]

[42] StarTech.com. Cable Adaptador USB a Serie RS232 de 1 Puerto Serial DB9 - Macho a Macho [en línea] <<https://www.startech.com/eu/es/Tarjetas-perifericos/Tarjetas-Serie/Adaptador-de-cable-serial-USB-a-RS232~ICUSB232V2>> [consulta: 20 abril 2016]

ANEXOS

ANEXO A: Determinación espesor máximo para potencia máxima.

Los espesores (de la posición 1 y posición 2, mostradas en la figura A.1) se determinan de acuerdo a la capacidad de la señal para traspasar la muestra en estado de saturación, es decir, cuando ésta se encuentre con un contenido máximo de humedad.

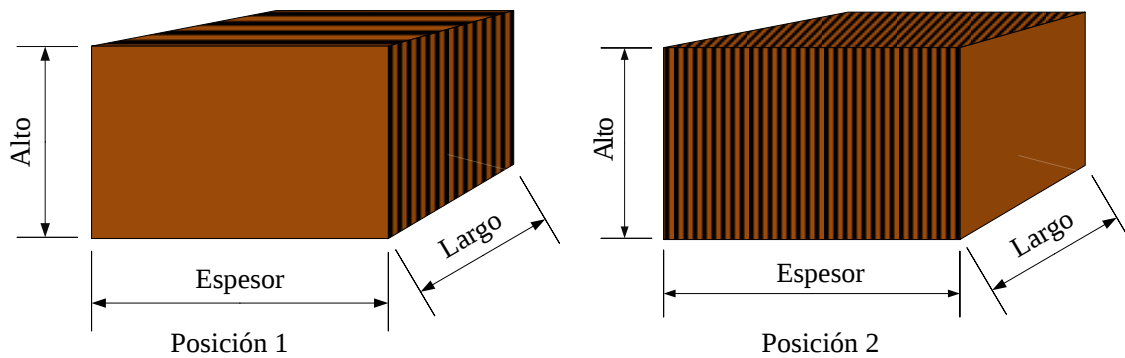


Figura N° A.1: Muestra en distintas posiciones

Lo anterior se realiza mediante el siguiente procedimiento:

1. Se monta un sistema compuesto por el generador de microondas, antena, el arreglo de diodos y osciloscopio, como se muestra en la figura A.2.



Figura N° A.2: Montaje espesor de la muestra

2. Se mide la señal en el osciloscopio sin ubicar la muestra entre la antena y el arreglo de diodos y sin ninguna señal en la antena. El primer diodo de la columna se conecta al canal 1 del osciloscopio y el último diodo al canal 2. Esto pues ambos diodos son los que reciben menos señal debido a que se encuentran a mayor distancia de la antena. Este paso se realiza con el fin de encontrar los “ceros” que sensa cada diodo.
3. Se configura el generador de microondas con una señal de salida de 30 dBm (máxima potencia del generador SMB 100A) y 10,3 GHz.
4. Se construyen distintas muestras para las posiciones 1 y 2. Estas muestras varían solo su espesor (30 cm, 25 cm y 20 cm), tienen una altura de 19 cm y se ubican a 17,5 cm de la antena.
5. Las muestras son mojadas con agua hasta llegar a un estado de saturación. Se llega a este estado sumergiendo las muestras en un recipiente con agua y dejándoles reposar, esperando que el agua no absorbida pueda escurrir.
6. Se miden las señales en el osciloscopio. Al momento de ejecutar este punto se debe verificar que no se llegue al “cero” de cada diodo, es decir, que la menor de las señales sensadas por los diodos sea mayor a la recibida en el caso en que no se tiene señal en la antena. Esto con el fin de poder elegir un espesor de la muestra que permita que la señal lo atraviese en el peor de los casos (estado de saturación).

Los resultados de las mediciones anteriores arrojan que para la señal de 30 dBm, el espesor máximo para la posición 1 y 2 es de 25 cm.

Los resultados anteriores se resumen en la figura A.3

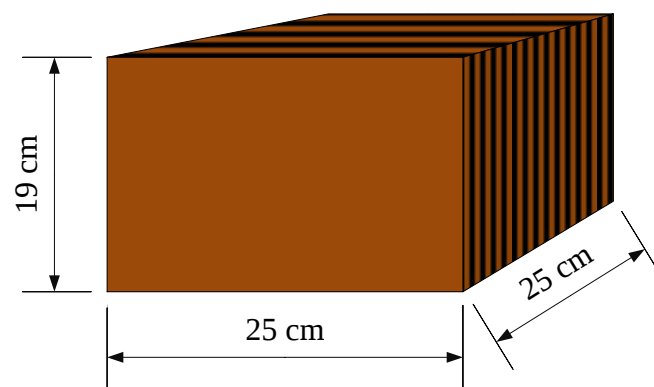


Figura N° A.3: Dimensiones muestra

ANEXO B: Mediciones prototipo de medición humedad para muestras de cartón

Tablas B.1: Calibración

CALIBRACIÓN

SIN SEÑAL

SIN MUESTRA		
Canales	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	42,74	0
Canal 1	11,73	0
Canal 2	3,05	0
Canal 3	8,3	0
Canal 4	34,41	0
Canal 5	1,13	0
Canal 6	5,7	0
Canal 7	5,89	0
Promedio	14,11875	0

15 dBm

SIN MUESTRA				
Canales	Sin Acondicionar	Acondicionado		
	Voltaje(mV)	C. Offset (mV)	Amplificación	V. Final (mV)
Canal 0	88,94	46,2	3,627705628	167,6
Canal 1	179,33	167,6	1	167,6
Canal 2	149,39	146,34	1,145278119	167,6
Canal 3	120,34	112,04	1,495894323	167,6
Canal 4	131,27	96,86	1,730332439	167,6
Canal 5	71,13	70	2,394285714	167,6
Canal 6	54,55	48,85	3,430910952	167,6
Canal 7	43,6	37,71	4,444444444	167,6
Promedio				167,6

Tablas B.2: Mediciones muestra 1

MUESTRA 1

15 dBm

MUESTRA SECA				
Peso (g)	75,26			
Humedad (%)	0			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	79,69	134,0437229	69,52	97,14995671
Canal 1	152,84	141,11	119,88	108,15
Canal 2	137,56	154,0513598	109,31	121,697253
Canal 3	114,94	159,5221707	88,54	120,0305605
Canal 4	124,53	155,9375594	103,04	118,7527153
Canal 5	67,05	157,8313143	54,59	127,9985143
Canal 6	50,39	153,3274104	47,93	144,8873695
Canal 7	40,93	155,7333333	38,32	144,1333333
Promedio		151,4446089		122,8499628

MUESTRA SATURADA				
Peso (g)	134,39			
Humedad (%)	43,99880944			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	47,02	15,52658009	47,04	15,5991342
Canal 1	20,91	9,18	12,97	1,24
Canal 2	8,91	6,71132978	4,14	1,24835315
Canal 3	9,69	2,07929311	9,19	1,331345948
Canal 4	40,7	10,88379104	38,47	7,025149701
Canal 5	2,96	4,381542857	1,3	0,407028571
Canal 6	6,85	3,945547595	6,56	2,950583419
Canal 7	6,58	3,066666667	6,41	2,311111111
Promedio		6,971843892		4,014088262

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	125,43			
Humedad (%)	39,99840549			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	46,35	13,09601732	45,82	11,17333333
Canal 1	27,16	15,43	14,02	2,29
Canal 2	12,86	11,23517835	4,06	1,156730901
Canal 3	11,62	4,966369154	9,16	1,286469118
Canal 4	40,68	10,84918439	37,35	5,087177369
Canal 5	4,18	7,302571429	1,56	1,029542857
Canal 6	7,93	7,650931423	6,49	2,710419652
Canal 7	7,74	8,222222222	6,98	4,844444444
Promedio		9,844059286		3,697264709

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	115,78			
Humedad (%)	34,99740888			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	48,49	20,85930736	45,28	9,214372294
Canal 1	35,8	24,07	14,1	2,37
Canal 2	21,84	21,51977586	4,08	1,179636463
Canal 3	14,92	9,902820421	9,16	1,286469118
Canal 4	44,14	16,83613463	37,48	5,312120586
Canal 5	7,17	14,46148571	1,47	0,814057143
Canal 6	9,9	14,409826	6,35	2,230092119
Canal 7	8,22	10,35555556	6,77	3,911111111
Promedio		16,55186319		3,289732354

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	107,51			
Humedad (%)	29,99720956			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	57,36	53,03705628	44,94	7,980952381
Canal 1	54,57	42,84	13,43	1,7
Canal 2	45,21	48,28492552	3,83	0,893316933
Canal 3	24,57	24,33820064	9,19	1,331345948
Canal 4	52,95	32,08036341	37,5	5,346727235
Canal 5	15,51	34,42982857	1,51	0,909828571
Canal 6	18,01	42,23451382	6,24	1,852691914
Canal 7	11,67	25,68888889	6,68	3,511111111
Promedio		37,86672214		2,940746762

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	100,35			
Humedad (%)	25,00249128			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	60,83	65,62519481	45,97	11,71748918
Canal 1	68,13	56,4	13,92	2,19
Canal 2	60,98	66,34596146	5,28	2,553970206
Canal 3	29,74	32,07197429	9,35	1,57068904
Canal 4	60,43	45,02325005	37,84	5,935040264
Canal 5	15,81	35,14811429	2,23	2,633714286
Canal 6	19,78	48,3072262	7,21	5,180675537
Canal 7	11,98	27,06666667	6,92	4,577777778
Promedio		46,99854847		4,544919536

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	94,08			
Humedad (%)	20,0042517			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	64,36	78,43099567	50,93	29,71090909
Canal 1	91,78	80,05	18,12	6,39
Canal 2	82,36	90,83200765	9,75	7,6733634
Canal 3	45,17	55,15362371	10,28	2,96187076
Canal 4	75,91	71,8087962	38	6,211893454
Canal 5	32,35	74,7496	3,34	5,291371429
Canal 6	38,99	114,2150256	9,23	12,11111566
Canal 7	28,78	101,7333333	7,59	7,555555556
Promedio		83,37167277		9,738259919

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	88,54			
Humedad (%)	14,99887057			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	69,91	98,5647619	53,67	39,65082251
Canal 1	121,56	109,83	23,52	11,79
Canal 2	97,98	108,7212519	15,45	14,20144868
Canal 3	62,68	81,34673331	10,59	3,425598001
Canal 4	88,54	93,6628949	39,12	8,149865786
Canal 5	41,79	97,35165714	3,81	6,416685714
Canal 6	48,39	146,4655885	9,08	11,59647902
Canal 7	32,44	118	8,22	10,35555556
Promedio		106,742861		13,19830691

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	83,62			
Humedad (%)	9,997608228			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	75,78	119,8593939	63,12	73,93264069
Canal 1	149,12	137,39	39,31	27,58
Canal 2	118,77	132,531584	23,94	23,92485992
Canal 3	88,47	119,9258479	13,79	8,212459836
Canal 4	100,23	113,8904811	41,24	11,81817056
Canal 5	53,94	126,4422286	4,86	8,930685714
Canal 6	60,5	188,0139202	10,22	15,5077175
Canal 7	39,79	150,6666667	9,17	14,57777778
Promedio		136,0900153		23,060539

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	79,22			
Humedad (%)	4,998737693			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	76,53	122,5801732	74,12	113,8374026
Canal 1	152,26	140,53	120,52	108,79
Canal 2	125,18	139,8728167	81,33	89,65237119
Canal 3	101,51	139,4323099	39,08	46,04362728
Canal 4	114,1	137,890192	64,85	52,67131943
Canal 5	61,27	143,9923429	24,45	55,83474286
Canal 6	61,43	191,2046673	19,72	48,10137155
Canal 7	41,82	159,6888889	23,84	79,77777778
Promedio		146,8989239		74,33857658

Tablas B.3: Mediciones muestra 2

MUESTRA 2

15 dBm

MUESTRA SECA				
Peso (g)	75,67			
Humedad (%)	0			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	80,51	137,0184416	71,11	102,9180087
Canal 1	156,9	145,17	120,57	108,84
Canal 2	133,88	149,8367364	106,62	118,6164548
Canal 3	116,41	161,7211353	87,72	118,8039272
Canal 4	122,09	151,7155482	98,21	110,3952096
Canal 5	65,92	155,1257714	51,29	120,0973714
Canal 6	48,43	146,602825	45,61	136,9276561
Canal 7	40,88	155,5111111	36,83	137,5111111
Promedio		150,3376961		119,2637174

MUESTRA SATURADA				
Peso (g)	134,78			
Humedad (%)	43,85665529			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	47,38	16,83255411	46,64	14,14805195
Canal 1	20,6	8,87	12,97	1,24
Canal 2	8,39	6,115785158	4,06	1,156730901
Canal 3	9,8	2,243841485	9,14	1,256551232
Canal 4	40,06	9,776378278	38,53	7,128969647
Canal 5	2,4	3,040742857	1,43	0,718285714
Canal 6	7,55	6,347185261	6,43	2,504564995
Canal 7	6,6	3,155555556	6,28	1,733333333
Promedio		7,047755338		3,735810971

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	126,12			
Humedad (%)	40,00158579			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	46,39	13,24112554	45,89	11,42727273
Canal 1	24,68	12,95	13,71	1,98
Canal 2	11,56	9,746316797	4,02	1,110919776
Canal 3	11,35	4,562477687	9,21	1,361263834
Canal 4	39,75	9,239975222	37,75	5,779310345
Canal 5	4,62	8,356057143	1,49	0,861942857
Canal 6	8,89	10,94460594	6,43	2,504564995
Canal 7	8,51	11,644444444	6,98	4,844444444
Promedio		10,08562535		3,733714872

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	116,42			
Humedad (%)	35,00257688			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	47,74	18,13852814	45,64	10,52034632
Canal 1	32,43	20,7	13,5	1,77
Canal 2	21,06	20,62645893	4,31	1,443050431
Canal 3	14,34	9,035201714	9,27	1,451017494
Canal 4	43,47	15,67681189	37,73	5,744703696
Canal 5	7,04	14,15022857	1,32	0,454914286
Canal 6	11,6	20,24237462	6,29	2,024237462
Canal 7	8,93	13,511111111	6,43	2,4
Promedio		16,51008937		3,226033711

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	108,1			
Humedad (%)	30			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	49,97	26,22831169	45,89	11,42727273
Canal 1	47,37	35,64	14,74	3,01
Canal 2	38,17	40,22216756	5,25	2,519611863
Canal 3	19,21	16,32020707	9,25	1,421099607
Canal 4	48,72	24,7610572	38,09	6,367623374
Canal 5	11,62	25,11605714	1,72	1,412628571
Canal 6	17,47	40,3818219	6,33	2,1614739
Canal 7	12,4	28,93333333	6,69	3,555555556
Promedio		29,70036949		3,9844082

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	100,89			
Humedad (%)	24,99752205			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	53,31	38,34484848	45,95	11,64493506
Canal 1	51,82	40,09	14,97	3,24
Canal 2	47,36	50,74727347	5,34	2,622686894
Canal 3	25,14	25,19086041	9,29	1,48093538
Canal 4	56,19	37,68664051	38,11	6,402230023
Canal 5	18,54	41,68451429	1,93	1,915428571
Canal 6	26,68	71,98051177	6,66	3,293674514
Canal 7	19,88	62,17777778	6,77	3,911111111
Promedio		45,98780334		4,313875195

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	94,59			
Humedad (%)	20,00211439			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	60,79	65,48008658	46,48	13,56761905
Canal 1	78,7	66,97	16,98	5,25
Canal 2	72,27	79,27615143	8,03	5,703485035
Canal 3	38,3	44,8768297	9,14	1,256551232
Canal 4	66,68	55,83782779	37,84	5,935040264
Canal 5	26,74	61,31765714	2,25	2,6816
Canal 6	37,88	110,4067144	7,42	5,901166837
Canal 7	28,84	102	6,83	4,177777778
Promedio		73,27065838		5,559155024

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	89,02			
Humedad (%)	14,99662997			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	69,05	95,44493506	51,1	30,32761905
Canal 1	111,7	99,97	22,93	11,2
Canal 2	93,21	103,2582752	14,57	13,19360394
Canal 3	61,65	79,80596216	9,96	2,483184577
Canal 4	79,29	77,65731984	38,72	7,45773281
Canal 5	39,67	92,27577143	3,93	6,704
Canal 6	49,78	151,2345548	9,08	11,59647902
Canal 7	34,96	129,2	8,26	10,53333333
Promedio		103,6058523		11,68699409

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	84,08			
Humedad (%)	10,00237869			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	70,48	100,6325541	66,28	85,39619048
Canal 1	147,4	135,67	40,49	28,76
Canal 2	113,8	126,8395517	19,8	19,1834085
Canal 3	76,49	102,0050339	15,74	11,12945377
Canal 4	91,77	99,25186868	42,34	13,72153624
Canal 5	43,77	102,0923429	6,66	13,2404
Canal 6	54,65	167,9430911	14,02	28,54517912
Canal 7	34,58	127,5111111	11,83	26,4
Promedio		120,2431942		28,29702101

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	79,65			
Humedad (%)	4,996861268			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	74,75	116,1228571	76,62	122,9066667
Canal 1	145,95	134,22	115,72	103,99
Canal 2	122,86	137,2157715	71,76	78,69205959
Canal 3	102,29	140,5991075	32,52	36,23056051
Canal 4	107,88	127,1275243	57,85	40,55899236
Canal 5	56,19	131,8293714	19,91	44,96468571
Canal 6	59,87	185,8524463	12,22	22,36953941
Canal 7	42,41	162,3111111	21,89	71,11111111
Promedio		141,9097736		65,10295192

Tablas B.4: Mediciones muestra 3

MUESTRA 3

15 dBm

MUESTRA SECA				
Peso (g)	75,35			
Humedad (%)	0			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	81,96	142,2786147	70,9	102,1561905
Canal 1	160,47	148,74	117,86	106,13
Canal 2	137,91	154,4522072	107,63	119,7731857
Canal 3	115,42	160,2401999	85,3	115,1838629
Canal 4	123,39	153,9649804	98,82	111,4507124
Canal 5	66,57	156,6820571	49,95	116,8890286
Canal 6	48,49	146,8086796	45,07	135,0749642
Canal 7	41,85	159,8222222	36,95	138,0444444
Promedio		152,8736202		118,0877986

MUESTRA SATURADA				
Peso (g)	134,09			
Humedad (%)	43,80639869			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	46,9	15,09125541	47,07	15,70796537
Canal 1	17,36	5,63	13,16	1,43
Canal 2	5,7	3,034987017	4,35	1,488861555
Canal 3	9,33	1,540771153	9,1	1,196715459
Canal 4	39,24	8,357505678	38,61	7,267396242
Canal 5	2,77	3,926628571	1,37	0,574628571
Canal 6	6,79	3,739692938	6,52	2,813346981
Canal 7	6,56	2,977777778	6,45	2,488888889
Promedio		5,537327318		4,120975383

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	125,58			
Humedad (%)	39,99840739			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	47,28	16,46978355	46,35	13,09601732
Canal 1	23,61	11,88	14,46	2,73
Canal 2	8,91	6,71132978	4,77	1,969878365
Canal 3	10,76	3,679900036	9,14	1,256551232
Canal 4	40,65	10,79727442	38,26	6,661779888
Canal 5	4,44	7,925085714	1,7	1,364742857
Canal 6	8,22	8,645895599	6,47	2,641801433
Canal 7	7,65	7,822222222	6,9	4,488888889
Promedio		9,241436415		4,276207498

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	115,92			
Humedad (%)	34,99827467			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	48,6	21,25835498	45,97	11,71748918
Canal 1	28,23	16,5	12,93	1,2
Canal 2	14,88	13,54864015	3,62	0,652808528
Canal 3	12,7	6,581935023	9,25	1,421099607
Canal 4	43,09	15,01928557	37,92	6,073466859
Canal 5	5,89	11,3968	1,32	0,454914286
Canal 6	9,58	13,31193449	6,39	2,367328557
Canal 7	7,48	7,066666667	6,58	3,066666667
Promedio		13,08545211		3,36922171

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	107,64			
Humedad (%)	29,99814195			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	53,98	40,77541126	45,97	11,71748918
Canal 1	43,53	31,8	13,1	1,37
Canal 2	35,31	36,94667213	3,59	0,618450185
Canal 3	19,26	16,39500179	9,46	1,735237415
Canal 4	47,95	23,42870122	37,52	5,381333884
Canal 5	11,37	24,51748571	1,35	0,526742857
Canal 6	15,91	35,02960082	6,39	2,367328557
Canal 7	10,64	21,11111111	6,98	4,844444444
Promedio		28,750498		3,570128315

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	100,47			
Humedad (%)	25,0024883			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	61,38	67,6204329	47,42	16,97766234
Canal 1	61,34	49,61	14,4	2,67
Canal 2	54,4	58,81003143	5,4	2,691403581
Canal 3	30,8	33,65762228	9,35	1,57068904
Canal 4	57,87	40,59359901	38,03	6,263803428
Canal 5	20,6	46,61674286	1,85	1,723885714
Canal 6	25,94	69,44163767	6,6	3,087819857
Canal 7	16,82	48,57777778	7,29	6,222222222
Promedio		51,86598049		5,150935772

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	94,19			
Humedad (%)	20,00212337			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	67,58	90,11220779	45,89	11,42727273
Canal 1	86,92	75,19	15,68	3,95
Canal 2	77,97	85,80423671	6,33	3,756512232
Canal 3	44,37	53,95690825	9,29	1,48093538
Canal 4	70,23	61,98050795	37,8	5,865826967
Canal 5	30,1	69,36245714	2,04	2,1788
Canal 6	37,73	109,8920778	7,06	4,666038895
Canal 7	27,64	96,66666667	6,85	4,266666667
Promedio		80,37063279		4,699006608

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	88,65			
Humedad (%)	15,00282008			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	71,78	105,3485714	50,41	27,82450216
Canal 1	111,3	99,57	21,88	10,15
Canal 2	93,46	103,5445948	13,18	11,60166735
Canal 3	59,91	77,20310603	9,56	1,884826848
Canal 4	81,88	82,13888086	38,51	7,094362998
Canal 5	38,09	88,4928	3,03	4,549142857
Canal 6	43,97	131,3009621	8,3	8,920368475
Canal 7	30,25	108,2666667	7,86	8,755555556
Promedio		99,48319774		10,09755328

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	83,72			
Humedad (%)	9,997611085			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	74,81	116,3405195	51,88	33,15722944
Canal 1	146,03	134,3	28,53	16,8
Canal 2	119,96	133,8944649	19,42	18,74820282
Canal 3	82,99	111,728347	11,46	4,727026062
Canal 4	97,09	108,4572372	38,87	7,717282676
Canal 5	54,4	127,5436	6,12	11,94748571
Canal 6	60,96	189,5921392	12,93	24,80548618
Canal 7	39,9	151,1555556	13,18	32,4
Promedio		134,1264829		18,78783911

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	79,32			
Humedad (%)	5,005042864			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	76,18	121,3104762	71,76	105,2760173
Canal 1	145,53	133,8	127,94	116,21
Canal 2	119,2	133,0240536	79,88	87,99171792
Canal 3	99,49	136,4106034	29,3	31,41378079
Canal 4	105,4	122,8362998	57,64	40,19562255
Canal 5	53,25	124,7901714	12,8	27,94131429
Canal 6	72,54	229,322088	22,68	58,25686796
Canal 7	43,48	167,0666667	17,31	50,75555556
Promedio		146,0700449		64,75510955

Tablas B.5: Mediciones muestra 4

MUESTRA 4

15 dBm

MUESTRA SECA				
Peso (g)	75,45			
Humedad (%)	0			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	81,85	141,8795671	70,99	102,482684
Canal 1	160,34	148,61	117,97	106,24
Canal 2	136,57	152,9175345	105,73	117,5971573
Canal 3	116,89	162,4391646	86,52	117,008854
Canal 4	122,84	153,0132975	101,49	116,0707
Canal 5	66,63	156,8257143	51,31	120,1452571
Canal 6	47,88	144,715824	48,45	146,6714432
Canal 7	41,24	157,1111111	37,92	142,3555556
Promedio		152,1890266		121,0714564

MUESTRA SATURADA				
Peso (g)	134,62			
Humedad (%)	43,95335017			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	47,32	16,61489177	46,79	14,69220779
Canal 1	20,41	8,68	13,31	1,58
Canal 2	8,24	5,94399344	4,33	1,465955993
Canal 3	9,31	1,510853267	8,95	0,97233131
Canal 4	39,12	8,149865786	38,32	6,765599835
Canal 5	2,31	2,825257143	1,3	0,407028571
Canal 6	7,15	4,97482088	6,49	2,710419652
Canal 7	6,71	3,644444444	6,41	2,311111111
Promedio		6,543015842		3,863081783

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	125,75			
Humedad (%)	40			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	47,91	18,7552381	46,45	13,45878788
Canal 1	23,71	11,98	13,41	1,68
Canal 2	7,99	5,65767391	4,22	1,3399754
Canal 3	10,59	3,425598001	9,21	1,361263834
Canal 4	40,38	10,33008466	38,3	6,730993186
Canal 5	3,57	5,842057143	1,37	0,574628571
Canal 6	8,22	8,645895599	6,35	2,230092119
Canal 7	8,13	9,955555556	6,73	3,733333333
Promedio		9,32401287		3,88863429

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	116,08			
Humedad (%)	35,00172295			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	47,95	18,90034632	45,82	11,17333333
Canal 1	29,16	17,43	13,26	1,53
Canal 2	15,13	13,83495968	3,81	0,870411371
Canal 3	13,01	7,045662263	9,14	1,256551232
Canal 4	42,52	14,03299608	37,94	6,108073508
Canal 5	6,29	12,35451429	1,34	0,5028
Canal 6	10,53	16,5712999	6,41	2,435946776
Canal 7	8,28	10,62222222	6,52	2,8
Promedio		13,84900009		3,334639527

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	107,79			
Humedad (%)	30,00278319			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	51,42	31,48848485	45,95	11,64493506
Canal 1	41,52	29,79	13,89	2,16
Canal 2	33,02	34,32398524	4,58	1,752275523
Canal 3	18,1	14,65976437	9,25	1,421099607
Canal 4	47,88	23,30757795	37,73	5,744703696
Canal 5	11,65	25,18788571	1,47	0,814057143
Canal 6	17,4	40,14165814	6,29	2,024237462
Canal 7	12,15	27,82222222	6,75	3,822222222
Promedio		28,34019731		3,67294134

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	100,6			
Humedad (%)	25			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	58,96	58,84138528	46,41	13,31367965
Canal 1	59,49	47,76	15,43	3,7
Canal 2	56,8	61,55869892	7,13	4,672734727
Canal 3	31,7	35,00392717	9,33	1,540771153
Canal 4	59,47	43,36213091	37,75	5,779310345
Canal 5	22,56	51,30954286	1,89	1,819657143
Canal 6	28,78	79,18542477	6,64	3,225056295
Canal 7	20,28	63,95555556	6,73	3,733333333
Promedio		55,12208318		4,723067831

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	94,31			
Humedad (%)	19,99787933			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	58,92	58,69627706	47,7	17,99341991
Canal 1	71,06	59,33	18,54	6,81
Canal 2	60,62	65,93366134	9,19	7,032007653
Canal 3	32,01	35,46765441	9,21	1,361263834
Canal 4	63,9	51,02750361	37,8	5,865826967
Canal 5	24,13	55,06857143	2,63	3,591428571
Canal 6	36,47	105,56913	8,05	8,062640737
Canal 7	27,68	96,84444444	7,08	5,288888889
Promedio		65,99215528		7,000684571

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	88,76			
Humedad (%)	14,99549347			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	67,96	91,49073593	53,14	37,72813853
Canal 1	110,53	98,8	24,07	12,34
Canal 2	87	96,14609813	15,98	14,80844608
Canal 3	53,87	68,16790432	10,68	3,56022849
Canal 4	77,57	74,68114805	39,2	8,288292381
Canal 5	35,57	82,4592	4,18	7,302571429
Canal 6	46,73	140,7702764	9,48	12,9688434
Canal 7	31,61	114,3111111	8,37	11,02222222
Promedio		95,85330924		13,50234282

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	83,83			
Humedad (%)	9,996421329			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	74,5	115,2159307	59,64	61,30822511
Canal 1	149,54	137,81	26,55	14,82
Canal 2	118,93	132,7148285	17,01	15,98808255
Canal 3	88,48	119,9408069	15,24	10,3815066
Canal 4	97,09	108,4572372	40,57	10,65884782
Canal 5	53,2	124,6704571	6,68	13,28828571
Canal 6	66,95	210,1432958	13,12	25,45735926
Canal 7	39,77	150,5777778	13,54	34
Promedio		137,4412918		23,23778838

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	79,42			
Humedad (%)	4,998740871			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	76,49	122,4350649	77,08	124,5754113
Canal 1	151,19	139,46	104,35	92,62
Canal 2	127,03	141,9915812	64,2	70,033757
Canal 3	103,31	142,1249197	35,67	40,94262763
Canal 4	111,45	133,3048111	57,22	39,46888292
Canal 5	57,85	135,8038857	19,95	45,06045714
Canal 6	62,58	195,1502149	30,75	85,94431934
Canal 7	41,61	158,7555556	24,62	83,24444444
Promedio		146,1282541		72,73623747

Tablas B.6: Mediciones muestra 5

MUESTRA 5

15 dBm

MUESTRA SECA				
Peso (g)	75,45			
Humedad (%)	0			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	82,46	144,0924675	69,66	97,6578355
Canal 1	157,06	145,33	132,83	121,1
Canal 2	135,5	151,6920869	116,28	129,6798415
Canal 3	114,84	159,3725812	95,16	129,9333809
Canal 4	122,42	152,2865579	104,2	120,7599009
Canal 5	64,78	152,3962857	55,05	129,0998857
Canal 6	47,27	142,6229683	47,53	143,5150051
Canal 7	40,86	155,4222222	38,07	143,0222222
Promedio		150,4018962		126,846009

MUESTRA SATURADA				
Peso (g)	134,73			
Humedad (%)	43,99910933			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	47,19	16,14329004	46,86	14,94614719
Canal 1	19,61	7,88	13,1	1,37
Canal 2	9,61	7,513024464	3,89	0,96203362
Canal 3	9,52	1,824991075	9,02	1,077043913
Canal 4	39,62	9,015032005	38,32	6,765599835
Canal 5	2,12	2,370342857	1,3	0,407028571
Canal 6	7,1	4,803275333	6,56	2,950583419
Canal 7	6,5	2,711111111	6,43	2,4
Promedio		6,532633361		3,859804568

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	125,75			
Humedad (%)	40			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	46,62	14,07549784	46,52	13,71272727
Canal 1	22,89	11,16	14,25	2,52
Canal 2	8,66	6,42501025	4,75	1,946972803
Canal 3	11,01	4,053873617	9,16	1,286469118
Canal 4	41,58	12,40648358	38,17	6,506049969
Canal 5	5,11	9,529257143	1,51	0,909828571
Canal 6	9,46	12,90022518	6,41	2,435946776
Canal 7	8,3	10,71111111	6,66	3,422222222
Promedio		10,15768234		4,092527092

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	116,08			
Humedad (%)	35,00172295			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	46,71	14,40199134	45,36	9,504588745
Canal 1	28,94	17,21	13,49	1,76
Canal 2	15,34	14,07546809	4,12	1,225447588
Canal 3	12,32	6,01349518	9,12	1,226633345
Canal 4	40,95	11,31637415	37,44	5,242907289
Canal 5	4,88	8,978571429	1,43	0,718285714
Canal 6	9,86	14,27258956	6,29	2,024237462
Canal 7	7,78	8,4	6,54	2,888888889
Promedio		11,83356122		3,073873629

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	107,79			
Humedad (%)	30,00278319			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	50,74	29,02164502	45,87	11,35471861
Canal 1	43,64	31,91	13,85	2,12
Canal 2	32,75	34,01476015	4,67	1,855350554
Canal 3	18,58	15,37779365	9,23	1,391181721
Canal 4	48,58	24,51881065	37,86	5,969646913
Canal 5	11,04	23,72737143	1,58	1,077428571
Canal 6	17,4	40,14165814	6,31	2,092855681
Canal 7	11,77	26,13333333	6,79	4
Promedio		28,10567155		3,732647757

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	100,6			
Humedad (%)	25			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	56,55	50,09861472	46,03	11,93515152
Canal 1	61,48	49,75	16,02	4,29
Canal 2	54,97	59,46283996	6,85	4,352056854
Canal 3	29,51	31,7279186	9,35	1,57068904
Canal 4	59,24	42,96415445	37,82	5,900433616
Canal 5	20,26	45,80268571	2,21	2,585828571
Canal 6	26,99	73,04409417	6,77	3,671074719
Canal 7	17,72	52,57777778	6,66	3,422222222
Promedio		50,67851067		4,715932067

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	94,31			
Humedad (%)	19,99787933			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	60,87	65,77030303	45,83	11,20961039
Canal 1	78,76	67,03	17,49	5,76
Canal 2	67,14	73,40087468	9,04	6,860215935
Canal 3	34,33	38,93812924	9,27	1,451017494
Canal 4	64,74	52,48098286	37,82	5,900433616
Canal 5	22,51	51,18982857	2,27	2,729485714
Canal 6	33,17	94,24712385	7,55	6,347185261
Canal 7	24,62	83,24444444	6,89	4,444444444
Promedio		65,78771083		5,587799107

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	88,76			
Humedad (%)	14,99549347			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	71,45	104,1514286	53,03	37,32909091
Canal 1	113,3	101,57	25,01	13,28
Canal 2	92,49	102,433675	17,26	16,27440208
Canal 3	68,04	89,36472688	11,31	4,502641914
Canal 4	82,46	83,14247367	38,99	7,924922569
Canal 5	38,42	89,28291429	4,54	8,164514286
Canal 6	48,3	146,1568066	10,43	16,2282088
Canal 7	35,13	129,9555556	9,38	15,51111111
Promedio		105,7571976		14,90186146

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	83,83			
Humedad (%)	9,996421329			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	70,08	99,18147186	59,32	60,14735931
Canal 1	142,6	130,87	38,57	26,84
Canal 2	109,85	122,3157032	25,88	26,14669947
Canal 3	70,76	93,43355944	14,52	9,304462692
Canal 4	93,06	101,4839975	41,64	12,51030353
Canal 5	45,17	105,4443429	5,32	10,03205714
Canal 6	55,09	169,4526919	11,39	19,52188332
Canal 7	36,09	134,2222222	11,12	23,24444444
Promedio		119,5504986		23,46840124

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	79,42			
Humedad (%)	4,998740871			
Canales	Lado 1		Lado 2	
	Sin Acondicionar	Acondicionado	Sin Acondicionar	Acondicionado
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Canal 0	74,83	116,4130736	69,35	96,53324675
Canal 1	148,81	137,08	129,91	118,18
Canal 2	119,65	133,5394287	86,33	95,37876179
Canal 3	99,74	136,7845769	35,04	40,00021421
Canal 4	109,6	130,1036961	63,46	50,26615734
Canal 5	54,63	128,0942857	19,25	43,38445714
Canal 6	73,23	231,6894166	30,12	83,78284545
Canal 7	41,04	156,2222222	21,41	68,97777778
Promedio		146,2408375		74,56293256

ANEXO C: Mediciones lanza PR2/4 para muestras de cartón

Tablas C.1: Calibración

CALIBRACIÓN

AIRE

SIN MUESTRA				
Peso (g)				
Humedad (%)	0			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	71,36	71,36	71,36	71,36
Sensor Acondicionado	0	0	0	0

AGUA

SIN MUESTRA				
Peso (g)				
Humedad (%)	100%			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	1075	1075	1075	1075
Sensor Acondicionado	1003,64	1003,64	1003,64	1003,64

Tablas C.2: Muestra 6

MUESTRA 6

MUESTRA SECA				
Peso (g)	71,11			
Humedad (%)	0			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	113,87	113,22	113,02	113,37
Sensor Acondicionado	42,51	41,86	41,66	42,01

MUESTRA SATURADA				
Peso (g)	129,1			
Humedad (%)	44,9186677			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	347,9	341,5	312,7	334,0333333
Sensor Acondicionado	276,54	270,14	241,34	262,6733333

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	118,52			
Humedad (%)	40,00168748			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	302	297,9	291,6	297,1666667
Sensor Acondicionado	230,64	226,54	220,24	225,8066667

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	109,4			
Humedad (%)	35			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	225,7	237	230,1	230,9333333
Sensor Acondicionado	154,34	165,64	158,74	159,5733333

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	101,59			
Humedad (%)	30,00295305			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	223,7	232,1	212,3	222,7
Sensor Acondicionado	152,34	160,74	140,94	151,34

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	94,81			
Humedad (%)	24,99736315			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	192,1	172,7	168,5	177,7666667
Sensor Acondicionado	120,74	101,34	97,14	106,4066667

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	88,89			
Humedad (%)	20,00224997			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	137,2	151,7	137,8	142,2333333
Sensor Acondicionado	65,84	80,34	66,44	70,87333333

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	83,66			
Humedad (%)	15,00119531			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	102,8	113,9	108,2	108,3
Sensor Acondicionado	31,44	42,54	36,84	36,94

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	79,01			
Humedad (%)	9,998734337			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	97,2	96,1	96,4	96,56666667
Sensor Acondicionado	25,84	24,74	25,04	25,20666667

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	74,85			
Humedad (%)	4,996659987			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	95,4	94,9	93,2	94,5
Sensor Acondicionado	24,04	23,54	21,84	23,14

Tablas C.3: Muestra 7

MUESTRA 7

MUESTRA SECA				
Peso (g)	71,48			
Humedad (%)	0			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	108	110,9	110,8	109,9
Sensor Acondicionado	36,64	39,54	39,44	38,54

MUESTRA SATURADA				
Peso (g)	128,99			
Humedad (%)	44,58485154			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	328,4	310,4	330,8	323,2
Sensor Acondicionado	257,04	239,04	259,44	251,84

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	119,13			
Humedad (%)	39,99832116			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	277,9	277,7	278,6	278,0666667
Sensor Acondicionado	206,54	206,34	207,24	206,7066667

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	109,97			
Humedad (%)	35,00045467			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	235	227	243	235
Sensor Acondicionado	163,64	155,64	171,64	163,64

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	102,11			
Humedad (%)	29,99706199			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	192	190	195	192,3333333
Sensor Acondicionado	120,64	118,64	123,64	120,9733333

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	95,31			
Humedad (%)	25,00262302			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	142,8	141,9	152,4	145,7
Sensor Acondicionado	71,44	70,54	81,04	74,34

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	89,35			
Humedad (%)	20			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	124,5	120,9	122,7	122,7
Sensor Acondicionado	53,14	49,54	51,34	51,34

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	84,09			
Humedad (%)	14,99583779			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	104,5	103,5	98,9	102,3
Sensor Acondicionado	33,14	32,14	27,54	30,94

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	79,42			
Humedad (%)	9,997481743			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	99,3	96,9	94,9	97,03333333
Sensor Acondicionado	27,94	25,54	23,54	25,67333333

MUESTRA HÚMEDA				
Peso (g)	75,24			
Humedad (%)	4,997341839			
Sensores	0°	120°	240°	Promedio
	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)	Voltaje(mV)
Sensor 4	94,3	93,8	93,5	93,86666667
Sensor Acondicionado	22,94	22,44	22,14	22,50666667

ANEXO D: Cálculo errores de aproximación

Tablas D.1: Errores Posición 1

POSICIÓN 1				
MUESTRA 1				
Voltaje (mV)	Humedad aproximada (%)	Humedad real (%)	Error relativo (%)	Error absoluto (g)
151,44	0,01	0	0,01	0,01
146,9	4,15	5	-0,85	-0,70
136,09	8,65	10	-1,35	-1,23
106,74	13,41	15	-1,59	-1,62
83,37	17,4	20	-2,6	-2,97
47	26,03	25	1,03	1,39
37,87	28,8	30	-1,2	-1,81
16,55	36,48	35	1,48	2,70
9,84	39,29	40	-0,71	-1,46
6,97	40,56	44	-3,44	-7,77

MUESTRA 2				
Voltaje (mV)	Humedad aproximada (%)	Humedad real (%)	Error relativo (%)	Error absoluto (g)
150,34	1,22	0	1,22	0,93
141,91	6,81	5	1,81	1,55
120,24	11,44	10	1,44	1,36
103,61	13,89	15	-1,11	-1,14
73,27	19,46	20	-0,54	-0,64
45,99	26,33	25	1,33	1,82
29,7	31,53	30	1,53	2,42
16,51	36,49	35	1,49	2,73
10,09	39,18	40	-0,82	-1,70
7,05	40,53	43,86	-3,47	-7,54

MUESTRA 3

Voltaje (mV)	Humedad aproximada (%)	Humedad real (%)	Error relativo (%)	Error absoluto (g)
152,87	-1,85	0	-1,85	-1,37
146,07	4,7	5	-0,3	-0,25
134,13	9,11	10	-0,89	-0,82
99,48	14,55	15	-0,45	-0,47
80,37	17,99	20	-2,01	-2,31
51,87	24,66	25	-0,34	-0,46
28,75	31,87	30	1,87	2,96
13,09	37,9	35	2,9	5,42
9,24	39,56	40	-0,44	-0,91
5,54	41,21	43,81	-2,6	-5,92

MUESTRA 4

Voltaje (mV)	Humedad aproximada (%)	Humedad real (%)	Error relativo (%)	Error absoluto (g)
152,19	-0,92	0	-0,92	-0,69
146,13	4,66	5	-0,34	-0,28
137,44	8,3	10	-1,7	-1,55
95,85	15,15	15	0,15	0,16
65,99	21,09	20	1,09	1,31
55,12	23,79	25	-1,21	-1,60
28,34	32,01	30	2,01	3,18
13,85	37,59	35	2,59	4,81
9,32	39,52	40	-0,48	-1,00
6,54	40,76	43,95	-3,19	-7,26

MUESTRA 5

Voltaje (mV)	Humedad aproximada (%)	Humedad real (%)	Error relativo (%)	Error absoluto (g)
150,4	1,16	0	1,16	0,89
146,24	4,59	5	-0,41	-0,34
119,55	11,54	10	1,54	1,46
105,76	13,56	15	-1,44	-1,47
65,79	21,14	20	1,14	1,37
50,68	24,99	25	-0,01	-0,01
28,11	32,09	30	2,09	3,31
11,83	38,44	35	3,44	6,48
10,16	39,15	40	-0,85	-1,76
6,53	40,76	44	-3,24	-7,37

Tablas D.2: Errores Posición 2

POSICION 2

MUESTRA 1

Voltaje (mV)	Humedad aproximada (%)	Humedad real (%)	Error relativo (%)	Error absoluto (g)
122,85	1,45	0	1,45	1,11
74,34	3,83	5	-1,17	-0,96
23,06	10,68	10	0,68	0,64
13,2	13,31	15	-1,69	-1,72
9,74	15,33	20	-4,67	-5,19
4,54	29,13	25	4,13	5,84
9,94	15,16	30	-14,84	-18,80
3,29	39,51	35	4,51	8,64
3,7	35,48	40	-4,52	-8,78
4,01	32,87	44	-11,13	-22,28

MUESTRA 2

Voltaje (mV)	Humedad aproximada (%)	Humedad real (%)	Error relativo (%)	Error absoluto (g)
119,26	1,56	0	1,56	1,20
65,1	4,6	5	-0,4	-0,33
28,3	9,61	10	-0,39	-0,36
11,69	13,99	15	-1,01	-1,04
5,56	23,88	20	3,88	4,82
4,31	30,65	25	5,65	8,22
3,98	33,11	30	3,11	5,03
3,23	40,16	35	5,16	10,03
3,73	35,21	40	-4,79	-9,33
3,74	35,13	43,86	-8,73	-18,13

MUESTRA 3

Voltaje (mV)	Humedad aproximada (%)	Humedad real (%)	Error relativo (%)	Error absoluto (g)
118,09	1,6	0	1,6	1,23
64,76	4,64	5	-0,36	-0,30
18,79	11,65	10	1,65	1,57
10,1	15,03	15	0,03	0,03
4,7	28,15	20	8,15	10,68
5,15	25,73	25	0,73	0,98
3,57	36,68	30	6,68	11,36
3,37	38,66	35	3,66	6,92
4,28	30,86	40	-9,14	-16,60
4,2	31,43	43,81	-12,38	-24,20

MUESTRA 4

Voltaje (mV)	Humedad aproximada (%)	Humedad real (%)	Error relativo (%)	Error absoluto (g)
121,07	1,5	0	1,5	1,15
72,74	3,95	5	-1,05	-0,87
23,24	10,64	10	0,64	0,60
13,5	13,19	15	-1,81	-1,85
7	19,36	20	-0,64	-0,75
4,72	28,03	25	3,03	4,24
3,67	35,75	30	5,75	9,64
3,33	39,08	35	4,08	7,77
3,89	33,84	40	-6,16	-11,71
3,86	34,09	43,95	-9,86	-20,15

MUESTRA 5

Voltaje (mV)	Humedad aproximada (%)	Humedad real (%)	Error relativo (%)	Error absoluto (g)
126,85	1,34	0	1,34	1,02
74,56	3,81	5	-1,19	-0,98
23,47	10,59	10	0,59	0,56
14,9	12,71	15	-2,29	-2,32
5,59	23,76	20	3,76	4,65
4,72	28,03	25	3,03	4,24
3,73	35,21	30	5,21	8,66
3,07	41,97	35	6,97	13,94
4,09	32,25	40	-7,75	-14,38
3,86	34,09	44	-9,91	-20,26

Tablas D.3: Errores PR2/4

PR2/4

MUESTRA 6

Voltaje (mV)	Humedad aproximada (%)	Humedad real (%)	Error relativo (%)	Error absoluto (g)
42,01	18,66	0,00	18,66	16,32
23,14	5,44	5,00	0,44	0,35
25,21	7,82	10,00	-2,18	-1,87
36,94	16,51	15,00	1,51	1,51
70,87	24,36	20,00	4,36	5,13
106,41	27,82	25,00	2,82	3,71
151,34	32,19	30,00	2,19	3,28
159,57	33,06	35,00	-1,94	-3,17
225,81	40,92	40,00	0,92	1,85
262,67	46,09	44,92	1,17	2,79

MUESTRA 7

Voltaje (mV)	Humedad aproximada (%)	Humedad real (%)	Error relativo (%)	Error absoluto (g)
38,54	17,26	0	17,26	14,91
22,51	4,65	5	-0,35	-0,27
25,67	8,3	10	-1,7	-1,47
30,94	12,9	15	-2,1	-2,02
51,34	21,32	20	1,32	1,50
74,34	24,75	25	-0,25	-0,32
120,97	29,18	30	-0,82	-1,18
163,64	33,5	35	-1,5	-2,48
206,71	38,48	40	-1,52	-2,94
251,84	44,5	44,58	-0,08	-0,20