



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

ESTUDIO DE LA ESPECTROSCOPIA DIELÉCTRICA PARA LA MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN PRODUCTOS ALIMENTICIOS

Rodolfo Rodríguez-Arisméndiz

Piura, noviembre de 2017

FACULTAD DE INGENIERÍA

Doctorado en Ingeniería con Mención en Automatización, Control y
Optimización de Procesos

Rodríguez, R. (2017). *Estudio de la espectroscopía dieléctrica para la medición del contenido de humedad en productos alimenticios* (Tesis doctoral en Ingeniería con Mención en Automatización, Control y Optimización de Procesos). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](https://repositorio.institucional.pirhua.edu.pe/)

UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA



Estudio de la espectroscopia dieléctrica para la medición del contenido de humedad en productos alimenticios: desarrollo tecnológico aplicado al sector pesquero y agroindustrial

Tesis para optar el Grado de Doctor en Ingeniería con mención en Automatización, control y optimización de procesos 2011/2015

M. Sc. Rodolfo Rodríguez Arisméndiz

Asesor: Dr. Ing. William Ipanaqué Alama

Piura, noviembre 2017



UNIVERSIDAD DE PIURA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Tesis para optar el Grado de Doctor en Ingeniería con mención en
Automatización, control y optimización de procesos
2011/2015

**“ESTUDIO DE LA ESPECTROSCOPIA DIELECTRICA PARA
LA MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN
PRODUCTOS ALIMENTICIOS: DESARROLLO
TECNOLÓGICO APLICADO AL SECTOR PESQUERO Y
AGROINDUSTRIAL”**

Tesis de doctorado de

M. Sc. RODOLFO RODRÍGUEZ ARISMÉNDIZ

Miembros de El Jurado:

.....
Dr. Ing. Justo Oquelis
Presidente

.....
Dr. Ing. Edilberto Vásquez
Secretario

.....
Ph. D. Danny Scipión
Informante

.....
Dr. Ing. William Ipanaqué Alama
Asesor

A mis hermanas y hermanos por su cariño y apoyo.

A las memorias de mis queridos padres y de mi hermano Rolando.

A las memorias de los profesores Ramón Mugica, Rafael Estartús y Ben Balsley

Prólogo

En muchos procesos de transformación o fabricación se requiere medir el contenido de humedad (CH) del producto en varias etapas. Usualmente, esta medición es hecha fuera de línea (*off line*), pero hay varios procesos en los que se necesita se haga en línea (*on line*) y en tiempo real tal que el CH pueda usarse como parámetro de regulación en un control del proceso.

Esta investigación busca hacer una innovación tecnológica en la medición del CH para la industria regional y nacional mediante el estudio e implementación de una técnica que permita determinar dicho parámetro en forma instantánea. La técnica investigada es la Espectroscopia Dieléctrica (ED) que se basa en hacer atravesar radiofrecuencia, en el rango de las microondas, a través de un determinado espesor del producto para determinar indirectamente el CH.

En la región Piura, uno de los primeros proyectos donde se investigó y aplicó esta técnica de medición del CH fue en el proceso de elaboración de la harina de pescado en Paita. Esta tesis doctoral es parte de dicha investigación aplicada que ha tenido buenos resultados en la implementación de sistemas de medición, en la realización de tesis de pregrado, disertaciones y publicaciones. Este desarrollo tecnológico ha sido expuesto en reuniones científicas como IV Congreso de Ciencias del mar del Perú (IV CONCIMAR, 2014) y en el VII Congreso Internacional de Ingeniería Pesquera (CONIPESCA, 2015) realizados en Lima.

Además, se ha obtenido en propiedad intelectual industrial una patente de invención de un “Sistema para medir la humedad de una masa en una línea de proceso” expedida por 20 años a favor de la Universidad de Piura (UDEP) por el Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI) mediante resolución No. 000307-2015/DIN-INDECOPI del 31 de marzo de 2015 donde el autor de esta tesis es coautor de la mencionada patente.

Durante el desarrollo de esa tesis el autor tuvo una pasantía de seis meses en el “Laboratorio Telecom telemetría e alta frecuencia (TTHF)” de la “Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI)” en Lugano, Suiza, donde se simuló, con el software ANSYS, el patrón de radiación de varios tipos de antenas para aplicarlos como sensores de este sistema de medición.

Durante este trabajo de investigación se ha explorado la aplicación de esta técnica a otros productos importantes de la región como, por ejemplo, del sector agroindustrial, específicamente en los procesos del café y del cacao. En los laboratorios de Física General y de Sistemas Automáticos de Control de la Facultad de Ingeniería de la UDEP, se ha tomado como línea de investigación las diferentes aplicaciones que puede tener a esta técnica en la industria regional y nacional.

Quisiera expresar mi sincero reconocimiento y agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que han hecho posible el desarrollo de la presente investigación:

Al Dr. Ing William Ipanaqué por su asesoría, apoyo y colaboración constantes.

A los doctores Antonio Mabres, Gastón Cruz de la UDEP y al Ronald Woodman del Instituto Geofísico del Perú (IGP) por el apoyo brindado en los estudios e investigaciones realizados a lo largo de estos años.

Agradecimiento póstumo a los doctores Ramón Mugica y Ben Balsley de la Universidad de Colorado (CU) en Boulder, Colorado (USA) quienes me dieron la oportunidad de participar en sus proyectos e investigaciones y supieron conducirme en el quehacer científico.

A todas aquellas personas, colaboradores y colegas de la UDEP, especialmente a los integrantes de los Laboratorios de Física General y de Sistemas Automáticos de Control (SAC) que de una forma u otra forma han colaborado en el desarrollo de la presente investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) por el apoyo y respaldo brindado a través del programa CATEDRA y por el financiamiento de varios proyectos relacionados con la presente investigación.

A INNOVATEPERU por haber financiado varios de los proyectos en los que he intervenido ya sea como Coordinador General o como parte del equipo técnico y científico.

Resumen

En la presente investigación se estudia los principios electromagnéticos en los que se basa la Espectroscopia Dieléctrica (ED) como técnica no invasiva para la medición indirecta del Contenido de Humedad (CH) de sustancias sólidas no conductoras. El objetivo es innovar los métodos de medición y control del CH en algunos procesos industriales de la región y del país.

Se expone el desarrollo de las técnicas indirectas de medición del CH especialmente aquellas basadas en los principios electromagnéticos. Se comparan estas técnicas indirectas con las directas en las que la medición del CH se basa en la determinación de la cantidad de agua que tiene el producto.

Dentro de las técnicas indirectas se da énfasis al estudio de los principios electromagnéticos de la técnica de ED aplicada a la medición del CH de productos en polvo o granulados. Esta técnica se basa en la transmisión y recepción de radiofrecuencia (microondas) para determinar instantáneamente la constante dieléctrica (CD) del producto como una medida indirecta de su CH. Se presenta la configuración básica de un sistema de medición del CH basado en esta técnica.

También se describe la implementación, en la UDEP, de un prototipo de la técnica de ED para realizar pruebas de laboratorio. Así mismo se reporta la aplicación de esta técnica de medición en la industria regional. Un prototipo de medición basado en esta técnica se aplicó en el

proceso de elaboración de harina de pescado, específicamente después del proceso de prensado, donde al producto se le conoce como queque de prensa. Se propone extender la aplicación de esta técnica de medición al proceso de transformación de productos de la agroindustria regional como café y cacao.

Finalmente se presentan los resultados y las conclusiones de la investigación que, para el proceso de la harina de pescado, ha merecido obtener una patente de INDECOPI mediante resolución No. 000307-2015/DIN-INDECOPI del 31 de marzo de 2015 a favor de la UDEP.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1 Desarrollo de las técnicas de medición de humedad basadas en principios electromagnéticos	5
1.1. Definición de humedad	5
1.2. Medición del contenido de humedad en sólidos no metálicos.....	6
1.2.1. Técnicas de medición directa	6
1.2.1.1. Método termo-gravimétrico	6
1.2.1.2. Método químico	8
1.2.2. Técnicas de medición indirecta.....	8
1.2.2.1. Técnicas pasivas.....	9
1.2.2.2. Técnicas activas	9
1.3. Medición de humedad basada en principios electromagnéticos.....	11
1.4. Desarrollo de las técnicas de medición de humedad basada en principios electromagnéticos.....	12
1.5. Reciente desarrollo y aplicaciones en el Perú.....	16

Capítulo 2 Principios electromagnéticos de la espectroscopia dieléctrica para la medición del contenido de humedad en sólidos granulados	19
2.1. Ondas electromagnéticas y cantidades fundamentales del electromagnetismo.....	19
2.2. Parámetros dieléctricos de los materiales	20
2.2.1. Conductividad eléctrica (σ)	21
2.2.2. Permitividad eléctrica (ϵ).....	21
2.2.3. Permeabilidad magnética (μ)	22
2.3. Ecuaciones de Maxwell	23
2.4. Medios de propagación y su interacción con las ondas electromagnéticas	24
2.4.1. Medio sin pérdidas.....	25
2.4.1.1. Propagación de ondas EM en medios sin pérdidas.....	25
2.4.2. Medios con pérdidas	27
2.4.2.1. Propagación de las ondas EM en materiales dieléctricos con pérdidas	27
2.5. Resumen de las expresiones de la constante de propagación en distintos tipos de medio	30
2.6. Aproximaciones para dieléctricos de bajas pérdidas.....	32
2.7. Aplicación de estos principios en la espectroscopia dieléctrica para la medición del contenido de humedad	32
2.8. Propiedades dieléctricas de la molécula del agua.....	34
2.9. Mezcla dieléctrica.....	35

Capítulo 3 Configuración de un sistema de medición de contenido de humedad con espectroscopia dieléctrica	37
3.1. Ventajas de la medición del CH usando microondas	37
3.2. Consideraciones para la configuración de un sistema de medición	38
3.2.1. Unidad material	39
3.2.2. Unidad traductora o sensora	40
3.2.3. Unidad controladora	40

3.2.4.	Unidad procesadora de señales	40
3.2.5.	Unidad de visualización	41
3.2.6.	Unidad interface	41
3.3.	Configuración de un módulo de laboratorio de Espectroscopia Dieléctrica.....	41
3.3.1.	Determinación del contenido de humedad.....	42
3.3.2.	Medición de los parámetros de dispersión	43
3.3.3.	Analizador de redes.....	45
3.4.	Módulo de laboratorio de Espectroscopia Dieléctrica implementado en la UDEP.....	46
3.5.	Configuración de un sistema de medición en una línea de proceso	46
3.5.1.	Módulo Wave Tester.....	49
3.5.2.	Obtención de curvas de calibración	50
3.5.3.	Prototipo de sistema de medición de humedad en línea de proceso.....	50

Capítulo 4 Implementación de un módulo de espectroscopia dieléctrica para pruebas de laboratorio	53
4.1. Partes del módulo.....	53
4.1.1. Analizador de redes vectorial (VNA)	54
4.1.2. Generador de radiofrecuencias.....	54
4.1.3. Computadora y software	55
4.1.4. Antenas.....	55
4.1.5. Depósito porta-muestra	55
4.2. Diseño y material del depósito porta-muestra.....	55
4.3. Diseño y construcción de antenas	57
4.3.1. Antena espiral plana.....	57
4.3.2. Antena corneta	59
4.4. Guía de onda	60
4.4.1. Guía de onda rectangular	60
4.4.2. Diseño y construcción de una guía de onda de sección rectangular para 1.5GHz	61
4.5. Módulo de laboratorio implementado en UDEP.....	63

4.6. Procedimiento de pruebas y medición.....	64
---	----

Capítulo 5 Aplicación en la medición del contenido de humedad en la industria regional..... 67

5.1. Importancia de la industria de la harina de pescado.....	67
5.2. La materia prima y el producto final.....	68
5.3. Proceso de la harina de pescado.....	69
5.4. Implementación de un sistema de medición de humedad en el proceso de elaboración de la harina de pescado.....	69
5.4.1. Unidad material.....	70
5.4.2. Unidad sensora.....	70
5.4.3. Unidades controladora y procesadora.....	71
5.4.4. Unidad display o de visualización.....	71
5.4.5. Unidad interface.....	72
5.5. Acople de la unidad sensora al proceso de la harina de pescado en la PTC.....	72
5.6. Pruebas de medición en la planta de PTC y obtención de curvas de calibración.....	73
5.7. Sistema de medición implementado en la planta de PTC.....	75
5.8. Propuesta de aplicación en la agroindustria regional.....	76
5.9. Aplicación en el proceso del café.....	76
5.9.1. Pruebas de medición en café y obtención de curvas de calibración.....	78
5.10. Aplicación al proceso del cacao.....	81

Conclusiones..... 83

Bibliografía..... 87

ANEXO..... 91

Anexo 1. Patente de un “Sistema para medir la humedad de una masa en una línea de proceso”.....	93
---	----

Índice de Tablas

Tabla 1.	Resumen de los métodos de medición del CH	10
Tabla 2.	Métodos de medición de humedad	10
Tabla 3.	Cantidades fundamentales del Electromagnetismo	20
Tabla 4.	Parámetros dieléctricos para el vacío	23
Tabla 5.	Ecuaciones de Maxwell en sus formas diferencial, integral y fasores.....	24
Tabla 6.	Ecuaciones de Maxwell en forma diferencial para medios sin pérdidas no conductores libres de fuentes.....	25
Tabla 7.	Velocidad y constante de propagación para distintos tipos de medio.....	31
Tabla 8.	Expresiones para estimar las constantes de atenuación (α) y de fase (β) en un dieléctrico con pérdidas.....	31
Tabla 9.	Constantes dieléctricas (CD) de algunas sustancias y materiales.....	35
Tabla 10.	Datos y resultados del diseño de una guía de onda rectangular para 1.5GHz.....	62
Tabla 11.	Constante dieléctrica de queque de prensa a 1.5GHz.....	75
Tabla 12.	Valores de constantes dieléctricas (CD) para muestras de gramos de café de distinto CH.....	80
Tabla 13.	Promedio de las mediciones de CD y su desviación estándar	81

Índice de Figuras

Figura 1.	Pasos seguidos en laboratorio para la determinación del CH por el método termo-gravimétrico. Fuente: Elaboración propia, 2014.....	7
Figura 2.	Analizador de CH marca OHAUS. Fuente: [4].....	8
Figura 3.	Esquema de la técnica de Espectroscopia Dieléctrica.	13
Figura 4.	Andrzej W Kraszewski (1933-2006), pionero de la técnica de ED en el rango de las microondas. Fuente: [12].....	15
Figura 5.	Sistema de medición de contenido humedad implementado en una planta procesadora de harina de pescado en Paita-	16
Figura 6.	Representación de una onda electromagnética mostrando sus componentes eléctrica (rojo) y magnética (azul). La onda se propaga en dirección del eje z.....	20
Figura 7.	Comparación de los circuitos equivalentes de medios sin y con pérdidas y la forma como las ondas electromagnéticas se propagan en esos medios.....	30
Figura 8.	Izquierda: Esquema de volumen de una sustancia húmeda de espesor d. Derecha: Su circuito eléctrico equivalente a la propagación de OEM.....	33
Figura 9.	Izquierda: Estructura molecular del agua (Fuente: Lozano Teruel, J. A. 2012) [20]. Derecha: Comportamiento de la permitividad compleja del agua a diferentes frecuencias	35

Figura 10. Diagrama de bloques de un sistema de medición con técnica de ED.	39
Figura 11. Esquema básico de un sistema de medición de humedad que usa la técnica de la ED ilustrando las unidades de material, sensora, controladora y procesadora.	40
Figura 12. Esquema de un banco de prueba para la medición a nivel de laboratorio de la humedad en sustancias no conductoras.	41
Figura 13. Esquema de una red de dos puertos. (Izquierda): ondas incidentes (a1 y a2) y reflejadas (b1 y b2) en ambos puertos. (Derecha): Parámetros de dispersión (S) para esta red.	44
Figura 14. Esquema de la aplicación de la técnica de ED en una línea de proceso. La unidad sensora se adapta al proceso y las otras unidades se ensamblan en un solo contenedor.....	47
Figura 15. Adecuación de una sustancia para que tenga un espesor uniforme: (izquierda) llenando una caja porta-muestras de sección rectangular y (derecha) en una banda transportadora. Fuente: [26].....	48
Figura 16. Módulo Wave Tester.....	49
Figura 17. Sistema de medición de CH con técnica ED basado en el módulo WT aplicado en el proceso de elaboración de harina de pescado (Foto: Rodolfo Rodríguez, 2012).	51
Figura 18. Panel frontal del analizador de redes vectorial (HP 8753C).....	54
Figura 19. Panel frontal del generador de radiofrecuencia Agilent modelo N5181A.....	54
Figura 20. Diseño del depósito porta muestras en forma de paralelepípedo con dos guías de ondas como antenas emisora y receptora.	56
Figura 21. Parámetros de diseño de una antena espiral plana de un brazo ([31] Balanis, C. A., 2005, p. 615).	58
Figura 22. Izquierda: Antena espiral plana de dos dipolos para 1.5GHz hecha en placa de circuito impreso. Derecha: Patrón de radiación en 2D.	58

Figura 23. Formas de antenas cornetas de sección rectangular, piramidal y cónica.	59
Figura 24. Izquierda: Esquema de las dimensiones de una guía de onda de sección rectangular. Derecha: Esquema de ubicación del punto de alimentación en una guía de onda	61
Figura 25. Izquierda: Guía de onda de sección rectangular para 1.5 GHz construida de láminas de aluminio. Derecha: Patrón de radiación en 3D de la guía de onda	62
Figura 26. Diagrama de conexiones del VNA para pruebas de laboratorio.....	63
Figura 27. Módulo de ED para pruebas de laboratorio implementado en la UDEP	64
Figura 28. Izquierda: Anchoqueta Blanca y Anchoqueta Negra (izquierda) usadas como materias primas en la elaboración de la harina de pescado (derecha).	68
Figura 29. Cadena de valor de la harina de pescado.	69
Figura 30. Planta del proceso de elaboración de harina de pescado de Pesquera Tierra Colorada (PTC) en Paita, Piura.	69
Figura 31. Diagrama de bloque de la implementación del sistema de medición del CH después de la etapa de prensado con alternativa de un control PID en el prensado.	70
Figura 32. Izquierda: Diseño de unidad de sensado, depósito porta-muestra y antenas. Derecha: Unidad de sensado instalada en la planta de elaboración de harina de pescado de PTC. Se muestra al depósito porta-muestras llenado con queque de prensa (unidad material).	71
Figura 33. Partes del sistema de medición de CH implementado en la elaboración de la harina de pescado	72
Figura 34. Izquierda: Diseño de depósito porta-muestras. Derecha: Acoplado al chute	73
Figura 35. Curvas de calibración (CH vs CD) para la Merluza y para la Anchoqueta	74
Figura 36. Sistema de medición del CH implementado en la planta de elaboración de harina de pescado de Pesquera Tierra Colorada en Paita.....	75

Figura 37. Esquema básico de la cadena productiva de productos agroalimenticios	76
Figura 38. Etapas del beneficio del café y propuesta de medición del CH.	77
Figura 39. Aplicación de un prototipo de sistema de ED a la medición del CH en muestras de café.	78
Figura 40. Muestras de granos de café secándose en un horno y pesándose en el Laboratorio de Suelos de UDEP.	79
Figura 41. Determinación de la CD con el prototipo en una muestra de granos de café con CH de 37.01%	79
Figura 42. Curva de calibración (CH vs CD) para granos de café proveniente de la zona de Coyona, Canchaque.....	80
Figura 43. Secado al aire libre de cacao en cáscara en la planta de la Asociación de Productores de Cacao, (ASPROBO) en Buenos Aires, Morropón.	82
Figura 44. Etapas del beneficio del cacao y propuesta de medición del CH.	82

Nomenclatura

Caracteres latinos

B	Densidad de Flujo Magnético
CH_h	Contenido de Humedad sobre base húmeda
CH_s	Contenido de Humedad sobre base seca
D	Densidad de Flujo Eléctrico
E	Intensidad de Campo Eléctrico
J	Densidad de volumen de corriente eléctrica
H	Intensidad de Campo Magnético
T	Temperatura
V	Volumen
m_s	Masa seca
m_a	Masa de agua
d	Espesor
f	Frecuencia
k	Numero de onda
v	Velocidad

Caracteres griegos

α	Constante atenuación
β	Constante de fase
γ	Constante de propagación
ϵ	Permitividad eléctrica
ϵ'	Parte real de la permitividad eléctrica
ϵ''	Parte imaginaria de la permitividad eléctrica
ϵ_r	Permitividad eléctrica relativa
λ	Longitud de onda
λ_c	Longitud de onda de corte
λ_g	Longitud de onda de la guía de onda
μ	Permeabilidad magnética
μ'	Parte real de la permeabilidad magnética
μ''	Parte imaginaria de la permeabilidad magnética
μ_r	Permeabilidad magnética relativa
ρ	Densidad
σ	Conductividad eléctrica
ϕ	Ángulo de fase
φ	Desfase
ω	Frecuencia angular del campo eléctrico

Constantes

Permitividad del espacio libre: $\epsilon_0 = (1/36\pi) \times 10^{-9}$ [F/m]

Permeabilidad del espacio libre: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]

Velocidad de la luz en el vacío: $c_0 = 3 \times 10^8$ [m/s]

Pi: $\pi = 3.1416$

Simbología de operadores y funciones

\times	Producto vectorial
\bullet	Producto escalar
\int_C	Integral de línea
\int_S	Integral de superficie
$u(z, t)$	Función dependiente de la variable z y del tiempo t

$\frac{d}{dt}$	Operador derivada en el tiempo
$\frac{\partial}{\partial t}$	Operador derivada parcial en el tiempo
∇	Operador gradiente
∇^2	Operador Laplaciano
$\nabla \times$	Operador divergencia
$\nabla \bullet$	Operador rotacional

Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing Materials
CH	Contenido de Humedad
CD	Constante dieléctrica
ED	Espectroscopia Dieléctrica
EHF	Extrema alta frecuencia
INDECOPI	Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la protección de la protección intelectual.
IR	Infrarrojo
OEM	Onda Electromagnética
RF	Radiofrecuencia
RMN	Resonancia magnética
VNA	Analizador de redes vectorial
WT	Wave Tester
SHF	Super alta frecuencia
UDEP	Universidad de Piura.
UHF	Ultra alta frecuencia

Introducción

De las muchas aplicaciones que tienen las ondas electromagnéticas en el rango de radiofrecuencias (3Hz a 300GHz) las más conocidas son, sin duda, las telecomunicaciones y los sistemas de detección remota como los radares. Sin embargo, hay otras importantes aplicaciones cuyas técnicas han sido desarrolladas durante el siglo XX que son poco conocidas y aplicadas en nuestro medio. Una de estas es la técnica de medición no invasivas, es decir, técnica que realizan una medición sin tener contacto físico con el producto. Esto es posible gracias a las propiedades de las ondas electromagnéticas y su interacción con las sustancias.

En el presente trabajo se estudian los principios electromagnéticos y el desarrollo de una de estas técnicas de medición aplicada a la determinación instantánea del contenido de humedad (CH) de sustancias dieléctricas. En este tipo de sustancias se incluyen a muchos productos alimenticios como harinas, cereales y productos agroindustriales granulados. Esta técnica es la Espectroscopia Dieléctrica (ED)

El CH en varios productos es un parámetro importante, pues de su nivel depende la durabilidad, calidad y precio del producto. Por esto conocer este parámetro es esencial en muchos procesos para optimizar el consumo de energía y la gestión ecológica del proceso de producción. Solamente un rápido y preciso sistema de medición de CH aplicado en línea del proceso hace posible una producción de calidad a bajo costo. La técnica de ED aplicada en el rango de las microondas (UHF, SHF y EHF)

es capaz de hacer una rápida y precisa medición de dicho parámetro.

La técnica basada en la emisión y recepción de radiofrecuencias que usa la ED tuvo gran desarrollo en Europa y Estados Unidos en la década de los 1980's. Andrzej W. Kraszewski (1933-2006), pionero de este desarrollo, aplicó esta técnica de medición en asociación, desde 1987, con el "Agricultural Research Service of the U.S. Department of Agriculture (USDA), en Athens, Georgia. Últimamente se ha explorado diversas aplicaciones de esta técnica en la determinación de las propiedades dieléctricas de productos agrícolas y alimenticios como, maíz, sorgo, maní, pasas y cebolla.

La principal ventaja de esta técnica de medición no invasiva es la determinación casi instantánea del valor del CH. Esto permite usar a este parámetro como regulador en la implementación de un control de procesos.

Una de las primeras aplicaciones de esta técnica fue en la determinación de la CD de líquidos y de algunos sólidos homogéneos no conductores. Luego se extendió su aplicación a productos alimenticios siendo la determinación del CH en estos una de las aplicaciones más importantes. En el primer capítulo se describe este desarrollo ocurrido principalmente en el siglo XX. Se comparan los métodos directos e indirectos de la determinación del CH.

En el segundo capítulo se exponen los principios del electromagnetismo que hacen posible la ED como una técnica no invasiva en la determinación indirecta del CH en muchas sustancias.

En el tercer capítulo se da conocer la configuración básica de un sistema de medición del CH basado en esta técnica conformado por seis principales partes o unidades: material, sensora, controladora, procesadora, visualización e interface.

En el cuarto capítulo se presenta la implementación de un módulo de ED para pruebas a nivel de laboratorio. Parte principal de este módulo es un analizador de redes vectorial (VNA) para determinar los parámetros de dispersión llamados también parámetros S.

En el quinto capítulo se expone la implementación de un sistema de medición en el proceso de elaboración de la harina de pescado, específicamente en el queque de prensa. Asimismo, se propone extender la aplicación este sistema de medición en los procesos del café y del cacao, antes y después de la etapa de secado de estos productos.

Capítulo 1

Desarrollo de las técnicas de medición de humedad basadas en principios electromagnéticos

En muchos productos alimenticios el CH juega un rol importante. Por ejemplo, harinas y cereales como arroz, trigo, maíz, cacao, café, etc., deben secarse hasta un determinado nivel de humedad antes de ser procesados, almacenados o comercializados pues influye en su durabilidad, calidad y precio. Es por ello que la medición de este parámetro, en muchos procesos, debe realizarse con rapidez y precisión. En las últimas décadas se han desarrollado técnicas, descritas en este capítulo, que tienen estas características. Algunas de estas técnicas se basan en principios electromagnéticos.

1.1. Definición de humedad

Humedad (del latino *humiditas*) se define como el agua absorbida en un sólido o disuelta en un gas. La cantidad de agua absorbida en un sólido no metálico, llamada más propiamente CH, se cuantifica relacionando la masa de agua (m_a) absorbida con la masa de la sustancia seca (m_s) según las siguientes expresiones [1]:

CH sobre base húmeda (CH_h), en tanto por ciento de masa, es determinada mediante la expresión:

$$CH_h(\%) = \frac{m_a}{m_s + m_a} \times 100, \quad (1.1)$$

donde m_a es la masa del agua absorbida en un sólido y m_s es la masa del sólido seco en que está absorbida el agua.

CH sobre base seca (CH_s), en tanto por ciento de masa, es determinada mediante la expresión:

$$CH_s(\%) = \frac{m_a}{m_s} \times 100. \quad (1.2)$$

Para este estudio interesa cuantificar el CH de sólidos no metálicos, como lo son varios productos alimenticios granulados, triturados o en polvo (cereales y granos).

1.2. Medición del contenido de humedad en sólidos no metálicos

Las técnicas de medición del CH en sólidos no metálico se clasifican en dos grupos: (a) directas e (b) indirectas [2].

1.2.1. Técnicas de medición directa

Las técnicas de medición directa siguen procedimientos para determinar la masa de agua (m_a) contenida en la sustancia. Esta determinación se puede hacer por métodos termo-gravimétricos o por métodos químicos:

1.2.1.1. Método termo-gravimétrico

Este es el método tradicionalmente usado en la determinación del CH de un producto. Los procedimientos para esta determinación están establecidos por las normas ASTM e INDECOPI [3]. La masa de agua contenida es determinada por secado (deshidratación) de la sustancia húmeda siguiendo los pasos ilustrados en el diagrama de la Figura 1 y aplicando las ecuaciones 1.1 y 1.2.

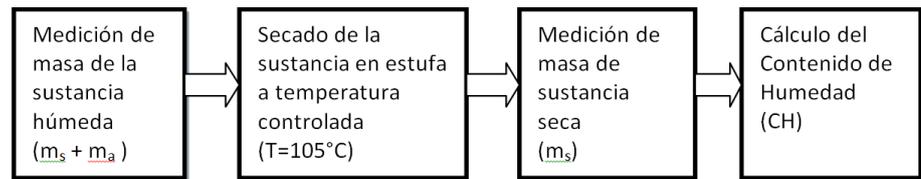


Figura 1. Pasos seguidos en laboratorio para la determinación del CH por el método termo-gravimétrico. Fuente: Elaboración propia, 2014.

Este método tiene la ventaja de ser simple, barato, y no depende del tipo de producto, pero tiene la desventaja de ser lento, tardándose incluso horas en la deshidratación. Se aplica principalmente en productos alimenticios y agrícolas, como los cereales. Dado que no es posible distinguir la pérdida de masa por evaporación de agua y de otros constituyentes volátiles (aceites, alcoholes, solventes orgánicos, etc.) durante el secado, puede tenerse una determinación del CH en la que la diferencia de peso no sea solo debida al agua [4].

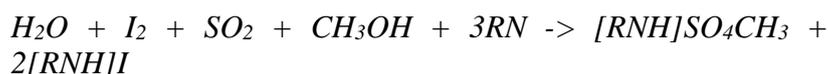
En las últimas décadas se han diseñado, construido y comercializado dispositivos portátiles llamados Analizadores de CH que se basan en este método. Están conformados por una balanza digital de precisión y un calentador eléctrico que irradia radiación infrarroja (IR) para secar una pequeña muestra del producto. La masa de la muestra húmeda se va midiendo continuamente. Estos equipos tardan alrededor de una hora en la determinación del CH dependiendo del tipo de producto. Son muy usados en las plantas industriales para medición fuera de línea [4]. Un modelo de estos dispositivos se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Analizador de CH marca OHAUS. Fuente: [4]

1.2.1.2. Método químico

En este método la masa de agua contenida en una sustancia se determina convirtiéndola, por reacción química, en un producto cuantificable. La titulación Karl Fisher es el método químico más empleado. Se trata de un procedimiento de análisis químico basado en la oxidación de dióxido de azufre con yodo en una solución de hidróxido metálico en la que tiene lugar la siguiente reacción química:



Es un método de alta precisión y aplicable a sustancias con muy baja humedad, pero debe llevarse a cabo en laboratorio. Fue ideado en 1935 por el químico alemán Karl Fisher (1918 – 1963).

La aplicación de estos métodos directos (termo gravimétrico y químico) para la medición del CH en granos y semillas es laboriosa debido al largo tiempo de secado y a los procedimientos de laboratorio que hay que seguir para determinar la masa de agua contenida en la muestra.

1.2.2. Técnicas de medición indirecta

En las técnicas de medición indirecta se mide algún parámetro de la sustancia que cambia significativamente con el CH.

Generalmente, se escogen parámetros eléctricos de la sustancia debido a que estos se pueden medir casi instantánea mediante dispositivos electrónicos. En el apartado 1.4 se expone el desarrollo de estas técnicas basadas en principios electromagnéticos. Estas técnicas indirectas pueden ser pasivas o activas:

1.2.2.1. Técnicas pasivas

En estas técnicas se mide la variación de un parámetro eléctrico o magnético con el CH de la sustancia. Estos parámetros, como por ejemplo la capacidad y la resistencia eléctrica, son usados como parte de sistemas electrónicos en los que la sustancia húmeda actúa como material dieléctrico en algún componente del sistema [2]. La variación del valor del componente electrónico con el CH permite la determinación de este parámetro.

Muchas veces, en estas técnicas, la sustancia húmeda es usada como parte de un componente electrónico (resistencia, capacitancia, inductancia, etc.) de un circuito electrónico resonante como aquel reportado por John King en 1922 [5].

1.2.2.2. Técnicas activas

Los métodos activos se basan en la emisión y recepción de ondas de radiofrecuencia, principalmente del rango de las microondas, que se hacen pasar a través de determinado espesor de una sustancia húmeda. Midiendo la atenuación y desfase que ocurre en ellas se deducen parámetros electromagnéticos de la sustancia como la CD que permiten inferir el CH. Esta técnica es llamada ED en el rango de las microondas [6].

Estos métodos son los más adecuados para implementar una medición en línea del CH en un proceso industrial pues tardan pocos segundos en hacer la medición.

En la Tabla 1 se resume la clasificación de los métodos de medición del CH expuestos, indicando sus ventajas y desventajas.

Tabla 1 Resumen de los métodos de medición del CH

Método	Parámetro medido	Procedimiento	Ventaja/ Desventaja
Directo	Masa de agua y masa de sustancia seca	Secado al aire libre, en horno o con radiación infrarroja.	Precisos pero lentos y no dependen de la sustancia.
Indirecto	Eléctrico y/o magnético (resistencia, capacidad, constante dieléctrica, etc.)	Medición rápida del parámetro eléctrico y/o magnético que cambia con el CH.	Rápidos pero dependen del material y deben ser calibrados por métodos directos.

Fuente: Elaboración propia, 2014

En la Tabla 2 se resumen las técnicas y el principio de análisis de medición que emplean los métodos directos e indirectos. Se indica el principio de análisis, rango de medición, exactitud y selectividad al agua de cada técnica [4].

Tabla 2. Métodos de medición de humedad

Método	Principio de análisis	Rango de CH	Exactitud	Selectividad de agua
Métodos directos				
Termo-gravimétrico Secado en horno	Calentamiento por convección. Diferencia de masa antes y después del secado.	0.5-100%	0.1-0.5%	No
Secado en IR	Calentamiento por absorción de radiación IR. Pérdida de masa medida continuamente durante el secado.	0.5-99%	0.1-0.5%	No
Secado en halógeno	Calentamiento por radiación infrarroja con radiador halógeno. Continua determinación de masa durante el secado.	0.5-99%	0.1-0.5%	No
Secado en microondas	Calentamiento por absorción de microondas. Determinación de masa antes y después del secado.	2-99%	0.1-0.5%	No
Químico				
Titulación Karl Fisher	Conversión química del agua a un producto medible por reacción.	0-100%	ppm	Si
Método Carbona	Conversión química del agua a un producto medible por reacción.	1-100%	0.1-0.5%	Si
Destilación	Medida de agua condensada del destilado de un solvente orgánico.	3-70%	1%	Si

Métodos indirectos				
Espectroscopia				
Espectroscopia IR	Agua medida por selectiva absorción / reflexión en el rango del infrarrojo (IR)	1-80%	0.3-1%	Si
Espectroscopia de microondas	Agua medida por selectiva absorción / reflexión en el rango de las microondas	2-70%	0.1-0.5%	Si
Espectroscopia de RMN	Medición resonancia magnética nuclear	0-15%	0.1%	Si
Otros				
Conductividad	Medición de la conductividad eléctrica.	>3%	0.5-1%	No
Capacidad dieléctrica	Medición de la constante dieléctrica.	0-50%	0.5-1%	No
Refractometria	Medida del índice de refracción.	40-100%	0.1-2.0%	No
Alcance sonoro	Acústica. Penetración o absorción de ondas de radio en partículas.			No

Fuente: Tabla adaptada de "Moisture analyzer Cook Book", OHAUS, 2014. [4]

1.3. Medición de humedad basada en principios electromagnéticos

La medición del CH basada en principios electromagnéticos es, claramente, un método indirecto. Estas técnicas son posibles gracias a los siguientes tres factores: (a) las propiedades dieléctricas de las sustancias, (b) las propiedades de las ondas electromagnéticas (OEM) y (c) la forma como estas ondas interactúan con las sustancias [1].

Los métodos activos de espectroscopia con infrarrojos (IR) y de resonancia magnética nuclear (RMN) han sido explorados para una rápida determinación del CH. El equipamiento para implementar estos métodos es más caro que la espectroscopia de microondas y requieren más tiempo o más preparación de la muestra. La ED con microondas es más práctica y se aplica en sustancias solidas no metálicas que actúan como sustancias dieléctricas.

Para el propósito de esta investigación las sustancias dieléctricas serán productos alimenticios como cereales, granos, semillas y harinas que consideraremos como sólidos granulados. La determinación de las propiedades dieléctricas de estos productos ha ganado considerable importancia en las últimas décadas. En el capítulo 2 se estudian estas propiedades y la forma como las ondas electromagnéticas interactúan con tales sustancias para hacer posible la determinación indirecta del CH.

1.4. Desarrollo de las técnicas de medición de humedad basada en principios electromagnéticos

Este desarrollo ha venido de la mano del desarrollo de las técnicas de medición de la CD de las sustancias. Este parámetro tiene efecto en las propiedades de algunos componentes electrónicos como, por ejemplo, en la capacidad de almacenamiento de los capacitores.

Los primeros capacitores datan de mediados de siglo XVIII en Europa (Alemania y Holanda) y fueron ideados para almacenar mayor densidad de carga eléctrica que en un conductor aislado. A Michael Faraday (1791-1867) le debemos el haber descubierto, en 1837, el efecto de los materiales dieléctricos en aumentar la capacidad de los capacitores para almacenar más cargas eléctricas. Por este efecto la capacidad de un condensador aumenta en un factor, que es característico del material que se use como dieléctrico, debido al debilitamiento del campo eléctrico entre sus placas respecto al que tiene cuando las separa el aire. Dicho factor es la CD [7]. Faraday, a partir de las ideas del físico y matemático francés Simeon D. Poisson (1781-1840), supuso la estructura microscópica de un material dieléctrico como conformado por una red de pequeñas esferas metálicas inmersas en un material aislante [8].

En 1847 Fabrizio Mossotti (1791-1863), físico italiano, introdujo el concepto de “cavidad” en la estructura microscópica de los materiales. Mossotti contemporáneamente con el físico alemán Rudolf Classius (1822-1888) sentaron las bases del concepto de “CD” para cuantificar el efecto de los materiales dieléctricos en los condensadores [8]. Este concepto se recogió en lo que se conoce como el factor de Classius-Mossotti expresado como:

$$\varepsilon = \varepsilon' + \frac{\sigma}{j\omega} = \varepsilon' - j \frac{\sigma}{\omega}, \quad (1.3)$$

donde ε es la permitividad eléctrica compleja, ε' es la parte real de la permitividad, σ es la conductividad y ω es la frecuencia angular del campo eléctrico aplicado.

Por otro lado, en 1850 el físico británico James Maxwell (1831-1879) desarrolló la teoría del electromagnetismo y formuló las conocidas

ecuaciones de Maxwell demostrando que la electricidad, el magnetismo y la luz son manifestaciones del mismo fenómeno: el campo electromagnético. Estas ecuaciones serán formuladas en el capítulo 2.

En 1888 el físico alemán Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) logró demostrar experimentalmente la veracidad de las ecuaciones de Maxwell y fue el primero en generar ondas electromagnéticas en forma artificial. Hertz demostró que era posible emitir y recibir ondas electromagnéticas, comprobando de manera concluyente las ecuaciones de Maxwell. Estas ecuaciones gobiernan la propagación de las ondas electromagnéticas en los medios [9].

A partir del trabajo de Hertz muchas aplicaciones se le han dado al amplio rango de frecuencias en la que se presentan las ondas electromagnéticas, conocido hoy como Espectro Electromagnético. En el rango de las radiofrecuencias (3Hz – 300GHz) de este espectro las aplicaciones más conocidas son las telecomunicaciones y los sistemas de detección remota, como los radares. Otra aplicación importante son las técnicas de medición no invasiva, como aquella aplicada a la medición del CH en sólidos dieléctricos cuyo estudio es uno de los objetivos del presente trabajo.

Una de estas técnicas de medición no invasiva es la ED que se empezó a desarrollar alrededor de 1890. Con esta técnica es posible inferir las propiedades dieléctricas de una sustancia. Se analiza la respuesta de una magnitud macroscópica (CD) para inferir información de la estructura microscópica (polarización de la estructura molecular) de la sustancia como se esquematiza en la Figura 3.

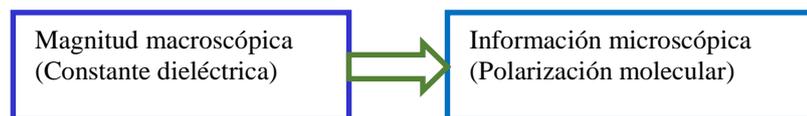


Figura 3. Esquema de la técnica de Espectroscopia Dieléctrica.
Fuente: Elaboración propia.

La ED se basa en la interacción de un campo eléctrico externo (magnitud macroscópica) con el momento dipolar eléctrico de la sustancia expresada por su permitividad eléctrica (información microscópica) que depende, entre otros factores, del CH de la sustancia.

A comienzos del siglo XX se empezó a explorar las propiedades dieléctricas de productos agrícolas (cereales y semillas) y su uso en el desarrollo de técnicas de medición de la humedad de tales productos. Por ejemplo, se descubrió un logarítmico incremento de la resistencia eléctrica del trigo con la disminución de su CH. A partir de este principio se diseñaron sistemas eléctricos de medición del CH. Luego se desarrollaron sistemas basados en la medición de la capacidad eléctrica de un condensador, usando a la sustancia como su dieléctrico y calibrado por comparación con otro método de referencia (Nelson y Trabelsi, 2011) [10].

También por esos años hubo gran interés por la determinación de la CD de los líquidos debido a la sospecha de que estaba relacionada con el poder solvente de estos. King (1922) reportó el desarrollo de un circuito puente que basado en la sintonía de audio-frecuencias permitía determinar la constante dieléctrico de líquidos. Con este circuito se determinaron las constantes dieléctricas de líquidos como alcohol, éter, benceno y mezclas de estos. [5]

A mediados del siglo XX se empezaron a determinar valores de la permitividad o propiedades dieléctricas de granos y semillas, de los cuales depende la rápida medición del CH de estos productos con la técnica de ED.

Entre 1950 y 1970 se desarrollaron, en Estados Unidos, técnicas basadas en circuitos resonantes de audio y radio frecuencias, como métodos indirectos pero rápidos de medición y control del CH en granos y semillas. Estos métodos surgieron como alternativos a aquellos métodos directos basados en el secado en estufa que demandan mucho tiempo. Se basan en la medición de la atenuación en dispositivos resonantes como guías de ondas y cable coaxial, llenados con los granos o semillas, para un cierto rango de radiofrecuencia, en el rango de las microondas [11]. Recibieron gran atención en estas determinaciones el maíz y el sorgo.

Desde la década de los 1980's las técnicas basadas en la emisión y recepción de radiofrecuencias tuvieron un gran desarrollo en Europa y Estados Unidos. Muchos reconocen al Dr. Andrzej W. Kraszewski (1933-2006), Figura 4, ingeniero electrónico polaco, como pionero de este desarrollo. Kraszewski desarrolló y aplicó estas técnicas de medición

en asociación, desde 1987, con el “Agricultural Research Service of the U.S. Department of Agriculture (USDA), en Athens, Georgia.

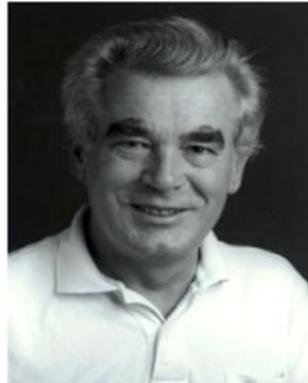


Figura 4. Andrzej W Kraszewski (1933-2006), pionero de la técnica de ED en el rango de las microondas. Fuente: [12].

Estas técnicas se basan en la medición de la atenuación y del cambio de fase que experimentan las microondas al atravesar un cierto espesor de sustancia. Constituyen métodos no invasivos de medición, es decir, la medición se hace sin tener contacto físico con la sustancia. [1], [13].

Okabe [2] reportó en 1973 sobre el diseño y construcción de un novedoso sistema de medición de humedad en granos usando microondas de 9.4 GHz desarrollado en Japón. Este sistema se basa en medir la atenuación que sufren estas microondas al atravesar muestras de arroz y trigo contenidas en un depósito de cierto espesor.

En las últimas décadas se han desarrollado, a nivel de laboratorio, sistemas de medición con fines experimentales para aplicarlos en diversos materiales o productos. Con estos sistemas se determina las dos componentes (real e imaginaria) de la permitividad relativa compleja, parámetros que son dependientes de la humedad [14]. Este método fue aplicado para determinar el CH de maíz en cáscara y trigo.

Últimamente se han explorado diversas aplicaciones de esta tecnología como la determinación de las propiedades dieléctricas de productos agrícolas y alimenticios como, maíz, sorgo, maíz, pasas y cebolla [14], [15], en la medición del CH de suelos y en la industria de la construcción [16].

1.5. Reciente desarrollo y aplicaciones en el Perú

Esta investigación también reporta las primeras aplicaciones de la medición del CH con la técnica de ED en nuestro país, donde el desarrollo e implementación de esta tecnología es incipiente, hay desconocimiento de su existencia y los equipos que se deben importar son costosos.

En los laboratorios de Física General y de Sistemas Automáticos de Control (SAC) de la UDEP desde 2010 se están haciendo los primeros estudios y aplicación de esta tecnología en algunas industrias de la región. Entre el 2010 y 2012 se desarrolló el proyecto “Innovación tecnológica aplicando TIC industriales en la medición y control de humedad en procesamiento de pescado” ([17]) en la que se implementó un prototipo de medición del CH aplicado al proceso de elaboración de la harina de pescado como se muestra en la Figura 5. El detalle de la implementación se reporta en el capítulo 5.



Figura 5. Sistema de medición de contenido humedad implementado en una planta procesadora de harina de pescado en Paita- Fuente: Elaboración propia.

Recientemente se está adaptando prototipos de esta técnica de medición para aplicarlos a productos agroindustriales granulados como el café y cacao. En el capítulo 5 se formulan propuestas para que este sistema sea aplicado en el proceso de beneficio de estos dos cereales.

Capítulo 2

Principios electromagnéticos de la espectroscopia dieléctrica para la medición del contenido de humedad en sólidos granulados

De las técnicas indirectas de medición del Contenido de Humedad (CH) las más adecuadas para mediciones en una línea de proceso son aquellas basadas en la Espectroscopia Dieléctrica (ED) en el rango de las microondas. Esta es una técnica indirecta activa, no invasiva y hace la medición casi instantáneamente.

Los principios de esta técnica la encontramos en la teoría electromagnética que explica la interacción de las ondas electromagnéticas con el medio donde se propagan. En este capítulo se exponen dichos principios utilizando principalmente la referencia [9].

2.1. Ondas electromagnéticas y cantidades fundamentales del electromagnetismo

La existencia de las ondas electromagnéticas (OEM) fue predicha por James Maxwell (1831- 1879). A partir de las ecuaciones de Maxwell se deduce que el campo magnético y el campo eléctrico oscilan a la vez y son perpendiculares entre sí. Estas ondas electromagnéticas transportan energía y se propagan en el vacío. La Figura 6 representa a una onda OEM propagándose en dirección del eje z con el campo eléctrico (E) paralelo al eje x y el campo magnético (H) paralelo al eje y.

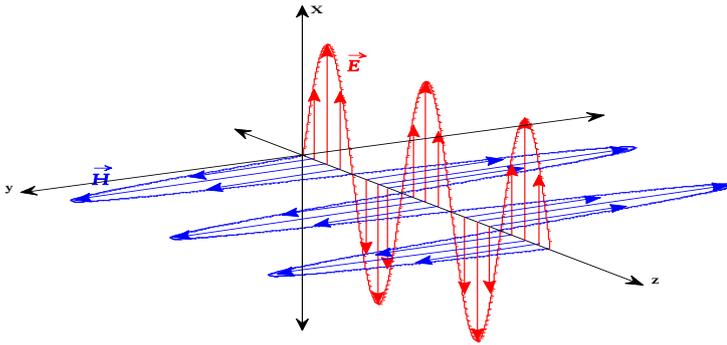


Figura 6. Representación de una onda electromagnética mostrando sus componentes eléctrica (rojo) y magnética (azul). La onda se propaga en dirección del eje z.

Los campos, eléctrico y magnético, que conforman una onda electromagnética (OEM) están caracterizados por la intensidad y la densidad de flujo de cada campo. Estos parámetros constituyen las cantidades fundamentales del electromagnetismo que se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Cantidades fundamentales del Electromagnetismo

Campo	Cantidad	Símbolo	Unidad
Eléctrico	Intensidad de Campo Eléctrico	E	V/m
	Densidad de Flujo Eléctrico	D	C/m ²
Magnético	Intensidad de Campo Magnético	H	A/m
	Densidad de Flujo Magnético	B	T

Fuente: Cheng, D. 1998 [9]

Dependiendo del tipo de medio donde se propaguen estos campos, se establecen relaciones entre estas cantidades. Estas relaciones definen los postulados fundamentales del electromagnetismo y dependen de los parámetros dieléctricos de los materiales.

2.2. Parámetros dieléctricos de los materiales

La propagación de una OEM en un medio diferente al vacío, está determinada por los parámetros dieléctricos del medio. Estos parámetros son: conductividad (σ), permitividad eléctrica (ϵ) y permeabilidad magnética (μ). Estos parámetros determinan la atenuación, desfase,

reflexión y absorción que sufren las ondas electromagnéticas cuando atraviesan un medio o cuando cambian de medio.

2.2.1. Conductividad eléctrica (σ)

Es la capacidad del medio de conducir corriente eléctrica como respuesta de las cargas libres a la presencia de un campo eléctrico externo (E). Se expresa como el factor de proporcionalidad (σ) entre el campo eléctrico (E) y la densidad de volumen de corriente eléctrica (J), según la ley de Ohm:

$$J = \sigma E, \quad (2.1)$$

donde J se expresa en [A/m^2], σ en [S/m] y E en [V/m].

En muchas sustancias el contenido de agua del material y su composición química determinan su conductividad [16].

2.2.2. Permitividad eléctrica (ϵ)

Es la capacidad del medio a polarizarse ante la presencia de un campo eléctrico. Está dada por la constante de proporcionalidad entre la intensidad de campo eléctrico aplicado (E) y su correspondiente densidad de flujo eléctrico (D).

$$D = \epsilon E \quad (2.2)$$

La permitividad eléctrica (ϵ) de un material se expresa normalmente en relación a la del vacío (Tabla 4), siendo la permitividad relativa (ϵ_r) el factor de proporcionalidad, según la ecuación 2.3 [9].

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0. \quad (2.3)$$

La permitividad eléctrica es una magnitud compleja expresada como:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' . \quad (2.4)$$

La permitividad eléctrica y la conductividad están relacionados entre sí por el factor de Clasiuss – Mossotti, presentado en el apartado 1.4 del capítulo 1.

$$\varepsilon = \varepsilon' + \frac{\sigma}{j\omega} = \varepsilon' - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (2.5)$$

La parte real de la permitividad eléctrica (ε') es la medida de la habilidad del medio a ser polarizado bajo un campo eléctrico. La parte imaginaria incluye los efectos de las pérdidas óhmicas y de polarización fuera de fase.

La dependencia de la permitividad eléctrica del CH de una sustancia hace posible la medición indirecta de este parámetro con la técnica de ED.

2.2.3. Permeabilidad magnética (μ)

Es la capacidad de los medios de dejar pasar un campo magnético. Este parámetro relaciona la inducción magnética (B) con la intensidad de campo magnético (H):

$$B = \mu H . \quad (2.6)$$

La permeabilidad magnética (μ) de un medio también se expresa en relación a la del vacío (Tabla 4) siendo la permeabilidad relativa (μ_r) el factor de proporcionalidad según la ecuación 2.7

$$\mu = \mu_r \mu_0 . \quad (2.7)$$

La permeabilidad magnética también es una magnitud compleja expresada como:

$$\mu = \mu' - j\mu'' . \quad (2.8)$$

La parte real es la permeabilidad magnética elástica y da idea de la energía magnética almacenada en el material, mientras que la parte imaginaria determina las pérdidas magnéticas.

En la mayoría de los materiales, excepto en los ferromagnéticos, se cumple que $\mu \approx \mu_0$, por tanto, $\mu_r \approx 1$. Este es el caso de muchos productos entre ellos los agroindustriales en los que se aplica esta técnica de ED.

Los parámetros dieléctricos del vacío son tomados como constantes universales dado que el vacío se toma como un medio de referencia para expresar estas constantes para otros medios. La Tabla 4 resume el valor de estas constantes [9].

Tabla 4. Parámetros dieléctricos para el vacío

Constante universal	Símbolo	Valor	Unidad
Permitividad del espacio libre	ϵ_0	$(1/36\pi) \times 10^{-9}$	F/m
Permeabilidad del espacio libre	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	H/m
Velocidad de la luz en el vacío	c_0	3×10^8	m/s

Fuente: Cheng, D. 1998 [9]

2.3. Ecuaciones de Maxwell

Las investigaciones realizadas por James Maxwell (1831-1879) y otros científicos anteriores a él, permitieron predecir la existencia de la energía electromagnética.

Maxwell trabajó en base a publicaciones realizadas por científicos que lo antecedieron como Ampere (1775-1836), Faraday (1791-1867) y Gauss (1777-1855), relacionando los aportes de cada uno de ellos y los agrupó en lo que hoy se conoce como las ecuaciones de Maxwell. Estas ecuaciones relacionan los campos eléctricos y magnéticos proporcionando una base teórica para la explicación de los fenómenos electromagnéticos. En la Tabla 5 se resumen las ecuaciones de Maxwell considerando el caso general, en el que las ondas se propagan en medios con pérdidas.

Estas cuatro ecuaciones explican que un campo magnético variable en el tiempo origina un campo eléctrico y que un campo magnético se

genera a partir de la variación de un campo eléctrico en el tiempo o por medio de corrientes eléctricas. También explican el comportamiento de los campos electromagnéticos cuando estos se propagan en cualquier medio, con o sin pérdidas

Tabla 5. Ecuaciones de Maxwell en sus formas diferencial, integral y fasores

Leyes de Maxwell	Forma Diferencial	Forma integral	Forma Fasores
Ley de Farada y	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$	$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$
Ley de Amper e	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{s}$	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega\epsilon\vec{E}$
Ley de Gauss	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v$	$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q$	$\nabla \cdot \vec{E} = \rho_v / \epsilon$
Ley de Gauss	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$	$\nabla \cdot \vec{H} = 0$

Fuente: Cheng, D. 1998 [9]

Dado que la técnica de medición del CH que se investiga se aplicará a sustancias húmedas, estas deben ser consideradas como medios con pérdidas debido a la absorción que hacen las moléculas de agua al ser polarizadas por una OEM.

2.4. Medios de propagación y su interacción con las ondas electromagnéticas

La estructura molecular del medio en el que se propagan las OEM determina la interacción de estas con dicho medio. Para la formulación de las ecuaciones que gobiernan la propagación de ondas en una sustancia húmeda, útiles para este trabajo, se considerará primero un medio de propagación sin pérdidas y luego se considera un medio con pérdidas que es el tipo de medio que más se aproxima una sustancia húmeda.

2.4.1. Medio sin pérdidas

Un medio sin pérdida no absorbe energía al paso de las OEM. Los medios que se aproximan a este tipo son el aire y el vacío, llamado también espacio libre. Al no haber moléculas en este medio no existe conductividad ($\sigma=0$) ni polarización y por tanto no hay absorción de energía.

En un medio isótropo, como el vacío, la relación entre la intensidad de campo eléctrico (E) y su densidad de flujo (D_0) es:

$$D_0 = \varepsilon_0 E . \quad (2.9)$$

Similarmente, en el espacio libre, también se cumple para el campo magnético que:

$$B_0 = \mu_0 H . \quad (2.10)$$

2.4.1.1. Propagación de ondas EM en medios sin pérdidas

En medios no conductores y libres de fuentes ($\sigma=0$, por tanto $J=0$), caracterizados por ε y μ , las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial de la Tabla 5 se expresan como se indica en la Tabla 6 [9].

Tabla 6. Ecuaciones de Maxwell en forma diferencial para medios sin pérdidas no conductores libres de fuentes.

Ley de Faraday	$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$
Ley de Ampere	$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$
Ley de Gauss	$\nabla \cdot \vec{E} = 0$
Ley de Gauss	$\nabla \cdot \vec{H} = 0$

Fuente: Cheng, D. 1998 [9]

Un medio sin pérdidas se puede representar mediante el circuito equivalente de la Figura 7a.

Las ecuaciones de la Tabla 6 son ecuaciones diferenciales de primer grado que combinadas pueden generar una ecuación de segundo grado que contenga únicamente E o H. En E se obtiene una ecuación vectorial homogénea de Helmholtz de la forma:

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0, \quad (2.11)$$

donde k es el número de onda que, para un medio sin pérdida, se expresa como:

$$k = \omega \sqrt{\epsilon \mu} = \frac{\omega}{c_o} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{rad/m}). \quad (2.12)$$

Para una onda plana que se propaga a lo largo del eje $+z$ y cuyo campo eléctrico es paralelo al eje x , su expresión matemática es la ecuación 2.13 cuya solución es la ecuación 2.14:

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} = \mu \epsilon \frac{d^2 E_x}{dt^2}, \quad (2.13)$$

$$\vec{E}(z, t) = \vec{a}_x E_0^+ e^{-jkz} = \vec{a}_x E_0^+ \cos(\omega t - kz). \quad (2.14)$$

Esta onda viajera tiene una velocidad de propagación a lo largo del eje z de:

$$c_o = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \quad (2.15)$$

La ecuación 2.14 representa a una onda senoidal que se propaga a velocidad c_o sin sufrir atenuación como se representa en la Figura 7b

2.4.2. Medios con pérdidas

En un medio real, con pérdidas, las OEM se atenúan debido a la interacción de estas con la estructura molecular del medio, hay absorción de toda o parte de la energía que transportan las ondas. Contribuye a esta absorción el fenómeno de polarización de los medios dieléctricos cuando sus moléculas tratan de alinearse con el campo electromagnético externo aplicado. En un medio dieléctrico con pérdidas, la permitividad de un material dieléctrico (ϵ) se toma en su forma compleja, según la ecuación 2.5, y $\mu \approx \mu_0$.

2.4.2.1. Propagación de las ondas EM en materiales dieléctricos con pérdidas

Los materiales dieléctricos conductivos (con pérdidas), son caracterizados por ϵ , μ y $\sigma \neq 0$. En estos materiales fluirá una corriente ($J = \sigma E$) inducida por el campo eléctrico (E). Un medio con pérdidas se puede representar mediante el circuito equivalente de la Figura 7c

La segunda ecuación de Maxwell (de la Tabla 5) que describe la propagación en un dieléctrico conductivo, expresada en forma diferencial, es:

$$\nabla \times H = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2.16)$$

En régimen armónico, esta misma ecuación se escribe como:

$$\nabla \times H = (\sigma + j\omega\epsilon)\bar{E} = j\omega\left(\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}\right)\bar{E} = j\omega\epsilon_c\bar{E}, \quad (2.17)$$

donde:

$$\epsilon_c = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \text{ (F/m)} \quad (2.18)$$

Confrontando la expresión de la permitividad compleja ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$; ecuación 2.4) con la de expresión 2.17 se obtiene una conductividad equivalente (σ) que representa todas las pérdidas en el medio

$$\sigma = \omega\epsilon'' . \quad (2.19)$$

La tangente de pérdidas definida por la ecuación 2.20 es una medida de la pérdida de potencia en el medio y se define como:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \cong \frac{\sigma}{\omega\epsilon} . \quad (2.20)$$

Las otras tres ecuaciones de Maxwell de la Tabla 4 no cambian para sustancias dieléctricas, por tanto, las ecuaciones 2.12, 2.13 y 2.14 obtenidas para medios sin pérdidas serán aplicables también a medios con pérdidas si se sustituye en dichas ecuaciones ϵ por la permitividad compleja (ϵ_c), llamada también permitividad efectiva. La ecuación 2.11 se convierte en:

$$\nabla^2 \vec{E} + k_c^2 \vec{E} = 0 , \quad (2.21)$$

dónde:

$$k_c = \omega \sqrt{\epsilon_c \mu} . \quad (2.22)$$

Para medios con pérdidas se define la constante de propagación (γ) como:

$$\gamma = jk_c = j\omega \sqrt{\epsilon_c \mu} \text{ (m}^{-1}\text{)} . \quad (2.23)$$

Reemplazando la ecuación 2.18 en la ecuación 2.23 se obtiene la expresión compleja de la constante de propagación [9].

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.24)$$

Usando la definición de tangente de pérdidas de la ecuación 2.20 en la ecuación 2.24, esta se convierte en la ecuación 2.25:

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon'}\left(1 - j\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.25)$$

La ecuación diferencial 2.21 se puede escribir ahora de la forma de la ecuación 2.26 cuya solución es la ecuación 2.27.

$$\nabla^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} = 0, \quad (2.26)$$

$$\vec{E}(z, t) = E_0 e^{-\gamma z} = E_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}. \quad (2.27)$$

La ecuación 2.27 representa una onda senoidal con atenuación y con desfase como se representa en la Figura 7d. El primer término exponencial ($e^{-\alpha z}$) representa la atenuación de la onda plana en un medio con pérdidas. El ritmo de atenuación es especificado por la constante de atenuación (α) expresada en Np/m. El segundo término exponencial ($e^{-j\beta z}$) representa un factor de fase controlado por la constante de fase (β) expresado en rad/m. α y β son cantidades positivas llamadas constante atenuación y constante de fase respectivamente

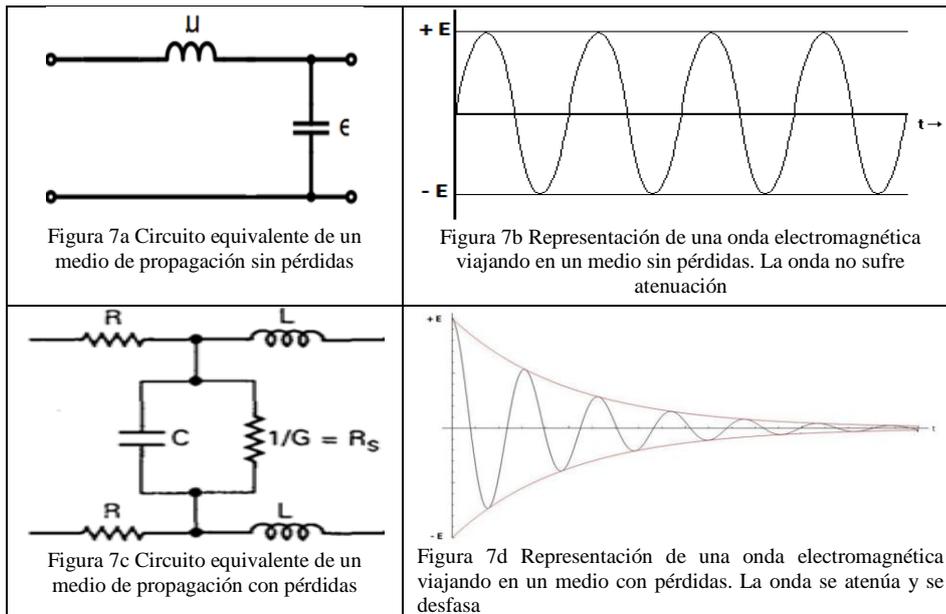


Figura 7. Comparación de los circuitos equivalentes de medios sin y con pérdidas y la forma como las ondas electromagnéticas se propagan en esos medios

Fuente: Elaboración propia.

2.5. Resumen de las expresiones de la constante de propagación en distintos tipos de medio

Los tipos de medios, sin pérdidas y con pérdidas, analizados en el apartado 2.4 tienen algunas particularidades. La permitividad, permeabilidad y conductividad para materiales dieléctricos sin pérdidas, con pérdidas y buenos conductores según son las siguientes [9]:

- Dieléctricos sin pérdidas: $\sigma = 0; \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0; \mu = \mu_r \mu_0$,
- Dieléctricos con pérdidas: $\sigma \neq 0; \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0; \mu = \mu_r \mu_0$,
- Buenos conductores: $\sigma = \infty; \epsilon = \epsilon_0; \mu = \mu_r \mu_0$

La Tabla 7 resume la velocidad (v) y constante de propagación (γ) que se obtienen para estos casos.

Tabla 7. Velocidad y constante de propagación para distintos tipos de medio

Tipo de medio	Velocidad [m/s]	Constante de propagación [m ⁻¹]
Medios sin pérdida		
Espacio libre $\sigma=0$ $\epsilon=\epsilon_0$ $\mu=\mu_0$	$v = c_0 = \frac{1}{(\epsilon_0\mu_0)^{1/2}} = \frac{\omega}{\beta}$	$\gamma = j\beta$ $\alpha = 0$
Dieléctrico perfecto $\sigma=0$ $\epsilon=\epsilon_r\epsilon_0=\epsilon'$, $\epsilon''=0$ $\mu=\mu_r\mu_0$	$v = \frac{c_0}{(\epsilon_r\mu_r)^{1/2}} = \frac{\omega}{\beta}$	$\gamma = j\beta = j\omega(\epsilon\mu)^{1/2} = j\omega(\epsilon_r\epsilon_0\mu_r\mu_0)^{1/2}$ $\alpha = 0$
Medios con pérdidas		
Dieléctrico $\sigma \neq 0$ $\epsilon = \epsilon' - j(\sigma/\omega)$ $\mu = \mu_r\mu_0$	$v = \frac{\omega}{\beta}$	$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega(\epsilon'\mu)^{1/2} \left[1 - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon'} \right]^{1/2}$
Dieléctrico de bajas pérdidas $P=(\sigma/\omega\epsilon') \ll 1$	$v = \frac{\omega}{\beta}$	$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega(\epsilon'\mu)^{1/2} \left[1 - j \frac{\sigma}{2\omega\epsilon'} \right]$
Buen conductor $P=(\sigma/\omega\epsilon') \gg 1$	$v = \frac{\omega}{\beta}$	$\gamma = \alpha + j\beta = (\pi f \mu \sigma)^{1/2} (1 + j)$

Fuente: Elaboración propia basado en [9]

Para un medio dieléctrico con pérdidas las constantes de atenuación (α) y de fase (β) pueden ser obtenidas mediante las expresiones que se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8. Expresiones para estimar las constantes de atenuación (α) y de fase (β) en un dieléctrico con pérdidas

Constante de atenuación (α)	Constante de fase (β)
$\alpha = \omega(\mu\epsilon')^{1/2} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon'} \right)^2 \right)^{1/2} - \frac{1}{2} \right]^{1/2}$	$\beta = \omega(\mu\epsilon')^{1/2} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon'} \right)^2 \right)^{1/2} + \frac{1}{2} \right]^{1/2}$
$\alpha = \omega(\mu\epsilon')^{1/2} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 \right)^{1/2} - \frac{1}{2} \right]^{1/2}$	$\beta = \omega(\mu\epsilon')^{1/2} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2 \right)^{1/2} + \frac{1}{2} \right]^{1/2}$
$\alpha = \omega(\mu\epsilon')^{1/2} \left[\frac{1}{2} (1 + \tan^2 \delta)^{1/2} - \frac{1}{2} \right]^{1/2}$	$\beta = \omega(\mu\epsilon')^{1/2} \left[\frac{1}{2} (1 + \tan^2 \delta)^{1/2} + \frac{1}{2} \right]^{1/2}$

Fuente: Elaboración propia

La atenuación de las OEM en un dieléctrico con pérdidas es debida a su conductividad y a sus parámetros dieléctricos. Estos dependen del CH del medio.

2.6. Aproximaciones para dieléctricos de bajas pérdidas

Se pueden simplificar las expresiones de las constantes de atenuación (α) y de fase (β) cuando las sustancias se comportan como dieléctricos de bajas pérdidas, en los que se cumple $(\tan \delta)^2 \ll 1$. Las constantes de atenuación y de fase pueden ser estimadas aplicando las siguientes aproximaciones:

$\alpha = \omega(\mu\epsilon')^{1/2} \frac{\tan \delta}{2}$	$\beta = \omega(\mu\epsilon')^{1/2}$
---	--------------------------------------

Estas aproximaciones son aplicables cuando el CH no es muy alto y depende de la banda de frecuencia que se use.

Usando estas dos aproximaciones, la velocidad (c) de las OEM en algunas sustancias puede ser expresada como:

$$c = \frac{c_0}{(\epsilon_r')^{1/2}} \quad 2.28$$

Donde, c_0 es la velocidad de propagación en el espacio libre y ϵ_r es la parte real de la permitividad relativa llamada también CD.

2.7. Aplicación de estos principios en la espectroscopia dieléctrica para la medición del contenido de humedad

Un volumen (V) de sustancia húmeda la analizamos electromagnéticamente separando la masa seca (m_s) y la masa agua (m_a) contenida, tal como se esquematiza en la Figura 8. Los otros parámetros físicos a considerar son el espesor (d), la densidad (ρ), CH, temperatura (T) y las componentes real (ϵ') e imaginaria (ϵ'') de la permitividad eléctrica.

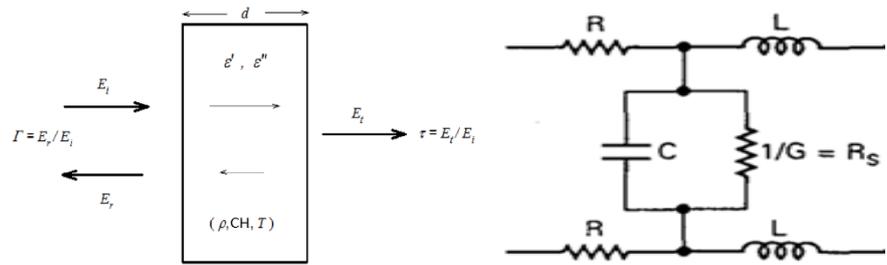


Figura 8. Izquierda: Esquema de volumen de una sustancia húmeda de espesor d . Derecha: Su circuito eléctrico equivalente a la propagación de OEM. Fuente: Elaboración propia (Adaptado de [18])

En una sustancia húmeda las constantes de atenuación (α_h) y de fase (β_h) dependerán de la masa seca (m_s) y de la masa de agua (m_a). Para una onda electromagnética plana que incida normalmente en el volumen atravesando el espesor d , las componentes de la permitividad compleja se obtienen aplicando las ecuaciones 2.29 y 2.30 según [14] y [18].

$$\varepsilon_r' = \left(1 + \frac{\Delta\phi\lambda_o}{360d} \right)^2, \quad 2.29$$

$$\varepsilon_r'' = \frac{\Delta A\lambda_o\sqrt{\varepsilon_r'}}{8.686\pi d}, \quad 2.30$$

donde λ_o es la longitud de onda en el espacio libre, obtenida a partir de la frecuencia (f) de trabajo ($c_o = f\lambda_o$), $\Delta\phi$ es la diferencia, en grados, entre el ángulo de fase (ϕ) medido con el volumen lleno de material y el ángulo de fase (ϕ_o) medido con el volumen sin material ($\Delta\phi = \phi - \phi_o$) y ΔA es la atenuación en decibeles.

La determinación de la permitividad relativa requiere de la determinación de $\Delta\phi$ y ΔA . Esto se hace con Analizadores de Redes, tal como se explica en el apartado 3.3 del capítulo 3.

2.8. Propiedades dieléctricas de la molécula del agua

La importancia del agua como sustancia de vida es resaltada por su crucial papel ecológico y climático ya que está presente en diferentes estados y ocupando casi el 71 % de la superficie terrestre [19]. A esto se le suma las peculiares propiedades dieléctricas de su molécula que explican su interacción con un campo electromagnético y cómo influye en la permitividad de una sustancia húmeda.

Los dos átomos de hidrógeno y el átomo de oxígeno que tiene una molécula de agua se encuentran unidos por medio de dos enlaces conformando una estructura molecular de tetraedro regular, teniendo al átomo de oxígeno en el centro y formando un ángulo de 104.5° con los átomos de hidrógeno como se ilustra de la Figura 9 (izquierda).

Las moléculas de agua son dipolares dado que cuando se les aplica un campo electromagnético experimentan una fuerza que produce que éstas tiendan a alinearse con el campo eléctrico, es decir, se polarizan. Por esto la molécula de agua es capaz de absorber energía, ya sea eléctrica o magnética. Este efecto puede ser cuantificado por el valor de la permitividad eléctrica. En la mayoría de los casos se cumple que la CD es mucho mayor que el factor de pérdidas ($\epsilon' \gg \epsilon''$), este factor se desprecia y se asume que la permitividad relativa es igual que la CD. En la Figura 9 (derecha) se observa la variación del valor de las componentes (ϵ' , ϵ''), de la permitividad compleja del agua a diferentes frecuencias.

La constante dieléctrica de la molécula de agua es aproximadamente 80 para frecuencias menores de 1 GHz, (Figura 9 - derecha), por lo que la CD de un material húmedo aumentará con respecto a su valor cuando está seco debido a la presencia de las moléculas de agua. En la Tabla 9 se dan los valores de la constante eléctrica de algunos materiales.

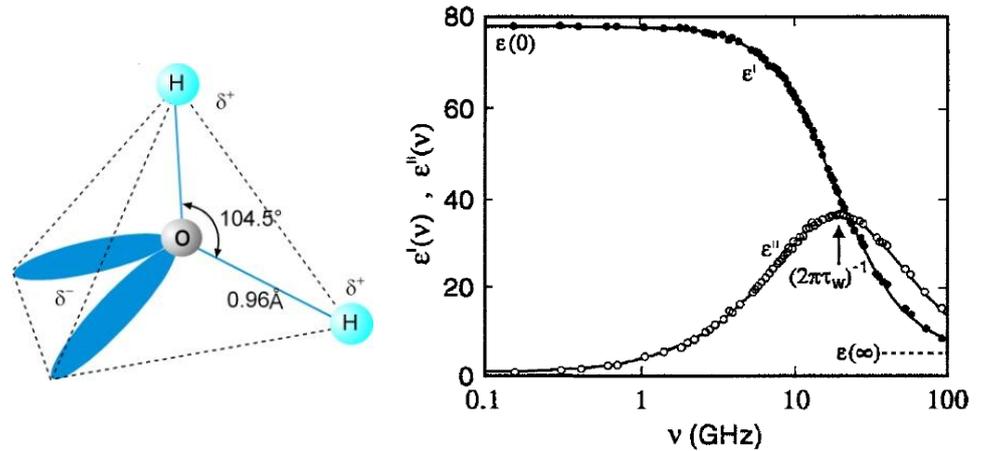


Figura 9. Izquierda: Estructura molecular del agua (Fuente: Lozano Teruel, J. A. 2012) [20]. Derecha: Comportamiento de la permitividad compleja del agua a diferentes frecuencias
Fuente: Kupfer, K., 2005, p.28. [21]

El agua pura se considera como un aislante, sin embargo, el agua salada o el agua con cualquier tipo de componentes generará que el agua se comporte como un conductor.

Tabla 9. Constantes dieléctricas (CD) de algunas sustancias y materiales

Material o sustancia	CD	Material o sustancia	CD
Vacío y aire	1.0	Harina de trigo	5.0
Semillas de algodón	1.4	Carne de pescado	8.0
Granos de café	1.5	Granos de Soya	8.1
Teflón	2.0	Acetona	21.0
Petróleo crudo	2.1	Alcohol etílico	24.0
Harina de maíz	2.5	Metanol	33.6
Arena seca	2.8	Glicerina	47.0
Arroz	3.0	Agua pura	80.3
Aceite de algodón	3.1	Agua de mar	88.0
Harina de soya	3.5		

Fuente: https://www.omega.co.uk/green/pdf/MaterialChar_Guide.pdf

2.9. Mezcla dieléctrica

Dado que muchos productos alimenticios no son homogéneos, como es el caso de los cereales granulados y semillas, en estos se da una mezcla dieléctrica de sus varios componentes. Se han formulado algunas

expresiones para estimar la CD de mezclas (ϵ_m) de dos componentes cuyas constantes dieléctricas son ϵ_1 y ϵ_2 y con volumen fraccional v_1 y v_2 , donde $v_1 + v_2 = 1$. [22].

$$\text{Ecuación de índice de refracción compleja: } \sqrt{\epsilon_m} = v_1\sqrt{\epsilon_1} + v_2\sqrt{\epsilon_2},$$

$$\text{Ecuación de Landau y Lifshitz: } \epsilon_m^{1/3} = v_1\epsilon_1^{1/3} + v_2\epsilon_2^{1/3},$$

$$\text{Ecuación de Bottcher: } \frac{\epsilon_m - \epsilon_1}{3\epsilon_m} = v_2 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_m},$$

$$\text{Ecuación de Bruggeman: } \frac{\epsilon_m - \epsilon_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_m} \right)^{1/3} = 1 - v_2,$$

$$\text{Ecuación de Rayleigh: } \frac{\epsilon_m - \epsilon_1}{\epsilon_m + 2\epsilon_1} = v_2 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2},$$

$$\text{Ecuación de Lichtnecker: } \ln \epsilon_m = v_1 \ln \epsilon_1 + v_2 \ln \epsilon_2$$

Con estas expresiones es posible estimar la CD de una sustancia pura a partir de haber determinado la CD de una mezcla (ϵ_m) donde las sustancias de interés es una de las componentes.

Capítulo 3

Configuración de un sistema de medición de contenido de humedad con espectroscopia dieléctrica

La medición indirecta del CH mediante la técnica de ED se basa, según la teoría expuesta en el capítulo 2, en considerar a la sustancia húmeda como un medio con pérdidas a la propagación de las microondas (UHF, SHF y EHF). Midiendo la atenuación y el desfase que sufren estas ondas cuando atraviesan cierto espesor de sustancia se infiere su CH. Esto es posible gracias a que el agua contenida en la sustancia afecta a las propiedades dieléctricas de la sustancia. Tiene importancia en esta determinación el relativo alto valor de la CD del agua respecto al de otras sustancias. En este capítulo se expone la configuración básica de un sistema de medición.

3.1. Ventajas de la medición del CH usando microondas

La determinación del CH mediante la técnica de ED tiene varias ventajas respecto a aquellas que usan otras técnicas. Entre estas ventajas están las siguientes [1]:

- (a) Las microondas no son sensibles al pH y a la conductividad de la sustancia.
- (b) La humedad es medida en todo el volumen de la sustancia incluyendo su interior.

- (c) La medición no es invasiva. Esto implica la no abrasión de sensores en la sustancia, la no perforación del material y la no interferencia con algún proceso que siga la sustancia.
- (d) Es una medición instantánea, por tanto, el CH puede ser usado como parámetro de regulación en el control de un proceso.

Las primeras aplicaciones de la técnica ED con microondas aplicadas a cereales fueron reportados por Kraszewski (1977) [23] y por King (1991) [24]. Entre los materiales cuyo CH puede ser medido mediante esta técnica se incluyen a carbón, arena, grava, madera, papas, tabaco, productos granulados (cereales) o en polvo. Hay pocas sustancias con restricciones debidas principalmente a que las moléculas de agua no pueden oscilar como por ejemplo en sustancias que contengan cristales de hielo.

3.2. Consideraciones para la configuración de un sistema de medición

En la configuración de un sistema que usa la técnica de ED aplicado a la medición del CH debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- (a) Factibilidad de aplicar esta técnica a las propiedades o naturaleza del producto de interés.
- (b) Adecuar al producto para que tenga la forma y dimensiones que permita la medición, según los requerimientos de la técnica
- (c) Caracterización del producto como adecuado para emplear microondas en la medición de su humedad, mediante la estimación de sus propiedades físicas y dieléctricas.
- (d) La generación y emisión de microondas a través de cierto espesor de sustancia y su recepción, tal que no interfieran con otros dispositivos electrónicos.
- (e) La sustancia actuará como una red de dos puertos a la propagación de las microondas como se ilustra en la Figura 13 y, por tanto, será

factible medir sus parámetros de dispersión (parámetros S) mediante un analizador de redes.

Estas consideraciones conllevan a formular un diagrama de bloques de un sistema de medición con la técnica de ED. Este se muestra en la Figura 10.

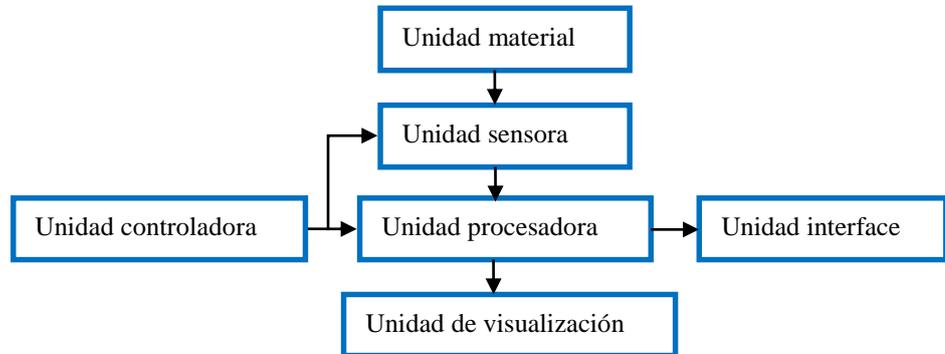


Figura 10. Diagrama de bloques de un sistema de medición con técnica de ED.
Fuente: Elaboración propia, 2015.

Un esquema básico de aplicación de la técnica ED se muestra en la Figura 11 donde se esquematiza las unidades material, sensora, procesadora y controladora. Estas y las otras unidades se describen a continuación.

3.2.1. Unidad material

Es el producto o sustancia húmeda convenientemente adaptada, en forma y dimensiones, para realizar las mediciones según lo requiere esta técnica. Para dar la forma y dimensiones convenientes se usa un depósito no metálico tal que se consiga que la sustancia tenga espesor uniforme. La sustancia adaptada de esta forma está caracterizada por: (a) sus dimensiones (largo, ancho y altura) que definen su volumen, (b) sus propiedades físicas como masa, densidad, temperatura, y CH y (c) sus propiedades dieléctricas (ϵ' , ϵ'').

3.2.2. Unidad traductora o sensora

Conformada por los dispositivos de emisión y recepción de la RF. Como dispositivos de emisión y recepción se usan dos antenas que se instalan a ambos lados de la unidad material, como lo ilustra la Figura 11. La señal emitida por la antena emisora atraviesa el espesor de sustancia. La señal recibida será procesada para deducir de ella los parámetros, atenuación (ΔA) y desfase ($\Delta\phi$), que varían con el CH.

3.2.3. Unidad controladora

Es la unidad electrónica que gobierna la generación, emisión y recepción de RF. Está conformada por fuentes de alimentación, generadores de RF (microondas), amplificadores de la señal de emisión y microprocesadores.

3.2.4. Unidad procesadora de señales

Esta unidad está conformada por procesadores de señales de RF. En esta unidad se procesa la señal de microondas que envía la antena receptora determinando su atenuación y desfase. Se usa para este propósito analizadores de redes vectoriales (VNA).

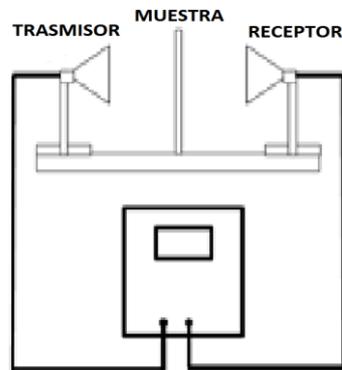


Figura 11. Esquema básico de un sistema de medición de humedad que usa la técnica de la ED ilustrando las unidades de material, sensora, controladora y procesadora.

Fuente: 2001Aviles [25]

3.2.5. Unidad de visualización

Dispositivos que permiten mostrar el valor de la humedad y su variación en el tiempo. También realiza el registro de estos valores en un archivo de datos.

3.2.6. Unidad interface

Dispositivo electrónico que proporciona una señal eléctrica proporcionar al valor del CH para que sea utilizada como señal de regulación en la implementación de un control del proceso.

3.3. Configuración de un módulo de laboratorio de Espectroscopia Dieléctrica

La configuración de un módulo de laboratorio de ED se muestra en la Figura 12. Esta configuración, a modo de un banco de pruebas, tiene en cuenta las unidades del diagrama de bloques de la Figura 10.

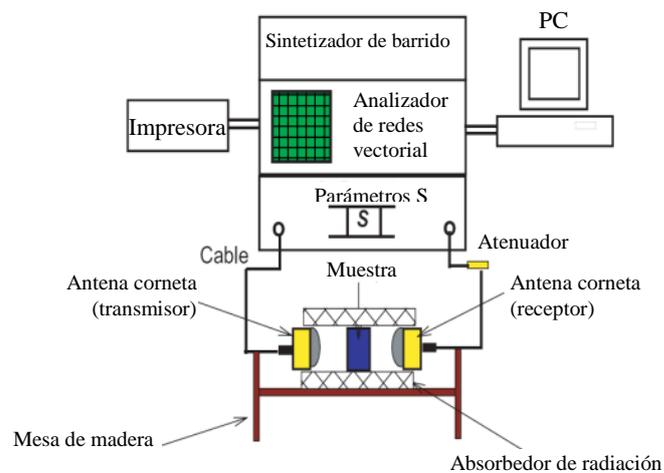


Figura 12. Esquema de un banco de prueba para la medición a nivel de laboratorio de la humedad en sustancias no conductoras.

Fuente: Trabelsi y Nelson, Food Control 2006 [14]

3.3.1. Determinación del contenido de humedad

La determinación del CH de una sustancia húmeda con esta técnica se hace bajo las siguientes consideraciones:

- (a) La sustancia es un medio de propagación de bajas pérdidas ($\epsilon'' \ll \epsilon'$) para las microondas.
- (b) Las ondas mantienen su naturaleza plana y su polarización natural al propagarse a través del espesor de la sustancia.
- (c) No hay reflexiones múltiples de las microondas en la sustancia y en el recipiente que lo contiene.
- (d) La sustancia se comporta como una red de dos puertos (uno de entrada y otro de salida) a la propagación de las microondas en la cual se deben medir los parámetros de dispersión (parámetros S) para la determinación de la humedad.

Una vez instaladas y conectadas todas las unidades del módulo de laboratorio, los pasos que se siguen para la determinación del CH son los siguientes:

- Medición de los parámetros de dispersión S (S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22}) mediante un analizador de redes vectorial (VNA)
- Determinación de la atenuación (ΔA) y desfase ($\Delta\phi$) mediante la aplicación de las expresiones 3.1 y 3.2
- Cálculo de la CD (ϵ_r') y el factor de pérdidas (ϵ_r'') mediante la aplicación de las fórmulas 3.3 y 3.4
- Obtención de curvas de calibración CH versus CD
- Medición instantánea del CH

La atenuación (ΔA) y el desfase ($\Delta\phi$) de la señal de microondas recibida son calculados a partir de los valores del módulo y fase del coeficiente de dispersión/transmisión (S_{21}) de la red de dos puertos asumida, aplicando las siguientes expresiones:

$$\Delta A = 20 \log |S_{21}|, \quad 3.1$$

$$\Delta\phi = \varphi - 360n, \quad 3.2$$

donde n es un número entero a ser determinado y φ solo puede tener valores entre -180° y $+180^\circ$.

Ambos valores de (ΔA) y $(\Delta\phi)$ deben ser tomados como números positivos. El coeficiente de dispersión/transmisión (S_{21}) se obtiene usando un analizador de redes vectorial (VNA) cuyo funcionamiento se describe más adelante (apartados 3.6 y 3.7).

La CD (ϵ_r') y el factor de pérdidas (ϵ_r'') son determinados mediante las siguientes expresiones, (Trabelsi y Nelson, Food Control 2006) [14]:

$$\epsilon_r' = \left(1 + \frac{\Delta\phi\lambda_o}{360d}\right)^2, \quad 3.3$$

$$\epsilon_r'' = \frac{\Delta A\lambda_o\sqrt{\epsilon_r'}}{8.686\pi d}, \quad 3.4$$

donde λ_o es la longitud de onda de la microonda en el espacio libre, d es el espesor de la sustancia en metros, ΔA es la atenuación en decibelios y $\Delta\phi$ es el desfase en grados.

3.3.2. Medición de los parámetros de dispersión

Los parámetros de dispersión llamados también parámetros S (S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22}) se miden mediante un VNA y permiten determinar la atenuación (ΔA) y el desfase ($\Delta\phi$) que sufren las microondas al atravesar cierto espesor de sustancia. Esto es posible debido a que la sustancia húmeda se comporta como una red de dos puertos para la propagación de las microondas, como lo ilustra la Figura 13, donde ocurre la incidencia, reflexión y trasmisión de las ondas.

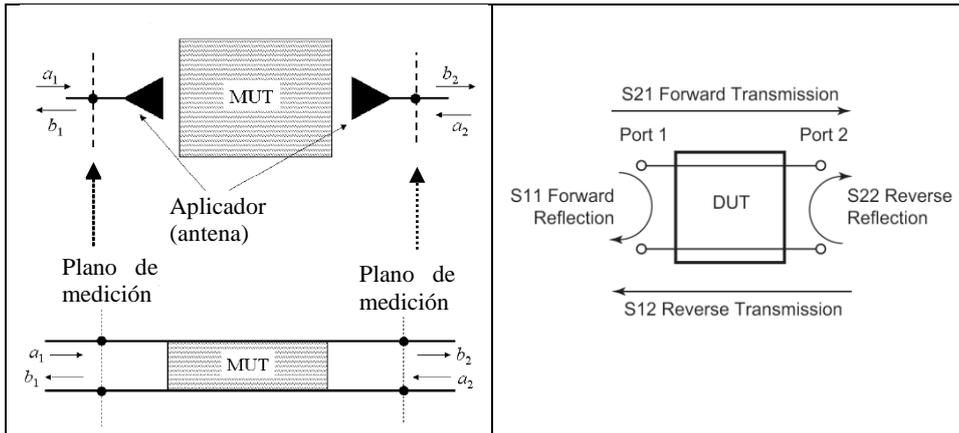


Figura 13. Esquema de una red de dos puertos. (Izquierda): ondas incidentes (a_1 y a_2) y reflejadas (b_1 y b_2) en ambos puertos. (Derecha): Parámetros de dispersión (S) para esta red.

Fuente: Anritsu, Vector Network Analyzer Prime MS4640A and 37000D Application Note

La matriz de parámetros-S para una red de dos puertos es la más común. En este caso, la relación entre las ondas de potencia incidente y reflejada y la matriz de parámetros-S está dada por:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}. \quad 3.5$$

Expandiendo las matrices en ecuaciones, se obtienen las expresiones 3.6 y 3.7

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2, \quad 3.6$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2. \quad 3.7$$

Estas ecuaciones dan la relación entre las ondas de potencia incidente (a_1 y a_2) y reflejada (b_1 y b_2) en cada uno de los puertos de la red en función de los parámetros-S de la red (S_{11} , S_{12} , S_{21} y S_{22}). Una onda de potencia incidente en el puerto 1 (a_1) puede resultar en una onda reflejada, (b_1) y una transmitida (b_2). Sin embargo, si, de acuerdo a la definición de parámetros-S, el puerto 2 termina en una carga idéntica a la impedancia del sistema (Z_o) entonces, debido al teorema de transferencia de potencia máxima,

b_2 será absorbida totalmente haciendo a_2 igual a cero. Por lo tanto:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \text{ y } S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \quad 3.8$$

De forma similar, si el puerto 1 está terminado en la impedancia del sistema, entonces a_1 se hace cero, dando las siguientes expresiones.

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \text{ y } S_{22} = \frac{b_2}{a_2}. \quad 3.9$$

Cada parámetro-S de una red de dos puertos tiene las siguientes descripciones genéricas:

S_{11} es el coeficiente de reflexión de la tensión del puerto de entrada

S_{12} es la ganancia de la tensión en reversa

S_{21} es la ganancia de la tensión en directa

S_{22} es el coeficiente de reflexión de la tensión del puerto de salida

3.3.3. Analizador de redes

Es un instrumento electrónico capaz de analizar las propiedades de las redes electrónicas que trabajan con RF, especialmente aquellas propiedades asociadas con la reflexión y la transmisión de señales eléctricas, conocidas como parámetros de dispersión (Parámetros-S), para redes operando, generalmente, en el rango de 9 kHz hasta 110 GHz.

Hay dos tipos principales de analizadores de redes:

- (a) **SNA (Scalar Network Analyzer)**: Analizador de redes escalar que mide propiedades de amplitud solamente. Es funcionalmente idéntico a un analizador de espectro combinado con un generador de barrido
- (b) **VNA (Vector Network Analyzer)**: Analizador de redes vectoriales que mide propiedades de amplitud y fase, es

llamado también *Medidor de Ganancia y Fase* o *Analizador de Redes Automático*. Los modelos que se pueden encontrar más comúnmente son los de dos puertos, pero también existen modelos de cuatro puertos.

3.4. Módulo de laboratorio de Espectroscopia Dieléctrica implementado en la UDEP

Como parte de tener las a la técnica de ED y sus aplicaciones como línea de investigación, se ha implementado en la UDEP un módulo básico de esta técnica para pruebas de laboratorio en el rango de las microondas. Esta implementación se ha realizado en el laboratorio de Física General de la UDEP y se detalla en el capítulo 4.

3.5. Configuración de un sistema de medición en una línea de proceso

La implementación de un sistema de medición del CH usando la técnica de ED aplicado en una línea de proceso industrial debe hacerse teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- (a) Determinar el punto o lugar del proceso donde se realizará la medición del CH.
- (b) Factibilidad de aplicar la técnica de ED a las propiedades o naturaleza del producto del proceso en el lugar escogido.
- (c) Caracterización del producto como adecuado para emplear microondas en la medición de su humedad (Propiedades física y dieléctricas).
- (d) Adecuar el proceso, en el punto escogido, para que el producto tenga la forma y dimensiones que permita la medición según los requerimientos de la técnica y para que el proceso no sea interrumpido.

En la aplicación a una línea de proceso industrial el módulo de ED tiene las mismas unidades de aquel módulo usado para pruebas y

mediciones de laboratorio descrito anteriormente, pero haciendo las adaptaciones necesarias en algunas de ellas para que la aplicación industrial sea lo más práctica y robusta posible, según como lo ilustra la Figura 14. Las variantes que tienen las unidades se explican a continuación.

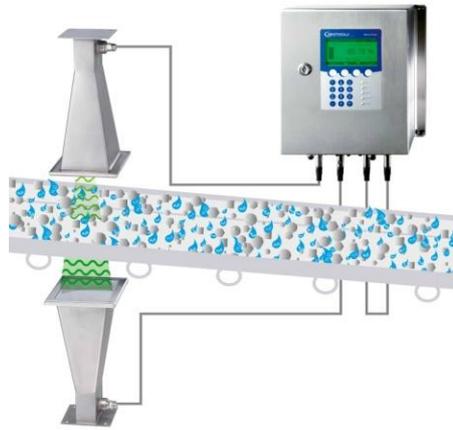


Figura 14. Esquema de la aplicación de la técnica de ED en una línea de proceso. La unidad sensora se adapta al proceso y las otras unidades se ensamblan en un solo contenedor

Fuente: <http://www.berthold.com/ww/en/pub/home.cfm>

- **Unidad material**

Es la sustancia húmeda en el punto del proceso escogido para hacer la medición. En este punto la sustancia será adaptada en forma y dimensiones según lo requiere la técnica. El principal requerimiento es que la sustancia tenga un espesor uniforme, esto se puede conseguir de varias formas, dependiendo de la naturaleza del proceso:

- Llenando momentáneamente un porta muestras de sección rectangular de al menos diez centímetros de espesor con la sustancia (Figura 15 izquierda)
- Adecuar la sustancia que va en una banda transportadora para que tenga el espesor uniforme (Figura 15 derecha)

- **Unidad sensora**

Las antenas de la unidad sensora se instalan tal que aseguren que las microondas emitidas atraviesen el espesor uniforme de la sustancia.

Las unidades material y sensora estaran ubicadas en el punto del proceso industrial escogido para realizar la medicion.

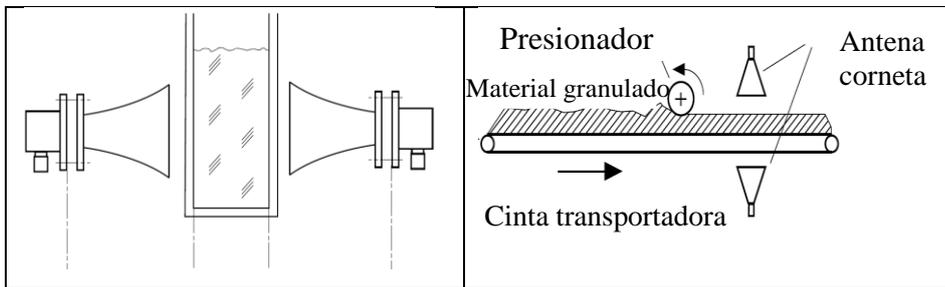


Figura 15. Adecuación de una sustancia para que tenga un espesor uniforme: (izquierda) llenando una caja porta-muestras de sección rectangular y (derecha) en una banda transportadora. Fuente: [26]

- **Unidad controladora**

Esta unidad se aloja en un contenedor ubicado a cierta distancia de las unidades material y sensora. Esta unidad genera las microondas que alimentan a la antena emisora de la parte sensora vía un cable coaxial. Así mismo de la antena receptora la señal recibida se lleva a la unidad procesadora a través de un cable coaxial.

- **Unidad procesadora de señales**

Esta unidad convierte la señal de microondas de la recepción en una señal eléctrica de salida (e) variable con el CH. Está conformada por un procesador de señales de microondas que procesa la señal que envía la antena receptora determinando su atenuación y desfase.

- **Unidad de visualización**

Dispositivo que permiten mostrar el valor de la humedad y graficas de sus variaciones y también la grabación de estos en un registrador de datos. Para este propósito se usa un computador y su monitor.

- **Unidad interface**

Dispositivo electrónico que acondiciona la señal proporcionar al valor de la humedad para ser utilizada como señal de control de un proceso.

Para aplicaciones industriales estas cuatro últimas unidades (controladora, procesadora, visualización e interface) se pueden alojar en un solo contenedor.

3.5.1. Módulo Wave Tester

El módulo Wave Tester (WT, Figura 16) es un dispositivo electrónico que contiene a las unidades controladora y procesadora de un sistema de ED en el rango de las microondas para aplicaciones industriales. Este módulo fue desarrollado en la década del 2000 por la compañía “Meet electronic Ltd” (2012) [27] en asociación con la “Escuela Universidad Profesional de la Suiza Italiana” (SUPSI).



Figura 16. Módulo Wave Tester

Detalles de las características técnicas, instalación, operación y mantenimiento de este módulo han sido reportados por Durand (2014) [28] en su tesis de pregrado de la Facultad de Ingeniería de la UDEP.

El módulo WT funciona conectado con una PC vía un cable Ethernet que debe tener instalado el software “*MEET WTSX* [29]

Los principales parámetros de funcionamiento del módulo WT son los siguientes:

- Frecuencia: 1-2 GHz
- Forma de la señal emitida: FM
- Potencia de RF emitida: 1-10 mW
- Temperatura de operación: 10 – 40°C
- Potencia de consumo: 40 W
- Dimensiones: 12.5”x10.5”x4.5”

- Peso: 3.60kg

Usando este módulo la configuración de un sistema de medición tiene las siguientes partes:

- Unidad material: Sustancia humedad
- Unidad sensora: Dos antenas (una transmisora y una receptora)
- Unidad controladora: Módulo WT
- Unidades procesadora y visualizador: Una PC con el software MEET WTSX.
- Unidad interface: Tarjeta PCI insertada en la PC

3.5.2. Obtención de curvas de calibración

Con este sistema de medición el CH de una sustancia se infiere indirectamente a partir de determinar, primero, su CD. Este parámetro se determina instantáneamente, por ello para la medición instantánea de la CH previamente se debe obtener una curva de calibración (CD versus CH), para cada producto.

La obtención de curvas de calibración se hace midiendo la CD de la sustancia con el sistema de ED y el CH con un equipo de medición de este parámetro.

Curvas de calibración del queque de prensa en la elaboración de harina de pescado y de granos de café obtenidos bajo esta investigación son presentadas en el capítulo 5

3.5.3. Prototipo de sistema de medición de humedad en línea de proceso

En la UDEP, se diseñó e implementó un prototipo de un sistema de ED para ser aplicado en la medición de humedad en línea de procesos de productos de la industria regional. Este desarrollo se ha basado en el uso del módulo WT y se ha aplicado en la medición de humedad en línea de proceso de la elaboración de la harina de pescado (Figura 17). Los detalles de esta

implementación son presentados en el capítulo 5.



Figura 17. Sistema de medición de CH con técnica ED basado en el módulo WT aplicado en el proceso de elaboración de harina de pescado (Foto: Rodolfo Rodríguez, 2012).

Capítulo 4

Implementación de un módulo de espectroscopia dieléctrica para pruebas de laboratorio

El desarrollo y aplicación de la técnica de Espectroscopia Dieléctrica para mediciones y control en línea de procesos ha sido tomada como una línea de investigación en los laboratorios de Sistemas Automáticos de Control y de Física General de la Facultad de Ingeniería de la UDEP. Esto tiene como propósito estudiar, desarrollar y aplicar esta técnica de medición en la industria regional y nacional. Es por ello que se ha implementado en UDEP un módulo experimental de esta técnica

4.1. Partes del módulo

El módulo implementado tiene la configuración mostrada en la Figura 12. Sus principales componentes son:

- Un analizador de redes vectorial (VNA),
- Un generador de radiofrecuencias,
- Una PC con el software “GPIB configurator”
- Dos antenas y
- Un depósito porta-muestras.

A continuación, se explica brevemente la función de cada uno de estos componentes en el módulo.

4.1.1. Analizador de redes vectorial (VNA)

El analizador de redes vectorial (VNA) determina los parámetros de reflexión (Parámetros S) tal como fue explicado en el apartado 3.3. El VNA adquirido para este módulo es de la marca Hewlett Packard (HP; modelo 8753C) que opera en el rango de 300kHz a 3 GHz (HP 8753C Operating manual) [30].



Figura 18. Panel frontal del analizador de redes vectorial (HP 8753C)

Fuente: <http://www.ebay.com/itm/HP-Agilent-8753C-Network-Analyzer-300-kHz-6-GHz>.

4.1.2. Generador de radiofrecuencias

Este dispositivo genera radiofrecuencias en el rango de microondas (UHF: 300MHz–3GHz). El generador de radiofrecuencia usado en este módulo es marca Agilent modelo N5181A que genera RF entre 100KHz y 3 GHz.



Figura 19. Panel frontal del generador de radiofrecuencia Agilent modelo N5181A

Fuente: <https://www.google.com.pe/search?q=Agilent+modelo+N5181>

4.1.3. Computadora y software

Se usa una computadora HP portátil (Pavilion Notebook PC) donde se ha instalado el software “GPIB configurator” que permite programar e interactuar con el VNA.

4.1.4. Antenas

Las dos antenas usadas en este módulo tienen la función de emitir (antena transmisora) y de recibir (antena receptora) la radiofrecuencia que debe atravesar un determinado espesor de la muestra.

Los tipos de antenas que mejor se adecuan para ser usadas en la unidad sensora de este módulo son (a) espiral plana y (b) corneta. Los detalles de diseño y construcción de estos dos tipos de antenas se exponen en el apartado 4.3.

4.1.5. Depósito porta-muestra

El depósito porta-muestra da a la sustancia la forma y dimensiones requeridas para que tenga un espesor uniforme en el momento de la medición. Este depósito se llena con la sustancia húmeda durante el corto tiempo que dura la medición.

Las antenas de la unidad sensora se ubican a ambos lados de este depósito tal que las microondas emitidas por una de ellas atraviesen el espesor de sustancia.

A continuación, se dan algunas consideraciones sobre el diseño y material para la construcción del depósito porta-muestras.

4.2. Diseño y material del depósito porta-muestra

El depósito porta-muestras se diseña en forma de un paralelepípedo tal que la sustancia pueda ser vertida y tenga un espesor uniforme al

momento hacer la medición (Figura 20). El ancho del depósito determina el espesor de la sustancia contenida. Este espesor depende de la textura de la sustancia a medir y debe escogerse adecuadamente, ni muy pequeño tal que la sustancia se atasque, ni muy grande que demore demasiado su llenado. En la práctica el ancho del depósito se escoge entre unos 10 a 20 centímetros. Las otras dos dimensiones (largo y alto) de la porta-muestras se determinan de acuerdo al área disponible para montar la unidad sensora y al tamaño de las antenas.

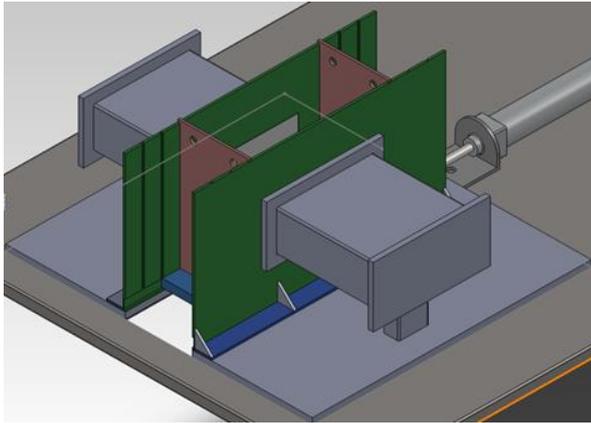


Figura 20. Diseño del depósito porta muestras en forma de paralelepípedo con dos guías de ondas como antenas emisora y receptora.

El tipo y disposición de las antenas a ambos lados de la porta-muestras determina el tipo de material con que se debe construir el depósito pues este debe ser transparente a la propagación de las microondas. Por lo general el material debe ser no metálico y resistente a las condiciones a la que estarán sometidas tales como vibraciones y ambientes agresivos (altas temperaturas, salinidad, corrosión, etc.).

Entre los materiales adecuados para la construcción del depósito porta muestras está el Ertalite (Politereftalato de etileno) que se suele emplear en aplicaciones mecánicas.

Cuando se emplean antenas cornetas el material del depósito porta-muestras puede ser metálico. En este caso se cuidará que el metal sea inoxidable.

4.3. Diseño y construcción de antenas

La unidad sensora de esta técnica de medición usa dos antenas (una transmisora y otra receptora) por lo que el diseño y construcción de estas es importante y debe realizarse adecuadamente. Entre los criterios a considerar para el diseño y construcción del tipo de antena están: (a) amplio ancho de banda, (b) alta ganancia y (c) fácil construcción e instalación.

A continuación, se expone el diseño y construcción de dos tipos de antenas que reúnen estas características y son adecuadas este tipo de mediciones:

- Antena espiral plana
- Antena bocina

No se profundiza sobre la teoría general de antenas ya que es bien abordado en muchos textos, entre ellos: [31] Balanis, [32] Stutzman, W. L. y Thiele, G. A. con *Antenna theory and design* y [33] H. J. Visser con *Antenna theory and applications*. A continuación, se detallan los aspectos más relevantes del diseño y construcción de estos dos tipos de antena.

4.3.1. Antena espiral plana

La antena espiral plana tiene sus dipolos de radiación en forma espiral contenidos en un mismo plano. Los parámetros de su diseño se expresan en coordenadas polares (Figura 21), la espiral de Arquímedes es la forma más usada.

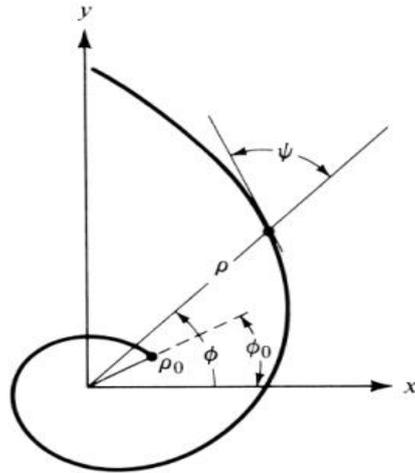


Figura 21. Parámetros de diseño de una antena espiral plana de un brazo ([31] Balanis, C. A., 2005, p. 615).

El diseño de esta antena es independiente de la frecuencia de trabajo porque tiene amplio ancho de banda (0.3 a 3 GHz)

Estas antenas se construyen, generalmente, en una tarjeta de circuitos impresos metalizada por un solo lado. En la Figura 22 izquierda se muestra una antena espiral plana construida para 1.5 GHz y en la Figura 22 derecha se muestra el patrón de radiación, en 2D, que caracteriza a este tipo de antenas. Es una antena de polarización circular y de radiación bidireccional.

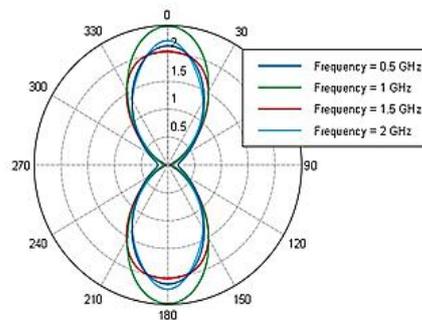
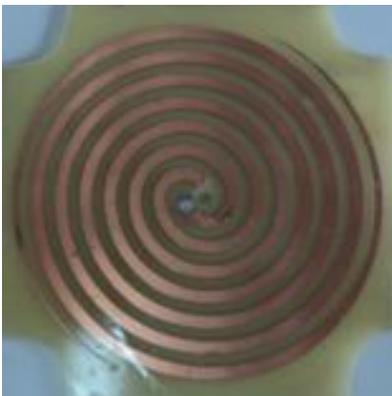


Figura 22. Izquierda: Antena espiral plana de dos dipolos para 1.5GHz hecha en placa de circuito impreso. Derecha: Patrón de radiación en 2D.

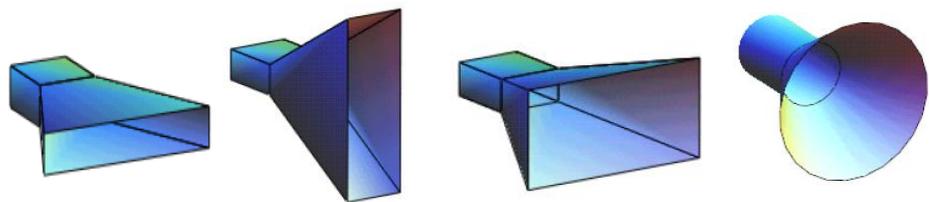
Fuente: Elaboración propia

La radiación bidireccional de esta antena es una desventaja ya que en su lóbulo secundario influirán los disturbios que existan alrededor de la zona donde se realice la medición. Estos disturbios se pueden presentar por señales transmitidas a la misma frecuencia de trabajo, el cruce de personas, etc. generando distorsiones en las señales emitidas y reflejadas, afectando las mediciones realizadas por el sistema y dando como resultado valores erróneos en la determinación de la CD. Sin embargo, el lóbulo secundario se puede atenuar empleando esponja industrial de alta densidad.

Esta antena se caracteriza por ser muy liviana y de pequeñas dimensiones, por lo que se puede instalar en reducidos espacios.

4.3.2. Antena corneta

La antena corneta está compuesta por una guía de onda y una bocina acoplada a la abertura de la guía de onda. Las formas más comunes de este tipo de antenas son rectangulares, piramidales y cónicas, cuyas formas se ilustran en la Figura 23



Bocina en plano H Bocina en plano E Bocina Piramidal Bocina Cónica
 Figura 23. Formas de antenas cornetas de sección rectangular, piramidal y cónica.

Los campos eléctrico y magnético se propagan dentro de la guía de onda y la bocina, por esta razón la potencia perdida en la radiación es mínima. Esta mínima pérdida se debe al dieléctrico (normalmente aire) por donde se propagan estos campos y por el material con que se ha construido la antena. Gracias a la apertura que posee al final, esta antena tiene alta directividad y ganancia.

Este tipo de antena se emplea en la banda de microondas (UHF, SHF y EHF). Las dimensiones de la guía de onda y la

bocina decrecen a medida que la frecuencia de operación aumenta. La bocina actúa como un adaptador de impedancias entre la guía de onda y el aire, reduciendo así la señal reflejada. Además, la radiación es direccional (en dirección de la apertura) y trabaja en un amplio ancho de banda, lo cual permite realizar mediciones en rangos de frecuencia grandes.

4.4. Guía de onda

Una guía de onda se comporta como filtro pasa-alto, por tanto, no puede guiar RF de frecuencia menor a la frecuencia de diseño. El modo de propagación de una guía de onda depende de la forma física de la misma. El modo fundamental de propagación de la guía de onda es transversal eléctrico (TE_{10}).

Las dimensiones de la guía de onda se escogen tal que la RF de trabajo se pueda propagar en su interior. Para dimensionar una guía de onda se debe conocer la frecuencia (f_0) de funcionamiento de la antena, con la cual se determina la longitud de ondas (λ_0) de trabajo de cuya magnitud dependerán las dimensiones de la guía de onda.

La frecuencia de corte (f_c) del filtro pasa alto se determina a partir de considerar la longitud de onda de esta frecuencia de corte (λ_c) entre el rango de $1.3 \lambda_0 < \lambda_c < 2 \lambda_0$. La longitud de onda de la guía (λ_g) es calculada aplicando la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\lambda_g^2} = \frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \quad (4.1)$$

4.4.1. Guía de onda rectangular

Las tres dimensiones de una guía de onda rectangular; ancho (a), alto (b) y largo (L); como se esquematiza en la Figura 24, dependen de las magnitudes de λ_0 , λ_c y λ_g .

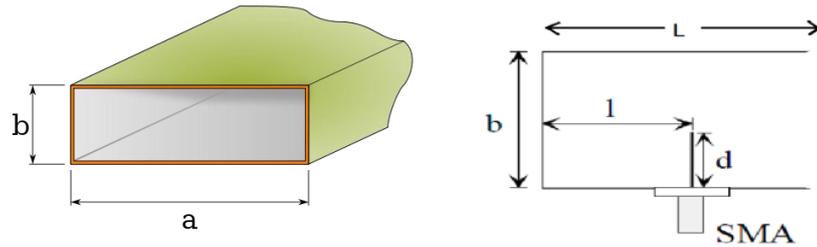


Figura 24. Izquierda: Esquema de las dimensiones de una guía de onda de sección rectangular. Derecha: Esquema de ubicación del punto de alimentación en una guía de onda

Las magnitudes de a , b y L se eligen según los siguientes criterios

Ancho (dimensión horizontal según el eje x o plano H): $a = \lambda_c/2$

Alto (dimensión vertical según el eje y o plano E): $b < \lambda_0/2$

Largo de la guía de onda (según el eje x): $L = 3\lambda_g/4$

Incide en el buen funcionamiento de una guía de onda la ubicación del punto de alimentación. En una guía de onda rectangular este se ubica sobre la línea central de la cara inferior (de área $a \times L$) y a una distancia $l = \lambda_g/4$ del extremo cerrado de la guía de onda. La longitud (d) del dipolo de alimentación se elige igual a $\lambda_0/4$. Este alambre puede ser instalado usando un conector N, BNC o SMA tal que se alimente con RF mediante un cable coaxial como se muestra en la Figura 24 derecha.

4.4.2. Diseño y construcción de una guía de onda de sección rectangular para 1.5GHz

En la Tabla 10 se resume los datos y resultados del diseño de una guía de onda rectangular para 1.5 GHz siguiendo las ecuaciones y criterios expuestos en el apartado anterior.

Tabla 10. Datos y resultados del diseño de una guía de onda rectangular para 1.5GHz

Datos	Símb.	Valor	Unid	Relativo	Cálculo
Frecuencia	f_0	1.50	GHz		
Longitud de onda	λ_0	20.00	cm	$1 \lambda_0$	$\lambda_0=c_0/f_0$
Longitud de onda de corte	λ_c	34.00	cm	$1.7 \lambda_0$	$f_c=f_0/1.7=0.882$ GHz
Longitud de onda de la guía	λ_g	24.72	cm	$1.236 \lambda_0$	$f_g=f_0/1.236=1.213$ GHz
Resultados					
Ancho (eje x o plano H)	A	17.00	cm	$0.85 \lambda_0$	$\lambda_c/2=17$ cm
Alto (eje y o plano E)	B	7.00	cm	$0.35\lambda_0$	$b=7$ cm ($< \lambda_0/2=10$ cm)
Longitud de la guía de onda (Eje z)	L	18.54	cm	$0.927\lambda_0$	$3\lambda_g/4=18.54$ cm
Longitud del alambre alimentador	D	5.00	cm	$0.25\lambda_0$	$L= \lambda_0/4=5$ cm
Distancia del punto alimentador	L	6.18	cm	$0.31 \lambda_0$	$L= \lambda_g/4=6.18$ cm

La construcción de la guía de onda de sección rectangular a partir de los resultados de este diseño fue hecha con láminas de aluminio como se muestra en la Figura 25 (Izquierda). Las caras de ambos extremos (cerrados y abiertos) tienen las prolongaciones necesarias con agujeros para facilitar la instalación de esta antena.

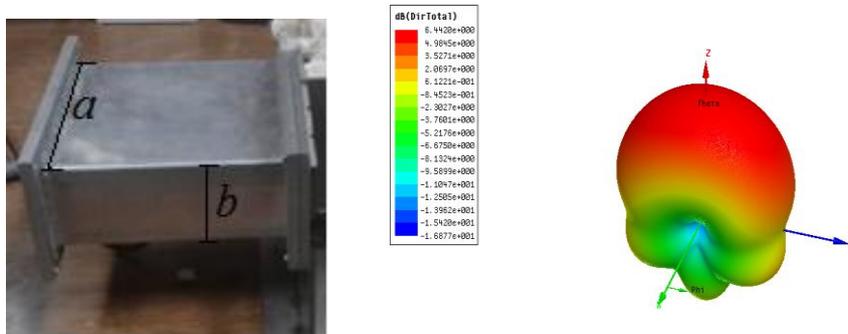


Figura 25. Izquierda: Guía de onda de sección rectangular para 1.5 GHz construida de láminas de aluminio. Derecha: Patrón de radiación en 3D de la guía de onda

Fuente: Elaboración propia

Una guía de onda tiene buena direccionalidad de la señal emitida y ocupa menos espacio que si tuviera corneta. El patrón de radiación de una guía se muestra en la Figura 25 (Derecha).

Dado que la técnica de ED no requiere potencias elevadas, es suficiente emplear un par de guías de ondas como antenas (una trasmisora y una receptora) para implementar un sistema de medición.

4.5. Módulo de laboratorio implementado en UDEP

El módulo implementado en UDEP para fines experimentales y de investigación de la técnica de ED está ubicado en el Laboratorio de Física General (Figura 27). Su componente principal es el Analizador de Redes Vectorial (VNA, HP; modelo 8753C).

El diagrama de conexiones de la configuración básica de este VNA para la realización de pruebas experimentales de la técnica de ED es el mostrado en la Figura 26.

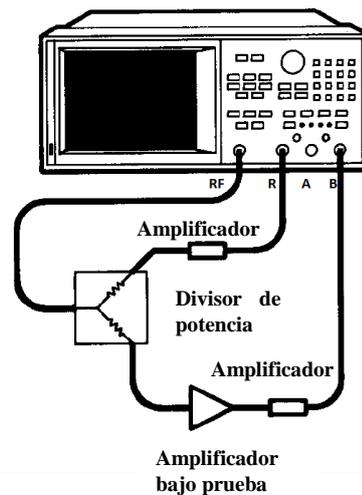


Figura 26. Diagrama de conexiones del VNA para pruebas de laboratorio
Fuente: HP 8753C Operating manual.

En este diagrama los conectores de salida y entrada del VNA son:
 RF es la salida de radiofrecuencia
 R es la entrada de la señal de referencia
 A es la entrada de la señal en el canal A
 B es la entrada de la señal en el canal B

Es necesario un divisor de potencia (Power Splitter) y a veces un par de dispositivos de amplificación de potencia (PAD=Power Amplifier Device). En el lugar del amplificador bajo prueba se conecta la unidad sensora (el depósito porta-muestras con las dos antenas).

La Figura 27 muestra el módulo implementado en UDEP conectado a un depósito porta muestras.



Figura 27. Módulo de ED para pruebas de laboratorio implementado en la UDEP
Fuente: Elaboración propia (Foto: Rodolfo Rodríguez, 2015)

4.6. Procedimiento de pruebas y medición

El procedimiento para realizar pruebas de laboratorio de ED con este módulo es el siguiente:

- a. El amplificador bajo prueba de la Figura 26 será reemplazado por la unidad sensora del sistema de medición conformado por el depósito porta muestras con las dos antenas (una transmisora y otra receptora) instaladas en ambos lados.
- b. Primero se medirá la atenuación y desfase con el depósito porta muestras en vacío.
- c. Luego se llena el depósito porta muestras con la sustancia o el producto húmedo con valor de CH conocido y se mide S_{12} y ϕ .
- d. La atenuación (ΔA) y el desfase ($\Delta\phi$) se determinan aplicando las ecuaciones 3.1 y 3.2.

- e. Con estos valores de atenuación y desfase se determinan las componentes real e imaginaria de la permitividad eléctrica compleja (ϵ_r' y ϵ_r'') aplicando las ecuaciones 3.3 y 3.4.
- f. Variar el valor de CH de la sustancia y repetir el procedimiento a partir del paso c.
- g. Graficar los valores de CH versus la CD (parte real, ϵ_r' de la permitividad eléctrica) para obtener una curva de calibración para dicha sustancia.

Capítulo 5

Aplicación en la medición del contenido de humedad en la industria regional

Una de las primeras aplicaciones, en nuestro país, de la técnica de ED para la medición del CH ha sido en la industria pesquera, específicamente en la elaboración de la harina de pescado [17]. Se ha implementado un sistema en la medición, en línea, después de la etapa de prensado, donde al producto se le conoce como queque de prensa. Se plantea extender el uso de esta técnica de medición en el proceso del café y del cacao productos importantes de la agroindustria regional de buena calidad y mucha demanda.

5.1. Importancia de la industria de la harina de pescado

Perú, Chile y Japón se disputan, desde la década de 1950, el primer lugar de la producción y exportación de harina de pescado. Esta industria tuvo un crecimiento notable en el Perú en las décadas de 1950 y 1960 contribuyendo a que el crecimiento del sector pesquero peruano sea uno de los más notables a nivel mundial. De la mano de este crecimiento han ido también las exportaciones de este producto que se han visto reflejadas en el notable crecimiento de la participación del sector pesquero en el PBI peruano y en el volumen de divisas. Al 2013 la pesquería en el Perú es el segundo sector en importancia como generador de divisas después de la minería [34].

La harina de pescado es uno de los principales insumos en la acuicultura, la alimentación porcina, la avicultura, la alimentación de mascotas y, muchas veces también, en la alimentación de consumo humano directo. Ésta industria tiene importante repercusión en los niveles de empleo en el Perú.

El Perú puede mejorar sus ingresos por la venta de su harina de pescado aumentando su valor agregado, mejorando su proceso y calidad, teniendo como ventaja que las capturas de las especies hidrobiológicas, que son la materia prima, se realiza en zonas cercanas a las fábricas.

5.2. La materia prima y el producto final

La harina de pescado se obtiene a partir de procesar algunas especies marinas. En Paita, específicamente, se usa, Anchoqueta Blanca (*Anchoa nasus*), Anchoqueta Negra (*Engraulis ringens*), Merluza (*Merluccius gayi peruanus*), Pota (*Dosidicus gigas*).

Entre las especies más usadas están las anchovetas y el producto final es una harina con textura de polvo obtenido a partir de cocer, deshidratar, moler y secar la pulpa y hueso de la materia prima (Figura 28).

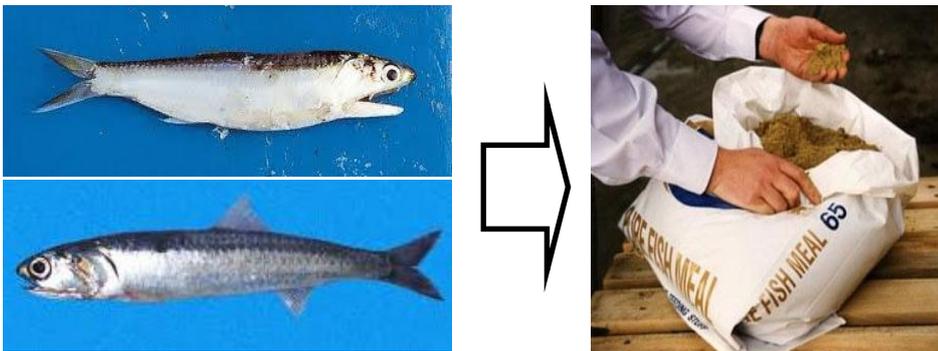


Figura 28. Izquierda: Anchoqueta Blanca y Anchoqueta Negra (izquierda) usadas como materias primas en la elaboración de la harina de pescado (derecha).

La cadena de valor de la elaboración de la harina de pescado sigue las etapas se ilustran en la Figura 29.

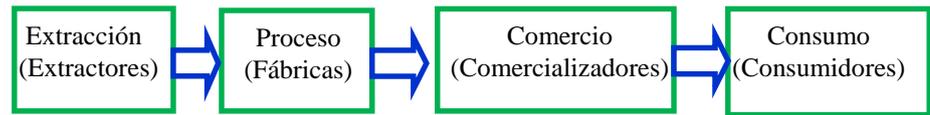


Figura 29. Cadena de valor de la harina de pescado.
Fuente: Elaboración propia.

5.3. Proceso de la harina de pescado

El proceso de elaboración de la harina de pescado tiene las siguientes etapas: (a) Ingreso de la materia prima, (b) Almacenamiento en pozas de lavado, (c) Cocción, (d) Prensado, (e) Separación de sólidos, (f) Concentración de agua de colas, (g) Pre-secado, (h) Secado, (i) Enfriado, (j) Molienda y (k) Envasado. La Figura 30 muestra parte de la planta de elaboración de harina de pescado de Pesquera Tierra Colorada (PTC) ubicada en Paita, Piura.



Figura 30. Planta del proceso de elaboración de harina de pescado de Pesquera Tierra Colorada (PTC) en Paita, Piura.

Fuente: Elaboración propia.

5.4. Implementación de un sistema de medición de humedad en el proceso de elaboración de la harina de pescado

El sistema de medición del CH se implementó después de la etapa de prensado donde al producto se le denomina “Queque de prensa”. Esta implementación se esquematiza en la Figura 31 indicando la alternativa

de usar el valor del CH como parámetro de control para regulación del prensado.

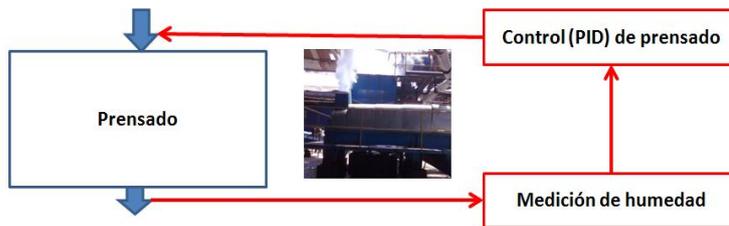


Figura 31. Diagrama de bloque de la implementación del sistema de medición del CH después de la etapa de prensado con alternativa de un control PID en el prensado.

Fuente: Elaboración propia.

El sistema de medición de humedad implementado para esta aplicación está formado por las seis partes o unidades de la configuración presentada en los apartados 3.3 y 3.5 del capítulo 3. En esta específica aplicación estas unidades son las siguientes:

5.4.1. Unidad material

El queque de prensa es el producto del proceso después que la especie marina es cocida y luego prensada. En este producto pulpa y hueso de la especie aparecen muy mezclados formando una masa caliente con CH de entre 40 % a 60 %. Una parte es vertida al depósito porta muestras para realizar la medición del CH.

Se midió el CH de queque de prensa de tres especies marinas: pota, merluza y anchoveta. Estos tres tipos tienen contenidos de humedad diferentes, siendo el más húmedo el queque de pota.

5.4.2. Unidad sensora

La unidad sensora está conformada por el depósito porta-muestra y las dos antenas que se encuentran instaladas a ambos lados de este depósito como se observa en la Figura 32.

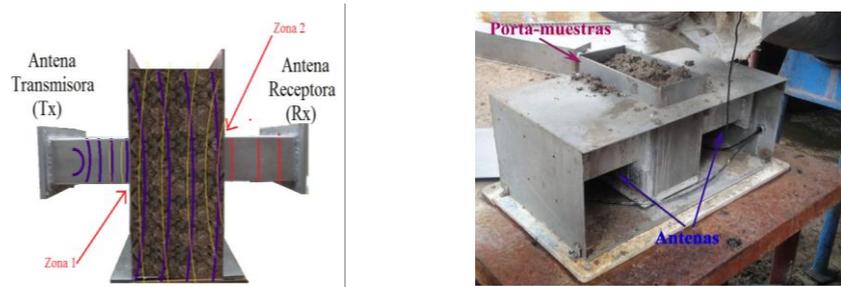


Figura 32. Izquierda: Diseño de unidad de sentido, depósito porta-muestra y antenas. Derecha: Unidad de sentido instalada en la planta de elaboración de harina de pescado de PTC. Se muestra al depósito porta-muestras llenado con queque de prensa (unidad material).

El depósito porta-muestras permite retener momentáneamente una muestra del queque de prensa para realizar la medición. El material del porta muestras debe permitir la propagación de la RF emitida por una de las antenas para minimizar las reflexiones. Se emplearon guías de onda como antenas, emisora y receptora, construidas de láminas de aluminio para que trabajen a una frecuencia de 1.5 GHz según el diseño del apartado 4.4.2.

5.4.3. Unidades controladora y procesadora

En esta aplicación el módulo WT cumple la función de las unidades controladora y procesadora, pues hace un pre-procesamiento de la señal recibida y su operación implica conectarse a una PC cuyo CPU realiza el post-procesamiento de la señal para obtener el valor de la CD. Este dispositivo es portátil, está ensamblado en forma compacta, y se puede adaptar a ambientes industriales. Para obtener el valor del CH, en la PC se emplea el software “*MEET WTSX*” que permite, mediante un algoritmo matemático, procesar los parámetros de dispersión adquiridos.

5.4.4. Unidad display o de visualización

Está conformada por la pantalla de la PC que permite observar los valores del CD y del CH en forma amigable, numérica

y gráficamente, a través de las ventanas de interacción del software *MEET WTSX* en la pantalla de la PC.

5.4.5. Unidad interface

La unidad interface está compuesta por una tarjeta PCI (PCI A0 Card, ADLINK, PCI6208A) que da una salida de corriente proporcional al valor de la humedad tal que con esta señal se implemente una interface que permita emplear el valor de la humedad como parámetro de regulación en un control del proceso, en este caso, para regular el prensado. El esquema del ensamblado de estas unidades se muestra en la Figura 33.

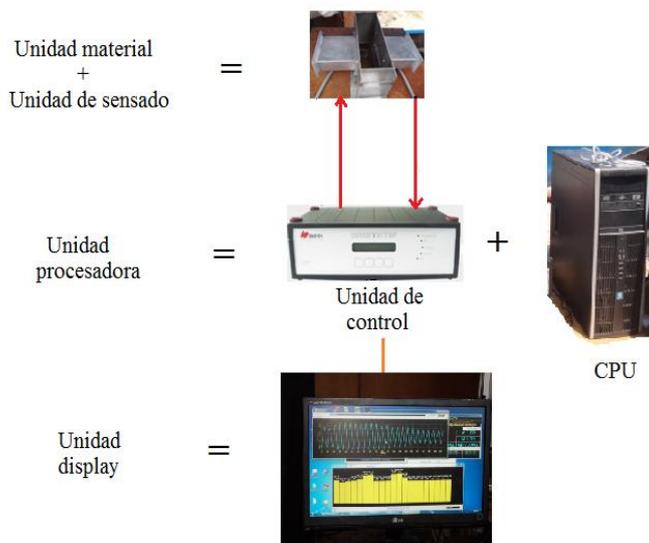


Figura 33. Partes del sistema de medición de CH implementado en la elaboración de la harina de pescado

Fuente: [28]

5.5. Acople de la unidad sensora al proceso de la harina de pescado en la PTC

El queque de prensa que sale del prensado cae a un tornillo sin fin que lo lleva hacia la bomba de concentrado. En este punto, donde el queque de prensa cae al tornillo sin fin, se acopló el depósito porta

muestras que retiene momentáneamente a una cierta cantidad de este queque para hacer la medición de su CH. Este depósito está provisto de un mecanismo que permite devolver el producto al proceso una vez hecha la medición como se muestra en la Figura 34.

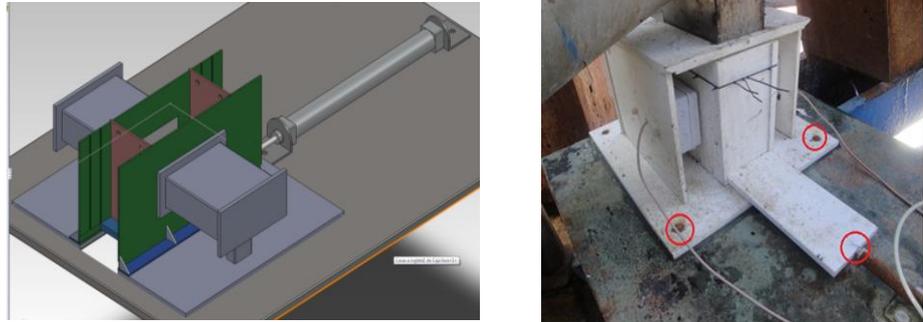


Figura 34. Izquierda: Diseño de depósito porta-muestras. Derecha: Acoplado al chute

Este mecanismo fue diseñado y construido en la UDEP como una innovación en la unidad de sentido del sistema de medición adaptado al proceso de la harina de pescado. Esta innovación ha merecido la obtención de una patente de INDECOPI [35] ver anexo 1.

5.6. Pruebas de medición en la planta de PTC y obtención de curvas de calibración

Las primeras pruebas de aplicación de este medidor del CH para la industria pesquera fueron realizadas en la planta de la Pesquera Tierra Colorada (PTC) en Paita. Las muestras para estas primeras pruebas fueron de queque de prensa de Merluza y Anchoveta. Se comprobó la sensibilidad del medidor a los niveles del CH que tiene el queque de prensa.

Para obtener el valor del CH se debe obtener una curva que relacione el valor de la CD y el valor del CH. Esta es una curva de calibración que se debe obtener para cada producto o sustancia.

Después de las pruebas realizadas se procedió a obtener las curvas de calibración (CD vs. CH) para cada especie procesada. Con los valores obtenidos se realizó una interpolación para estimar la CD de la especie empleada.

La Figura 35 muestra las curvas de calibración para la merluza y la anchoveta

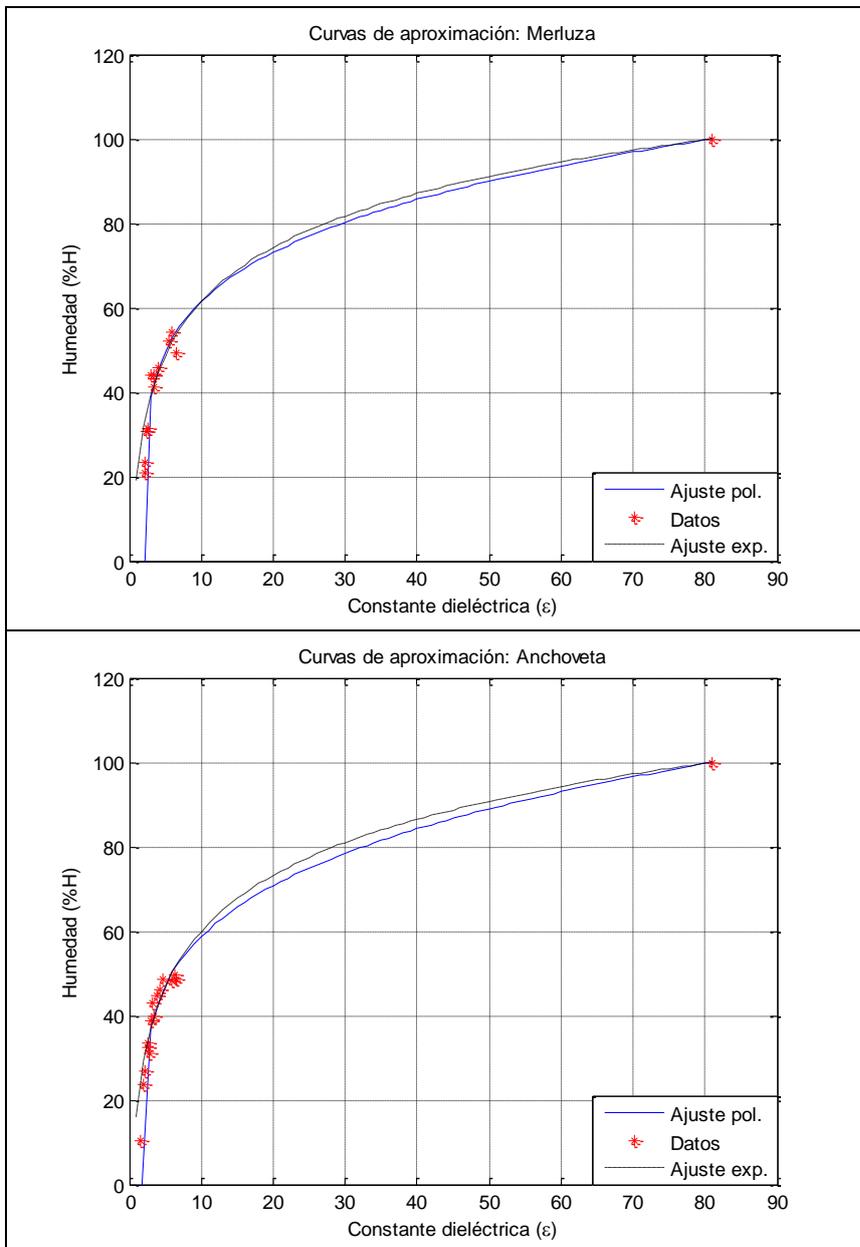


Figura 35. Curvas de calibración (CH vs CD) para la Merluza y para la Anchoveta

Teniendo en cuenta las curvas de aproximación polinómica inversa se ha estimado, por extrapolación, un valor de CD para cada tipo de queque de prensa cuando está totalmente seco (0 % de humedad) y una frecuencia central de trabajo de 1.5 GHz. En la Tabla 11 se presentan estos resultados.

Tabla 11. Constante dieléctrica de queque de prensa a 1.5GHz.

Tipo de queque de prensa	Constante dieléctrica (ϵ_r)
Queque de pota	3.417
Queque de merluza	2.117
Queque de anchoveta	1.785

5.7. Sistema de medición implementado en la planta de PTC

El sistema de medición implementado en la planta de elaboración de harina de pescado de la Pesquera Tierra Colorada (PTC) mide el CH del queque de prensa. La unidad sensora adaptada como se ha descrito en el apartado 5.5 y el dispositivo WT (unidad controladora y procesadora) se instalaron en un tablero que se instaló cerca al chute de salida del queque de prensa.



Figura 36. Sistema de medición del CH implementado en la planta de elaboración de harina de pescado de Pesquera Tierra Colorada en Paita

5.8. Propuesta de aplicación en la agroindustria regional

Los productos agroalimenticios siguen una cadena de valor cuyas principales etapas son: (a) cultivo, (b) beneficio, (c) comercialización y (d) consumo, tal como se ilustran en la Figura 37 [36, 37]

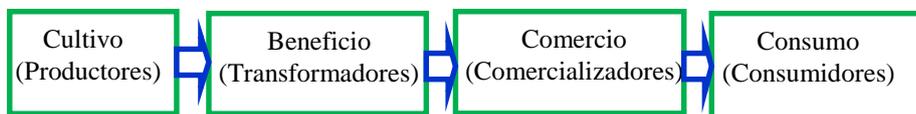


Figura 37. Esquema básico de la cadena productiva de productos agroalimenticios
Fuente: Cadena de valor [37].

Los productos agroindustriales de la región Piura no escapan a este esquema. En las últimas décadas se han innovado en algunas zonas procedimientos y técnicas de cultivo para mejora del fruto y de la producción de muchos productos agroindustriales tanto a nivel nacional como regional. En cambio, en la etapa de beneficio nula o poca innovación se ha hecho y en muchos casos es realizada en forma artesanal. Esta etapa se ejecuta después que el fruto es cosechado y en el que se procesa para que el producto final tenga la calidad requerida para su comercialización y/o consumo.

El dispositivo de medición de CH estudiado puede contribuir a mejorar dicho proceso y hacerlo más eficiente. Se propone su implementación para los procesos del café y del cacao que realizan en la región Piura.

5.9. Aplicación en el proceso del café

El cultivo y comercio del café en Perú entró a formar parte del desarrollo social y económico a comienzo del siglo XX. Actualmente, de las 24 regiones del Perú 10 son productoras de café (Amazonas, Ayacucho, Cajamarca, Cuzco, Huánuco, Junín, Pasco, Piura, Puno y San Martín). Según el último censo agropecuario del INEI del 2012 el cultivo de café ocupa aproximadamente 425,400 hectáreas, cifra que lo convierte en el principal cultivo a nivel nacional, superando a la papa, arroz y maíz. La mayor producción se concentra en el Valle de Chanchamayo, región Junín, con cerca del 50 % de la cosecha total del país. El café crece

también, aunque en menor cantidad, en la parte septentrional y nororiental del país [38].

En la sierra de la región Piura el cultivo del café es uno de los más importantes, su producción se centra en las provincias de Ayabaca y Huancabamba donde se cultivan las variedades: Arábica (*Coffea arabica*) y Robusta (*Coffea canephora*).

La cadena productiva del café comprende típicamente las siguientes etapas: (a) cultivo, (b) cosecha, (c) beneficio, (d) tostado, (e) catación y (f) preparación. Para el tostado se requiere que el grano llegue con un máximo de 12% de CH. Es importante que a lo largo de la etapa de beneficio (Figura 38), donde se realiza el despulpado, fermentación, lavado, secado, selección y almacenamiento, se controle el CH para asegurar en la comercialización y el consumo la calidad de café requerida. Después del lavado los granos de café tienen una humedad de alrededor de 55% por lo que el seguimiento del CH a partir de esta parte del beneficio es importante.

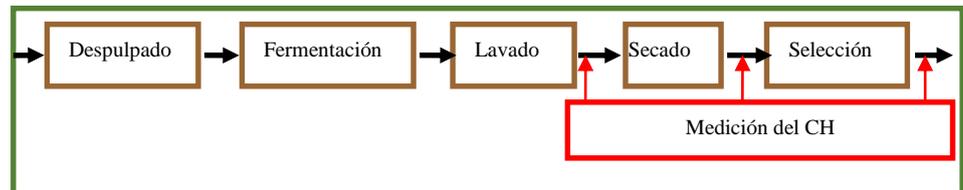


Figura 38. Etapas del beneficio del café y propuesta de medición del CH.
Fuente: Elaboración propia.

El proceso de beneficio en los centros de producción de las provincias de Ayabaca y Huancabamba de la región Piura es realizada en forma artesanal. El secado del café se hace mediante secado solar directo, esparciendo los granos sobre una superficie para que estos sean secados por la radiación solar. Por lo tanto, se requiere de innovaciones tecnológicas para mejorar este proceso

El sistema de medición de humedad desarrollado puede ser aplicado a lo largo de la etapa de Beneficio del café, específicamente antes y después del secado y la selección como se ilustra en la Figura 38. Pruebas de laboratorio realizadas con el prototipo mostrado en Figura 39 demuestran esta factibilidad.



Figura 39. Aplicación de un prototipo de sistema de ED a la medición del CH en muestras de café.

La medición del CH antes del secado del café tiene la finalidad de saber el CH de entrada para estimar el tiempo de secado necesario. La medición después del secado indicará si el producto final cumple con el CH requerido y la última medición indicará el CH del producto seleccionado para la comercialización.

5.9.1. Pruebas de medición en café y obtención de curvas de calibración

Con muestras de granos de café obtenidas después de la etapa de lavado en la planta de beneficio de la Cooperativa agraria cafetalera “Jose Gabriel Condorcanqui” del caserío Coyona en Canchaque Piura, se hicieron pruebas de medición del CH para la obtención de la curva de calibración. La determinación del CH se hizo por el método termo-gravimétrico explicado en el apartado 1.2.1.1

Este método es rutinario en laboratorios de centros de investigación, universidades y plantas industriales y esta normado en la Normas Técnicas Peruanas (NTP) de INDECOPI [3].

En la UDEP este método se aplica en los laboratorios de Química y de Suelos. La Figura 40 muestra algunos pasos de este método como el calentamiento en el horno y el pesado de muestras

realizados en el laboratorio de suelos de UDEP para la determinación del CH de muestras de granos de café.



Figura 40. Muestras de granos de café secándose en un horno y pesándose en el Laboratorio de Suelos de UDEP.

La CD es medida por el prototipo. Este parámetro eléctrico varía con el CH del producto y permite una determinación indirecta de esta. En la Figura 41 se muestra una determinación de la CD con el prototipo implementado



Figura 41. Determinación de la CD con el prototipo en una muestra de granos de café con CH de 37.01%

La Tabla 12 muestra los valores de la CD obtenidos para 7 muestras de café con distinto valor de CH determinado por el

método directo descrito anteriormente. Para cada una de estas 7 muestras se repitió 10 veces la determinación de la CD.

Tabla 12. Valores de constantes dieléctricas (CD) para muestras de gramos de café de distinto CH.

CH\CD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Prom
8.00%	1.94	1.95	1.94	1.96	1.96	1.95	1.94	1.95	1.96	1.94	1.949
9.64%	2.06	2.05	2.06	2.06	2.06	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05	2.05
16.35%	2.77	2.78	2.77	2.78	2.78	2.78	2.78	2.78	2.78	2.77	2.777
29.67%	4.14	4.13	4.12	4.13	4.12	4.13	4.12	4.13	4.13	4.12	4.127
37.51%	5.5	5.51	5.51	5.51	5.51	5.52	5.52	5.51	5.51	5.52	5.512
45.27%	8.95	8.94	8.94	8.95	8.94	8.95	8.95	8.95	8.95	8.94	8.946
50.63%	12.04	12.07	12.06	12.07	12.02	12.05	12.02	12.06	12.02	12.04	12.045

La curva de calibración CH vs CD se obtiene graficando en el eje horizontal los valores de la CD y en el eje vertical el CH medidos separadamente como se ha explicado anteriormente. La Figura 42 muestra esta curva

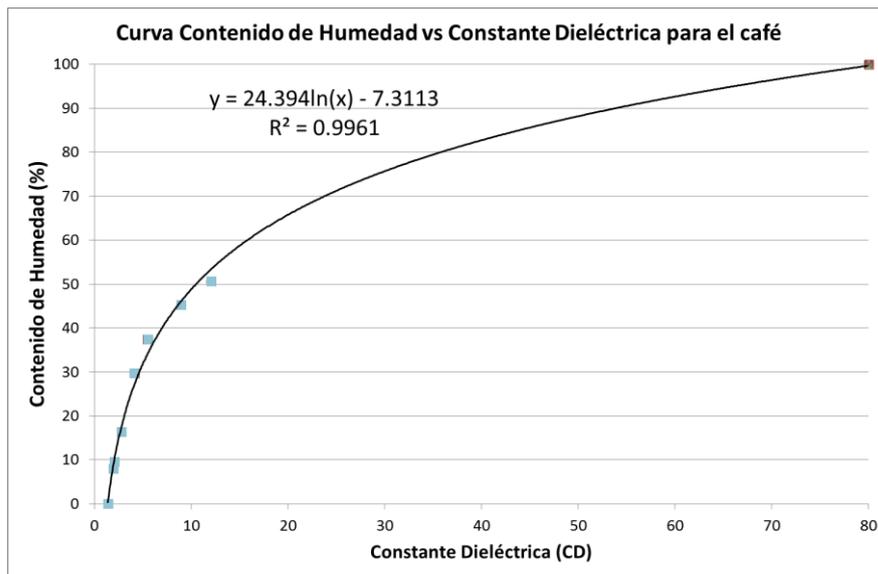


Figura 42. Curva de calibración (CH vs CD) para granos de café proveniente de la zona de Coyona, Canchaque

Basado en que la sensibilidad de un dispositivo de medida determina la mínima medida de una magnitud que se puede hacer con él y a partir de los valores de la CD de la Tabla 13 se observa que estos varían en la segunda cifra decimal; en donde se indican los promedios de los 10 valores de CD y su desviación estándar para cada uno de los 7 niveles de CH. Las desviaciones estándares del CH son de aquellos valores reportados por el prototipo de medición.

Tabla 13. Promedio de las mediciones de CD y su desviación estándar

Promedio de CD	Desviación Estándar de CD	Promedio de CH	Desviación Estándar de CH
1.949	0.00567	8.00%	0.0222
2.054	0.00516	9.64%	0.0296
2.777	0.00483	16.35%	0.0218
4.127	0.00675	29.67%	0.0390
5.512	0.00632	37.51%	0.0345
8.946	0.00516	45.27%	0.0366
12.045	0.02014	50.63%	0.0417

A raíz de estos resultados y considerando alguna fuente de error adicional se puede atribuir una sensibilidad de 1% a este prototipo.

Hay que tener en cuenta que conseguir secar granos de café al aire libre con CH menores a 8 % es imposible dado que la Humedad Relativa del aire no lo permite.

5.10. Aplicación al proceso del cacao

El cacao de la región Piura está considerado como uno de los de mejor calidad a nivel mundial. Al igual que en el café, en esta región, el proceso del cacao se realiza artesanalmente. El beneficio del cacao comprende: (a) fermentación, (b) secado, (c) selección y (d) almacenamiento [39]. El secado se hace al aire libre como se muestra en la Figura 43. Para una producción a gran escala este proceso de secado innovar.



Figura 43. Secado al aire libre de cacao en cáscara en la planta de la Asociación de Productores de Cacao, (ASPROBO) en Buenos Aires, Morropón.

Fuente: Elaboración propia.

En el proceso de beneficio del cacao también es posible la aplicación del sistema de medición antes y después de la fermentación y del secado, como se ilustra en la Figura 44.

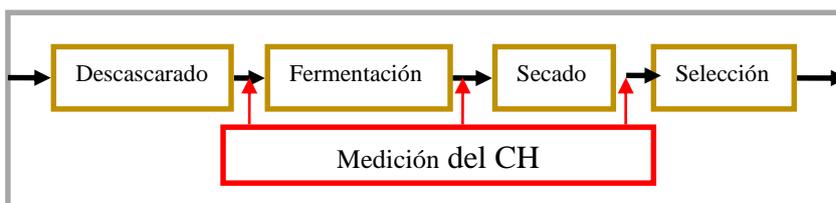


Figura 44. Etapas del beneficio del cacao y propuesta de medición del CH.

Fuente: Elaboración propia.

La medición del CH antes de la fermentación tiene la finalidad de saber el CH de entrada y estimar el tiempo necesario para este paso. La medición antes del secado igualmente tiene como objetivo estimar el tiempo de secado y la medición después del secado indicará si el cacao tiene el CH requerido para la comercialización.

Conclusiones

La presente investigación sobre el “Estudio de la ED para la medición del CH en productos alimenticios y su desarrollo tecnológico aplicado al sector pesquero y agroindustrial” tiene entre sus objetivos hacer una innovación tecnológica en la medición del CH en varios procesos de elaboración de productos alimenticios que tienen forma granulada, como cereales, o en polvo. Esta innovación tiene como base una aplicación, poco conocida, de las ondas de radiofrecuencia en el rango de las microondas, como lo es el desarrollo de sistemas de medición no invasivos cuyos principios se han estudiado y se reportan como parte de esta investigación.

Las principales conclusiones de esta investigación son las siguientes:

- Se ha estudiado la aplicación de las radiofrecuencias (RF) en el desarrollo de técnicas para mediciones no invasivas, es decir, mediciones sin tener contacto físico con el producto. Estas técnicas fueron desarrolladas durante el siglo pasado (siglo XX) y una de ellas es la ED que se basa en la determinación de la CD de una sustancia para inferir, indirectamente, el CH de una sustancia.
- Una de las aplicaciones de esta técnica es la medición del CH de varias sustancias sólidas y productos procesados, entre estos, productos alimenticios en forma granulada o en polvo como los cereales. Esta medición es posible gracias a que las moléculas de agua modifican la propiedad de polarización molecular de una

sustancia seca que se ve reflejada en la variación del valor de su CD cuando la sustancia está húmeda. Así, mediante la medición de un parámetro macroscópico como lo es la CD se infiere la modificación microscópica que hacen las moléculas de agua en la propiedad de polarización molecular de una sustancia húmeda que permite inferir, a su vez, su CH.

- La técnica de ED aplicada a la medición del CH tiene su base en la teoría electromagnética, específicamente aquella que explica: (a) las propiedades dieléctricas de los medios y de las sustancias, (b) la forma de propagación de las ondas de radiofrecuencias en los medios y (c) la interacción entre las radiofrecuencias y las sustancias. Esta teoría ha sido estudiada y es reportada en la presente investigación.
- Entre las ventajas que tiene esta técnica está la medición instantánea del CH, lo que hace factible la implementación de un sistema de control en un proceso de fabricación tomando al CH como parámetro de regulación. Una implementación de este tipo tiene consecuencias muy importantes, entre ellas un ahorro de energía en los procesos de fabricación.
- En los laboratorios de Física General y de Sistemas automáticos de control de la Facultad de Ingeniería de la UDEP se ha tomado como línea de investigación las aplicaciones de esta técnica de medición no invasiva y por ello se ha implementado un módulo de ED para fines experimentales en el laboratorio de Física General de la UDEP.
- La técnica de ED es factible de ser aplicada en la medición de CH de varios productos agroalimenticios de la industria regional y nacional. A nivel regional se ha implementado un sistema de medición en el proceso de elaboración de la harina de pescado realizado en una planta procesadora en Paita. Específicamente, se midió el CH en el queque de prensa, lo que dio lugar a una patente. Esta experiencia ha sido presentada en algunos eventos científicos nacionales [40], [41].
- Se plantea extender la aplicación de esta técnica de medición para productos agroalimenticios de la región, específicamente en las etapas de beneficio el café y el cacao. Durante el beneficio del café se propone aplicar la medición en tres puntos: (a) antes del secado, (b) después del secado y (c) después de la selección para asegurar

que a la comercialización y el consumo el café llegue con el nivel requerido de CH de 12 % o menos.

- Durante el beneficio del cacao se propone aplicar la medición también en tres puntos: (a) antes de la fermentación, (b) antes del secado y (c) después del secado.
- Las curvas de calibración (CH vs CD) obtenidas para la harina de pescado y para el café tienen forma parecida y permiten inferir, por extrapolación, el valor de la CD para esos productos cuando estén completamente secos.

Bibliografía

- [1] Kraszewski, A. W. (1991). *Microwave aquametry—needs and perspectives*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 39(5), 828–835.
- [2] Okabe T.; Huang M. T.; & Okamura S. (1973). *A New Method for the Measurement of Grain Moisture Content by the Use of Microwaves*. J. Agric. Engng Res., 18, 59-66.
- [3] INDECOPI (1998). *Norma Técnica Peruana NTP 339.127:1998 SUELOS. Método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo*, Primera edición, 12 de diciembre de 1998.
- [4] OHAUS, 2014. “Moisture analyzer Cook Book. (www.ohaus.com)
- [5] King John Fitch. (1922). *The measurement of dielectric constant*. Bibliolife. The Johns Hopkins University.
- [6] Venkatesh M. S. & G. S. V. Raghavan. (2005). *A overview of dielectric properties measuring techniques*. Canadian Biosystem Engineering. Vol. 47.
- [7] Tipler Paul A. (2000). *Física para la ciencia y la tecnología*. Volumen 2, Cuarta Edición, Editorial Reverte S. A.
- [8] Markov K. Z. (1999). *Elementary Micromechanics of Heterogeneous Media*, Birkhauser Boston.
- [9] Cheng K. David. (1998). *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. Pearson Educacion. Addison Wesley Longman de Mexico S. A.

- [10] Nelson S. O., Samir Trabelsi. (2011). *Sensing grain and seed moisture and density from dielectric properties*. Int J Agric & Biol Eng, 2011; 4(1): 75–81.
- [11] Gorakhpurwalla H. D.; McGinty R. I., Watson C. A. (1975). *Microwave Dissipation Loss in High-moisture Grain*, J. agric. Engng Res., 20, 225-233.
- [12] Kaatze Udo, Klaus Kupfer y Christof Hubner, Editores invitados. Editorial Microwave Moisture Measurements de Measurement Science and Technology, Vol 18, Editorial.
- [13] Kraszewski, A. W., & Kulinski, S. (1976). *An improved microwave method of moisture content measurement and control*. IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, 23(4), 364–370.
- [14] Trabelsi Samir, Stuart O. Nelson (2006). *Nondestructive sensing of bulk density and moisture content in shelled peanuts from microwave permittivity measurements*. Food Control, 17, 304–311.
- [15] Sacilik Kamil y Ahmet Colak; (2010). *Determination of dielectric properties of corn seeks from 1 to 100 MHZ*. Powder Technology, 203, 365-370.
- [16] Behari Jitendra, 2010. *Microwave dielectric behavior of wet soils*. Springer, New York, USA.
- [17] Proyecto N° 01-235-FINCYT-PITEI-2010. “*Innovación tecnológica aplicando TIC industriales en la medición y control de humedad en procesamiento de pescado*”. Coordinador Dr. William Ipanaqué. Universidad de Piura (UDEP).
- [18] Nelson Stuart O, Andrzej W Kraszewski, Samir Trabelsi (2000). *Using Cereal Grain Permittivity for Sensing Moisture Content*. IEEE Transactions on instrumentation and measurements. Vol. 49, No. 3, June 2000.
- [19] Wernecke R. y Jan Wernecke; (2014). *Industrial Moisture and Humidity Measurement: A practical guide*. Primera Edición. Wiley – VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Germany, 2014.
- [20] Lozano Teruel, J. A., (2012). *Ciencia y Salud: La estructura del agua*. Recuperado enero 28, 2014, de <http://cienciaysalud.laverdad.es/la-alimentacion/la-nutricion-ciencia/la-estructura-agua-article.html>

- [21] Kupfer K. (2005). *Electromagnetic aquametry: Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances*. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2005.
- [22] Nelson Stuart O (1990). *Estimation of permittivities of solids from measurements on pulverized or granular material*, Cap 6, 231-271.
- [23] Kraszewski A., S. Kulinski. Z. Stosio (1977). A preliminary study on microwave monitoring of moisture content in wheat” J. Microwave power, Vol. 12, No. 33, pp 241-251.
- [24] King R. J. y K. V. King (1991). *Microwave measurement in grains*, IEEE 506-512.
- [25] Aviles C. D., I. Garcia, J.M. Arias (2001). *Medición de humedad en sólidos por microondas*.
- [26] Hinz T., F. Menke, R. Eggers, R. Knockel (1996) *Development of a microwave moisture sensor for application on food industry*. LWT Vol. 29, No. 44, pp. 316-325. Academic Press Limited.
- [27] Meet electronic Ltd., (2012) *Wavetester Technical description*. Switzerland.
- [28] Durand Calle, Katherine M. (2014). *Aplicación del sistema Wavetester para la medición de humedad en sólidos: instalación, operación y mantenimiento*. Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico – Eléctrico. Universidad de Piura, marzo 2014.
- [29] Software “MEET WTSX
- [30] HP 8753C *Operating manual*
- [31] Balanis, Constantine A. (2005). *Antenna Theory: Analysis and Design*. (Third edition) New Jersey: John Willey & Sons, Inc.
- [32] Stutzman, W. L. y Thiele, G. A. con *Antenna theory and design*
- [33] H. J. Visser con *Antenna theory and applications*
- [34] Álvarez Velarde, Felix; 2013. *La problemática de la harina y aceite de pescado*. Editora Don Bosco S. A. Lima.
- [35] Resolución de INDECOPI “Sistema para medir la humedad de una masa en una línea de proceso”. Patente de INDECOPI a favor de la Universidad de Piura resolución No. 000307-2015/DIN-INDECOPI del 31 de marzo de 2015 (Anexo 1)
- [36] Soluciones prácticas, 2014. *Rentabilidad, mercado y tecnología para la producción de café amigable con el clima*.
- [37] Coordinadores: Julián Briz e Isabel de Felipe, 2011, *La cadena de valor agroalimentaria*. Editorial agrícola española S. A.

- [38] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), 2012
- [39] ASPROBO, 2011. *Procedimientos validados para las buenas prácticas de beneficio del cacao.*
- [40] Rodríguez R, W. Ipanaqué, I. Chinchay, K. Durand, J. Manrique, J. C. Soto. (2014). *Propiedades dieléctricas del queque de prensa en la elaboración de harina de pescado de tres especies marinas.* Disertación en el IV Congreso de Ciencias del mar del Perú (CONCIMAR), Lima 24 – 28 de junio 2014.
- [41] Rodríguez R., Ipanaqué W., Chinchay I., Durand K., Manrique J., Soto J. C. *Medición en línea de la humedad del queque de prensa en la elaboración de harina de pescado.* Disertación en el Congreso Nacional de Ingeniería Pesquera (CONIPESCA 2015). Lima, 02-04 de Setiembre 2015.

ANEXO

Anexo 1. Patente de un “Sistema para medir la humedad de una masa en una línea de proceso”

 **Indecopi**
INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA DE LA
COMPETENCIA Y DE LA PROTECCIÓN DE LA
PROPIEDAD INTELECTUAL
Calle de la Prosa N° 104 – San Borja

**DIRECCIÓN DE INVENCIONES Y
NUEVAS TECNOLOGÍAS**

CÉDULA DE NOTIFICACIÓN



Señor(es) : UNIVERSIDAD DE PIURA

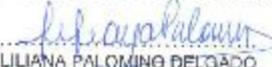
Representante : CALVO CERVANTES, CESAR

Domicilio : AV. RAMÓN MUGICA N° 131, URB. SAN EDUARDO, PIURA

Expediente N° 000826-2013/DIN

Lima, 31 de marzo de 2015.

En la fecha, la Dirección de Invencciones y Nuevas Tecnologías del Indecopi, procede a notificar la **Resolución N° 000307-2015/DIN-INDECOPI de fecha 31 de marzo de 2015, el Examen de Patentabilidad BCC 022-2015/A y el proveído de fecha 23 de marzo de 2015;** y se pone en conocimiento del solicitante que contra la referida resolución procede interponer los recursos administrativos de RECONSIDERACIÓN o APELACIÓN, dentro del plazo de quince (15) días hábiles, contados a partir del día siguiente a la fecha de recepción de la presente.


LILIANA PALOMINO DELGADO
Coordinadora Legal
Dirección de Invencciones y
Nuevas Tecnologías
INDECOPI

Constancia de recepción

Nombre: Miguel Masco

L.E. / DNI N°: 0280721

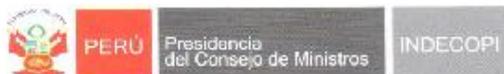
Vínculo:

Firma y/o sello:

Fecha:

Hora: 10:40

/jts



DIRECCIÓN DE INVENCIÓNES Y NUEVAS TECNOLOGÍAS

EXPEDIENTE N° 000826-2013/DIN

RESOLUCIÓN N° 000307-2015/DIN-INDECOPI

Lima, 31 de marzo de 2015

Patente de invención: Concedida

Mediante expediente N° 000826-2013/DIN, iniciado el 10 de abril de 2013, UNIVERSIDAD DE PIURA de Perú, solicita patente de invención para "SISTEMA PARA MEDIR LA HUMEDAD DE UNA MASA EN UNA LINEA DE PROCESO", C.I.P.8 G01N 22/04; G01N 33/24, cuyos inventores son WILLIAM IPANAQUE ALAMA; RODOLFO RODRIGUEZ ARISMENDIZ; JORGE JAVIER MACHACUAY AREVALO; JOSE JOSE MANRIQUE SILUPU y JUAN CARLOS SOTO BOHORQUEZ.

1. EXAMEN DE PATENTABILIDAD

La invención solicitada reúne los requisitos establecidos en la Decisión 486 de la Comisión de la Comunidad Andina que aprueba el Régimen Común sobre Propiedad Industrial, conforme aparece en el examen que corre de fojas 114 a 118 del expediente.

La presente Resolución se emite en aplicación de la norma legal antes mencionada y en uso de las facultades conferidas por los artículos 37 y 40 de la Ley de Organización y Funciones del Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI) sancionada por Decreto Legislativo N° 1033, concordado con el artículo 4 del Decreto Legislativo 1075 que aprueba las disposiciones complementarias a la Decisión 486 de la Comisión de la Comunidad Andina.

2. RESOLUCIÓN DE LA DIRECCIÓN DE INVENCIÓNES Y NUEVAS TECNOLOGÍAS

OTORGAR patente de invención para "SISTEMA PARA MEDIR LA HUMEDAD DE UNA MASA EN UNA LINEA DE PROCESO", C.I.P.8 G01N 22/04; G01N 33/24, a favor de UNIVERSIDAD DE PIURA de Perú, por un plazo de veinte (20) años, contados desde el 10 de abril de 2013, fecha de presentación de la solicitud, aprobándose las 4 reivindicaciones que corren a fojas 102 y 103 del expediente.

Regístrese y Comuníquese




MANUEL CASTRO CALDERÓN
 Director(a) de Invencciones y
 Nuevas Tecnologías
 INDECOPI

BCC:pl
 INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA DE LA COMPETENCIA Y DE LA PROTECCIÓN DE LA PROPIEDAD INTELECTUAL

Calle De la Prensa 118, Sex. Bona, Lima 41 - Perú / T20: 324 7860
 e-mail: postmaster@indecopi.gob.pe / Web: www.indecopi.gob.pe

M-DIN-14/C



EXAMEN DE PATENTABILIDAD	
BCC	022-2015/A

EXPEDIENTE:	000826-2013/DIN	FECHA DE INGRESO:	2013-04-10
		FECHA DE PRESENTACION:	

SOLICITUD INTERNACIONAL PCT	N°	
		-
	FECHA:	-

SOLICITANTE(S):	UNIVERSIDAD DE PIURA
-----------------	----------------------

PRIORIDAD(ES)	FECHA(S) DE PRIORIDAD(ES)
No reivindica	-

MODALIDAD DE PROTECCIÓN	Patente de Invención (Decisión 486 / Art. 45)	X
	Modelo de Utilidad (Decisión 486 / Art. 45 concordante con Art. 85)	
TÍTULO:	SISTEMA PARA MEDIR LA HUMEDAD DE UNA MASA EN UNA LINEA DE PROCESO	

REFERENCIA(S):	Informe Técnico BCC N° 100-2014
----------------	---------------------------------

OPOSITOR(ES):	Ninguno
---------------	---------

1. TEXTOS A ANALIZAR	Originalmente presentado	Modificaciones	Fecha	Ampliación ¹ (Decisión 486 / Art. 84)	
				SI	NO
MEMORIA DESCRIPTIVA	X				
FIGURA(S)	X				
REIVINDICACION(ES)	1 y 2	1 a 4	2015-03-10		X

¹ En caso de que las modificaciones realizadas impliquen una ampliación de lo originalmente presentado, esta nueva documentación modificada no será tomada en cuenta y toda opinión final emitida se realizará en función a la documentación original.

RESUMEN	X				
LISTADO DE SECUENCIAS					
OTROS ²					
OPOSICIÓN					
RESPUESTA A OPOSICIÓN					

*Constituye una ampliación parcial.

	<u>SI</u>	<u>NO</u>
2. NO INVENCIÓNES Y EXCEPCIONES A LA PATENTABILIDAD (Decisión 486 / Art. 15, 20 y/o B2 ³)	<input type="text"/>	1 a 4
3. USOS (Decisión 486 / Art. 14 ⁴ y 21)	<input type="text"/>	1 a 4
4. UNIDAD DE INVENCIÓN⁵ (Decisión 486 / Art. 25)	1 a 4	<input type="text"/>

5. REQUISITOS A EVALUAR	<u>CUMPLE</u>	<u>NO CUMPLE</u>
5.1 Suficiencia, claridad, concisión y soporte:		
Memoria descriptiva (Decisión 486 / Art. 28)	X	<input type="text"/>
Reivindicaciones (Decisión 486 / Art. 30)	1 a 4	<input type="text"/>
5.2 Novedad (Decisión 486 / Art. 16)	1 a 4	<input type="text"/>
5.3 Nivel Inventivo (Decisión 486 / Art. 18)	1 a 4	<input type="text"/>
5.4 Aplicación Industrial (Decisión 486 / Art. 19)	1 a 4	<input type="text"/>
5.5 Para Modelos de Utilidad (Decisión 486 / Art. 81 ⁵)	-	<input type="text"/>

² e.i. argumentos, resultados de ensayos, cuadros comparativos, etc.

³ En los casos de patentes de Modelo de Utilidad.

⁴ Interpretación por el Tribunal de Justicia de la Comunidad Andina que, a la luz del Proceso N° 89-A-2000 considera patentables los productos o los procedimientos, mas no los usos.

⁵ En caso de que se encuentre más de un concepto inventivo en la presente solicitud y se identifique más de un grupo de reivindicaciones relacionados con dichos conceptos inventivos, se procederá con el análisis respecto al primer grupo encontrado.

6. ANÁLISIS Y OPINIÓN ESCRITA ACERCA DE LOS REQUERIMIENTOS CONSIDERADOS EN LOS PUNTOS ANTERIORES

6.1 Cita(s) y documentación tomada en consideración para la emisión del presente examen:

Antecedente(s) relevante(s) del estado de la técnica

D1: US 5,666,061 con fecha de publicación 1997-06-09
(JERALD G. ASSENHEIM)

"Aparato y método para medir la concentración de humedad en materiales granulados"

6.2 Formulación de opinión y argumentos respecto al(a los) punto(s):

5.2 NOVEDAD

La **reivindicación 1** divulga un sistema para medir la humedad de una masa en una línea de producción (el documento D1 divulga un aparato y método de medición del contenido de humedad en materiales granulados independientemente de la densidad de los mismos, columna 1, líneas 5 a 9) que comprende un sistema mecánico conteniendo una caja hueca sin base y sin tapa montada sobre una mesa y provista de una abertura y una rampa para devolver la masa desde la caja hueca a la línea de producción; así como un sistema de medición mediante antenas de alta radiofrecuencia, (el aparato del documento D1 comprende un dispositivo para la medición de humedad en un material granular empleando ondas de alta frecuencia, reivindicación 1 del D1) comprendiendo dos cajas cerradas dispuestas a ambos lados de la caja hueca del sistema mecánico y un par de antenas tipo bocina, una antena de emisión y una antena de recepción (el aparato descrito en el documento D1 comprende un resonador, un campo electromagnético, un generador de onda, medios para determinar la frecuencia natural del resonador y la frecuencia del resonador en conjunto con el material que está siendo probado (muestra) para la determinación del contenido de humedad, reivindicación 1 del D1).

Observándose que el aparato descrito en D1 no menciona a un sistema mecánico con las características descritas en la reivindicación 1, ni que está provisto de una abertura y una rampa para devolver la masa desde la caja hueca a la línea de producción; por lo que se considera que la reivindicación 1 es novedosa.

Las reivindicaciones 2 a 4, al ser dependientes de la reivindicación 1, se considera que también son novedosas.

5.3 NIVEL INVENTIVO

El estado de la técnica más cercano (documento D1) se refiere a un aparato y método de medición del contenido de humedad en materiales granulados.

Lo solicitado se diferencia del documento D1 en que comprende un sistema mecánico provisto de una caja hueca montada sobre una mesa, una abertura y una rampa para devolver la masa desde la caja hueca a la línea de producción.

El efecto técnico que se desprende a partir de esta diferencia, tal como se menciona en la página 2 de la memoria descriptiva, es que la configuración del sistema mecánico permite la medición de humedad de una masa sin alterar sus propiedades internas en una línea de proceso, permitiendo recoger y acumular una cantidad predeterminada de la muestra, al mismo tiempo que se determina el porcentaje de humedad de la muestra, la misma que es devuelta a la línea de proceso; asimismo, el sistema de antenas se adapta para la medición de la constante dieléctrica de un producto industrial de un flujo vertical u oblicuo.

El problema técnico objetivo solucionado por la solicitud se podría por lo tanto formular así: "Cómo evitar modificar las propiedades internas de una muestra al momento de determinar su contenido de humedad".



INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA DE LA
COMPETENCIA Y DE LA PROTECCIÓN DE LA
PROPIEDAD INTELECTUAL
Calle de la Prusa N° 104 – San Borja

DIRECCIÓN DE INVENCIÓNES Y
NUEVAS TECNOLOGÍAS

REPORTE DE BUSQUEDA BCC N° 022-2015/A

Expediente N°: 000826-2013/DIN

Fecha de Presentación: 2013-04-10		Fecha de Prioridad: No Reivindica
CIP B: G01N22/04, G01N33/24		
Estrategia de búsqueda empleada: moisture measurement RF HORN		
DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES:		
Categoría	Cita del documento, indicando las partes pertinentes y la fecha de publicación	Reivindicaciones afectadas
A	US 5,666,061 con fecha de publicación 1997-06-09 (JERALD G. ASSENHEIM) "Aparato y método para medir la concentración de humedad en materiales granulados" (Reivindicación 1; Columna 1, líneas 5 a 9)	1 a 4
Categoría de documentos citados:		
<p>X: Particularmente relevante por sí solo. Y: Particularmente relevante combinado con otro(s). A: Estado de la técnica general, no particularmente relevante O: Divulgación oral. E: Solicitud presentada antes pero publicada después de la fecha de presentación de la solicitud examinada (sólo con X)</p>		
<p>D: Citado en la solicitud. L: Citado por otras razones. P: Anterior a la fecha de presentación pero posterior a la fecha de prioridad. T: Teoría o principio en el que se basa la invención. &: Familia de patentes</p>		
Examinadora: Ing. Beatriz Camacho Calizaya		

000110



**DIRECCION DE INVENCIONES Y
NUEVAS TECNOLOGÍAS**

Expediente N° 000826-2013/DIN

Modalidad: Patente de Invención

Lima, 23 de marzo de 2015

Visto el Informe Técnico N° BCC 022-2015/A, que corre de fojas 114 a 118, que analiza el nuevo pliego de 4 reivindicaciones presentado mediante escrito de fecha 10 de marzo de 2015, el cual establece que:

- ❖ Las reivindicaciones 1 a 4, presentadas el 10 de marzo de 2015, CUMPLEN con los requisitos de patentabilidad establecidos en el artículo 14 de la Decisión 486 de la Comisión de la Comunidad Andina.

PASE EL EXPEDIENTE A RESOLVER

BEATRIZ CAMACHO CALIZANA
Profesional en Ingeniería
Dirección de Invenciones y Nuevas Tecnologías
INDECOPÍ