

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

**Instituto de Investigación e Innovación en
Energías Renovables**

**Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos
Renovables**

TESIS

**“Estudio Teórico de emisiones Tera Hertz para
determinar la humedad en productos
alimenticios en secadores solares”**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN MATERIALES Y SISTEMAS ENERGÉTICOS
RENOVABLES**

PRESENTA

ING. ERICK ALEJANDRO HERNÁNDEZ DOMÍNGUEZ

DIRECTORES

**DR. HEBER VILCHIS BRAVO
DR. EDGAR BRIONES HERNÁNDEZ**



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Junio 2019



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
17 de mayo de 2019
Oficio No. DIP/0321/2019

C. Erick Alejandro Hernández Domínguez
Candidato al Grado de Maestro en Materiales
y Sistemas Energéticos Renovables UNICACH
Presente

En virtud de que se me ha hecho llegar por escrito la **opinión favorable** de la Comisión Revisora que analizó su trabajo terminal denominado **"Estudio Teórico de emisiones Tera-Hertz para determinar la humedad en productos alimenticios en secadores solares"**, y que dicho trabajo cumple con los criterios metodológicos y de contenido, esta Dirección a mi cargo le **autoriza la impresión del documento** mencionado, para la defensa oral del mismo, en el examen que Usted sustentará para obtener el **Grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables**.

Se le pide observar las características normativas que debe tener el documento impreso y entregar en esta Dirección un tanto empastado del mismo.

Atentamente

"Por la Cultura de mi Raza"


Dra. Magnolia Solís López
Directora

C.c.p. Expediente
*MSL/rags



DIRECCION DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO



Resumen

En esta investigación se planteó una técnica óptica para medir el contenido de humedad en productos orgánicos que son conservados por el método de deshidratación, si bien existen diversos métodos para determinar el contenido de humedad en productos orgánicos algunos pueden llegar a destruir la muestra y otros son sensibles a los cambios bruscos de temperatura. La radiación Tera-Hertz es una longitud de onda no iónica y no destructiva además que posee una alta absorbencia por parte de las moléculas de agua, las cuales funcionan como medio de contraste para poder determinar el contenido de agua, en la actualidad existen trabajos de medición de humedad con tecnología Tera-Hertz realizados con hojas de tabaco entre algunas otras hojas, en esta investigación se determinó mediante espectroscopia Tera-Hertz el contenido de humedad de una muestra de Mango Ataulfo que es un alimento que tiene una composición más compleja y un contenido de humedad alto.

Dedicatoria

A mi familia.

La familia no siempre es de sangre,
la familia son las personas en tu vida que te quieren en la suya,
son aquellos quien te aceptan por quien eres
aquellos que harían cualquier cosa por verte sonreír
y aquellos que te aman sin importar nada.

Agradecimiento

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el programa CONACYT-SENER Sustentabilidad por la beca otorga que me permitió realizar este trabajo sin contratiempos.

Al Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables por toda la cátedra especializada para el desarrollo de mis capacidades académicas.

Al Dr. Heber Vilchis Bravo por la confianza depositada en mi y la paciente dirección de esta investigación.

Al Dr. Edgar Briones Hernández por la dirección e ideas innovadoras para concluir esta investigación.

Al Dr. Juan Andres Reyes Nava y el Dr. Jorge Evaristo Conde Díaz por toda la dedicación que tuvieron para la discusión de este trabajo.

Al Dr. Enrique Castro Camus del Centro de investigaciones en Óptica (CIO) por su colaboración con los experimentos de esta investigación.

A todos ellos, Muchas Gracias.

Justificación

En esta investigación se pretende seleccionar un modelo matemático que permita determinar la variación de humedad del mango Ataulfo ya que este alimento es de gran valor debido a que cuenta con denominación de origen. Así como su valor comercial para el estado de Chiapas representando ventas anuales de 70 mdd, sin contar que el 50 % de la producción de este fruto se pierde debido a malos manejos pos-cosecha, este alimento será deshidratado simulando un proceso de secado solar y utilizando emisiones Tera-Hertz se determinará sus propiedades ópticas las cuales nos servirán para calcular la humedad mediante modelos matemáticos. La presente investigación pretende ser el antecedente que permita desarrollar dispositivos para mejorar el control de calidad de los productos alimenticios que sean preservados por la técnica de secado solar en México.

Objetivos

Objetivo General

Estudiar teóricamente las emisiones de radiación Tera Hertz para determinar el contenido de humedad de mango en secadores solares

Objetivos Particulares

- Seleccionar un modelo matemático que permita determinar el comportamiento de emisiones Tera-Hertz para alimentos en proceso de secado solar
- Evaluar el modelo matemático comparado con un estudio Tera Hertz de un producto alimenticio.

Índice general

Resumen	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Justificación	iv
Objetivos	v
Lista de figuras	xi
Lista de tablas	xiii
1 Estado Actual de técnicas para determinar el contenido de humedad en productos orgánicos	1
1.1 Introducción	1
1.2 Métodos directos para determinar humedad	2
1.2.1 Método de secado en horno	3
1.2.2 Método de secado en horno de vacío	3
1.2.3 Método de secado en Termobálanza	4
1.2.4 Método de destilación azeotrópica	4
1.2.5 Método de Karl Fisher	5
1.3 Métodos Indirectos para determinar humedad	6
1.3.1 Refractometría	6
1.3.2 Método Dieléctrico	7
1.3.3 Espectroscopía de cercano infrarrojo	8

1.3.4	Imagen hiperespectral de cercano infrarrojo	9
1.3.5	Espectroscopía de bajo campo de resonancia magnética nuclear(RMN)	10
1.4	Tera Hertz	15
1.4.1	Tecnología Tera-Hertz en Alimentos	16
1.5	Conclusión	18
Referencias		21
2	Rango Tera-Hertz del espectro electromagnético	23
2.1	Introducción	23
2.2	Fundamentos del electromagnetismo	23
2.3	Ecuación de onda	24
2.4	Dieléctricos	25
2.5	Polarización de medios dieléctricos	26
2.6	Radiación Tera-Hertz	26
2.7	Generación y detección de pulsos Tera Hertz	29
2.7.1	Antena Fotoconductoras	30
2.7.2	Rectificación óptica y muestreo electro óptico (EOS)	30
2.7.3	Banda ancha THz generación y detección	32
2.7.4	Generación y la detección de Onda continua	33
2.7.5	Generación no lineal y detección de pulsos THz	33
2.8	Aplicaciones Tera-Hertz	33
2.9	Modelado de la permitividad efectiva del agua en un material	37
2.9.1	Extracción del nivel de humedad	38
2.10	Respuesta Tera Hertz al agua	38
2.11	Modelos efectivos del medio	41
2.11.1	Modelo lineal para el coeficiente efectivo de absorción	42
2.11.2	Maxwell-Garnett	42
2.11.3	Bruggeman (BG)	43
2.11.4	Modelo Landau-Lifshitz-Looyenga (LLL)	43
2.12	Extracción del nivel de humedad de los datos de transmisión o reflexión	44
2.13	Ecuaciones de Fresnel	45

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	ix
2.14 Conclusiones	47
Referencias	51
3 Metodología experimental y teórica para la espectroscopía Tera-Hertz en rebanadas de Mango Ataulfo	53
3.1 Introducción	53
3.2 Preparación de muestras de Mango Ataulfo	54
3.3 Determinación de contenido de agua inicial	55
3.4 Deshidratado de mango	55
3.5 Espectroscopía Tera-Hertz por transmisión	57
3.6 Modelo de permitividad efectiva del agua en un material	58
3.7 Conclusión	61
Referencias	63
4 Tera-Hertz herramienta para determinar contenido de humedad en mango: resultados y conclusiones	65
4.1 Introducción	65
4.2 Resultados	65
4.3 Simulación Computacional	71
4.4 Conclusiones	73
4.5 Trabajos Futuros	74
A Anexo I: Productividad del Proyecto	75

Lista de Figuras

Figura 1.1	Herramientas para secado en horno a) Horno b) Balanza Analítica	3
Figura 1.2	Horno de vacío	4
Figura 1.3	Termobálanza	4
Figura 1.4	Destilación Azeotrópica	5
Figura 1.5	Método Karl Fisher	6
Figura 1.6	Refractómetro	7
Figura 1.7	Método dieléctrico	8
Figura 1.8	Espectroscopía de infrarojo cercano	9
Figura 1.9	Hiperespectral NIR	9
Figura 1.10	Resonancia Magnética Nuclear	10
Figura 1.11	Espectro Electromagnético	15
Figura 1.12	Imagenología mediante Técnica Tera-Hertz	17
Figura 2.1	Heinrich Rubens realizó los primeros estudios de Radiación Tera-Hertz	26
Figura 2.2	Espectro electromagnético desde la región micro ondas hasta la región óptica. Transiciones rotacionales vibracionales y electrónicas se observar a lo largo de la radiación de cuerpo negro 300 K . .	27
Figura 2.3	Absorción atmosférica de la radiación donde se observa la atenuación de la región Tera-Hertz	28
Figura 2.4	a) Switch fotoconductor para generación de pulsos THz de pulsos ultra cortos que están colimados en el espacio libre por el substrato de los lentes b) muestra EO en el espacio libre de un cristal de ZnTe para detección THz [26]	32

Figura 2.5	Esquema de sistemas de espectroscopía de transmisión THz. a) Generación Tera Hertz de Banda ancha b) Generación de THz de onda continua c) Generación Tera Hertz no lineal	34
Figura 2.6	Amplitud normalizada a diferentes porcentajes de humedad se observa una relación lineal [10].	36
Figura 2.7	Propiedades dieléctrica real ϵ' e imaginaria ϵ'' en membranas biológicas [29]	40
Figura 2.8	Vibración y rotación de las moléculas de agua	41
Figura 2.9	Onda incidente que se transmite y se refleja	46
Figura 3.1	a) Mango Ataulfo y b) Pelador.	54
Figura 3.2	Termobalanza	55
Figura 3.3	Horno para deshidratar muestras de mango	56
Figura 3.4	Muestras de Mango Ataulfo en Proceso secado	56
Figura 3.5	Perfilómetro	57
Figura 3.6	Esquema de experimento Tera-Hertz con muestra de mango	57
Figura 4.1	Esquema del corte longitudinal de una rebanada de mango	66
Figura 4.2	Distribución del contenido de humedad de una muestra de mango deshidratada 4 h. a 50° C corte transversal.	66
Figura 4.3	Espesor de muestras de mango cortadas en sentido a la fibra.	67
Figura 4.4	Campos eléctricos de los pulsos THz sin y con muestras (líneas negra y roja respectivamente).El campo está medido a 20 cm de la punta de pulso, en el instante de tiempo t después de la emisión de éste. La muestra induce dos efectos sobre el pulso: su retraso Δt y su atenuación	68
Figura 4.5	Datos teóricos de la atenuación del campo eléctrico THz y Dato experimental de la atenuación	70
Figura 4.6	Simulación computacional, comportamiento de las ondas Tera-Hertz a) inicio de la emisión THz b) Colisión de las ondas con el material dieléctrico c) Traspaso de la onda THz en la muestra.	72

Lista de Tablas

Tabla 2.1	Propiedades ópticas de algunos materiales	29
Tabla 2.2	Coeficientes de absorción de materiales en frecuencia Tera- Hertz.	35
Tabla 3.1	Rampa de temperatura.	57
Tabla 4.1	Datos de Simulación en MEEP	71

Capítulo 1

Estado Actual de técnicas para determinar el contenido de humedad en productos orgánicos

1.1. Introducción

En este capítulo, se presenta una revisión de diferentes técnicas para determinar el contenido de humedad en productos orgánicos alimenticios, así como sus principales ventajas y desventajas, algunas técnicas presentan ventajas sobre otras en términos de viabilidad económica y/o velocidad con que se procesan las muestras sin embargo su aplicación está en función de herramientas específicas de laboratorio así como dispositivos sensibles a cambios de temperatura o condiciones de humedad ambiental controladas.

Un método ideal para determinar la humedad debe ser *in situ*, *ex situ*, rápido, aplicable a una amplia gama de alimentos, simple y fácil de usar. Además, debe ser económico y de fácil acceso, mientras demuestra exactitud y precisión [19, 16]

Actualmente aún no existe una herramienta ideal o un método para determinar la humedad de todo tipo de alimentos lo que implica una falta de estándares de calidad tanto en el proceso de deshidratación como en el proceso de envasado

que proporcione información nutricional y calidad del producto para el consumo humano.

La selección de una metodología apropiada es crucial para dar confianza al momento de determinar el contenido de humedad en alimentos, eso depende en un número de factores tal como el propósito de análisis, muestra, propiedades, cantidad de muestra, exactitud, sensibilidad, especificidad, repetitividad, medición, velocidad, costo, facilidad de operación.

1.2. Métodos directos para determinar humedad

Todos los alimentos, sin importar el método por cual se hayan deshidratado, contienen agua en mayor o menor proporción. Las cifras de contenido en agua varían entre un 60 % y un 95 % en los alimentos naturales. En los tejidos vegetales y animales, puede decirse que existe en dos formas generales: *agua libre* y *agua ligada*. El agua libre o absorbida, que es la forma predominante; se libera con gran facilidad. El agua ligada se halla combinada o absorbida. Se encuentra en los alimentos como agua de cristalización (en los hidratos) o ligada a las proteínas y a las moléculas de sacáridos y absorbida sobre la superficie de las partículas coloidales [8].

Los métodos de secado son los más comunes para valorar el contenido de humedad en los alimentos; se calcula el porcentaje en agua por la pérdida en peso debida a su eliminación por calentamiento bajo condiciones normalizadas. Aunque estos métodos dan buenos resultados que pueden interpretarse sobre bases de comparación, es preciso tener presente que algunas veces es difícil eliminar por secado toda la humedad de la muestra; a cierta temperatura el alimento es susceptible a descomponerse, con lo que se volatilizan otras sustancias además de agua y pueden perderse las propiedades organolépticas (sabor, olor, textura, color) y nutritivas de las muestras [20].

1.2.1. Método de secado en horno

El proceso de secado en horno se basa en la pérdida de peso de la muestra por evaporación del agua. Para esto se requiere que la muestra sea térmicamente estable y que no contenga una cantidad significativa de compuestos volátiles y se utiliza un báscula analítica para determinar el peso inicial y final para remover el agua de la muestra por esta técnica se utiliza un horno como se muestra en la figura 1.1.

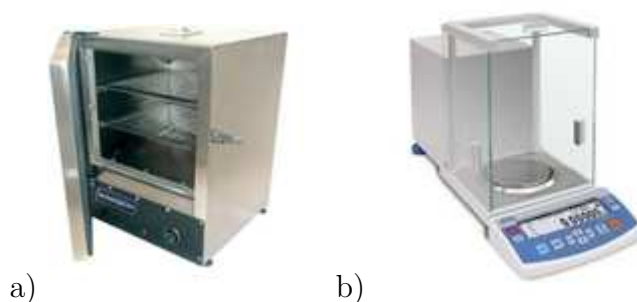


Figura 1.1: Herramientas para secado en horno a) Horno b) Balanza Analítica

El principio operacional del método de determinación de humedad utilizando un horno y balanza analítica, incluye la preparación de la muestra, pesado, secado, enfriado y pesado nuevamente de la muestra [16].

1.2.2. Método de secado en horno de vacío

Se basa en el principio fisicoquímico que relaciona la presión de vapor con la presión del sistema a una temperatura dada. Si se abate la presión del sistema, se abate la presión de vapor y necesariamente se reduce su punto de ebullición. Si se sustrae aire del horno por medio de vacío en un rango de 0.75 a 75 Torr lo cual incrementa la velocidad del secado el horno de vacío se muestra en la figura 1.2.

Es necesario que el horno tenga una salida de aire constante y que la presión no exceda los 100 torr y 70°C, de manera que la muestra no se descomponga y que no se evaporen los compuestos volátiles de la misma, cuya presión de vapor también ha sido modificada [16].



Figura 1.2: Horno de vacío

1.2.3. Método de secado en Termobálanza

Esta técnica se basa en evaporar de manera continua la humedad de la muestra y el registro continuo de la pérdida de peso en la termobálanza hasta que la muestra se sitúe a peso constante figura ver figura 1.3. El error de pesada en este método se minimiza cuando la muestra no se expone constantemente al ambiente [16].



Figura 1.3: Termobálanza

1.2.4. Método de destilación azeotrópica

El método se basa en la destilación simultánea del agua con un líquido inmiscible en proporciones constantes. El agua es destilada en un líquido inmiscible de alto punto de ebullición, como son tolueno y xileno. El agua destilada y condensada se recolecta en una trampa Bidwell para medir el volumen [16], como se puede observar en la figura 1.4.

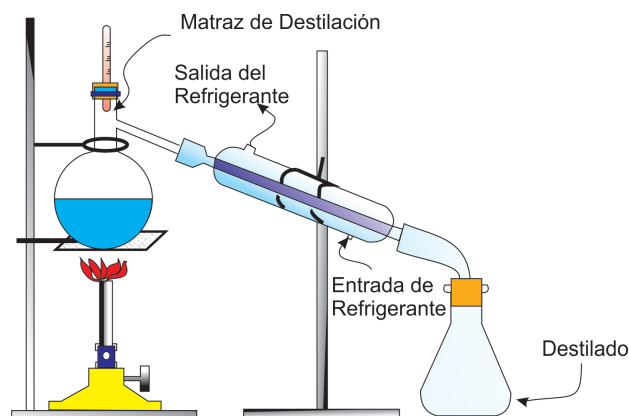
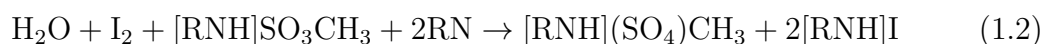


Figura 1.4: Destilación Azeotrópica

1.2.5. Método de Karl Fisher

Es el único método químico comúnmente usado para la determinación de agua en alimentos que precisamente se basa en su reactivo. Este reactivo fue descubierto en 1936 y consta de yodo, dióxido de azufre y un alcohol (ejemplo metanol).

Las reacciones son las siguientes [13] :



Inicialmente, el dióxido de azufre reacciona con el metanol para formar el éster el cual es neutralizado por la base (1.1). El éster es oxidado por el yodo a metil sulfato en una reacción que involucra al agua (1.2). Habitualmente se utiliza un exceso de dióxido de azufre, piridina y metanol de manera que la fuerza del reactivo venga determinada por la concentración de yodo como se observa en la figura 1.5 .

Este reactivo es un poderoso deshidratante, por lo que tanto la muestra como el reactivo deben protegerse contra la humedad del aire, cualquiera que sea la técnica usada. Se hace por análisis volumétrico y estas pueden ser visuales o potenciométricas. En su forma más simple el mismo reactivo funciona como indicadores. La disolución muestra mantiene un color amarillo canario mientras haya agua, que



Figura 1.5: Método Karl Fisher

cambia luego a amarillo cromato y después a pardo en el momento del vire [11].

En su forma más simple el método potenciométrico consta de una fuente de corriente directa, un reóstato, un galvanómetro o micro amperímetro y electrodos de platino, dos cosas son necesarias determinar la cantidad de humedad: una diferencia de potencial que nos dé una corriente y el contacto del titulante con el analito.

Este método se aplica a alimentos con bajo contenido de humedad por ejemplo frutas y vegetales deshidratados, aceite y café tostado, no es recomendable para alimentos con alto contenido de humedad [13, 11, 9].

1.3. Métodos Indirectos para determinar humedad

1.3.1. Refractometría

La refractometría se basa en la refracción del haz de luz cuando pasa de uno a otro medio de diferentes densidades ópticas. El método implica la determinación del índice de refracción (RI), definido como la relación del seno del ángulo del

haz incidente al seno de un ángulo del haz refractado [2]. El índice de refracción depende en la concentración, la temperatura y la longitud de onda de la luz. El valor estándar de RI se mide a 20°C usando luz monocromática de sodio (a 589 nm) obtenida por prismas Amici integrados en un refractómetro como observamos en la figura 1.6.



Figura 1.6: Refractómetro

Al mantener la temperatura y longitud de onda de una luz constante, las cuantitativas determinaciones de sólidos contenidos son habilitadas, dónde el valor del Rhode Island indica la concentración del compuesto de interés. Ya que todos los compuestos químicos tienen una característica Rhode Island, la identificación cualitativa de un compuesto desconocido es determinada por la comparación de literatura de los datos de Rhode Island.

1.3.2. Método Dieléctrico

La unidad de medida del instrumento es un condensador eléctrico figura 1.7 que consiste en dos electrodos paralelos separados por un espacio de aire. Cuando hay un voltaje entre los electrodos, un campo eléctrico estático se desarrolla a través del espacio de aire, causando una pequeña corriente entre ellos (I_a). Sin embargo, colocando el material de prueba entre los electrodos, la corriente entre los electrodos aumenta a un nuevo valor (I_k). Por lo tanto, la capacidad de un condensador depende de la naturaleza del material ubicado entre los electrodos. La permitividad de un material dieléctrico se define en relación con la de aire, que tiene una permitividad relativa de 1 .



Figura 1.7: Método dieléctrico

Por lo tanto, la permitividad relativa del material de prueba es definida por su constante dieléctrica, dado como la proporción de la cantidad de energía eléctrica almacenada en un material por voltaje aplicado. Sin embargo, los productos alimenticios con alto contenido de agua se caracterizan por una alta constante dieléctrica debido a la rotación dipolar, un fenómeno que ocurre cuando la molécula del agua tiende a orientarse en la dirección del campo eléctrico. Valores típicos de K para materiales aislantes más comunes están entre 1 y 10, con la excepción del agua teniendo una constante dieléctrica de alrededor 80 [3].

1.3.3. Espectroscopía de cercano infrarrojo

La técnica de espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) sirve para determinar el contenido de humedad, es basada en el hecho de que la muestra es expuesta a radiación electromagnética (800-2500 nm) lo cual conduce a la excitación de enlaces químicos involucrando hidrógeno, que puede usarse para su cuantificación, ver figura 1.8. Sin embargo, debido a la composición muy compleja de muestras de alimentos, diferentes enlaces de hidrógeno presentes en compuestos orgánicos (CH, NH, OH y SH) simultáneamente absorben la radiación NIRS, al mismo tiempo que cambian su energía.

Por lo tanto, el espectro NIRS es muy complejo y consiste en bandas verticales y de combinación muy amplias y superpuestas que no pueden ser atribuidas a un compuesto químico particular y como tales no se pueden usar directamente para cuantificar el contenido de agua de una muestra analizada. Para derivar la información relevante de los espectros NIRS y cuantificar el compuesto de interés,



Figura 1.8: Espectroscopía de infrarrojo cercano

se deben aplicar técnicas de quimiometría modernas. La quimiometría implica la utilización de matemáticas aplicadas, estadísticas multivariadas, y técnicas computacionales para desarrollar un modelo de calibración que permita la cuantificación del compuesto de interés y una cierta aplicación práctica de NIRS [2, 3].

1.3.4. Imagen hiperespectral de cercano infrarrojo

La imagen hiperespectral NIR figura 1.9 ha sido introducida para la simultanea identificación, cuantificación y localización de constituyentes químicos de interés. El sistema de imágenes hiperespectrales (HSI) genera una imagen hipercubierta tridimensional que permite un análisis tanto cualitativo como cuantitativo: visualización de la distribución de los constituyentes dentro de la muestra y datos espectrales obtenidos para cada píxel de la muestra examinada que se explotará para análisis cuantitativos.



Figura 1.9: Hiperespectral NIR

1.3.5. Espectroscopía de bajo campo de resonancia magnética nuclear(RMN)

La aplicación de espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN) de campo bajo comenzó en la década de 1970, cuando se dispuso de los primeros sistemas de RMN de mesa figura 1.10. La medición del contenido de agua mediante RMN de baja resolución se basa en la medición de los cambios en la señal de RMN, que es proporcional al número de átomos de hidrógeno presentes en la muestra. Los núcleos de hidrógeno en el campo magnético oscilan con la frecuencia proporcional a la intensidad del campo. Al usar un pulso de radiofrecuencia corto y fuerte, se induce una señal de RMN. Sin embargo, una terminación del pulso de radiofrecuencia induce la relajación-retorno de los núcleos al estado inicial registrado como decaimiento de una señal de RMN, donde la velocidad de decaimiento de la señal de RMN depende de la matriz en la que están incrustados los átomos de hidrógeno.



Figura 1.10: Resonancia Magnética Nuclear

En muestras sólidas, las oscilaciones de los núcleos de hidrógeno se suprimen mostrando un breve tiempo de relajación, mientras que el fenómeno opuesto se observa para muestras líquidas. En este sentido, sobre la base de diferentes tiempos de relajación, se habilita la distinción entre sólidos, petróleo y agua, lo que representa una base para la medición del contenido de estos. Mediante la aplicación de la técnica de RMN, el agua libre se determina fácilmente, en contraste con el agua ligada. Sin embargo, la aplicación de esta técnica se limita a un contenido humedad de 20 % debido a los largos tiempos de relajación de los núcleos de hidrógeno en agua libre [12].

Si bien existen técnicas por medio de radiación electromagnética que permiten determinar el contenido de humedad en los alimentos estos tienen ciertas limitantes. Por otra parte existe la tendencia a utilizar región Tera-Hertz para determinar contenidos de humedad debido a la alta absorción que tiene dicha longitud de onda por las moléculas de agua, así como por su baja energía que evita el calentamiento y destrucción de la muestra.

A continuación se presentan tablas con las principales técnicas para determinar el contenido de humedad así como sus principales aplicación, ventajas y desventajas.

Metodo	Principio de medida	aplicación	ventajas	desventajas	limitaciones
Secado en horno	determinar la pérdida de peso causado por el calor de convección	mayoría de alimentos	<ul style="list-style-type: none"> • Método estándar • Simple de manejar • Sin consumo químico • Mano de obra mínima • Análisis simultaneo de un gran número de muestras • Baja temperatura de secado • Oxidación y descomposición de reacción minimizadas 	<ul style="list-style-type: none"> • No selectivo • Pérdida de otras sustancias volátiles • Posible descomposición de la muestra • Pérdida de tiempo • No portable • No selectivo • Pérdida de otras sustancias volátiles 	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentos ricos en grasas de azúcar y compuestos volátiles • Rango típico: 0.1% -99%
Secado en horno al vacío	Determinación de la pérdida de peso causado por la calefacción bajo presión reducida	<ul style="list-style-type: none"> • La mayoría de los alimentos • Comida sensible al calor • Alimentos ricos en azúcar y grasa 	<ul style="list-style-type: none"> • Secado a baja temperatura • Se minimizan las reacciones oxidativas y de descomposición 	<ul style="list-style-type: none"> • No selectivo • Pérdida de otros volátiles sustanciados 	<ul style="list-style-type: none"> • Rango típico: 0.1% -99%
Destilación azeotrópica	Destilación de agua con un solvente inmiscible	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentos ricos en sustancias volátiles 	<ul style="list-style-type: none"> • Selectivo • Las reacciones oxidativas se minimizan 	<ul style="list-style-type: none"> • No apto para sensibles al calor muestras • No es adecuado para el análisis de rutina de muestras múltiples • Baja precisión • Riesgos de solventes orgánicos usados 	<ul style="list-style-type: none"> • Rango típico: 3% -70% • Muestras que contienen componentes solubles en agua
Método Karl Fisher	Reacción química entre agua y yodo	<ul style="list-style-type: none"> • Comida baja en humedad 	<ul style="list-style-type: none"> • Selectivo • Método estándar • Alta precisión y precisión • Equipo automatizado disponible 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensible a la humedad atmosférica • Se requiere la estandarización del KFR • Depende de la matriz de muestra 	<ul style="list-style-type: none"> • Las muestras deben ser solubles en el reactivo de titulación • Rango típico: 100 ppm-100%

Metodo	Principio de medida	aplicación	ventajas	desventajas	limitaciones
Refractometría	Medición del ángulo crítico de un haz de luz a medida que pasa de medios de diferentes densidades ópticas	<ul style="list-style-type: none"> • Productos de azúcar líquido • Leche condensada • Frutas y productos de frutas 	<ul style="list-style-type: none"> • No destructivo • Pequeña cantidad de muestra 	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento delicado de la superficie del prisma • La presencia de polvo u otros residuos puede provocar arañazos e inexactitudes 	
Método dieléctrico	Medición del cambio en capacitancia eléctrica o resistencia a la electricidad pasando por la muestra	<ul style="list-style-type: none"> • Una amplia gama de materiales en forma sólida o en partículas • Uso en proceso 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición simple y rápida 	<ul style="list-style-type: none"> • La curva de calibración está influenciada por la composición sólida de una muestra • Dependencia de las proporciones de sales a no electrolitos • Dependencia de los procedimientos de calibración • Dependencia del tamaño, la densidad y la temperatura de la muestra 	<ul style="list-style-type: none"> • Rango típico: hasta 30% - 35%
NIR	Medida de la absorbancia de la radiación NIR de la muestra	<ul style="list-style-type: none"> • La mayoría de los alimentos • Uso en proceso 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición simple y rápida • Bajo costo • Sin consumo de productos químicos • No destructivo • Mínima mano de obra • Preparación de muestra mínima o nula • Análisis simultáneo de múltiples parámetros • Disponibilidad de calibraciones listas para usar • precisión superior • Gran selección de equipos 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere conocimientos complejos sobre análisis de datos multivariantes para desarrollar calibración • Dependencia de los modelos de calibración • Necesidad de validación periódica del rendimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • El rango típico depende del modelo de calibración

Metodo	Principio de medida	aplicación	ventajas	desventajas	limitaciones
Imágenes hiperespectrales NIR	Generación de un mapa espacial de la variación espectral causada por la reflexión de la radiación NIR, dispersión, absorción o emisión de la muestra	<ul style="list-style-type: none"> • todos los alimentos 	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la identificación, cuantificación y localización de agua <ul style="list-style-type: none"> • No destructivo • Preparación de muestra mínima o nula 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere conocimientos complejos sobre análisis de datos multivariantes para desarrollar calibración • Dependencia de los modelos de calibración • Alto costo de compra de los equipos de HSI • Pocos proveedores comerciales disponibles • Largo tiempo de análisis 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependencia del modelo de calibración
Espectroscopía de RMN de campo bajo	Medición de los cambios en la señal de RMN de la muestra		<ul style="list-style-type: none"> • Permite la investigación de la estructura de los alimentos 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere conocimiento complejo • No práctico 	<ul style="list-style-type: none"> • Hasta 20% de contenido de humedad

1.4. Tera Hertz

La región de Tera-Hertz (THz) del espectro electromagnético se encuentra en el intervalo de frecuencia de 0.1 a 10 THz (3 mm a 30 μm en longitud de onda) como se observa en la figura 1.11, acortando el espacio entre las bandas infrarroja y de microondas. La radiación THz u ondas THz, son típicamente considerada como la próxima frontera en tecnologías de detección e imágenes que pueden proporcionar información, que puede no estar disponible a través de métodos convencionales (por ejemplo, microondas y técnicas de rayos X). Durante la última década, las ondas THz se han utilizado para caracterizar las propiedades electrónicas, vibratorias y de composición de sólidos, líquidos y materiales de fase gaseosa [19, 16, 8]. El interés reciente en la tecnología THz se ha centrado en las imágenes, el diagnóstico médico, el monitoreo de salud, control ambiental, identificación química y biológica, y evaluación no destructiva. La aplicación de la tecnología Tera-Hertz en la alimentación y la agricultura también se ha iniciado [2, 3] .

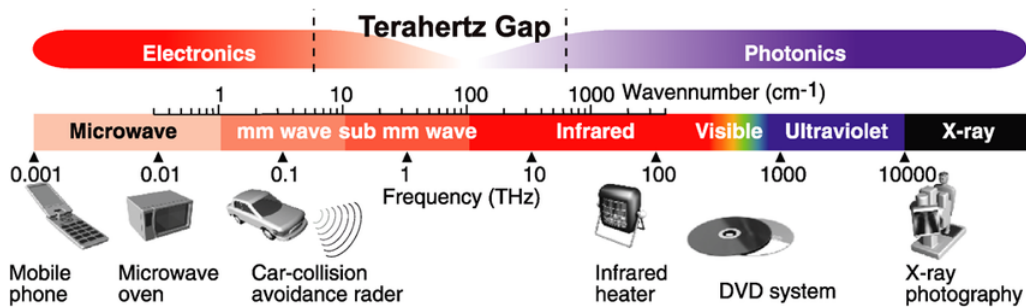


Figura 1.11: Espectro Electromagnético

Una de las aplicaciones más importantes de la onda de THz es la espectroscopía THz. La radiación THz es capaz de explorar interacciones intermoleculares e intramoleculares de moléculas complejas y muchas moléculas polares exhiben *firmas espectrales* únicas en esta región, que surgen de las transiciones entre los estados rotacionales. En los últimos años, la espectroscopía THz se ha estado utilizando para investigar químicos, *Escherichia coli* (*E. coli*) y esporas de *Bacillus subtilis* (BG), un estimulante para ántrax, explosivos plásticos, drogas y otros compuestos [15, 1].

En general, los sólidos no polares y no metálicos, como los plásticos y los cerámicos, son al menos parcialmente transparentes y reflectantes en el rango de 0.2-5 THz. Los líquidos no polares también son transparentes, mientras que los líquidos polares, como el agua, son altamente absorbentes. Esto se debe a que la absorción en el rango THz del espectro electromagnético se debe generalmente a los movimientos rotacionales de los dipolos dentro de un material. Experimentos de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) y simulación por computadora de los espectros del infrarrojo lejano de moléculas orgánicas muestran características vibratorias asociadas con movimientos relativos del enlace de hidrógeno intermolecular [23, 6].

1.4.1. Tecnología Tera-Hertz en Alimentos

Con la generación de seguridad alimentaria los productos agrícolas deben garantizar un control de calidad cada vez más importante y desafiante. Los métodos fáciles para medir los alimentos, discernir entre los alimentos adulterados y detectar venenos (residuos de pesticidas, residuos de medicamentos veterinarios, residuos de herbicidas, aditivos, etc.) y los patógenos alimentarios en los alimentos también son necesarios y desafiantes. Los métodos de prueba tradicionales, como eyeballing, degustación, knocking y otros métodos físicos se utilizaron para determinar el cumplimiento de las normas. Las técnicas no tradicionales, como la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR), NIR, bioensayos (como la pureza cromatográfica), impresión molecular basados en sensores, se emplean para diferenciar productos y proporcionar información de calidad adicional [5].

La fuerte atenuación de la radiación THz por el agua hace que la radiación en esta banda espectral sea una sonda de hidratación sin contacto muy sensible en plantas, así como otros materiales teniendo como ventaja que no es una radiación ionizante por lo tanto no se alteran las propiedades organolépticas de los productos [21].

Además, un buen número de materiales dieléctricos, tales como tejido biológico deshidratado, son en su mayor parte transparentes en esta región espectral, lo que

nos permite por medio de las moléculas de agua ligadas al material determinar el contenido de agua [4].

Si bien existen estudios de emisiones Tera Hertz donde buscan el contenido de agua detección de pesticidas detección de antibióticos así como predicción de azúcares y contenido de alcohol, es necesario el estudio del contenido de humedad en alimentos aún se encuentra en desarrollo crear bibliotecas con los rangos de atenuación por el agua y determinar la cinética de secado con esta técnica es un reto que apenas inicia [10, 22, 14, 18].

Aunque el potencial de la espectroscopía de Tera-Hertz en el dominio del tiempo (THz-TDS) y de las imágenes ha sido demostrado por una serie de cuestiones en el control de calidad de los alimentos, está claro que queda mucho por investigar en esta área. El desarrollo de las bases de datos de la biblioteca espectral THz es algo que todavía está en desarrollo [7].

Se acepta ampliamente que un mapa de humedad de una hoja seca es la primera demostración de formación de imágenes THz [14, 7]. A partir de estas primeras mediciones, han surgido otros ejemplos de detección de humedad o líquido utilizando técnicas THz. Por ejemplo, los avances en el análisis de la transmisión de THz a través de las hojas han permitido la medición no invasiva in-situ de los niveles de hidratación en las hojas de las plantas figura 1.12 , lo que puede permitir una supervisión y asignación efectivas de los recursos hídricos para la agricultura.



Figura 1.12: *Imagenología mediante Técnica Tera-Hertz*

Mediante el método de imagen THz, está claro que el agua en la hoja dismi-

nuye con el tiempo esta disminución también se puede monitorear incluso in-vivo aportando una herramienta que determina la humedad en tiempo real [17, 4].

1.5. Conclusión

En este capítulo, se realizó un resumen de los métodos que existen para determinar el contenido de humedad en productos orgánicos, así como una comparación de sus ventajas, desventajas y aplicaciones, se encontró que a pesar de que todos las técnicas ofrecen ciertas características en sus métodos al momento de realizar las mediciones no existe aún un dispositivo que permita monitorear la cantidad de agua presente en los alimentos sin ser no invasivo o que tenga un efecto secundario sobre la muestra. Así mismo se realizó una revisión bibliográfica del actual uso de la radiación Tera Hertz en espectroscopía e imagenología en alimentos siendo estudiado algunos alimentos en búsqueda de diversas propiedades como son humedad, detección de antibióticos, detección de pesticidas. Lo cual se puede comenzar con el estudio de alimentos de alto contenido de humedad ya que esto nos permitirá aplicar a diversos alimentos que son producidos en el estado de Chiapas y así poder general un control de calidad óptimo para los productores que deshidratan alimentos para su venta.

Referencias

- [1] AGELET, L. E., AND HURBURGH JR, C. R. A tutorial on near infrared spectroscopy and its calibration. *Critical Reviews in Analytical Chemistry* 40, 4 (2010), 246–260.
- [2] BRADLEY, R. L. Moisture and total solids analysis. In *Food analysis*. Springer, 2010, pp. 85–104.
- [3] BYARS, M. Techniques based on the measurement of electrical permittivity. *Nondestructive Testing of Food Quality* (2007), 321–338.

- [4] CASTRO-CAMUS, E., PALOMAR, M., AND COVARRUBIAS, A. Leaf water dynamics of arabidopsis thaliana monitored in-vivo using terahertz time-domain spectroscopy. *Scientific reports* 3 (2013), 2910.
- [5] DEFERNEZ, M., KEMSLEY, E. K., AND WILSON, R. H. Use of infrared spectroscopy and chemometrics for the authentication of fruit purees. *Journal of agricultural and food chemistry* 43, 1 (1995), 109–113.
- [6] FISCHER, B., WALTHER, M., AND JEPSEN, P. U. Far-infrared vibrational modes of dna components studied by terahertz time-domain spectroscopy. *Physics in Medicine & Biology* 47, 21 (2002), 3807.
- [7] GOWEN, A., AND O. SULLIVAN, O. DONNELL, C. Terahertz time domain spectroscopy and imaging: Emerging techniques for food process monitoring and quality control. *Trends in Food Science & Technology* 25, 1 (2012), 40–46.
- [8] HART, F. L., BURGOS GONZALEZ, J., FISHER, H. J., ET AL. *Análisis moderno de los alimentos*. Acribia,, 1991.
- [9] HINZ, D. C. Evaluation of methods for the determination of water in substances with unknown chemical and thermal behaviour. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis* 43, 2 (2007), 779–783.
- [10] HUA, Y., AND ZHANG, H. Qualitative and quantitative detection of pesticides with terahertz time-domain spectroscopy. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 58, 7 (2010), 2064–2070.
- [11] ISENGARD, H. Karl fischer titration, a selective method for determining water in food. *J Agroaliment Process Technol* 12 (2006), 65–74.
- [12] ISENGARD, H.-D. Water content, one of the most important properties of food. *Food control* 12, 7 (2001), 395–400.
- [13] JAMES, C. S. *Analytical chemistry of foods*. Springer Science & Business Media, 2013.

- [14] JEPSEN, P. U., MØLLER, U., AND MERBOLD, H. Investigation of aqueous alcohol and sugar solutions with reflection terahertz time-domain spectroscopy. *Optics Express* 15, 22 (2007), 14717–14737.
- [15] LIN, H., AND YING, Y. Theory and application of near infrared spectroscopy in assessment of fruit quality: a review. *Sensing and instrumentation for food quality and safety* 3, 2 (2009), 130–141.
- [16] NOLLET, L. M. *Handbook of Food Analysis, -3 Volume Set*. CRC Press, 2004.
- [17] OGAWA, Y., KAWASE, K., MIZUNO, M., YAMASHITA, M., AND OTANI, C. Nondestructive and real-time measurement of moisture in plant. *IEEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems* 124 (2004), 1672–1677.
- [18] PARASOGLU, P., PARROTT, E., ZEITLER, J., RASBURN, J., POWELL, H., GLADDEN, L., AND JOHNS, M. Quantitative water content measurements in food wafers using terahertz radiation. *Terahertz Sci Technol* 3, 4 (2010), 176–82.
- [19] PARK, Y. W., AND BELL, L. N. Determination of moisture and ash contents of foods. In *Handbook of Food Analysis-3 Volume Set*. CRC Press, 2004, pp. 66–93.
- [20] PEARSON, D., ROMERO, C., SUSO, J., ET AL. *Técnicas de laboratoria para el análisis de alimentos*. 1981.
- [21] PERENZONI, M., AND PAUL, D. J. *Physics and applications of Terahertz radiation*, vol. 173. Springer, 2014.
- [22] REDO-SANCHEZ, A., SALVATELLA, G., GALCERAN, R., ROLDÓS, E., GARCÍA-REGUERO, J.-A., CASTELLARI, M., AND TEJADA, J. Assessment of terahertz spectroscopy to detect antibiotic residues in food and feed matrices. *Analyst* 136, 8 (2011), 1733–1738.
- [23] WALTHER, M., FISCHER, B. M., AND JEPSEN, P. U. Noncovalent intermolecular forces in polycrystalline and amorphous saccharides in the far infrared. *Chemical Physics* 288, 2-3 (2003), 261–268.

Capítulo 2

Rango Tera-Hertz del espectro electromagnético

2.1. Introducción

En este capítulo abordaremos los principios teóricos fundamentales para entender las características únicas de la radiación Tera Hertz. La teoría electromagnética clásica nos permite una descripción general de como las ondas Tera Hertz se propagan e interactúan con la materia.

2.2. Fundamentos del electromagnetismo

Comenzaremos con las ecuaciones de Maxwell para describir las ondas THz como lo haríamos para cualquier otra región espectral. La forma macroscópica de las ecuaciones de Maxwell tiene la siguiente forma.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_f \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = J_f + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.4)$$

Los parametros presentes que intervienen en la formulacion de las ecuaciones de Maxwell son las siguientes:

- \vec{D} - Campo dieléctrico que resume los efectos eléctricos de la materia.
- \vec{B} - Campo magnético existente en el espacio, creado por las corrientes.
- \vec{E} - Campo eléctrico existente en el espacio, creado por las cargas.
- \vec{H} - Campo magnético que resume los efectos magnéticos de la materia.
- ρ_f - densidad de carga libre
- J_f - densidad de corriente libre.

Estas ecuaciones relativamente simples, junto con la ley de fuerza de Lorentz la cual nos describe como el campo afecta las cargas.

$$\vec{F} = q(E + v \times B) \quad (2.5)$$

- \vec{F} - Fuerza de Lorentz
- q - Carga Eléctrica
- E - Campo Eléctrico
- B - Campo Magnético
- v - Velocidad de la carga

constituyen la base teórica completa de la electrodinámica clásica.

2.3. Ecuación de onda

De acuerdo con la teórica si un material es dieléctrico la ecuación de onda toma la siguiente forma universal.

$$\nabla^2 E = \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

lo que significa que las ondas electromagnéticas se propagan en medios homogéneos a una velocidad.

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{c}{n} \quad (2.7)$$

donde $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ es la velocidad de la luz en el espacio libre y $n = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}$ es el índice de refracción. Las soluciones generales de la ecuación de onda son linealmente polarizadas en ondas planas monocromáticas.

$$E(r, t) = E_0 e^{i(kr - wt)} \quad \text{y} \quad H(r, t) = H_0 e^{i(kr - wt)} \quad (2.8)$$

donde k es el vector de onda y w es la frecuencia angular. Desde las ecuaciones de Maxwell podemos comenzar a determinar las relaciones entre \mathbf{E} y \mathbf{H} asociadas con k y w . Substituyendo en el plano de onda $\nabla \cdot E = 0$ y $\nabla \cdot B = 0$ se obtiene.

$$k \cdot E = 0 \quad \text{y} \quad k \cdot H = 0 \quad (2.9)$$

Esto significa que \mathbf{E} y \mathbf{H} son ambas perpendiculares a el vector de onda, esto es una onda electromagnética transversal. Las ecuaciones de rizo dan la relación

$$kc \cdot E = w\mu H \quad (2.10)$$

Estas ecuaciones nos permiten la descripción e interacción de la radiación con materiales anisotrópicos [17].

2.4. Dieléctricos

Son sustancias en las que todas las partículas cargadas están ligadas muy fuertemente a las moléculas constituyentes. Las partículas cargadas pueden cambiar sus posiciones ligeramente como respuesta a un campo eléctrico, pero no se aleja de la vecindad de las moléculas. Hablando estrictamente, esta definición se aplica a un dieléctrico ideal; esto es, aquel que no muestra conductividad en presencia de un campo eléctrico externo. Los dieléctricos físicos reales pueden mostrar una débil conductividad, pero en un dieléctrico típico la conductividad es 10^{20} veces menor que la de un buen conductor. Por lo general es suficiente decir que los dieléctricos no son conductores.

2.5. Polarización de medios dieléctricos

Si un material contiene moléculas polares, estarán normalmente en una orientación aleatoria cuando no tiene un campo eléctrico aplicado. Si se aplica un campo eléctrico, polarizará al material, orientando los momentos de dipolos de las moléculas polares.

Esto disminuye el campo eléctrico efectivo entre las placas y aumentará la capacidad en una disposición de placas paralelas. El dieléctrico debe ser un buen aislante eléctrico para reducir al mínimo las fugas de corriente DC a través del condensador. La presencia del dieléctrico disminuye el campo eléctrico producido por una determinada densidad de carga.

2.6. Radiación Tera-Hertz

Los primeros estudios realizados hace más de cien años, casi en su totalidad debido al trabajo de Heinrich Rubens figura 2.1, la gran mayoría de los artículos publicados hasta 1920 fueron escritos por Rubens, o investigadores que habían colaborado con él, pero a partir de entonces hubo un flujo constante de artículos, finalmente conduce a una rápida expansión desde la década de 1950 en adelante.



Figura 2.1: Heinrich Rubens realizó los primeros estudios de Radiación Tera-Hertz

Esencialmente, la Radiación Tera-Hertz (THz) es una onda electromagnética con frecuencias que van desde 0.3 THz a 3 THz y longitudes de onda que van desde de 0.1 mm a 1 mm. Las ondas de THz fueron formalmente nombrado a

finis de la década de 1980, antes de lo cual eran colectivamente conocido como rayos infrarrojos lejanos. Debido a la disponibilidad limitada de fuentes efectivas de generación de THz y detectores sensibles a THz, hubo muy poca investigación en esta banda; por lo tanto, esta banda también es llamada THz Gap.

El término THz Gap es aplicable a continuación a dos aspectos: a) La banda THz se encuentra entre ondas milimétricas y rayos infrarrojos, ambas bandas han sido más ampliamente investigadas, formando así un "espacio en blanco" relativamente subdesarrollado. b) Estudios del régimen de longitud de onda larga, del cual la banda THz es una parte, se basan predominantemente en la electrónica, mientras que los estudios de el régimen de longitud de onda corta se basan predominantemente en la fotónica, resultando en una "brecha" como se observa en la figura 2.2 entre estos dos campos de investigación [34].

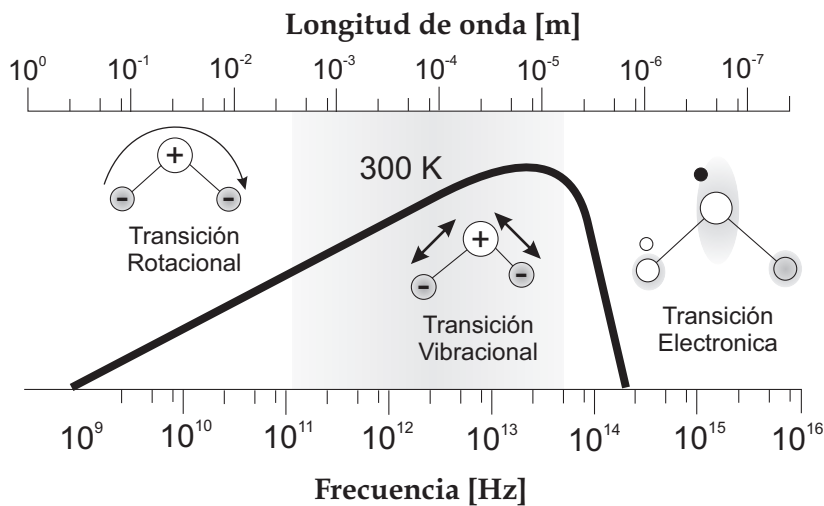


Figura 2.2: Espectro electromagnético desde la región micro ondas hasta la región óptica. Transiciones rotacionales vibracionales y electrónicas se observar a lo largo de la radiación de cuerpo negro 300 K

El desarrollo de láseres ultrarrápidos en la década de 1990 fue un punto de inflexión importante, que llevó a el desarrollo de la espectroscopía de dominio THz-time de hoy en día (THz-TDS). Los sistemas THz ahora se pueden desarrollar usando una variedad de fuentes, como diodos Gunn [6] y dispositivos electrónicos de super-retícula [25], que operan en el extremo de baja frecuencia de banda THz, o fuentes

fotónicas, como láser y antenas dipolo fotoconductoras [26], que son más comunes y de los cuales se puede generar radiación a través de un rango de frecuencia de banda ancha. Otros métodos de generación THz incluyen rectificación óptica [24] y mezcla de luz de dos fuentes de láser cuya longitud de onda es la diferencia de la región THz [11].

En comparación con las regiones vecinas de ondas de radio y radiación infrarroja, la banda THz muestra una opacidad atmosférica excesivamente alta debido a las líneas de rotación de las moléculas constituyentes figura 2.3 . En particular, absorción por vapor de agua es el proceso predominante de atenuación atmosférica de THz.

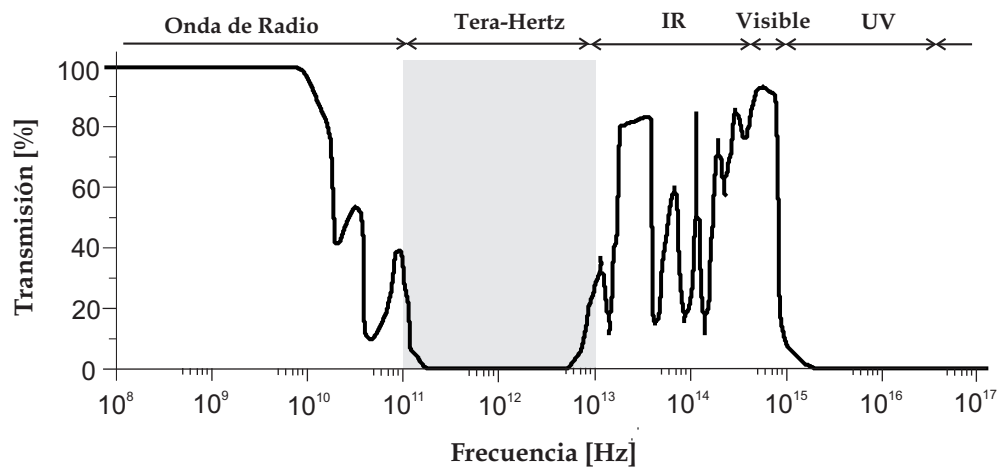


Figura 2.3: Absorción atmosférica de la radiación donde se observa la atenuación de la región Tera-Hertz

Con base a las propiedades ópticas a frecuencias THz, la materia condensada es en gran parte agrupados en tres tipos: agua, metal y dieléctrico. El agua, es un líquido polar fuerte, es altamente absorbente en la región THz.

Debido a la alta conductividad eléctrica, los metales son altamente reflexivos en las frecuencias THz. No polares y materiales no metálicos, es decir, dieléctricos tales como papel, plástico, ropa, madera, y las cerámicas que son generalmente opacas a longitudes de onda ópticas, son transparentes a la radiación THz. Una

breve descripción de las propiedades ópticas de cada material tipo se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: *Propiedades ópticas de algunos materiales .*

Tipo de material	Propiedades Ópticas
Agua líquida	Alta absorbencia ($\alpha \approx 250 \text{ cm}^{-1}$ a 1 THz)
Metal	Alta reflectividad ($> 99.5\%$ a 1 THz)
Plástico	Baja absorbencia ($\alpha < 0.5 \text{ cm}^{-1}$ a 1 THz) Baja Reflectividad ($n \approx 1.5$)
Semiconductor	Baja absorbencia ($\alpha < 1 \text{ cm}^{-1}$ a 1 THz) Alta reflectividad ($n \approx 3-4$)

2.7. Generación y detección de pulsos Tera Hertz

Hay dos categorías principales de sistemas THz: pulsado y onda continua. Los sistemas pulsados utilizan pulsos de picosegundos electromagnéticos, que tienen componentes espectrales que varían de 100 GHz a varios THz, mientras que los sistemas de onda continua emplean ondas que solo tienen un solo componente de frecuencia a la vez. La radiación THz de banda ancha se genera excitando una antena fotoconductor (PCA) o un cristal no lineal con un solo láser de femtosegundo.

Se pueden usar dos láseres de femtosegundo para generar banda estrecha u onda continua (CW) de radiación THz. Ya sea un detector fotoconductor o dispositivo de muestreo un electro-óptico (EOS) se puede usar para detectar ondas THz. Existen variaciones de esta las técnica (PCA y EOS) pueden emplearse en la generación y detección de THz. Las siguientes secciones describen sus conceptos operativos, los detalles y las descripciones teóricas de los métodos de generación y detección de THz [26, 33, 14].

2.7.1. Antena Fotoconductor

En la generación de pulsos THz ultracortos usando un interruptor fotoconductor, se envía un pulso de láser ultrarrápido, en el rango de femtosegundos (fs) sobre una superficie fotoconductor sesgada.

El campo de polarización en la brecha fotoconductor entre los electrodos es proporcionado por electrodos metálicos. Cuando se excita con los pulsos de láser de femtosegundos, este espacio genera pulsos de THz. Los pulsos de THz generados se emiten en el sustrato por una antena dipolar THz, que en la forma más simple es hecha por el puente metalizado entre los dos electrodos. Una lente de sustrato conectada a la estructura recoge la radiación de THz generada en un haz de THz colimado.

Al invertir el principio de la generación THz, se puede utilizar una antena similar al generador de THz para detectar los pulsos de THz mediante muestreo fotoconductor. Sin embargo, para su uso como un detector, los dos electrodos de PCA están conectados a un sensor de corriente en lugar de a una fuente de alimentación suministro. Los impulsos de THz entrantes suministran el campo eléctrico requerido para conducir una fotocorriente en el detector de THz. La fotocorriente se mide como se muestra en las figuras 2.4. Otros métodos de generación de THz incluyen rectificación óptica en un cristal no lineal, corriente de sobretensión en la superficie del semiconductor, estructuras cuánticas de semiconductores, puente superconductor de alta temperatura y otros.

2.7.2. Rectificación óptica y muestreo electro óptico (EOS)

La rectificación óptica es un efecto óptico no lineal de segundo orden que básicamente es generación de diferencia de frecuencia (DFG) con una diferencia de frecuencia cercana a cero. Los pulsos de láser de femtosegundo se utilizan para generar THz a partir de cristales electro óptico (EO) mediante rectificación óptica como se muestra en la figura 2.4a se utilizan cristales de EO no lineales similares en el muestreo electro-óptico (EOS) para detectar la radiación THz. En esencia, EOS (utilizado para la detección de THz) puede considerarse un proceso recíproco

de la rectificación óptica utilizada para la generación de THz.

En EOS, la radiación THz incidente modifica el elipsoide de índice de refracción del cristal EO, dando lugar a un retardo de fase del haz de la sonda óptica polarizada linealmente. Al monitorear el retardo de fase, se detecta la intensidad de campo del pulso de THz.

Un procedimiento típico de EOS se muestra en la figura 2.4b un divisor de haz combina el haz THz, que viene después de la interacción con la muestra, y el haz de la sonda láser. El rayo combinado pasa a través del cristal sensor y luego un polarizador Wollaston se usa para convertir el retardo de fase inducida por THz del haz de la sonda en una modulación de intensidad.

Los fotodiodos conectados en modo equilibrado detectan modulación de intensidad óptica y la señal de diferencia está conectada a un amplificador de bloqueo.

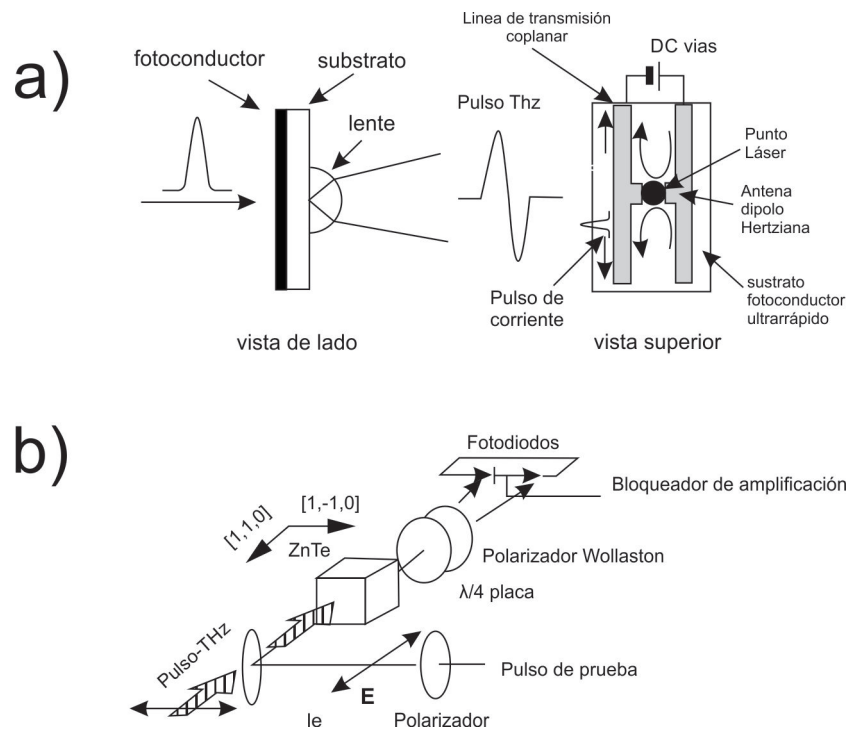


Figura 2.4: a) Switch fotoconductor para generación de pulsos THz de pulsos ultra cortos que están colimados en el espacio libre por el sustrato de las lentes
 b) muestra EO en el espacio libre de un cristal de ZnTe para detección THz [26]

2.7.3. Banda ancha THz generación y detección

La figura 2.5a muestra una configuración típica para la generación y detección de banda ancha o ondas de THz coherentes. Un pulso de láser excita el emisor THz, la radiación THz generada se dirige a la muestra por un espejo parabólico fuera del eje (OPM). La radiación THz transmitida por la muestra se enfoca en el detector THz por otra OPM. El pulso de láser utilizado para excitar el emisor de THz se divide con un divisor de haz (BS) y también se usa para controlar el detector de THz. La fotocorriente producida por la antena del detector THz se mide como una señal. Una descripción más detallada puede encontrarse en [33, 14].

2.7.4. Generación y la detección de Onda continua

La radiación THz de banda estrecha se genera cuando dos rayos láser se solapan espacialmente en un soporte de haz y luego se enfocan en una antena fotoconductor o cristal no lineal. Los láseres se seleccionan cuidadosamente para que coincidan con la frecuencia de diferencia en la región de THz deseada. Aparte de esto, la generación y detección de CWTHz son similares al sistema THz-TDS.

Un sistema de transmisión CW-THz típico se muestra en la figura 2.5b una revisión de los últimos desarrollos en CW photomixing para generación THz así como los sistemas de espectroscopía CW-THz podrían ser más compactos, menos costosos y más precisos que sistemas convencionales de THz-TDS.

2.7.5. Generación no lineal y detección de pulsos THz

Otro método para la generación y detección de THz de banda ancha es la rectificación óptica utilizando cristales no lineales (EO) figura 2.5c. La principal diferencia en comparación para la banda ancha y la generación de THz figura 2.5a es que una unidad de muestreo electro-óptica de espacio libre (FSEO). Del mismo modo, un cristal no lineal se utiliza para la generación de THz radiación en lugar de PCA. Con esta configuración figura 2.5c, se pueden usar dos láseres para generar la radiación THz, similar a la generación CW-THz, o un solo láser puede ser utilizado, similar a la generación THz-TDS con cristales no lineales (EO).

2.8. Aplicaciones Tera-Hertz

Las aplicaciones principales para la tecnología THz se dividen en dos categorías: detección y comunicaciones. Tera-Hertz tiempo de dominio (TDS) y frecuencias de dominio (FDS) son métodos tecnológicos analíticos avanzados aplicables a diversos materiales. El uso de estas herramientas proporciona capacidades de detección sin precedentes para muchos campos de investigación, incluyendo biología, farmacéutica, ciencias médicas, evaluación industrial no destructiva, ciencia de los materiales, monitoreo ambiental, seguridad, astronomía y ciencia básica [21, 31, 30, 12].

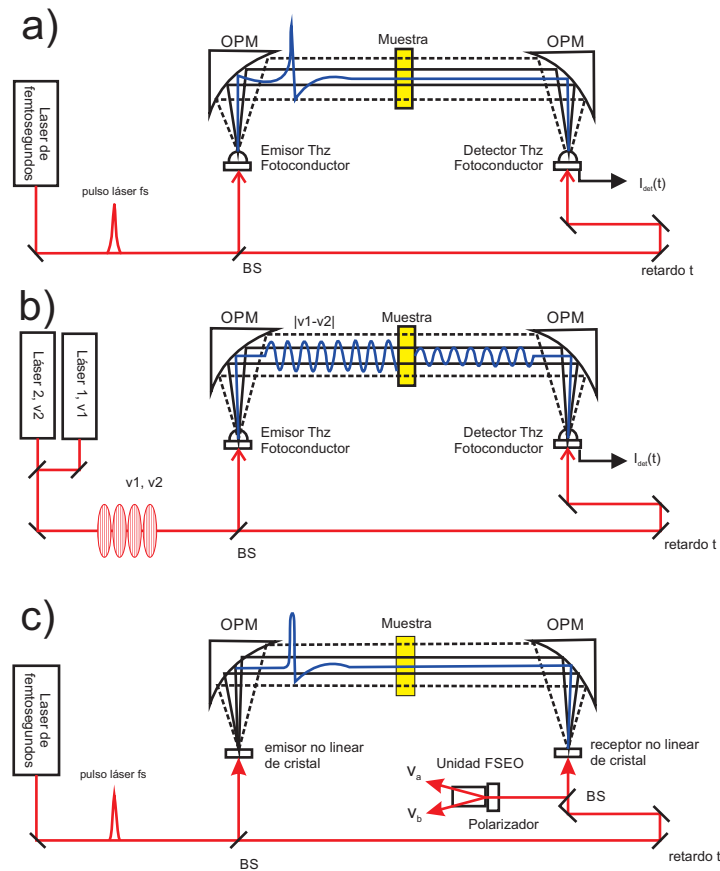


Figura 2.5: Esquema de sistemas de espectroscopía de transmisión THz. a) Generación Tera Hertz de Banda ancha b) Generación de THz de onda continua c) Generación Tera Hertz no lineal

Existen numerosos ejemplos en aplicaciones Tera-Hertz: chips de ADN, diagnóstico de cáncer de piel, pruebas de circuitos integrados a gran escala (LSI), inspección de explosivos y muchos otros. El estudio para control de calidad de los alimentos de la onda THz es óptimo debido a que la onda no es iónica y no es invasiva. Los efectos biológicos de las ondas THz se pueden dividir en efectos térmicos y efectos no térmicos debido a la baja energía de las ondas THz y la superposición de sus niveles de vibración y rotación [4, 10, 2].

La permitividad relativamente alta del agua líquida en comparación con los

Tabla 2.2: *Coefficientes de absorción de materiales en frecuencia Tera-Hertz.*

Material	Coefficientes de Absorción
Agua	250 cm ⁻¹
Proteínas	2 cm ⁻¹
Lípidos	15 cm ⁻¹
Almidón	6 cm ⁻¹
cafeína hidratada	40 cm ⁻¹
Glucosa monohidratada	60 cm ⁻¹
Ampicilina Trihidratada	30 cm ⁻¹
Theophylina monohidratada	41 cm ⁻¹
Trinitrotolueno	13.5 cm ⁻¹

otros materiales en el rango THz permite un mecanismo de contraste para la detección e imágenes de la humedad [8].

Mientras que el agua es absorbida fuertemente por la radiación de THz, otros elementos, como las proteínas, típicamente exhiben coeficientes de absorción 100 veces más pequeños que el agua. Las grasas y los lípidos son típicamente 20 veces menos absorbentes que el agua, mientras que el almidón es aproximadamente 50 veces más bajo que el agua en el rango de THz Tabla 2.2. Una demostración cuantitativa de las mediciones de humedad en alimentos secos [22, 23].

La radiación de microondas es una alternativa donde los coeficientes de absorción típicos para el agua en la región de microondas del espectro electromagnético son del orden de 1 cm⁻¹. Dado que el agua absorbe bastante en este rango del espectro electromagnético, las técnicas que emplean radiación de microondas pueden dar mediciones precisas con buena señal. Sin embargo, la alta potencia de salida de los generadores utilizados en este caso, que generalmente es del orden de decenas de milivatios, puede resultar en un calentamiento y degradación excesivos de la muestra. Por otra parte la ventaja del uso de las mediciones de THz es la potencia mínima del pulso que no provoca un calentamiento significativo de la muestra y

no tiene degradación [8] permitiendo una técnica adecuada para el estudio de humedad en productos orgánicos.

La primera imagen que se realizó del dominio de tiempo en el rango THz se tomó con el nivel de deshidratación de una hoja de tabaco [5]. Más recientemente, el monitoreo de la humedad in-vivo de las plantas a través del contenido de agua de sus hojas se ha convertido en una aplicación importante de la tecnología THz como observamos en la figura 2.6 la amplitud del del pico THz disminuye en función del aumento de la humedad. La evaluación del contenido de agua de la hoja proporciona información valiosa a agricultores y científicos sobre el estrés de la sequía de las plantas y el manejo del riego [4, 10, 8] .

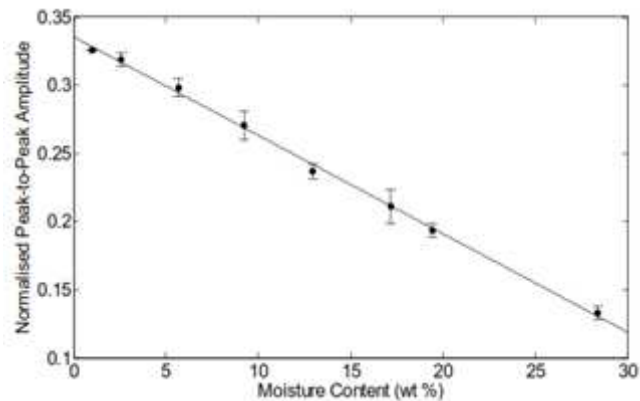


Figura 2.6: Amplitud normalizada a diferentes porcentajes de humedad se observa una relación lineal [10].

El aumento de las normas de calidad de los alimentos requiere métodos de medición rápidos para la determinación objetiva de la calidad de los alimentos a medida que los productos pasan del productor al consumidor.

Los métodos tradicionales de medición basados en espectroscopía de infrarrojo y medio infrarrojo proporcionan información intramolecular, como la presencia de diferentes enlaces característicos que indican la presencia de ciertas moléculas o grupos de moléculas en una muestra.

Sin embargo, en la región infrarroja se proporciona información intermolecular limitada (alineación de moléculas, grado de enlace de hidrógeno con moléculas circundantes y estructura amorfa o cristalina de moléculas). Por el contrario, la región THz puede proporcionar una mejor información intermolecular antes mencionada [32].

2.9. Modelado de la permitividad efectiva del agua en un material

Las técnicas de Tera Hertz normalmente aprovechan el hecho de que los sistemas THz más comunes [5, 13, 20] permiten medir tanto la fase como la amplitud de la radiación THz. La fase y amplitud de un campo eléctrico THz que se propaga como una onda plana en la dirección + z como función del tiempo t se puede expresar como:

$$E = E_0 \exp(iknz - i2\pi vt) \quad (2.11)$$

Donde la amplitud inicial de la onda es E_0 el número de onda de vacío es $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, n es el índice complejo de refracción, λ es la longitud de onda electromagnética, y v es la frecuencia de la onda THz en el vacío, respectivamente. El índice de refracción complejo puede expresarse alternativamente n en términos del complejo dieléctrico ϵ tal que $n = \sqrt{\epsilon}$. En términos de la ecuación. Donde en términos es la parte real e imaginaria del índice de refracción complejo $n = n_r + in_i$ por lo tanto $E = E_0 \exp(-kn_i z) \exp(ikn_r z - iwt)$ La primera exponencial corresponde a la amortiguación de la magnitud de la onda a través del índice de refracción imaginario, mientras que la segunda exponencial describe la fase cambiante de la onda a través del índice real de refracción. Alternativamente, uno puede definir el coeficiente de atenuación (en el campo eléctrico) como $\alpha = kn_i$ por lo tanto.

$$E = E_0 \exp(-kn_i z) \exp(ikn_r z - iwt) = E_0(\alpha z) \exp(ikn_r z - iwt) \quad (2.12)$$

La permitividad dieléctrica compleja está relacionada con el índice de refracción real y el coeficiente de absorción α mediante $\varepsilon = n^2 = (n_r + in_i)^2$ y $n_i = \frac{\alpha\lambda}{2\pi}$ como :

$$\varepsilon = \varepsilon_r \pm i\varepsilon_i = \left[n_r^2 - \left(\frac{\alpha\lambda}{2\pi} \right)^2 \right] + i \left[n_r \frac{\alpha\lambda}{\pi} \right] \quad (2.13)$$

2.9.1. Extracción del nivel de humedad

La extracción de un nivel de humedad de los datos experimentales se realiza normalmente asumiendo un modelo de transmisión o reflexión particular. Un modelo común es asumir que la transmisión se mide a través de una losa de material mediano efectivo de grosor L que está rodeado por aire con una permitividad de unidad asumida. En términos del índice de refracción complejo efectivo, la transmisión de THz en incidencia normal puede escribirse como

$$T(v) \equiv \frac{E_t}{E_i} \equiv \frac{(4\tilde{n}/(\tilde{n} + 1)^2)e^{i\tilde{n}2\pi vL/c}}{1 - ((\tilde{n} - 1)(\tilde{n} + 1))^2 e^{i\tilde{n}2\pi vL/c}} \quad (2.14)$$

donde c es la velocidad de la luz v es la frecuencia THz y $\tilde{n} = \sqrt{\varepsilon_{eff}}$ es el índice complejo de refracción efectivo derivado de los modelos de medio efectivo.

2.10. Respuesta Tera Hertz al agua

Se han publicado numerosos artículos sobre la permitividad THz dependiente de la frecuencia del agua líquida una buena visión general del tema, es el modelo doble de Debye [27, 18]. En el rango de THz, la permitividad compleja del agua líquida se describe típicamente como una suma de filtros de paso bajo que representan una suma de tiempos de relajación. Para el rango THz, la suma se limita típicamente a dos términos y es llamado modelo doble de Debye. En este modelo, la permitividad compleja dependiente de la frecuencia se modela como:

$$\varepsilon_w(w) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_1}{1 \pm i2\pi vt_1} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty}{1 \pm i2\pi vt_2} \quad (2.15)$$

Aquí ε_∞ es el límite de alta frecuencia de la permitividad, ε_0 y ε_i son constantes, mientras que las constantes de tiempo se refieren a procesos de relajación lentos (t_1) y rápidos (t_2) dependientes de la temperatura. Por debajo de 100 GHz, un solo término de Debye es suficiente para describir el agua [16]. Los signos \pm en Eq. (2.13) y Eq. (2.14) se incluyen para resaltar el hecho de que las definiciones de las ecuaciones para el coeficiente dieléctrico complejo y el índice de refracción complejo variarán en la literatura científica.

Como resultado de las diferentes definiciones, la contribución imaginaria resultante a la permitividad puede ser positiva o negativa dependiendo de las definiciones de las ecuaciones. (2.13) y (2.14). La permitividad del agua se modela usando Eq. (2.14) asumiendo los parámetros de Debye para Agua líquida "libre". Sin embargo, se ha reconocido que las moléculas de agua polares pueden interactuar y unirse débilmente a grupos funcionales polares en la superficie del material huésped. La unión débil del agua "ligada" a la superficie del huésped modifica las vibraciones de las moléculas de agua, lo que conduce a un índice de refracción y un coeficiente de absorción más bajos.

En la figura 2.7 se determinaron las propiedades de permitividad real e imaginaria en membranas que tienen contenido de agua y la variación en la permitividad del agua en función de la frecuencia de la onda electromagnética

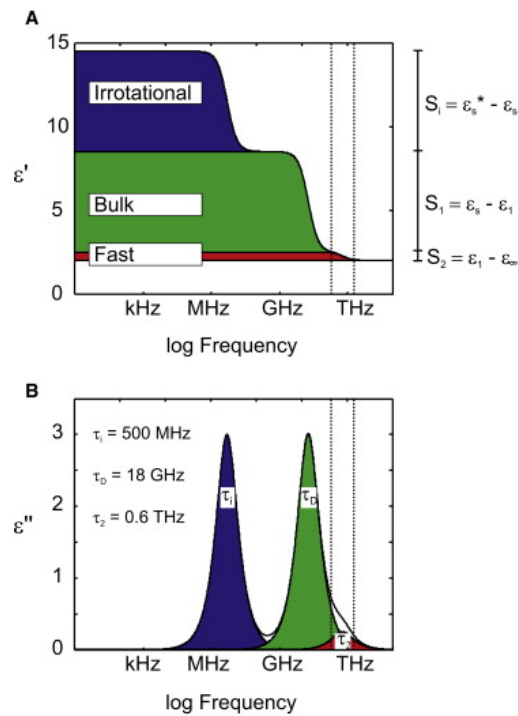


Figura 2.7: Propiedades dieléctrica real ϵ' e imaginaria ϵ'' en membranas biológicas [29]

Las moléculas poliatómicas tienen modos de rotación vibracional más complicados que las moléculas diatómicas. Por ejemplo, una molécula de agua (H_2O) tiene tres grados de libertad de vibración y rotación, como se muestra en la figura 2.8. La molécula de agua es asimétrica en la parte superior, la forma menos simétrica de un rotor rígido, que tiene tres momentos de inercia de principio diferente. Los tres modos normales de vibración implican el estiramiento y la flexión de los enlaces OH. Para una molécula grande, los modos de flexión generalmente tienen energías más bajas que los modos de estiramiento, que a menudo caen en la región THz.

Existen desafíos para incluir tanto las contribuciones de agua ligadas como las libres en un modelo de medio efectivo es difícil separar experimentalmente las contribuciones de agua ligada y libre a la permitividad. En ciertos casos, como la absorción de agua por poliamida, compuesto de madera y plástico, la medición se simplifica por el hecho de que solo existe agua unida en estos materiales suponiendo

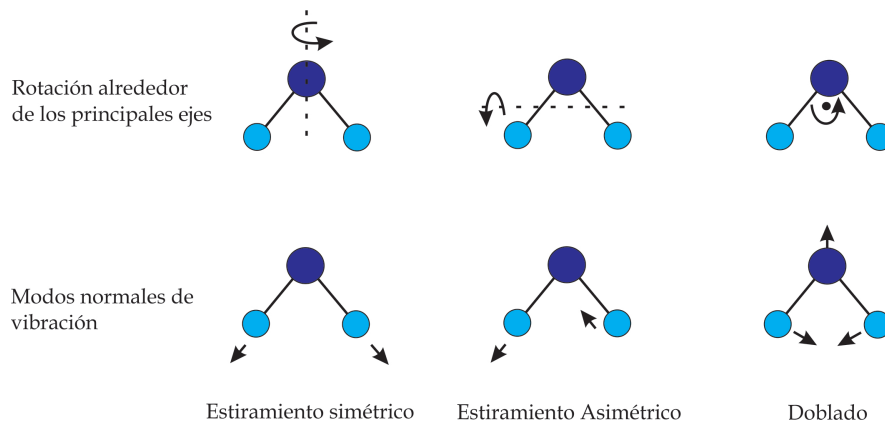


Figura 2.8: *Vibración y rotación de las moléculas de agua*

que uno está muy por debajo del punto de saturación de la fibra [15].

2.11. Modelos efectivos del medio

Al calcular la absorción de THz por un material huésped hidratado, es necesario considerar la permitividad efectiva medida de la combinación agua/huésped. Si la permitividad del agua "pura" ε_w y del material huésped ε_h (es decir, material seco) se conocen individualmente, se puede usar un modelo de medio efectivo, junto con sus respectivas fracciones de volumen, para combinar las actividades permitidas del agua y el "huésped" material en una permitividad efectiva que representa la respuesta del material húmedo. Independientemente del modelo de medio efectivo particular que se use para describir un material, el objetivo del análisis es utilizar las constantes ópticas de THz medidas del modelo de medio efectivo para determinar la fracción de volumen de agua. Con el fin de describir las propiedades dieléctricas efectivas de mezclas en el rango de Tera Hertz, se han propuesto varios métodos [16, 15, 28].

2.11.1. Modelo lineal para el coeficiente efectivo de absorción

El modelo [1] utiliza una mezcla simple que incorpora la presencia de agua a través de un modelo lineal para el coeficiente efectivo de absorción y la fracción de volumen de agua:

$$\alpha_{eff}(v) = X_h\alpha_h(v) + X_w\alpha_w(v) \quad (2.16)$$

aquí α_{eff} representa el medio efectivo, el subíndice h representa el medio huésped y el subíndice w representa el agua. Para un sistema de dos componentes $X_h + X_w = 1$.

Algunos de los modelos de medio efectivo más utilizados son los modelos Maxwell-Garnet (MG), Bruggeman (BG) y Landau-Lifshitz-Looyenga (LLL). Todos estos modelos intentan dar cuenta de los efectos locales del campo eléctrico que ocurren cuando la presencia de las partículas que perturba el campo eléctrico de una onda electromagnética cuando interactúa con una partícula individual aislada. Las interacciones de orden superior entre las partículas se desprecian. Se supone que el campo electromagnético promedia en escalas espaciales que son grandes en comparación con el tamaño de partícula.

2.11.2. Maxwell-Garnett

La teoría de Maxwell-Garnett [9] calcula las propiedades dieléctricas efectivas de un material formado por la presencia de partículas pequeñas (esféricas) incrustadas en un material huésped:

$$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_h}{\varepsilon_{eff} + 2\varepsilon_h} = X_p \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_h}{\varepsilon_p + 2\varepsilon_h} \quad (2.17)$$

Donde los subíndices h y p representan el “huésped” y “partícula”, y X_p es la fracción de volumen de las “partículas”. Además, en el modelo MG se supone que la fracción de volumen de las “partículas” es pequeña, de modo que el tamaño de las partículas es mucho menor que el espaciado entre las partículas. El modelo MG es asimétrico con respecto al intercambio de roles de “huésped” y “partícula”.

2.11.3. Bruggeman (BG)

El modelo BG [7] es una extensión del modelo MG que permite calcular la permitividad efectiva de los N componentes en una mezcla. En términos de la fracción de volumen y permitividad de N componentes individuales, la permitividad efectiva en este modelo para partículas esféricas embebidas en un material la cual se describe de la siguiente manera.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_j}{\varepsilon_j + 2\varepsilon_{eff}} = 0 \quad (2.18)$$

Donde las fracciones de volumen están limitadas por las partículas pueden escribirse como $\sum_{j=1}^N X_j = 1$ o un medio de dos componentes en el que $X_h + X_p = 1$ la ecuación 2.17 puede ser reescrita como:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{4} \left(\beta + \sqrt{\beta^2 + 8\varepsilon_h\varepsilon_p} \right) \quad (2.19)$$

donde:

$$\beta = (3X_h - 1)\varepsilon_h + (3X_p - 1)\varepsilon_p \quad (2.20)$$

Se debe tener en cuenta que el modelo BG es simétrico con respecto al intercambio de los roles de los componentes “huésped” y “partícula”. Al comparar el modelo BG frente al modelo MG, se espera que el modelo BG sea más preciso a medida que aumenta la fracción de volumen de las partículas, ya que reacciona tanto el huésped como las partículas de forma simétrica.

2.11.4. Modelo Landau-Lifshitz-Looyenga (LLL)

Para el modelo LLL [19], la permitividad dieléctrica efectiva se modela como

$$\sqrt[3]{\varepsilon_{eff}} = X_h \sqrt[3]{\varepsilon_h} + X_p \sqrt[3]{\varepsilon_p} \quad (2.21)$$

Una desventaja del modelo LLL es que se deriva en el límite de mezclas de bajo contraste dieléctrico y técnicamente solo se puede aplicar en este límite. Sin embargo, la ventaja del modelo LLL en comparación con los modelos MG y BG es que no se supone que las partículas incrustadas tengan una forma particular. El

modelo LLL es simétrico con respecto al intercambio de la función del “anfitrión” y los materiales con agua.

2.12. Extracción del nivel de humedad de los datos de transmisión o reflexión

La extracción de un nivel de humedad de los datos experimentales se realiza típicamente suponiendo un modelo de transmisión o reflexión particular. Un modelo común es suponer que la transmisión se mide a través de una lámina de material de medio efectivo de espesor L que está rodeado por aire con una permitividad permitida de la unidad. En términos del índice de refracción complejo efectivo, la transmisión de THz en incidencia normal se puede escribir como.

$$T(v) = \frac{E_t}{E_o} = \frac{(4n/(n+1)^2)e^{i2\pi vL/c}}{1 - ((n-1)/(n+1))^2 e^{i2\pi vL/c}} \quad (2.22)$$

Donde c es la velocidad de la luz, v es la frecuencia, y $n = \sqrt{\varepsilon_{eff}}$ es el índice complejo de refracción eficaz derivado de los modelos de medio efectivos en la Sección 2.3. En aplicaciones para las cuales la muestra es ópticamente gruesa, como los estudios de hidratación de tejidos biológicos que hacen que las mediciones de transmisión sean poco prácticas, alternativamente se puede utilizar un enfoque reflexivo. La reflectividad de THz en incidencia normal a partir de un material ópticamente grueso de índice de refracción n puede expresarse a partir de una ecuación simple de reflexión de Fresnel [27].

$$r(v) = \frac{E_r(v)}{E_0(v)} = \frac{1 - n}{1 + n} \quad (2.23)$$

El nivel de humedad entra en las ecuaciones de transmisión y reflexión de THz a través de la contribución del agua a la permitividad efectiva. A partir de la permitividad conocida de agua y material seco, las ecuaciones se usan para ajustar la transmisión o reflexión medida experimentalmente a uno de los modelos de medio efectivo en el que el contenido de agua en volumen es uno de los parámetros de ajuste.

La longitud de onda está en dependencia del coeficiente evaluado desde el factor de rugosidad de Rayleigh [3].

$$\alpha_{scatt}(\lambda) = \frac{1}{d} \left[(\sqrt{\varepsilon_L(\lambda)} - 1) \left(\frac{4\pi\Gamma \cos \theta}{\lambda} \right) \right]^2 \quad (2.24)$$

Donde D es el espesor de la muestra, Γ es la desviación estándar del perfil de altura (medido de la rugosidad de la superficie), Θ es el ángulo de incidencia, λ es la longitud de onda THz en el espacio libre y ε_L es la permitividad dependiente de la longitud de onda del material.

2.13. Ecuaciones de Fresnel

Las ecuaciones de fresnel se encargan de determinar la relación que existe entre la amplitud de una onda incidente y las amplitudes de las ondas reflejadas; estas relaciones matemáticas muestran de qué manera es afectada la onda original con respecto a sus componentes de campo eléctrico y magnético.

Estas ecuaciones muestran de que manera se descompone una onda electromagnética que viaja por un medio con un determinado índice de refracción n_i , al incidir sobre una superficie con un índice de refracción distinto n_t resultando una parte una parte de esta onda reflejada y otra porción transmitida por dicho material.

El comportamiento de las ondas resultantes de la incidencia del haz dependen de gran parte del ángulo de incidencia y el medio. Debido a que los componentes eléctricos y magnéticos de la onda incidente se mueve de manera perpendicular a la dirección de la propagación da lugar a que una de estas componentes se encuentre en el mismo plano de incidencia.

Se puede observar en la figura 2.9 que al momento de que una onda incidente llega a un limite entre dos constantes dieléctricas diferentes, parte de esa onda se ver afectada reflejándose y transmitiéndose en diferentes proporciones determinando así que la suma de la energía de estas dos ondas da como resultado la energía de la onda incidente.

Las ondas electromagnéticas son de carácter transversal y de acuerdo con las ecuaciones de fresnel los coeficientes varían dependiendo de las direcciones per-

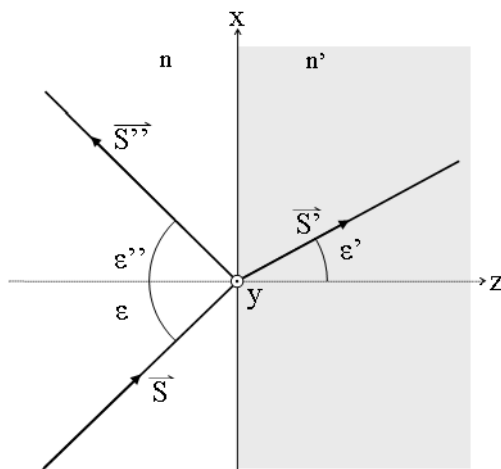


Figura 2.9: Onda incidente que se transmite y se refleja

pendiculares y paralelas del medio dieléctrico. Para identificar los coeficientes de reflexión y transmisión del campo eléctrico transversal (TE) se denota r_{\perp} y t_{\perp} , respectivamente, mientras que los coeficientes de reflexión y transmisión del campo magnético transversal (MC) se denotan r_{\parallel} y t_{\parallel} .

En estas formulas se indica la dirección del haz reflejado con signo negativo indicando la amplitud de este haz con una dirección contraria al haz incidente

$$r_{\perp} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (2.25)$$

$$t_{\perp} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (2.26)$$

$$r_{\parallel} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} \quad (2.27)$$

$$t_{\parallel} = \frac{2n_i \cos \theta_i t}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} \quad (2.28)$$

2.14. Conclusiones

En este capítulo se ha estudiado las características de la radiación Tera Hertz, así como las forma de emitir y detectar esta longitud de onda, también se describieron los modelos matemáticos que nos permiten describir el comportamiento de la brecha THz. La radiación Tera Hertz debido a la alta absorbencia por parte del agua, la convierte en un medio de contraste ideal esto se ha reflejado en estudios del contenido de agua en materiales orgánicos in-vivo [4, 10, 2].

La espectroscopía Tera-Hertz por no tener contacto con la muestra, por ser no iónica y que sus procesos térmicos son mínimos la proyecta como una tecnología de control de calidad ideal para determinar el contenido de humedad de alimentos. Una vez considerando sus propiedades, emisión y detección, así como los estudios que se han realizado con otros materiales dieléctricos orgánicos, se plantea cómo una futura aplicación de metrología in-situ para secadores solares la cual no afecte la eficiencia del secador ya que actualmente para determinar el contenido de agua en las muestras se requiere de abrir y cerrar la cámara de secado de manera intermitente hasta lograr el contenido de agua deseado.

Referencias

- [1] BALAKRISHNAN, J., FISCHER, B. M., AND ABBOTT, D. Sensing the hygroscopicity of polymer and copolymer materials using terahertz time-domain spectroscopy. *Applied optics* 48, 12 (2009), 2262–2266.
- [2] BANERJEE, D., VON SPIEGEL, W., THOMSON, M., SCHABEL, S., AND ROSKOS, H. Diagnosing water content in paper by terahertz radiation. *Optics Express* 16, 12 (2008), 9060–9066.
- [3] BECKMANN, P., AND SPIZZICHINO, A. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. *Norwood, MA, Artech House, Inc., 1987, 511 p.* (1987).
- [4] CASTRO-CAMUS, E., PALOMAR, M., AND COVARRUBIAS, A. Leaf water dynamics of arabidopsis thaliana monitored in-vivo using terahertz time-domain spectroscopy. *Scientific reports* 3 (2013), 2910.
- [5] CHAN, W. L., DEIBEL, J., AND MITTLEMAN, D. M. Imaging with terahertz radiation. *Reports on progress in physics* 70, 8 (2007), 1325.
- [6] CHANDRA, I., GULATI, R., AND SHARMA, H. Advances in gunn diode technology. *Iete Technical Review* 14, 6 (1997), 443–449.
- [7] CHOY, T. C. *Effective medium theory: principles and applications*, vol. 165. Oxford University Press, 2015.
- [8] FEDERICI, J. F. Review of moisture and liquid detection and mapping using terahertz imaging. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 33, 2 (2012), 97–126.
- [9] GARNET, M. Colours in metal glasses, in metallic films, and in metallic solutions. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A* 205 (1906), 237.
- [10] GENTE, R., BORN, N., VOSS, N., SANNEMANN, W., LÉON, J., KOCH, M., AND CASTRO-CAMUS, E. Determination of leaf water content from terahertz time-domain spectroscopic data. *Journal of infrared, millimeter, and terahertz waves* 34, 3-4 (2013), 316–323.

- [11] GOWEN, A., O. SULLIVAN, C., AND O. DONNELL, C. Terahertz time domain spectroscopy and imaging: Emerging techniques for food process monitoring and quality control. *Trends in Food Science & Technology* 25, 1 (2012), 40–46.
- [12] HERNANDEZ-CARDOSO, G., ROJAS-LANDEROS, S., ALFARO-GOMEZ, M., HERNANDEZ-SERRANO, A., SALAS-GUTIERREZ, I., LEMUS-BEDOLLA, E., CASTILLO-GUZMAN, A., LOPEZ-LEMUS, H., AND CASTRO-CAMUS, E. Terahertz imaging for early screening of diabetic foot syndrome: A proof of concept. *Scientific reports* 7 (2017), 42124.
- [13] JANSEN, C., WIETZKE, S., PETERS, O., SCHELLER, M., VIEWEG, N., SALHI, M., KRUMBHOLZ, N., JÖRDENS, C., HOCHREIN, T., AND KOCH, M. Terahertz imaging: applications and perspectives. *Applied optics* 49, 19 (2010), E48–E57.
- [14] JEPSEN, P. U., MØLLER, U., AND MERBOLD, H. Investigation of aqueous alcohol and sugar solutions with reflection terahertz time-domain spectroscopy. *Optics Express* 15, 22 (2007), 14717–14737.
- [15] JORDENS, C., WIETZKE, S., SCHELLER, M., AND KOCH, M. Investigation of the water absorption in polyamide and wood plastic composite by terahertz time-domain spectroscopy. *Polymer Testing* 29, 2 (2010), 209–215.
- [16] KAAATZE, U., AND HÜBNER, C. Electromagnetic techniques for moisture content determination of materials. *Measurement Science and Technology* 21, 8 (2010), 082001.
- [17] LEE, Y.-S. *Principles of terahertz science and technology*, vol. 170. Springer Science & Business Media, 2009.
- [18] LIEBE, H. J., HUFFORD, G. A., AND MANABE, T. A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 thz. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves* 12, 7 (1991), 659–675.
- [19] LOOYENGA, H. Dielectric constants of heterogeneous mixtures. *Physica* 31, 3 (1965), 401–406.

- [20] MITTLEMAN, D. M., JACOBSEN, R. H., AND NUSS, M. C. T-ray imaging. *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics* 2, 3 (1996), 679–692.
- [21] NAGEL, M., HARING BOLIVAR, P., BRUCHERSEIFER, M., KURZ, H., BOSSEHOFF, A., AND BÜTTNER, R. Integrated thz technology for label-free genetic diagnostics. *Applied Physics Letters* 80, 1 (2002), 154–156.
- [22] PARASOGLU, P., PARROTT, E., ZEITLER, J., RASBURN, J., POWELL, H., GLADDEN, L., AND JOHNS, M. Quantitative moisture content detection in food wafers. In *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009. IRMMW-THz 2009. 34th International Conference on* (2009), IEEE, pp. 1–2.
- [23] PARASOGLU, P., PARROTT, E., ZEITLER, J., RASBURN, J., POWELL, H., GLADDEN, L., AND JOHNS, M. Quantitative water content measurements in food wafers using terahertz radiation. *Terahertz Sci Technol* 3, 4 (2010), 176–82.
- [24] RADHANPURA, K., HARGREAVES, S., LEWIS, R. A., AND HENINI, M. The role of optical rectification in the generation of terahertz radiation from gabias. *Applied Physics Letters* 94, 25 (2009), 251115.
- [25] RENK, K., ROGL, A., AND STAHL, B. Semiconductor-superlattice parametric oscillator for generation of sub-terahertz and terahertz waves. *Journal of luminescence* 125, 1-2 (2007), 252–258.
- [26] TANI, M., WATANABE, M., AND SAKAI, K. Photoconductive twin dipole antennas for thz transceiver. *Electronics letters* 38, 1 (2002), 1.
- [27] TAYLOR, Z. D., SINGH, R. S., BENNETT, D. B., TEWARI, P., KEALEY, C. P., BAJWA, N., CULJAT, M. O., STOJADINOVIC, A., LEE, H., HUBSCHMAN, J.-P., ET AL. Thz medical imaging: in vivo hydration sensing. *IEEE transactions on terahertz science and technology* 1, 1 (2011), 201–219.
- [28] TETI, A. J., RODRIGUEZ, D. E., FEDERICI, J. F., AND BRISSON, C. Non-destructive measurement of water diffusion in natural cork enclosures using terahertz spectroscopy and imaging. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 32, 4 (2011), 513–527.

- [29] TIELROOIJ, K., PAPARO, D., PIATKOWSKI, L., BAKKER, H., AND BONN, M. Dielectric relaxation dynamics of water in model membranes probed by terahertz spectroscopy. *Biophysical journal* 97, 9 (2009), 2484–2492.
- [30] TONOUCI, M. Cutting-edge terahertz technology. *Nature photonics* 1, 2 (2007), 97.
- [31] WOODWARD, R. M., COLE, B. E., WALLACE, V. P., PYE, R. J., ARNONE, D. D., LINFIELD, E. H., AND PEPPER, M. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue. *Physics in Medicine & Biology* 47, 21 (2002), 3853.
- [32] YAN, Z., YING, Y., ZHANG, H., AND YU, H. Research progress of terahertz wave technology in food inspection. In *Terahertz Physics, Devices, and Systems* (2006), vol. 6373, International Society for Optics and Photonics, p. 63730R.
- [33] ZHANG, X.-C., AND XU, J. *Introduction to THz wave photonics*, vol. 29. Springer, 2010.
- [34] ZHAO, L., HAO, Y.-H., AND PENG, R.-Y. Advances in the biological effects of terahertz wave radiation. *Military Medical Research* 1, 1 (2014), 26.

Capítulo 3

Metodología experimental y teórica para la espectroscopía Tera-Hertz en rebanadas de Mango Ataulfo

3.1. Introducción

La tecnología de los secadores solares se ha desarrollado ampliamente ya que es uno de los métodos de conservación de alimentos de bajo costo y amigables para el medio ambiente, estos dispositivos han sido estudiados y clasificados por diversos autores [1, 4, 10].

Sin importar su clasificación todos cuentan con un cámara de secado y su funcionamiento está en dependencia de las condiciones climáticas de la zona donde esté operando. Por lo tanto, los procesos de secado siempre son variables y no obedecen a la cinética de secado realizadas en laboratorio.

Debido a lo expuesto se considera el estudio teórico de emisiones Tera Hertz en mango Ataulfo ya que es un producto importante en el estado de Chiapas que además cuenta con denominación de origen.

En este capítulo se describe de forma detallada el proceso realizado para obtener las muestras de mango Ataulfo, así como la configuración de espectroscopía THz y como esta radiación THz interactúa con la muestra de mango, además se describirán las ecuaciones requeridas para determinar el contenido de agua en una muestra de forma teórica.

3.2. Preparación de muestras de Mango Ataulfo

Los frutos frescos de mango Ataulfo utilizados en este trabajo se obtuvieron de un productor certificado (con denominación de origen) de Tonalá Chiapas durante los meses de junio-febrero de 2018. El color, la estabilidad, el tamaño y la ausencia de manchas fue considerado al momento de elegir los mango para las muestras elegidas [12].

Los mangos se lavaron con agua y jabón, se ubicaron en el laboratorio con temperaturas de $26^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$ durante 24 h para que la muestra se encuentra en equilibrio térmico. Las rebanadas de mango se obtuvieron utilizando un pelador con un grosor de 1 mm . Las muestras se cortaron de forma longitudinales en el sentido de las fibras de las muestra en la figura 3.1.

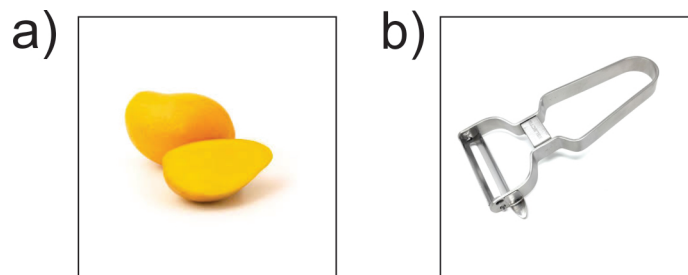


Figura 3.1: a) Mango Ataulfo y b) Pelador.

3.3. Determinación de contenido de agua inicial

El contenido de humedad inicial presentado en las muestras frescas se determinó usando un analizador de humedad infrarrojo (Modelo VELAB VE-50-5) [8] como se observa en la figura 3.2.



Figura 3.2: Termobalanza

Este dispositivo nos permite determinar el contenido de humedad de un producto el proceso que realiza es de secado lo cual nos proporciona el porcentaje final de humedad removida, para lograr este cometido el dispositivo mantiene una temperatura constante controlada y el peso de la muestra es censado en todo momento por un sensor.

3.4. Deshidratado de mango

Para realizar el deshidratado de mango se utilizó un horno de laboratorio marca Binder Modelo ED-56 figura 3.3, en el cual se estableció una temperatura inicial de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante 4 horas se realizó el proceso de deshidratado de las muestras con la finalidad de remover la mayor cantidad de agua y obtener como máximo un 15% de humedad el cual es el requerido como control de calidad de la muestra sin afectar sus propiedades organolépticas de acuerdo con los criterios BFAD, 2007 [11].

Las muestras se colocaron sobre papel encerado para evitar que se pegaran sobre la base de metal al finalizar su proceso de deshidratado 3.4. Posterior al



Figura 3.3: Horno para deshidratar muestras de mango

secado se aplicación rampas de temperatura como se observan en la Tabla 3.1 para dejar las muestras con un contenido de humedad de el $10 \% \pm 1 \%$.



Figura 3.4: Muestras de Mango Ataulfo en Proceso secado

Esto para remover la mayor cantidad de agua *libre* posible de la muestra. Posteriormente las muestras se guardaron en bolsas herméticas para evitar la re absorción de agua de las muestras por parte de a humedad ambiental.

Se utilizó un perfilómetro figura 3.5 para determinar el espesor de las muestras de mango y poder relacionar su espesor en función de la ecuación (2.23)

Tabla 3.1: Rampa de temperatura.

Grupo	°C/s
A	0.0666
B	0.0833
C	0.1



Figura 3.5: Perfilómetro

3.5. Espectroscopía Tera-Hertz por transmisión

La configuración que se utilizó para determinar la espectroscopía se muestra en la figura 3.6 el dispositivo utilizado fue un Picometrix modelo T-ray 4000 TD-THz, se hace interactuar el pulso de radiación Tera-Hertz sobre una muestra de mango.

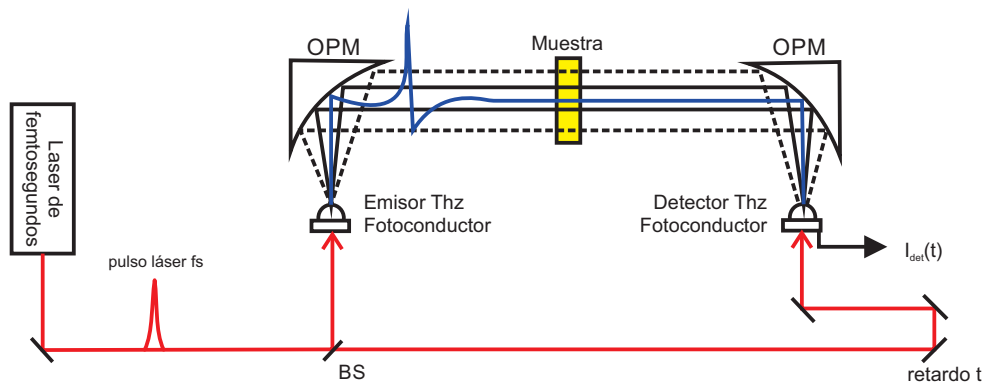


Figura 3.6: Esquema de experimento Tera-Hertz con muestra de mango

Esta configuración es utilizada para determinar el contenido de agua de hojas

in-vivo [3, 5, 6]. Las mediciones se llevaron a cabo utilizando un sistema THz-TDS basado en un láser de fibra que proporciona ≈ 65 fs de pulsos con una longitud de onda central de 1550 nm a una velocidad de repetición de ≈ 80 MHz. Una fracción de los pulsos se envió a través de una polarización que mantenía el extensor de fibra accionado por piezoeléctrico produciendo un retraso de ≈ 15 ps a 10 Hz. Estos pulsos se usaron para excitar un emisor fotoconductor de línea de cinta LT-InGaAs. La fracción restante de los pulsos se usó para atravesar un detector fotoconductor dipolo LT-InGaAs. Después de la emisión, la radiación THz fue recolectada y reenfocada por un par de lentes de polietileno produciendo un foco de ≈ 3 mm (FWHM). Se usaron dos lentes adicionales para colimar y reenfocar la radiación transmitida a través de la muestra en el detector fotoconductor.

3.6. Modelo de permitividad efectiva del agua en un material

El contenido de agua de la mezcla está asociado a diferentes condiciones ambientales y fisiológicas demostrando que la aproximación de medio efectivo es un modelo apropiado para obtener la función dieléctrica Tera Hertz del tejido hidratado [7].

Se utilizó el modelo extendido de Landau-Lifshitz-Looyenga [9] que relaciona la función dieléctrica de una mezcla heterogénea con las funciones dieléctricas de sus componentes. Dentro de este modelo, la función dieléctrica de la rebanada de mango está dada por:

$$\sqrt[3]{\varepsilon_{eff}} = X_h \sqrt[3]{\varepsilon_h} + X_w \sqrt[3]{\varepsilon_w} \quad (3.1)$$

Donde las fracciones volumetricas seran determinadas por el siguiente metodo.

$$X_h + X_w = 1 \rightarrow X_h = 1 - X_w$$

Sustituyendo en la ecuacion 3.1

$$\varepsilon_{eff}^{1/3} = (1 - X_w)\varepsilon_h^{1/3} + X_w\varepsilon_w^{1/3}$$

$$\varepsilon_{eff}^{1/3} = \varepsilon_h^{1/3} - X_w \varepsilon_h^{1/3} + X_w \varepsilon_w^{1/3}$$

$$\varepsilon_{eff}^{1/3} = \varepsilon_h^{1/3} - X_w (\varepsilon_h^{1/3} - \varepsilon_w^{1/3})$$

$$X_w = \frac{\varepsilon_h^{1/3} - \varepsilon_{eff}^{1/3}}{(\varepsilon_h^{1/3} - \varepsilon_w^{1/3})}$$

donde

$$\sqrt{\varepsilon\mu} = n + i\kappa$$

en la ecuación anterior $\mu = 1$ no existen propiedades magnéticas.

Para todo caso en este trabajo de investigación

$$\varepsilon^{1/2} = \tilde{n}$$

$$\varepsilon = \tilde{n}^2$$

Para obtener el coeficiente de transmisión correcto para la hoja, es fundamental tener en cuenta la dispersión producida por la superficie rugosa de la hoja [7]. El coeficiente de transmisión complejo está dado por

$$T(f) = \frac{E_{sam}(f)}{E_{ref}(f)} \quad (3.2)$$

Donde $E_{sam}(w)$ y $E_{ref}(w)$ son los campos eléctricos transformados de Fourier medidos por THz-TDS. La dispersión superficial puede incluirse en el modelo utilizando un factor de rugosidad Rayleigh [2], lo que significa que debe considerarse una pérdida equivalente a un coeficiente de absorción incrementado $\alpha = \alpha_{abs} + \alpha_{scat}$ donde

el coeficiente de atenuación se obtiene de la siguiente manera

$$n_i = \frac{\alpha\lambda}{2\pi}$$

Por otra parte el índice de refracción real se obtiene del retardo de la onda en la muestra.

$$n_r = \frac{c}{v}$$

donde

$$c = \frac{d}{t} \quad \text{y} \quad v = \frac{d}{t + \Delta t}$$

por lo tanto

$$n_r = 1 + \frac{\Delta t}{t}$$

$$n_r = 1 + c \frac{\Delta t}{d}$$

La permitividad dieléctrica compleja esta relacionada con el índice de refracción real y el coeficiente de absorción α

$$\varepsilon = \varepsilon_r \pm i\varepsilon_i = \left[n_r^2 - \left(\frac{\alpha\lambda}{2\pi} \right)^2 \right] + i \left[n_r \frac{\alpha\lambda}{\pi} \right]$$

En dicho modelo, la rugosidad Γ es la desviación estándar del perfil de altura del mango, d es el grosor de la muestra y θ es el ángulo de incidencia.

$$\alpha_{scatt}(\lambda) = \frac{1}{d} \left[(\sqrt{\varepsilon_L(\lambda)} - 1) \left(\frac{4\pi\Gamma \cos\theta}{\lambda} \right) \right]^2 \quad (3.3)$$

$$\Delta\varepsilon(f) = \sqrt{\varepsilon_L(f)} - 1 \quad (3.4)$$

El algoritmo descrito en la sección anterior es válido para el mango de cualquier especie, siempre que se utilicen las funciones dieléctricas correctas, las fracciones volumétricas, la rugosidad y el grosor. Sin embargo, si se conoce la función dieléctrica de la muestra y sus componentes, no es trivial determinar las proporciones volumétricas relativas de dichos componentes.

3.7. Conclusión

De acuerdo a la revisión bibliográfica se pudieron determinar parámetros para calcular matemáticamente el porcentaje de humedad en una muestra de mango, así como realizar el deshidratado de mango de acuerdo a lo establecido por la bibliografía, así como realizar el proceso experimental conociendo los parámetros y requerimientos necesarios de las emisiones THz.

Referencias

- [1] BAL, L. M., SATYA, S., AND NAIK, S. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 8 (2010), 2298–2314.
- [2] BECKMANN, P., AND SPIZZICHINO, A. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. *Norwood, MA, Artech House, Inc., 1987, 511 p.* (1987).
- [3] CASTRO-CAMUS, E., PALOMAR, M., AND COVARRUBIAS, A. Leaf water dynamics of arabidopsis thaliana monitored in-vivo using terahertz time-domain spectroscopy. *Scientific reports* 3 (2013), 2910.
- [4] EKECHUKWU, O. V., AND NORTON, B. Review of solar-energy drying systems ii: an overview of solar drying technology. *Energy conversion and management* 40, 6 (1999), 615–655.
- [5] GENTE, R., BORN, N., VOSS, N., SANNEMANN, W., LÉON, J., KOCH, M., AND CASTRO-CAMUS, E. Determination of leaf water content from terahertz time-domain spectroscopic data. *Journal of infrared, millimeter, and terahertz waves* 34, 3-4 (2013), 316–323.
- [6] HERNANDEZ-CARDOSO, G., ROJAS-LANDEROS, S., ALFARO-GOMEZ, M., HERNANDEZ-SERRANO, A., SALAS-GUTIERREZ, I., LEMUS-BEDOLLA, E., CASTILLO-GUZMAN, A., LOPEZ-LEMUS, H., AND CASTRO-CAMUS, E. Terahertz imaging for early screening of diabetic foot syndrome: A proof of concept. *Scientific reports* 7 (2017), 42124.
- [7] JORDENS, C., WIETZKE, S., SCHELLER, M., AND KOCH, M. Investigation of the water absorption in polyamide and wood plastic composite by terahertz time-domain spectroscopy. *Polymer Testing* 29, 2 (2010), 209–215.
- [8] KAYA, A., AYDIN, O., AND DEMIRTAŞ, C. Concentration boundary conditions in the theoretical analysis of convective drying process. *Journal of food process engineering* 30, 5 (2007), 564–577.

- [9] LOOYENGA, H. Dielectric constants of heterogeneous mixtures. *Physica* 31, 3 (1965), 401–406.
- [10] SHARMA, A., CHEN, C., AND LAN, N. V. Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews* 13, 6-7 (2009), 1185–1210.
- [11] TECSON-MENDOZA, E. M. Development of functional foods in the philippines. *Food science and technology research* 13, 3 (2007), 179–186.
- [12] TRIBST, A. A. L., FRANCHI, M. A., DE MASSAGUER, P. R., AND CRISTIANINI, M. Quality of mango nectar processed by high-pressure homogenization with optimized heat treatment. *Journal of Food Science* 76, 2 (2011), M106–M110.

Capítulo 4

Tera-Hertz herramienta para determinar contenido de humedad en mango: resultados y conclusiones

4.1. Introducción

En este capítulo se analizan y se discuten los resultado teóricos y experimentales obtenidos en el estudio de determinación de humead en mango mediante espectroscopia THz. Las propiedades dieléctricas medidas en las muestras de mango, se utilizaron en las ecuaciones de la interacción de radiación-materia para modelar distintas condiciones teóricas.

4.2. Resultados

La humedad inicial de la muestra de mango fresco se determino por medio de la termobálanza la cual nos indico un valor de 88 % de humedad con un margen de error de $\pm 1\%$. La humedad de las rebanadas de mango deshidratado fue del 10 % en la figura 4.1 se muestra el contenido de agua libre y ligada en forma de esquema.

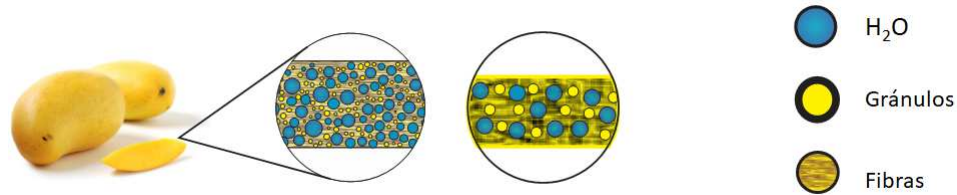


Figura 4.1: Esquema del corte longitudinal de una rebanada de mango

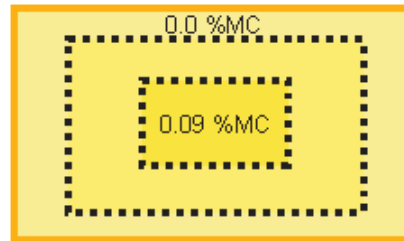


Figura 4.2: Distribución del contenido de humedad de una muestra de mango deshidratada 4 h. a 50° C corte transversal.

Para determinarlo, se requiere el porcentaje del contenido de agua de la muestra conocer el peso inicial de las muestras, y cual es su contenido de humedad final y mediante la siguiente ecuación determinamos su contenido de agua inicial.

$$W_i\% = ((W_i - W_{dry})) \cdot 100 \quad (4.1)$$

Donde W_i es el peso medido al principio y W_{dry} es el peso de la muestra en proceso seco. El contenido final de humedad de la muestra obtenida para este experimento es $\sim 9\%$ contenido de humedad, la distribución de humedad no es homogénea en la muestra como se muestra en la figura 4.2 la distribución de humedad tenía una forma específica.

En la figura 4.3 se observan los espesores de 3 rebanadas de mango, se pueden ver que existen dos pendientes, la primera con un ángulo de 80° aproximadamente que corresponde al borde de la misma y la segunda pendiente con una inclinación de 30° que se atribuye al perfil de corte de la misma, común en todos los procesos de corte estandarizados.

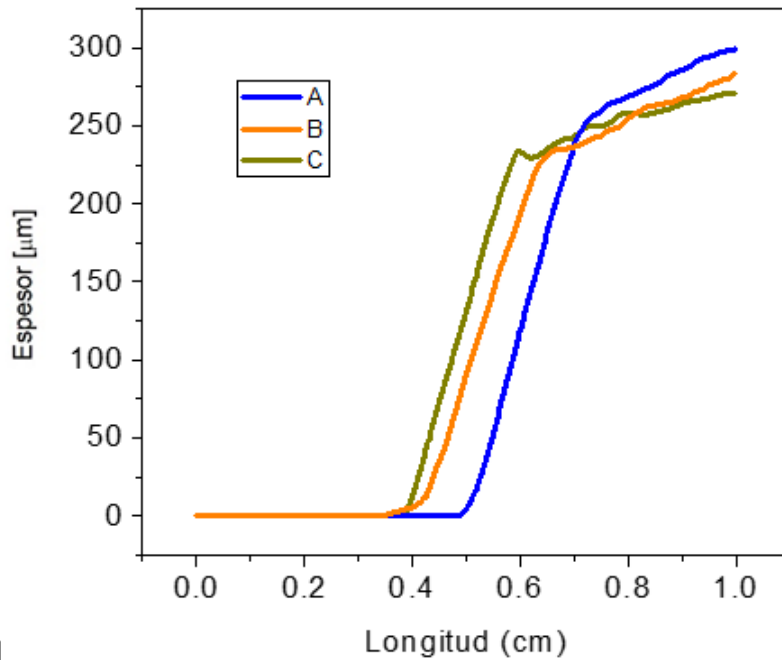


Figura 4.3: Espesor de muestras de mango cortadas en sentido a la fibra.

En la figura 4.4 se observan dos señales de campo eléctrico THz, una correspondiente a la señal tal cual es generada en el transmisor y la otra representa la interacción del campo eléctrico. Donde podemos observar dos fenómenos : a) cambio de fase (retardo) y b) la atenuación de la onda.

El campo eléctrico está representado por la línea color negro y roja en la figura 4.4, tienen como origen el transmisor con un instante de referencia al momento en que la onda abandona la fuente de emisión y el campo resultante de la emisión es medido por el receptor que se encuentra a 20 centímetros de la fuente. La línea negra se transmite libre sin ninguna obstrucción a lo largo de los 20 centímetros hasta que es medida por el receptor, debido a esto se considera una recepción del 100 % de lo emitido por la fuente.

Por otra parte, la línea roja recorre una distancia de 10 centímetros, donde entra en interacción con la muestra de mango previamente deshidratada. El campo eléctrico resultante continúa su trayectoria hasta el receptor. De acuerdo con la teoría un campo eléctrico al entrar en interacción con un medio experimenta

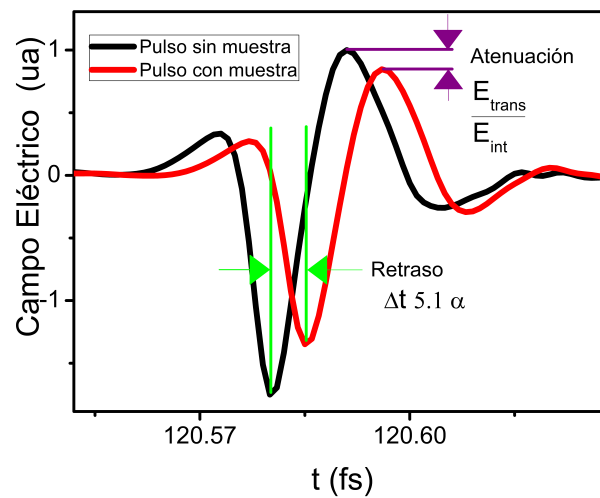


Figura 4.4: Campos eléctricos de los pulsos THz sin y con muestras (líneas negra y roja respectivamente). El campo está medido a 20 cm de la punta de pulso, en el instante de tiempo t después de la emisión de éste. La muestra induce dos efectos sobre el pulso: su retraso Δt y su atenuación

fenómenos de reflexión, transmisión y absorción. Como podemos observar en la figura 4.4 la línea roja tiene un retardo en su medición respecto a la línea negra, este fenómeno ocurre cuando la radiación interactúa con un medio dispersivo. Esto debido a que la radiación viaja a una menor velocidad en dicho medio. Como se puede ver en la figura 4.4 existe un retardo de 5.1 as. El retardo del campo es inducido por las propiedades dieléctricas y el grosor de la muestra de mango, entre mas espesor tenga la muestra mayor sera el retardo. El otro fenómeno que se observa de la línea roja en la figura 4.4 es la atenuación del campo eléctrico, el mecanismo por el cual la radiación se atenúa es la absorción de energía por parte de las acumulaciones de agua en la muestra, donde está aumenta su energía interna. Dicho aumento de energía es ocasionado a los cambios vibracionales de las moléculas de H_2O dado que la radiación THz tiene una alta selectividad por estas moléculas. Para determinar el porcentaje de la atenuación se toma el valor de la cresta mas alta como el 100 % de la emisión y se resta la cresta mas baja y posterior mente se divide entre la cresta mas alta de nuevo para obtener el porcentaje de atenuación

del campo eléctrico.

Esto representa alrededor de 15 % menos de radiación THz transmitida a través de la muestra. Con esta medición se pueden obtener la índice de reflexión imaginario el cual está relacionada con el coeficiente de absorción δt

Lo cual representa una señal específica de calibración para un $\sim 9\%$ de contenido de humedad en una rebanada de mango con un grosor de ~ 300 micras.

La parte imaginaria de la permitividad dieléctrica, ϵ'' es directamente proporcional a la energía disipada por el medio (muestra de mango), mientras que la parte real, ϵ' es proporcional a la energía transmitida al medio (muestra de mango).

Los resultados obtenidos de la teoría se muestran en la figura 4.5 con la amplitud normalizada respecto al porcentaje de agua contenido. Los datos utilizados para calcular la dispersión son experimentales y se utilizó la ecuación (3.3).

Las propiedades dieléctricas del material reales e imaginarias fueron proporcionadas por el laboratorio Tera-Hertz del centro de investigaciones en óptica (CIO), los cuales fueron utilizados en el modelo de Landau-Lifshitz-Looyenga ecuación (3.1) donde se relacionan las funciones dieléctricas de una mezcla heterogénea.

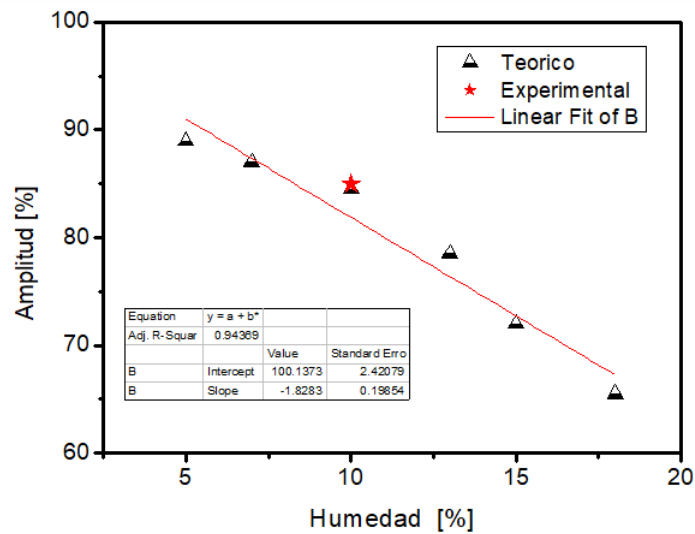


Figura 4.5: Datos teóricos de la atenuación del campo eléctrico THz y Dato experimental de la atenuación

Los datos experimentales obtenidos para realizar la simulación se muestran en la Tabla 4.1 donde encontramos parámetros requeridos para usar la ecuación 3.1 y 3.3 donde en la ecuación 3.1 se tomaron los datos experimentales para obtener el coeficiente de transmisión de la rebanada de mango es fundamental tener en cuenta la dispersión producida por la rugosidad de la superficie. Posteriormente usando la ecuación 3.3 y conociendo los parámetro se procedió a determinar un contenido supuesto de 0 % de agua asumiendo que la mayor cantidad a remover es de 9 % y la cantidad máxima 100 % asumiendo que la mayor cantidad de agua en la muestra es 90 %, posteriormente bajo una regla de tres se determina el porcentaje obtenido.

Tabla 4.1: Datos de Simulación en MEEP

Parámetros de Simulación	
Espesor	300 μm
Frecuencia	0.3 THz
Rugosidad	4.54 $\pm 1,95 \mu m$
Propiedades Dieléctricas	$\epsilon' = 6.53$ $\epsilon'' = \alpha - 0.8$

4.3. Simulación Computacional

Para conocer el comportamiento de la radiación Tera-Hertz a través de las muestras de mango se utilizó un soft-ware de simulación de licencia publica general (GPL) **MEEP** MIT Electromagnetic Equation Propagation que utiliza el método de diferencias finitas en dominio del tiempo.

Los resultados de la simulación computacional para conocer el comportamiento de las ondas Tera-Hertz se obtuvieron los parámetros de la Tabla 4.1 el resultado de la simulación se muestran en la figura 4.6 como se observa en a) se generan pulsos electromagnéticos con la frecuencia Tera-Hertz, posteriormente como se observa en b) la onda Tera-Hertz se colisiona con el material dieléctrico el cual tiene los parámetros de la muestra de mango como son espesor, permitividad y rugosidad del material finalmente observamos en c) la atenuación de la onda Tera-Hertz debido al material, por lo tanto demostramos que el estudio computacional de diversos materiales puede ser realizado teóricamente para encontrar los límites donde la tecnología Tera-Hertz puede ser útil como sensor de humedad no invasivo y no iónico para productos orgánicos incluso una vez después de haber sido empacados.

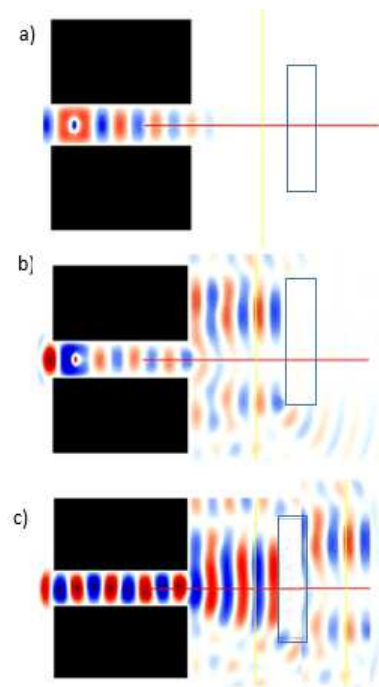


Figura 4.6: Simulación computacional, comportamiento de las ondas Tera-Hertz
a) inicio de la emisión THz b) Colisión de las ondas con el material dieléctrico c) Traspaso de la onda THz en la muestra.

4.4. Conclusiones

- Se realizó el experimento con emisiones Tera-Hertz en interacción con mango Ataulfo para obtener sus propiedades ópticas las cuales nos permitieron conocer su comportamiento teóricamente mediante modelos matemáticos.
- Se usó el modelo matemático Landau-Lifshitz-Looyenga (LLL) el cual se aproxima de manera muy optima a los datos experimentales.
- Observamos la atenuación de la onda tera hertz al atravesar la lamina de mango en la cual observamos una atenuación y un desfase de la onda esto nos indica que puede ser utilizada esta herramienta como un método innovador para determinar el contenido de humedad de alimentos mas complejos que una hoja.
- Se puede utilizar esta metodología con diversos alimentos para poder conocer la cantidad de humedad que contienen y así poder generar un control de calidad.

4.5. Trabajos Futuros

- Realizar experimentación con otros alimentos de valor agregado que se produzcan en el estado de Chiapas como son el café cereza o el cacao.
- Optimizar el código del modelo matemático para la obtención de parámetros óptimos del secado de mango.
- Proponer un control de calidad basado en la espectroscopía Tera-Hertz que genere una normatividad para deshidratar productos alimenticios en secadores.

Apéndice A

Anexo I: Productividad del Proyecto

- **International Material and Systems Congress for Renewable Energy Applications** -*Poster* - Schematic Model to Determinate the Moisture Content in Mango Slice by Terahertz Time-Domain During Solar Dry Process, Chiapas, México, 2017.
- **International Materials Research Congress** -*Poster*- Tera-Hertz Emission Simulation for Food Quality In-Situ Application on Solar Dryer, Cancun, Mexico, 2018.
- **15th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)** -*Conference*-First Principles for Evaluation of the Moisture Content in Mango Slice by Tera-Hertz Pulse, Ciudad de México, México, 2018.
- **15th (CCE)** -*Paper*-First Principles for Evaluation of the Moisture Content in Mango Slice by Tera-Hertz Pulse [DOI 10.1109/ICEEE.2018.8533906](https://doi.org/10.1109/ICEEE.2018.8533906)
Publisher-IEEE **impact factor 0.63**