



Universidad de Valladolid

Facultad de Ciencias

TRABAJO DE FIN DE GRADO

APLICACIÓN DE LA RADIACIÓN DE ALTA
FRECUENCIA Y BAJA POTENCIA PARA
EL CONTROL DE CALIDAD DE
ALIMENTOS

Autor:

LUIS ARIAS CLAUSS

Dirigido por:

ANA CRISTINA LÓPEZ CABECEIRA

FERNANDO GAYUBO ROJO

Abril 2023

[CENTRO]
[TECNOLÓGICO] **CARTIF**

RESUMEN

Este trabajo realiza un análisis empírico sobre la interacción de la **radiación electromagnética milimétrica** con la materia con la finalidad de encontrar características únicas que aporten información acerca del estado de la materia (*composición y estructura*), ya que la radiación milimétrica puede atravesar algunos materiales revelando cierta información con cada interacción que trataremos de explicar. La idea es trabajar con radiación electromagnética a muy alta frecuencia para que pueda interactuar con la materia, pero no a demasiada frecuencia para que interactúe con los electrones que componen los átomos y moléculas de la materia (*excitaciones atómicas*), ya que de esa manera, la energía de las ondas serían absorbidas por los electrones de los átomos. Nos interesa que sea capaz de atravesar la materia orgánica ya que nuestro sensor se encuentra detrás de los alimentos.

Se hará una espectroscopia dieléctrica. Se utilizarán dos frecuencias de trabajo únicamente. **Utilizaremos una fuente de radiación de 100 GHz y una fuente de 300 GHz** que aportarán información diferente debido a que la radiación emitida por cada una de las fuentes, interactuará de manera distinta con la materia. Se observarán imágenes sobre los objetos irradiados con cada una de las fuentes de radiación. Veremos detalles en las imágenes debido a las pérdidas energéticas de la radiación al interactuar con la materia. En materiales que presenten una distribución heterogénea de elementos de distinta naturaleza, habrá unas pérdidas de energía diferentes según la zona irradiada del material. Veremos una escala de grises que nos mostrarán detalles físico-químicos. **Clasificaremos los alimentos en función de sus concentraciones de biomoléculas** (*glúcidos, proteínas y lípidos*) ya que debido a la naturaleza química que presentan las biomoléculas, la interacción con la radiación electromagnética responderá de un modo diferente. La concentración de las biomoléculas vienen reflejadas en el envase de los alimentos en términos de porcentajes en masa.

Nos encontraremos con diversos problemas propios de la escala que estamos manejando. Por un lado, tenemos que las ondas milimétricas van a incidir en algunos alimentos cuyo tamaño son de la escala del milímetro, creando **patrones de difracción y dispersiones** que estropearán las imágenes. Por otro lado, debido a la geometría curva de algunos alimentos, se crearán **reflexiones como consecuencia de los efectos de borde**. También veremos como aparecen zonas oscuras al aproximar alimentos como consecuencia de **extinciones de onda** (*absorción más dispersión*).

Índice

Índice de figuras	8
1. Introducción	12
2. El electromagnetismo, la piedra angular de lo que observamos	14
2.1 Fenómenos ondulatorios presentes en nuestro análisis	14
3. Espectroscopía dieléctrica	17
3.1 Factores involucrados en la permitividad	19
4. Fuentes de radiación THz y potenciales usos	21
4.1 Fuentes de radiación milimétrica y submilimétrica (<i>rango del THz</i>)	21
4.2 Campos de investigación en el rango del THz	23
5. Materia biológica	26
5.1 Glúcidos	26
5.1.1 Monosacáridos	27
5.1.2 Disacáridos	27
5.1.3 Polisacáridos	28
5.2 Prótidos	28
5.2.1 Aminoácidos	29
5.2.2 Péptidos	29
5.2.3 Proteínas	30
5.3 Lípidos	30
5.3.1 Ácidos grasos saturados e insaturados	31
6. Instrumentación	32
7. Medidas	35
7.1 Fuente de 100 GHz	35
7.2 Fuente de 300 GHz	44
8. Conclusiones	52
Referencias	54
Anexo A	60
Anexo B	68
Anexo C	70
Anexo D	72
Anexo E	74

Anexo F86

Índice de figuras

1.	<i>Cerebro humano. Localización de los cinco sentidos.</i>	14
2.	<i>Prisma de Newton.</i>	15
3.	<i>Tipos de dispersiones.</i>	15
4.	<i>Dispersión de la luz debido a la atmósfera.</i>	16
5.	<i>Clasificación de los materiales según su interacción con la radiación microondas.</i>	18
6.	<i>representación de la tangente de pérdidas</i>	19
7.	<i>Altas velocidades de conexión inalámbrica es posible con la tecnología THz.</i>	23
8.	<i>Telescopio espacial Herschel.</i>	23
9.	<i>Satélite artificial AURA.</i>	24
10.	<i>Señal de peligro biológico.</i>	24
11.	<i>Inspección de alimentos con radiación THz.</i>	24
12.	<i>Detección de caries en etapas tempranas gracias a la radiación THz.</i>	25
13.	<i>Análisis de un lienzo con radiación THz.</i>	25
14.	<i>Nos lo encontramos en alimentos cotidianos como las pastas, harinas, frutas, azúcares, tubérculos, etc.</i>	26
15.	<i>Microfotografía de cristales de azúcar.</i>	26
16.	<i>Representación de una molécula de glucosa.</i>	27
17.	<i>La sacarosa es el edulcorante más utilizado del mundo, formada por dos moléculas de glucosa.</i>	27
18.	<i>La amilopectina es un polisacárido que constituye alrededor del 75% de los almidones más comunes.</i>	28
19.	<i>Nos los encontramos en alimentos como carnes, pescados, leche, huevos, frutos secos, etc.</i>	28
20.	<i>La valina es uno de los veinte aminoácidos codificados por el ADN en la Tierra, siendo uno de los aminoácidos esenciales.</i>	29
21.	<i>La insulina es una hormona polipeptídica formada por 2 cadenas, una de 21 aminoácidos y otra de 30 aminoácidos.</i>	29
22.	<i>Representación esquemática del dinamismo de una proteína en general en función de su escala.</i>	30
23.	<i>Se encuentran en alimentos como carnes, pescados, aceites, frutas, semillas, etc.</i>	30
24.	<i>Los triglicéridos están presentes en el organismo humano y en los alimentos cotidianos.</i>	31
25.	<i>Las grasas cis y trans, tienen idéntica fórmula química, tan sólo se diferencian en la posición de sus átomos (son isómeros).</i>	31
26.	<i>Diferentes fuentes TeraSense.</i>	32
27.	<i>Fuente que produce ondas electromagnéticas a 100 GHz de frecuencia.</i>	32
28.	<i>Modos de vibración colectivos e individuales.</i>	33
29.	<i>Fuente que produce ondas electromagnéticas a 300 GHz de frecuencia.</i>	33
30.	<i>Disposición de fuentes (prueba).</i>	33
31.	<i>Espejo.</i>	34
32.	<i>Sensor para ondas milimétricas (TeraSense).</i>	34
33.	<i>Agua líquida (100 GHz).</i>	35
34.	<i>Agua congelada (100 GHz).</i>	35
35.	<i>Azúcar blanco (100 GHz).</i>	36
36.	<i>Azúcar moreno (100 GHz).</i>	36
37.	<i>Azúcar moreno con granos más finos (100 GHz).</i>	37
38.	<i>Miel de flores (100 GHz).</i>	37
39.	<i>Miel de flores congelada (100 GHz).</i>	38
40.	<i>Chocolate a la taza (100 GHz).</i>	38
41.	<i>Harina de trigo (100 GHz).</i>	39
42.	<i>Harina de trigo integral (100 GHz).</i>	39
43.	<i>Galletas saladas (100 GHz).</i>	40
44.	<i>Difracción causada por las lentejas (100 GHz).</i>	40

45.	<i>Lentejas (100 GHz).</i>	41
46.	<i>Proteínas en polvo (100 GHz).</i>	41
47.	<i>Porción de loncha de beicon (100 GHz).</i>	42
48.	<i>Aceite de oliva virgen extra (100 GHz).</i>	42
49.	<i>Aceite de oliva virgen (congelado) (100 GHz).</i>	43
50.	<i>Sal común (100 GHz).</i>	43
51.	<i>Azúcar blanco (300 GHz).</i>	44
52.	<i>Mermelada de frambuesa 300 GHz).</i>	44
53.	<i>Mermelada de frambuesa (300 GHz).</i>	45
54.	<i>Chocolate 99 % de cacao (300 GHz).</i>	45
55.	<i>Galleta con miel (300 GHz).</i>	46
56.	<i>Galleta con miel (300 GHz).</i>	46
57.	<i>Imagen comparación de galleta postprocesada (300 GHz).</i>	47
58.	<i>Hojas de laurel (300 GHz).</i>	47
59.	<i>Proteínas en polvo (300 GHz).</i>	48
60.	<i>Alubias blancas (300 GHz).</i>	48
61.	<i>Porción de loncha de beicon (300 GHz).</i>	49
62.	<i>Beicon congelado (300 GHz).</i>	49
63.	<i>Medición de aceite de oliva.</i>	50
64.	<i>Comparación directa entre aceites de oliva (300 GHz).</i>	50
65.	<i>Comparación entre aceites de oliva congelados (300 GHz).</i>	50
66.	<i>Cacahuets con vaina (300 GHz).</i>	51
67.	<i>Sal común (300 GHz).</i>	51
68.	<i>Representación de la ley de Faraday.</i>	II
69.	<i>Representación de la ley de Ampère-Maxwell.</i>	II
70.	<i>Propagación de una onda electromagnética con frente plano.</i>	III
71.	<i>Refracción de un frente plano (Ley de Snell).</i>	V
72.	<i>Obstáculo entre fuente y sensor.</i>	VI
73.	<i>Múltiples obstáculos entre fuente y sensor.</i>	VI
74.	<i>Espectro electromagnético</i>	VII
75.	<i>Condiciones de contorno.</i>	I
76.	<i>Espectro electromagnético en escala logarítmica de los diferentes factores que contribuyen a la constante dieléctrica en sistemas biológicos, siendo α, β, δ y γ las dispersiones dadas dependiendo de la frecuencia [CASTRO].</i>	II
77.	<i>Representación gráfica del tiempo de relajación [CASTRO].</i>	III
78.	<i>Representación del aumento de la conductividad con la frecuencia [CASAS].</i>	IV
79.	<i>Permitividad de un medio de tipo Debye respecto a la frecuencia [BARBA].</i>	VII
80.	<i>Permitividad respecto a la frecuencia de un medio que sigue el modelo de Debye (líneas continuas) y de un medio que sigue el de Cole-Cole (líneas a trazos). [BARBA].</i>	X
81.	<i>Refracción en agua normal (izquierda) y en un metamaterial (derecha).</i>	I
82.	<i>Combinan metalentes con músculo artificial inspirados en el ojo humano [Europa Press: 26 Feb. 2018].</i>	I
83.	<i>Comparación entre la transmisión de las ondas a través de un material diestro (RHM) y uno zurdo (LHM).</i>	II
84.	<i>Esquema de la lente perfecta de Pendry.</i>	II
85.	<i>Comparación entre una lente convencional y una metalente.</i>	III

Gewidmet meiner Familie, meinen Haustieren und Freunden , ob sie bei mir sind oder nicht. Herzlichen Dank.

1. Introducción

El electromagnetismo es la rama de la física que estudia los fenómenos eléctricos y magnéticos. **Para poder estudiar estos fenómenos, obligatoriamente han de poder interactuar con la materia.** Conocemos las propiedades de los materiales a partir de los efectos que tienen al interactuar con las ondas electromagnéticas. Nosotros no sólo estamos interesados en conocer los efectos, sino también estamos interesados en conocer las causas.

Nosotros vamos a utilizar como agente físico las ondas electromagnéticas (*a la escala del milímetro*). Las ondas electromagnéticas están compuestas por partículas elementales llamadas fotones, que son bosones de espín igual a 1. Se trata de una partícula de interacción que actúa frente al intercambio de la interacción electromagnética. Nosotros, en nuestro análisis, no venimos a hablar de la escala de un fotón. Eso significa "crecer en tamaño", entonces, nosotros debemos hablar de conjunto de fotones, lo que comúnmente llamamos haz de ondas electromagnéticas. Lo interesante al cambiar de escala, es que ocurren fenómenos nuevos y nos desprendemos de otros fenómenos. La energía asociada a las ondas electromagnéticas no es lo suficientemente energética para excitar átomos y moléculas. A esta escala, las ondas electromagnéticas interactuarán con los modos vibracionales cuyas frecuencias que estén en el mismo rango de frecuencia de las ondas electromagnéticas. También habrá una interacción con la escala de energía de enlace entre moléculas. Dado que es una energía relativamente débil, interactuará con los enlaces moleculares débiles como los enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals.

Nosotros en nuestro análisis, vamos a tratar de "ver" cómo son los alimentos cuando a través de ellos ha pasado un haz de ondas electromagnéticas. Vamos a utilizar únicamente dos frecuencias. Tenemos una fuente de ondas electromagnéticas de 100 GHz y otra fuente de 300 GHz. A partir de los efectos producidos en el haz de ondas emitido, podemos interpretar qué ha tenido que suceder, para que radiación electromagnética, cuando llega al sensor tenga una energía diferente a la de la energía inicial.

Una vez que hemos presentado al agente principal de nuestro experimento, debemos hablar del criterio para clasificar vamos a utilizar. Vamos a estudiar los efectos a partir de las propiedades de las ondas electromagnéticas, ya que se va a emitir haces de ondas electromagnéticas que tienen una energía asociada y detectamos energía proveniente de las ondas. La principal propiedad es la **permitividad**. Vamos a hacer una **espectroscopía dieléctrica**, es decir, vamos a hacer un estudio de la interacción de la radiación electromagnética en función de la permitividad relativa con la materia. Vamos a ver cómo **los alimentos tienen una absorción de la energía que transporta el haz inicial y una transmisión de energía que transporta la radiación electromagnética al atravesar el material dieléctrico.**

¿Qué esperamos encontrarnos en los resultados? Cuando alguien realiza un estudio, generalmente conoce, aunque sea de manera aproximada, qué resultados puede esperar. Nosotros vamos a obtener como producto final unas imágenes que nos van a mostrar detalles que a simple vista no podemos observar, debido que las ondas electromagnéticas no tienen una frecuencia que nuestro ojo sea capaz de percibir. La radiación electromagnética que nosotros vamos a hacer incidir en los alimentos, presumiblemente, será capaz de atravesar la materia y llegar al sensor revelando cierta información como consecuencia de la interacción con la materia. Dependiendo de la naturaleza de la materia, habrá unas propiedades electromagnéticas u otras, por lo que esperamos encontrarnos con diferentes situaciones incluso dentro de un mismo alimento. Podríamos encontrarnos en una situación en la que el alimento sea aparentemente homogéneo a través de la luz visible, pero la radiación milimétrica revele que hay diferencias en la tonalidad de la imagen.

Sí escalamos un poco más en frecuencia, nos encontramos con las ondas submilimétricas. Hay un conjunto del espectro de las ondas milimétricas y submilimétricas al que se le ha llamado **rango del THz**¹. Se trata de un rango dentro del espectro electromagnético, en el que producir radiación electromagnética a las frecuencias de este rango ha sido durante mucho tiempo muy complicado. A estas frecuencias **convergen la física clásica y la física cuántica**. La dificultad de producir fuentes de radiación que trabajen a estas frecuencias reside en que no se pueden producir a partir de la excitación atómica (*las ondas no tienen suficiente energía para excitar a los electrones*), sino que se ha de buscar una forma alternativa de producir radiación electromagnética.

¿Por qué nos interesa entonces acercarnos a dicha frecuencia? La respuesta está en **potenciar las aplicaciones tecnológicas ya existentes y si es posible encontrar nuevas aplicaciones**. Una de las posibles aplicaciones dentro de la industria que tiene el uso del rango del THz (*ondas milimétricas y submilimétricas*) es la posibilidad de ver a través de los alimentos en el **sector agroalimentario** (*objeto de este trabajo*) y así conocer de antemano el estado de los alimentos antes de lanzarse al mercado. La idea que se plantea es tratar de **sustituir a los peligrosos rayos X** en la inspección de los alimentos. Dado que es posible traspasar algunos materiales y obtener información útil, hay más intereses de utilizar este rango de frecuencias en otras áreas como defensa, biomedicina, teledetección, astrofísica y patrimonio.

Relación con los estudios del Grado en Física

En este trabajo, se abordarán temas de estudio vistos en el **grado en Física** como el electromagnetismo, electromagnetismo de alta frecuencia, electrodinámica, óptica, física del estado sólido, electrónica y química. Se añaden otros campos diferentes como la biología. Aunque no he hecho hincapié en otras ramas de la física (*impartidas en el grado*), para un análisis más profundo es útil tener conocimientos de programación, termodinámica, estadística y mecánica cuántica.

¹1 THz (*Terahercio*) equivale a 10^{12} Hz

2. El electromagnetismo, la piedra angular de lo que observamos

La curiosidad de la humanidad por conocer más acerca de nuestro entorno nos ha permitido sobrevivir y acomodar nuestras necesidades mediante el uso y el desarrollo de la tecnología. Para conocer el entorno es imprescindible interactuar con él. De no ser así, el entorno podría pasar inadvertido.

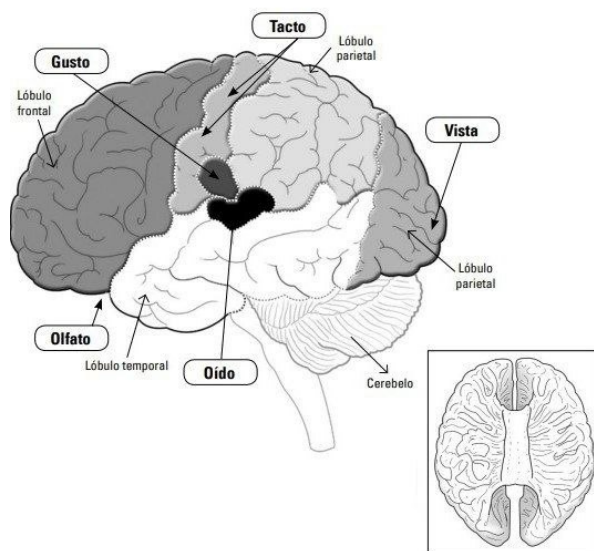


Figura 1: Cerebro humano. Localización de los cinco sentidos.

Este conocimiento a través de la interacción ha sido posible gracias al electromagnetismo. Todos nuestros sentidos están subordinados a la existencia del electromagnetismo, ya que nuestro cerebro procesa la información mediante impulsos eléctricos [EAGLEMAN]. Necesitamos tener los receptores necesarios y en el rango adecuado para que interactúe con la materia y podamos comprender la naturaleza. Nuestro cuerpo, al fin y al cabo, nuestros receptores, son una herramienta realmente eficientes y sensibles con las interacciones electromagnéticas. Sin embargo, tienen limitaciones. Es ahí donde entra nuestro ingenio (*nuestro cerebro*) con el que ideamos aparatos tecnológicos que nos permiten conocer el cosmos en un abanico más amplio. Gracias al ingenio, hemos podido desarrollar instrumentos que nos permiten "ver" en un rango de frecuencias que nuestro ojo no puede percibir. Hablamos de las ondas electromagnéticas milimétricas (*ver figura 74*) (*ver anexo A*). Las ondas milimétricas tienen ese nombre porque la longitud de onda de estas ondas es del orden del milímetro. En nuestro análisis, utilizaremos ondas electromagnéticas milimétricas pero a una frecuencia que entra dentro de un rango especial denominado **brecha del THz**. Este rango comprende desde los 100 GHz a los 10 THz [BENACLOCHE].

Produciremos ondas electromagnéticas con dos dispositivos. En concreto vamos a producir radiación electromagnética de 100 GHz y 300 GHz. Estas ondas electromagnéticas al interactuar con la materia sufrirán los fenómenos propios de las ondas: refracción, dispersión (*scattering*), reflexión, absorción y difracción que serán útiles y/o perjudiciales para nuestro estudio [MANCIBO].

2.1. Fenómenos ondulatorios presentes en nuestro análisis

Refracción: Es el cambio de velocidad que experimentan las ondas electromagnéticas al pasar de un medio a otro. Como consecuencia de la velocidad, las ondas electromagnéticas cambian su dirección de propagación. Esto sucede siempre y cuando el rayo incidente no sea normal a la superficie de separación de los medios. Si incide perpendicular a la superficie de separación, no sufrirá ningún cambio en la dirección de propagación [CASAS 2]. Las ondas electromagnéticas deben satisfacer las **condiciones de contorno** [WANGSNES] (*ver anexo B*).

Reflexión: Es el cambio de dirección dentro del mismo medio que las ondas electromagnéticas experimentan al incidir sobre una superficie de separación de dos medios [CASAS 2]. En nuestro análisis, vamos a tener alimentos que presentan una geometría tal que la radiación electromagnética va a incidir con muchos ángulos diferentes con respecto a la superficie. Para ángulos cercanos a la

perpendicular del plano, la radiación penetra en la materia refractándose (*y reflejándose*), pero hay un ángulo tras el cual, sólo nos encontramos con el fenómeno de reflexión. Se le denomina **ángulo límite**. Resulta conveniente hablar entonces de incidencia normal y oblicua [WANGSNESS] (*Ver anexo C*). Debido a las reflexiones, veremos completamente oscuros ciertos alimentos. Es debido a que poseen una geometría característica tal que haya reflexiones totales o haya una reflexión tan grande que la pérdida de intensidad haga que no llegue radiación al sensor.

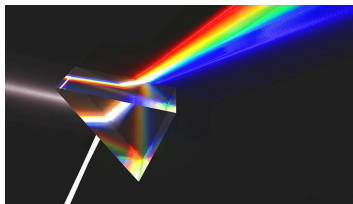


Figura 2: Prisma de Newton.

Dispersión (scattering): La dispersión es la desviación de las ondas electromagnéticas de su trayectoria original al incidir en un medio de diferente índice de refracción. Podemos distinguir tres tipos de fenómenos asociados a la dispersión: dispersión Rayleigh, dispersión Mie y efecto Tyndall. Se diferencia de la reflexión en la dirección de avance (*figura 3*). En la reflexión, la onda electromagnética vuelve "hacia atrás", mientras que en el scattering no hay una distinción de la dirección y sentido del avance de la onda.

Dispersión Rayleigh: Este fenómeno de dispersión sucede cuando los agentes dispersivos tienen un diámetro menor o igual a la longitud de onda (*aproximadamente una décima parte de la longitud de onda*) [LINK 12], [LINK 13]. **La dispersión Rayleigh es dependiente de la frecuencia de las ondas electromagnéticas.** Un ejemplo de dispersión Rayleigh lo podemos ver en la (*figura 2*). Se trata de una dispersión elástica (*la energía de las ondas electromagnéticas no varía con la interacción*). **En nuestro análisis con los alimentos también veremos dispersiones inelásticas cuando hablemos de radiación absorbida por los modos vibracionales.**

Dispersión de Mie: A medida que los agentes dispersivos crecen de tamaño y la longitud de onda empieza a ser de un tamaño parecido al tamaño de los cuerpos dispersivos, vamos teniendo una **dispersión hacia adelante**. Aparece un patrón con un lóbulo delantero cada vez más intenso. A este tipo de dispersión se la conoce como **dispersión de Mie** [LINK 12], [LINK 13]. La dispersión Mie, a diferencia de la dispersión Rayleigh, es independiente de la longitud de onda.

Efecto Tyndall: Cuando la luz es dispersada por partículas en un medio que es **heterogéneo y no uniforme**, tenemos el llamado efecto Tyndall [LINK 23]. El grado de dispersión de las ondas depende de la longitud de onda que se está dispersando y del tamaño del cuerpo dispersor, que ha de ser del orden de la longitud de onda [LINK 13], siendo más efectivo para longitudes de onda cortas. El cuerpo dispersivo refleja las ondas electromagnéticas en todas las direcciones. Un ejemplo, son las partículas de polvo que podemos ver cuando entra un haz de luz por la ventana.

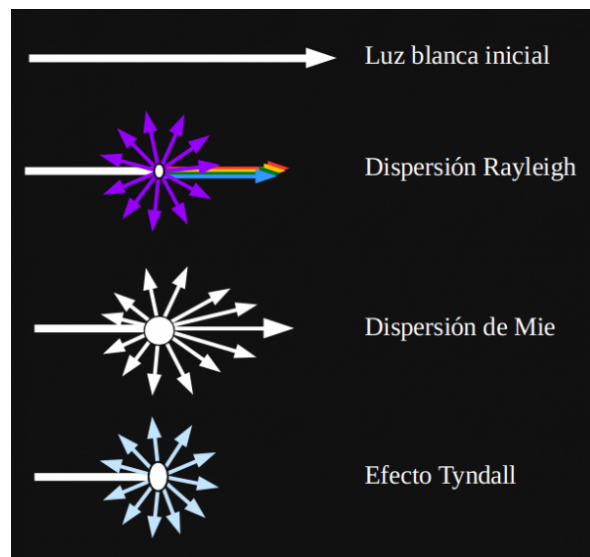


Figura 3: Tipos de dispersiones.

Este tipo de dispersiones elásticas, son un perjuicio en nuestro análisis, ya que tendremos por ello una pérdida de intensidad. **Una posible solución, es construir lentes a partir de metamateriales (ver anexo F)**. De esta forma podremos "recoger" esa radiación electromagnética dispersa y conducirla hacia el sensor.



(a) Atardecer en Marte.

(b) Atardecer en La Tierra.

Figura 4: *Dispersión de la luz debido a la atmósfera.*

Absorción: La radiación electromagnética cuando interactúa con la materia, parte de la radiación se refleja y/o dispersa, parte se transmite y parte es absorbida. Las ondas electromagnéticas, cuando atraviesan un medio material, se van a atenuar exponencialmente debido a esas interacciones internas del material con las ondas (ver anexo D). Resulta conveniente en algunos casos hablar de profundidad de penetración.

Un fenómeno que vamos a encontrarnos en numerosos casos, consiste en las **extinciones de onda**. Se trata de un fenómeno de **absorción más dispersión** (ver anexo A). Se trata de un fenómeno de interferencia ondulatoria. La onda dispersa elimina parte de la energía de la onda original por interferencia [VAN DE HULST].

Difracción: Es un fenómeno asociado a las ondas cuando son distorsionadas al encontrarse en su trayectoria un obstáculo comparable a su longitud de onda [BELÉNDEZ 2]. Los fenómenos de difracción se dividen en dos tipos: **Difracción de Fraunhofer** y **difracción de Fresnel**. Se puede determinar la propagación de las ondas electromagnéticas utilizando el **principio de Huygens**. Consideramos que cada punto de un frente de onda primario sirve como foco de ondas elementales secundarias que avanzan con la misma velocidad y frecuencia que la onda primaria. El frente de onda primario al cabo de un cierto tiempo es la envolvente de las ondas secundarias.

Interferencias de las ondas electromagnéticas: Como consecuencia de las difracciones que vamos a tener al irradiar ciertos alimentos, vamos a tener una situación en la que dos o más ondas van a solapar en el espacio. Esto va a dar lugar a lo que se conoce como el **principio de superposición** [MANCERO]. Cuando dos o más ondas se superponen, el movimiento resultante en cualquier punto se halla sumando los desplazamientos de las ondas individuales. Se formará un **patrón de interferencias** de franjas brillantes y oscuras debido a la interacción entre las ondas de manera constructiva y destructiva.

3. Espectroscopia dieléctrica

Nuestro estudio acerca de cómo interacciona la radiación milimétrica en los alimentos está basado en el análisis espectroscópico de la naturaleza dieléctrica de los materiales. Si nos vamos a la definición de espectroscopia es el **estudio de la radiación electromagnética con la materia, con absorción o emisión de energía**. Dado que es una definición muy general, normalmente lleva un apellido haciendo referencia a cómo va a ser ese estudio, cuál es el método del estudio, en nuestro caso la **naturaleza dieléctrica de la materia**. Para ello veamos en primer lugar qué es un material dieléctrico y cómo interacciona con la materia [DÍAZ], [CASTRO].

Los materiales pueden clasificarse según como sea su respuesta a un campo electromagnético como **material aislante, material conductor o material dieléctrico**:

Los **materiales aislantes (dieléctrios no polarizables)** son materiales dieléctricos que no se polarizan a las frecuencias con las que estamos trabajando. Tampoco tienen cargas libres de movimiento. Esto implica que no se originará ninguna corriente eléctrica. Esto trae como consecuencia que las ondas electromagnéticas penetrarán el material sin ninguna barrera. Si hubiera cargas libres de movimiento, se habrían originado corrientes eléctricas. La generación de corrientes eléctricas trae como consecuencia la existencia de un campo magnético. Se trata de un efecto que se opone a la variación de flujo magnético que trata de atravesar el material acorde a la **ley de Lenz**. Por lo tanto se crearía un flujo de campo magnético saliente del material que impediría que la onda atravesara en lo posible el material (*ver anexo A*).

Los **materiales conductores** en contraposición a los materiales aislantes tienen cargas libres de movimiento. Como hemos adelantado antes, que tengan cargas libres va a tener como consecuencia que cuando llegue un haz de ondas electromagnéticas **va a originarse una corriente en su superficie que va a impedir su paso a través**. Si es un buen conductor, como, por ejemplo, un metal, **reflejará todo el campo electromagnético que le llegue**. Por lo tanto, son buenos materiales para crear blindajes electromagnéticos o para fabricar espejos, de hecho, en nuestro experimento, hemos utilizado un espejo para focalizar el haz de ondas electromagnéticas [LANDAU].

Los **materiales dieléctricos** son materiales que no tienen cargas móviles, al igual que sucedía con los materiales aislantes. **Se les distingue de los aislantes porque pueden aparecer dipolos** a las frecuencias de trabajo (*ver anexo E*). Cuando una onda electromagnética atraviesa un material dieléctrico, dependiendo de cómo sea el dieléctrico, puede haber un reparto inhomogéneo de carga en el material como respuesta al campo eléctrico que incide. Las cargas eléctricas serán atraídas por ese campo eléctrico externo y como tienen cierta libertad de movimiento, **se inducirá un dipolo eléctrico**. Ahora tenemos un campo eléctrico formado por los dipolos. Tendrá un sentido contrario al campo externo como consecuencia del reparto de cargas. **Como consecuencia, el campo eléctrico creado por los dipolos, atenuará al campo eléctrico externo y, por lo tanto, recibiremos una señal más débil en nuestro receptor** [DÍAZ], [CASTRO].

Hay materiales dieléctricos que directamente ya poseen esos dipolos, son **dipolos permanentes**, estos se orientarán con el campo externo incidente y atenuarán al campo electromagnético incidente impidiendo atravesar el material.

En nuestro experimento, **nuestros materiales son alimentos. Vamos a tener una mezcla de las tres situaciones anteriores**. Una idea del comportamiento real que vamos a tener al irradiar los alimentos está representado en la *figura 5*.

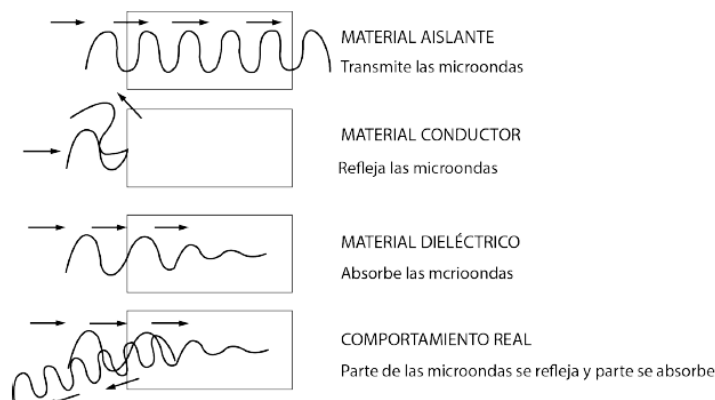


Figura 5: Clasificación de los materiales según su interacción con la radiación microondas.

¿Cómo podemos clasificar los alimentos en función de la respuesta a un campo eléctrico externo?. Todos los alimentos tienen en común un parámetro, ese parámetro es la llamada **permitividad eléctrica** ($\frac{F}{m}$), designada con la letra griega ϵ . Se trata de un parámetro que relaciona la interacción entre el campo eléctrico emitido con el material. Dado que también existe un campo magnético, no es de extrañar que también haya un parámetro que relacione la intensidad del campo magnético emitido con el material. Ese parámetro existe, es la llamada **permeabilidad magnética** ($\frac{H}{m}$) y se le designa con la letra griega μ . Tanto la permitividad eléctrica como la permeabilidad magnética son parámetros físicos que dependen de la frecuencia y caracterizan los materiales en relación con sus propiedades eléctricas y magnéticas, respectivamente.

Como podemos observar, el apellido que le hemos puesto al estudio hace referencia a la parte eléctrica de la onda electromagnética. Hay una razón y es que en los alimentos se asume que **la permeabilidad magnética permanece próxima a la del vacío** ya que la materia que vamos a irradiar (*los alimentos*) es de naturaleza no magnética. La permeabilidad magnética μ se considera próxima a la del valor en el vacío, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{H}{m} \approx \mu$. Vamos a tener que **es el campo eléctrico el que va a interactuar con los alimentos**. [CASTRO].

Centrándonos en la parte eléctrica, hemos dicho que la permitividad eléctrica relaciona el campo eléctrico con la respuesta de la materia y hemos dicho que tiene unidades de Faradios por metro. **La permitividad eléctrica es un número complejo** (*en el dominio de la frecuencia*), lo escribimos de la siguiente forma:

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

Tenemos por un lado la parte real, que hemos llamado ϵ' y una parte imaginaria que hemos llamado ϵ'' , siendo j la unidad imaginaria. La parte real, ϵ' , nos habla de la **polarización del material**, de la capacidad que tiene un material de almacenar energía potencial eléctrica cuando es sometido a un campo eléctrico externo. Las cargas positivas y negativas van a desplazarse de su punto de equilibrio como consecuencia de la presencia del campo externo, induciéndose un dipolo eléctrico [CASTRO], [ECHEVARRÍA]. (*Los mecanismos que explican el comportamiento dieléctrico, son explicados en el anexo E*).

Por otro lado, tenemos una parte imaginaria que describe las **pérdidas energéticas**. Cuanto mayores sean las pérdidas, mayor es la parte imaginaria, que vemos que está restando, a ϵ'' se le llama **factor de pérdidas**. Esta energía absorbida será disipada en otras formas de energía como puede ser en forma de calor. **Esas pérdidas son producidas por el retardo en la respuesta del material para polarizarse cuando una onda electromagnética incide en el material**. Normalmente a

la permitividad eléctrica se toma el valor relativo, tomándose como valor patrón el vacío. Para hacer referencia a ese valor relativo, se le pone el subíndice "r", $\epsilon_r = \frac{\epsilon^*}{\epsilon_0}$, con $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$.

Ahora conocemos la permitividad eléctrica, que da cuenta la energía que puede almacenar un material como consecuencia de la polarización que sufre al ser irradiado, y el factor de pérdidas, que da cuenta de la energía que pierde el material. En ocasiones es interesante hablar de la llamada **tangente de pérdidas**, que sería el cociente entre ambas partes, es decir, la relación entre la energía disipada y la energía almacenada, por lo tanto, nos indica cuánta energía de la que es absorbida se pierde en forma de calor (*por lo general*), [CASTRO], [POCE].

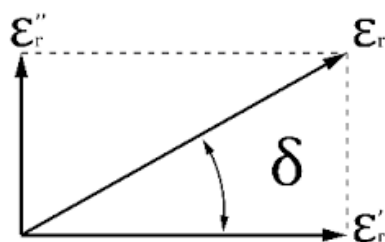


Figura 6: representación de la tangente de pérdidas

Por lo tanto, podemos escribir la expresión:

$$\tan(\delta) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = D = \frac{E(\text{perdida})/\text{ciclo}}{E(\text{almacenada})/\text{ciclo}} \quad (2)$$

Donde "D" es el **factor de disipación** que indica las **pérdidas relativas dieléctricas**. La letra "E", es la designación para la energía, no obstante, a veces también es interesante utilizar el llamado **factor de calidad**, que se representa por la letra "Q". Es el inverso del factor de disipación, por lo tanto, está relacionado con las **ganancias energéticas**. Todo depende de cómo uno quiera ver las cosas, si las queremos ver como pérdidas o como ganancias. Dependerá de lo que estemos midiendo. Podemos expresarlo de la siguiente manera:

$$Q = \frac{1}{D} = \frac{E(\text{almacenada})/\text{ciclo}}{E(\text{perdida})/\text{ciclo}} \quad (3)$$

3.1. Factores involucrados en la permitividad

La permitividad no es una constante, sino que depende de varios factores. **Es un parámetro que depende enormemente de la frecuencia del campo eléctrico con el que interactúa**, tenemos, por otro lado, la temperatura, la presión, y por supuesto de la composición y de la estructura interna [CASTRO], [MACDOWELL].

Frecuencia: Para conocer el valor exacto de la permitividad eléctrica, es clave conocer a qué frecuencia estamos operando porque, como hemos dicho, la permitividad eléctrica se compone de un parámetro real que da cuenta de la energía que puede absorber y de un parámetro imaginario que da cuenta de las de pérdidas energéticas. No todas las frecuencias son válidas, sólo se podrán absorber aquellas **frecuencias que sean resonantes** con las frecuencias de vibración de los constituyentes.

Temperatura: Todo material, por el hecho de poseer una temperatura, va a estar en continuo movimiento que dependerá, en última instancia, de los grados de libertad. Ese movimiento está compuesto por vibraciones, rotaciones y traslaciones. Nosotros vamos a trabajar con sólidos y líquidos,

luego nos centramos sobretudo en vibraciones y rotaciones. Al aumentar la temperatura, aumentará la agitación térmica. Esto hará que las vibraciones y rotaciones sean diferentes. Va a cambiar el módulo y la frecuencia de esas vibraciones. Un incremento de la temperatura provoca por otro lado un incremento en el **tiempo de relajación** (*más información en el anexo E*). Para la mayoría de alimentos congelados, la permitividad dieléctrica aumenta a medida que un alimento congelado se descongela. Si se sigue aumentando la temperatura, llegado un punto empezará a disminuir paulatinamente debido a la agitación térmica y el aumento de las vibraciones que dificultan la polarización [CASTRO].

Presión: Hay materiales que se polarizan cuando son sometidos a una cierta presión (*materiales piezoeléctricos*), como, por ejemplo, el cuarzo. Esto va a afectar significativamente a la permitividad puesto que debido a esa polarización, la interacción con el campo eléctrico va a ser diferente.

Composición y estructura interna: Los materiales que nosotros vamos a examinar no son todos sólidos cristalinos, ni mucho menos sustancias puras. Por lo tanto, hablar de permitividad del material pensando que siempre vamos a obtener los mismos valores para un tipo de alimento no es algo adecuado. No todos los alimentos dentro de su categoría son iguales ni todas las partes de un mismo alimento son iguales. Las diferentes moléculas que componen los alimentos van a tener influencia sobre otras moléculas adyacentes. Esto va a afectar a sus vibraciones (*sobre todo vibraciones colectivas*) y por lo tanto a la interacción con el campo eléctrico externo.

Llegados a este punto podríamos pensar que la permitividad eléctrica no es un buen parámetro para clasificar los materiales como son los alimentos, pero en realidad, esa es su fortaleza. Lo que nos interesa es distinguir cambios en un material. Si todo fuera homogéneo sólo veríamos una sombra de una determinada intensidad, sin detalles relevantes. Además, nos interesa ver cambios de un alimento con respecto a otro alimento de la misma naturaleza y con ello ver cual es el óptimo para el consumo y tratar de explicar por qué.

4. Fuentes de radiación THz y potenciales usos

Las ondas electromagnéticas milimétricas y submilimétricas son frecuencias poco utilizadas en la actualidad. Producir este tipo de radiación conlleva problemas. Esta frecuencia es imposible producirla con excitaciones atómicas. Las excitaciones atómicas empiezan a producirse desde el infrarrojo lejano. Las interacciones que nosotros vamos a ver son aquellas que sean del rango de energía de la escala de la radiación electromagnética milimétrica. Vamos a ver interacciones cuya energía es del orden de 4,1357 meV (*Energía de un fotón de 1THz*) [VILLAFUERTE]. Se trata de una energía relativamente débil, dependiendo con qué se compare. Si lo comparamos con la energía de ionización, por ejemplo, el Cs es el elemento con menor energía de ionización con aproximadamente una energía de 3.8939 eV, es bastante débil. Es decir, **necesitaríamos aproximadamente unas 1000 veces más energía para excitar el átomo con la energía más baja de ionización**. Si nos vamos a las fuentes con las que vamos a trabajar, tenemos que para la fuente de 100 GHz, tenemos una energía de $E = hf = 0,4136$ meV y para la fuente de 300 GHz, los fotones tienen una energía de 1,2407 meV.

4.1. Fuentes de radiación milimétrica y submilimétrica

En los últimos años, la investigación y el desarrollo por producir radiación electromagnética milimétrica y submilimétrica ha crecido notablemente. Hoy día, podemos encontrar múltiples fuentes de radiación comercializables. Vamos a mencionar algunos tipos de fuentes de radiación milimétrica y submilimétrica (*no todas de uso comercial*).

Girotrón: El Girotrón se considera el primer instrumento que se inventó capaz de producir rayos de microondas a muy alta frecuencia. **Este instrumento pertenece a la familia de los tubos de vacío**. El girotrón consigue frecuencias que van desde 20 GHz a 527 GHz [THUMM], [NUSINOVICH]. Como vemos, llega al borde de la brecha de Terahercios. Para conseguir tales frecuencias, ha de acelerar electrones a través de un potente campo magnético mediante resonancia ciclotrónica.

Fuentes electrónicas: Las fuentes electrónicas como los diodos Gunn, los diodos Impatt y los diodos túnel resonantes pueden emitir a frecuencias de hasta varios THz. Sin embargo, generalmente generan frecuencias inferiores a THz. Al aumentar la frecuencia hasta llegar al THz, el rendimiento se degrada [ASADA]. Otro enfoque en fuentes electrónicas es la generación armónica en dispositivos electrónicos no lineales.

Antenas fotoconductoras: Las antenas fotoconductoras son útiles tanto para la generación como para la detección de señales electromagnéticas de alta frecuencia. Un material semiconductor actúa como fuente de la antena. Se aplica un voltaje de polarización con corriente continua a la antena junto con un rayo láser enfocado en la región entre las bandas metálicas, de modo que se generan portadores libres [AUSTON], [BURFORD]. El espacio semiconductor sirve como un interruptor fotoconductor en el que el cambio de potencial acelera los portadores libres e induce corriente eléctrica alterna en la antena, emitiendo radiación en el rango del THz. La longitud de la antena determina la frecuencia de resonancia que necesitamos para producir la radiación.

Láseres de gas: Los láseres de gas también conocidos como láseres THz bombeados ópticamente. Son una de las fuentes más poderosas de radiación en el rango THz. Con estos láseres, podemos producir radiación en el rango de THz mediante las transiciones de ciertas moléculas entre estados rotacionales [WANG 2]. Las transiciones entre los estados rotacionales generan frecuencias discretas en el rango de THz. Por lo general, tienen potencias de salida de unos pocos mW y una eficiencia de conversión muy baja. La potencia de salida es difícil de mejorar debido a la falta de fuentes de bombeo de infrarrojo medio sintonizables de alta potencia.

Tubos de osciladores de onda inversa: Los tubos osciladores de onda inversa son instrumentos que emiten un haz de electrones enfocados por un campo magnético externo. El haz de electrones enfocado interactúa con una estructura que genera una onda electromagnética en sentido contrario del haz de electrones actuando como un resonador. Entra en fase con los electrones que viajan en sentido contrario pudiendo acelerarlos o frenarlos. La onda está acoplada a la guía de onda de salida cerca del cañón de electrones. Al cambiar el voltaje de aceleración, la frecuencia de funcionamiento del dispositivo se puede ajustar electrónicamente hasta llegar al THz [CHEN 2]. Los tubos osciladores de onda inversa ofrecen una alta potencia de salida, buena calidad de frente de onda, capacidad de ajuste de longitud de onda y una alta relación señal-ruido, por lo que se han utilizado como fuentes de THz para sistemas de imágenes. Un ejemplo de tubo de oscilador de onda inversa es el llamado **Carcinotrón** [ILYAKOV].

Rectificación óptica utilizando pulsos ópticos de femtosegundos: La rectificación óptica utilizando pulsos ópticos de femtosegundos en gases (*por ejemplo, aire*) son dispositivos que pueden generar emisión de ondas THz. Un plasma es generado por la superposición de un haz de ondas electromagnéticas en el rango infrarrojo con su segundo armónico [DAI]. En comparación con la rectificación óptica en cristales, con los gases el ancho de banda de emisión suele ser mayor y se pueden obtener energías de pulso más altas.

Fuente láser de cascada cuántica: Las fuentes láser de cascada cuántica (*QLC*) son láseres fabricados a partir de semiconductores que se han desarrollado originalmente para emitir en la región espectral del infrarrojo medio y lejano [WILLIAMS], [MARTÍNEZ]. La optimización para una longitud de onda de emisión particularmente larga, ha llevado a la emisión de radiación con frecuencias de unos pocos THz. Pueden producir una corriente alterna con una potencia relativamente alta junto con ondas pulsadas cuya potencia de salida puede ser de hasta cientos de mWs. Tales láseres son muy compactos, pero en su mayoría funcionan a baja temperatura y necesitan un sistema de enfriamiento criogénico.

Láser de electrones libres: Se trata de una fuente de luz de sincrotrón en el que emite pulsos cortos de radiación. No es un láser al uso puesto que no estimula excitaciones atómicas sino que **mueve electrones a una velocidad relativista como fuente de radiación** [TAN]. **Los electrones pasan a través de una estructura magnética y se va amplificando en cada paso por la estructura.** De nuevo, nos encontramos con un fenómeno de resonancia magnética. A medida que los electrones van dando vueltas, van emitiendo radiación, radiación monocromática pero incoherente. Se colocan unos espejos en los extremos creando una cavidad. Forman ondas estacionarias, esto hace que ahora los electrones interactúen con el campo eléctrico. El campo eléctrico puede interactuar con las cargas acelerándolas o frenándolas según coincida su fase. De modo que hemos conseguido dar coherencia al haz emitido. **Ahora tenemos electrones rápidos y electrones lentos separados por una longitud de onda.** La longitud de onda que se puede conseguir mediante este método es muy variada, se puede conseguir desde microondas, Terahercios, infrarrojos, visible, ultravioleta e incluso rayos X [LEE], [GUO], [BIURRUN]. Son capaces de emitir potencias muy altas y son sintonizables en un amplio rango de frecuencia que también incluye frecuencias de THz, pero son muy grandes y caros. Por lo tanto, tienen un uso limitado en experimentos de física fundamental.

Fuentes no lineales (*Photomixing*): También conocidos como **convertor óptico heterodino**. Utilizan una combinación de dos láseres que emiten a distinta frecuencia dentro del espectro infrarrojo [WEISS]. La interferencia de estas dos ondas crea un nuevo frente de ondas con una nueva frecuencia que se le hace pasar por una antena conductora, de modo que se consigue una fuente de radiación continua dentro de la banda de los Terahercios [TANI]. Las principales ventajas de usar la técnica de Photomixing son el reducido tamaño, es compacto y sintonizable. Por contra, tenemos una potencia de salida baja.

4.2. Campos de investigación en la brecha del THz

A medida que se van desarrollando equipos más eficientes y baratos, más campos tecnológicos se suman a la investigación utilizando ondas electromagnéticas en el rango de las ondas milimétricas y submilimétricas. A continuación, vamos a citar algunos ejemplos de campos tecnológicos interesados en la tecnología asociada a las ondas electromagnéticas en el rango de los THz.



Figura 7: *Altas velocidades de conexión inalámbrica es posible con la tecnología THz.*

Telecomunicaciones: Un sector muy interesado en desarrollar la tecnología del THz, es el sector de las telecomunicaciones. Actualmente se utilizan frecuencias de radio, microondas (*Wi-Fi*), e infrarrojo (*fibra óptica*). Hay un salto entre las microondas y el infrarrojo. Ese salto es justo la **brecha del THz**. La banda del THz, sería la última barrera que hay antes de llegar a la fibra óptica, lo que **puede ser interesante para las comunicaciones inalámbricas** [DE LEÓN]. Gracias a la implementación de la radiación en el rango del THz, **aumentaríamos el ancho de banda**. Es realmente necesario en la actualidad debido a la saturación del mercado. Otra ventaja es que **se ganaría velocidad de transmisión de datos respecto de otras transmisiones inalámbricas**, que podría utilizarse para garantizar altas velocidades de datos, fiabilidad y seguridad de las redes de distribución de transporte de los sistemas móviles 5G en el rango de terahercios y la eliminación de interferencias intencionales [ILCHENKO].

Los problemas o retos que plantea actualmente la implementación del uso de ondas electromagnéticas dentro del rango del THz en el área de las telecomunicaciones son variados. Tenemos por un lado **la gran absorción de este tipo de ondas por parte de la atmósfera** (*principalmente el agua*). La pérdida de señal con la distancia es tan grande que a día de hoy resulta inviable una comunicación inalámbrica dentro del planeta en este rango de frecuencias. Otro problema que presenta, es **la falta de potencia de las fuentes actualmente existentes**, que sumado a la gran absorción, hace que toda la señal se pierda a distancias pequeñas para considerarlo una alternativa viable. Un problema que hay que tener en cuenta, es **la penetración en los materiales**. Las ondas electromagnéticas en el rango del THz, (*dependiendo del material*) penetran relativamente poco en la materia, por lo que no conseguiría atravesar muchos materiales, como, por ejemplo, las paredes de las viviendas, lo que puede llegar a ser incómodo y poco práctico para el uso comercial.

Astronomía y astrofísica: La importancia del rango del THz también da un salto hacia el espacio. **Muchos procesos químico-físicos tienen lugar en espectro del THz**. Se ha comprobado que hay modos de vibración de algunas moléculas en el rango de los THz, así como interacciones débiles entre moléculas que ocurren en este rango. Por otro lado, el espectro del cuerpo negro se localiza también en este rango. **La identificación y estudio de los procesos astronómicos a frecuencias de las ondas milimétricas y submilimétricas son de gran importancia para tratar de entender cómo se formaron las galaxias e incluso cómo se originó el Big-Bang** [DROUIN], [VAN EXTER]. Debido a ello, hoy en día la mayoría de los observatorios astronómicos poseen sistemas telescópicos del rango del THz.

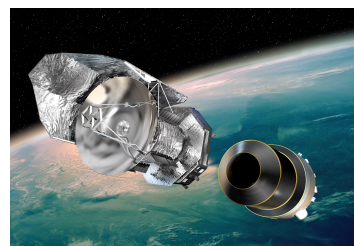


Figura 8: *Telescopio espacial Herschel.*

El estudio de moléculas como son los hidruros ligeros, que contienen N, O, y C, y que trazan los **primeros pasos de la química interestelar**, constituyen excelentes pruebas de la interacción entre

fases atómicas y moleculares del medio interestelar. Por ejemplo, el amoníaco (NH_3) fue la primera molécula detectada en el medio estelar en la región de THz [CHEUNG].



Figura 9: *Satélite artificial AURA.*

Teledetección: Otro de los usos de la tecnología en el rango de la frecuencia del rango del THz, es la espectroscopía de THz para detectar la presencia de ciertos elementos presentes en nuestra atmósfera [WATERS]. **La radiación milimétrica y submilimétrica es sensible a especies radicales**, como, por ejemplo, los enlaces OH . También es útil para **detectar la presencia de nubes y diferenciarlo del humo de un incendio**, por ejemplo. El sistema de observación terrestre “Microwave Limb Sounder” (EMLS) utiliza el espectro de THz para llevar a cabo la monitorización del clima desde el lanzamiento del satélite AURA. El sistema realiza observaciones radiométricas en las órbitas cercanas al satélite. Gracias a las mediciones del satélite, **puede hacerse un seguimiento diario de la capa de ozono, y presencia de especies químicas en el rango del THz.**

Defensa: La espectroscopía de THz es una tecnología con un gran potencial en temas de defensa. Una de las características más esperanzadoras, es la posibilidad de **identificación de sustancias peligrosas**, como explosivos, drogas u objetos ocultos que puedan ser peligrosos, ya que muchas especies químicas peligrosas tienen actividad en el rango del THz. Desde hace algunos años, se ha venido implantando **escáneres** que trabajan a la frecuencia del THz en algunos aeropuertos con el fin de mejorar la seguridad de las personas. También está bajo estudio la **invisibilidad óptica** [ÁLVAREZ]. La invisibilidad óptica permitiría construir elementos pasivos de seguridad militar que podría dar cierta ventaja sobre el enemigo [WANG], [PAWAR]. Actualmente se está trabajando en el rango infrarrojo y THz.



Figura 10: *Señal de peligro biológico.*

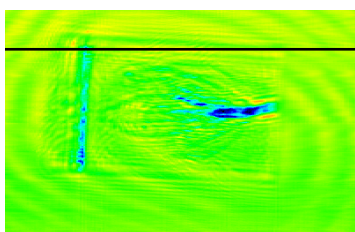


Figura 11: *Inspección de alimentos con radiación THz.*

Industria agroalimentaria: En una sociedad cada vez más exigente y desarrollada, en la que la seguridad y calidad de los alimentos es siempre una preocupación, la industria agroalimentaria busca nuevas formas de asegurar la calidad de los productos. Busca nuevos métodos más rápidos, económicos y efectivos con los que asegurar la calidad de los productos [VILLAFUERTE]. Por lo general, los métodos de operar, son métodos lentos, destructivos y finalmente caros. Una alternativa a esta última forma de operar, es con el monitoreo a través de la radiación milimétrica y submilimétrica. **La radiación en el rango de los THz es capaz de atravesar algunos materiales como el cartón y los plásticos, lo que nos permite ver a través de los envases.** Podemos detectar, por ejemplo, la presencia de cuerpos extraños que se hayan mezclado accidentalmente con el producto. Otra funcionalidad que tiene la radiación en el rango de los THz, es que **es capaz de penetrar en algunos alimentos, pudiendo revelar detalles morfológicos, incluso químicos, lo cual puede ser interesante para conocer el estado del producto antes de su comercialización.**

Salud y medicina: Los modos vibracionales colectivos de muchas proteínas y ADN son sensibles a la radiación en el rango de los THz [WU], [LI 2]. Esto nos permite ahondar en un mayor análisis de los espectros, **nos permite complementar la información obtenida mediante la espectroscopía infrarroja**. Debido a que la radiación electromagnética en el rango del THz interacciona con los enlaces intermoleculares, en especial con los enlaces de hidrógeno intermoleculares, aportan una huella dactilar única de la estructura molecular, lo que puede ser útil para investigar la dinámica molecular. El uso de radiación THz en biología aparece como una técnica prometedora. Se ha visto la capacidad de distinguir entre hebras simples y dobles de ADN debido a cambios asociados en el índice de refracción [TANG].

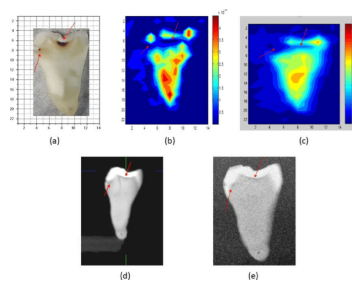


Figura 12: *Detección de caries en etapas tempranas gracias a la radiación THz.*

Hay interés en las **empresas farmacéuticas** por el rango del THz. Se ha conseguido distinguir diferentes formas polimorfas de diversos fármacos debido a la sensibilidad a las vibraciones intermoleculares e intramoleculares en diferentes especies químicas [PAWAR]. Tras la purificación, las moléculas de fármacos a menudo cristalizan en diferentes formas polimórficas, las cuales pueden ser identificadas mediante espectroscopía de THz puesto que sus espectros son diferentes [ERMOLINA]. **En dermatología**, hay un interés en esta banda de frecuencia para **detectar carcinomas**. El melanoma en el rango del THz tiene un índice de refracción diferente y un coeficiente de absorción más alto que el tejido sano de la piel. Por otro lado, la pequeña penetración de la radiación en el rango del THz sobre la piel, **permite evaluar quemaduras o enfermedades como psoriasis**. **En oncología**, la tecnología THz tiene el potencial de mejorar en gran medida. La biopsia convencional y la cirugía asociada al identificar con mayor precisión las áreas que se extirparán. **Puede resultar una alternativa a los rayos X en la toma de imágenes de algunas muestras**, ya que a diferencia de los rayos X, la radiación de THz no tiene energía suficientemente como para dañar los tejidos y el ADN.

Patrimonio y cultura: Un campo en el que es aplicable esta tecnología, es la conservación y estudio del patrimonio. Debido a que las ondas electromagnéticas del rango del THz son capaces de penetrar en los materiales y obtener información debido a la interacción con los enlaces y vibraciones moleculares, **puede ser útil para detectar compuestos químicos presentes**. Otra posible utilidad, es reconstruir tridimensionalmente con ayuda de la radiación THz, objetos de alto valor cultural. La radiación THz no es lo suficientemente energética para dañar las muestras, por lo que resulta una técnica no invasiva interesante [LINK 22].



Figura 13: *Análisis de un lienzo con radiación THz.*

5. Materia biológica

Nuestro estudio está enfocado al sector agroalimentario, por lo que nuestras muestras son compuestos biológicos, cuyas estructuras pueden llegar a ser muy complejas. Vamos a irradiar alimentos con ondas electromagnéticas y vamos a tratar de explicar qué se ve y por qué se ve así. Dado que hay muchas biomoléculas distintas, de muy distinta naturaleza, en nuestro estudio vamos a tener que generalizar y hablar de un tipo de moléculas en su conjunto. Para ello, hemos clasificado las moléculas en tres de los cuatro principales tipos de biomoléculas: **Glúcidos, prótidos y lípidos** [WANG], [CASTRO], [ARMENDANO]. Hemos descartado los ácidos nucleicos, porque requeriría un estudio aparte, ya que en las tablas nutricionales de los alimentos no vienen reflejado los ácidos nucleicos y no tenemos una forma clara de conocer la concentración. Aunque no se mencionen, los ácidos nucleicos interaccionan activamente con la radiación electromagnética en el rango del THz [BYKHOVSKI], [WU]. Se ha demostrado que existen modos de vibración en el rango de los THz con el que se ha podido observar la dinámica nuclear de macromoléculas como el ADN.

5.1. Glúcidos



Figura 14: Nos lo encontramos en alimentos cotidianos como las pastas, harinas, frutas, azúcares, tubérculos, etc.

Los glúcidos son una clase de biomoléculas que van a estar involucradas en la interacción con la radiación electromagnética milimétrica. Están formados en su mayor parte de átomos de carbono e hidrógeno y en menor proporción oxígeno. Los glúcidos tienen enlaces químicos covalentes por lo que los electrones van a estar fuertemente ligados a las moléculas. Se los conoce también como carbohidratos debido a su contexto histórico. Al principio se los conocía como moléculas ricas en carbonos hidratados, sin embargo los glúcidos se extienden más allá. Se fue descubriendo que había moléculas con las mismas características químicas cuyos carbonos no sólo están unidos a moléculas de agua, sino que también están unidos a otros grupos funcionales químicos. Evitaremos usar el término *azúcar* ya que está reservado únicamente para los glúcidos más simples, entre los que se encuentra

la sacarosa o como comúnmente se conoce, *azúcar de mesa*. Dentro de esta clase de biomoléculas hay varias subclases. Según la complejidad, podemos referirnos a ellos como: **Monosacáridos, disacáridos u oligosacáridos y polisacáridos** [OH], [LINK 4].

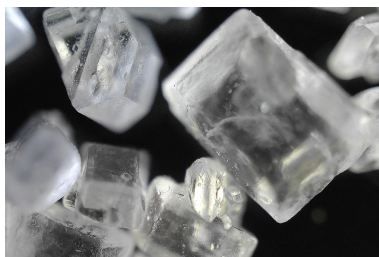


Figura 15: Microfotografía de cristales de azúcar.

5.1.1. Monosacáridos

Son los glúcidos más simples. Están formados por una sola molécula, por lo tanto no pueden ser hidrolizados² por glúcidos más pequeños. Poseen de tres a ocho átomos de carbono y su fórmula empírica es $(CH_2O)_n$, con $n \geq 3$, $n \in \mathbb{N}$ [WEININGER], [MONGE]. Los monosacáridos se clasifican de acuerdo a tres características diferentes: La posición del grupo carbonilo, el número de átomos de carbono que contiene y su quiralidad³. Algunos ejemplos de monosacáridos son: **Glucosa, fructosa, galactosa y glucosamina**, que nos encontraremos en muchos alimentos. Son **moléculas que presentan momento dipolar permanente** con una relativa baja masa molecular. Debido a su pequeño tamaño **podrán orientarse con los campos eléctricos externos con relativa facilidad** [POCE] (*más información en el anexo E*). Por otro lado, por poseer una temperatura, las moléculas estarán vibrando, y por lo tanto, tendrán ciertos **modos de vibración** asociados. Esto sucede a nivel individual y a nivel colectivo, por lo que **hay que pensar a varias escalas**. Existen más monosacáridos que se encuentran en los alimentos, hemos mencionado únicamente los más destacados por motivos de extensión.

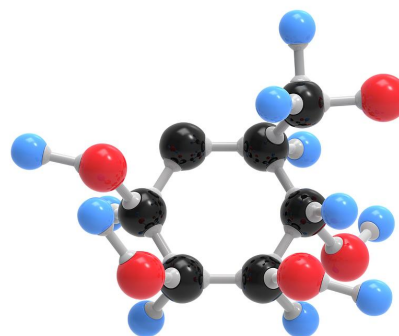


Figura 16: Representación de una molécula de glucosa.

5.1.2. Disacáridos

Los disacáridos son un tipo de glúcido formado por la unión de dos monosacáridos. Vamos a mencionar únicamente los disacáridos más importantes: **Maltosa, lactosa y sacarosa**. Son moléculas hidrolizables que **poseen momento dipolar permanente**⁴. Esta capacidad de hidrolizarse hace que tengamos combinaciones de monosacáridos cuando la molécula se rompe. Tienen una composición molecular $C_{12}H_{22}O_{11}$ [MONGE]. Tienen una masa mayor que los monosacáridos. Esto afectará a sus movimientos a la hora de polarizarse, al igual que afectará a los movimientos vibratorios. Finalmente esto se traduce en una distinta interacción con la radiación electromagnética que vamos a irradiar. El azúcar (*sacarosa*) puede encontrarse también formando cristales moleculares (*estructura monoclinica*), como es el azúcar de mesa [QUINTANA]. **Al formar un cristal, afectará muy significativamente a los grados de libertad** y, por lo tanto, el enfoque debe ser distinto.

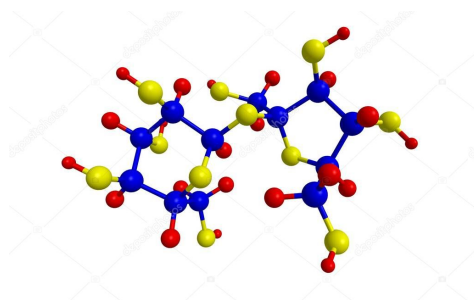


Figura 17: La sacarosa es el edulcorante más utilizado del mundo, formada por dos moléculas de glucosa.

²La palabra **hidrólisis** es una composición de los vocablos **hidro** (*agua*) y **lisis** (*disolución*) cuyo significado completo es la descomposición de una molécula por acción del agua.

³**Quiralidad**: Dicho de una estructura o de un objeto: Que no es superponible con su imagen especular.

⁴**Polaridad**: Es una propiedad de ciertas moléculas que resulta de la distribución desigual de cargas eléctricas en la molécula. En una molécula polar, existe una separación de cargas eléctricas, creando un polo positivo y un polo negativo en la molécula.

5.1.3. Polisacáridos

Los polisacáridos son glúcidos formados por más de dos monosacáridos. Son el grupo más abundante dentro de los glúcidos. Son el principal componente estructural de las plantas. Presentan una elevada masa molecular a diferencia de los monosacáridos y disacáridos, eso implicará que su frecuencia natural de vibración sea menor. Vamos a mencionar dos tipos de polisacáridos, **almidón y celulosa**, ambos muy importantes ya que van a estar muy presentes en los alimentos que vamos a irradiar. El **almidón** está compuesto por **amilosa y amilopectina** en una proporción 20% y 80%, respectivamente [RUÍZ 2]. Las moléculas de amilosa están compuestas por un tamaño muy variable de moléculas de glucosa unidas por enlaces glicosídicos formando una hélice [GÓMEZ]. Las moléculas de amilopectina se unen a la cadena principal en cadenas ramificadas formadas a partir de unidades de glucosa. La **celulosa** es el componente estructural de las paredes celulares de las plantas [TREJO]. La celulosa es una molécula poco ramificada y se parece en su estructura a la amilosa. Está presente en las verduras, frutas, frutos secos, cereales integrales y legumbres enteras, por lo que va a estar muy presente, en mayor o menor medida, en los alimentos que nosotros vamos a ver. La celulosa tiene una alta afinidad con el agua, pero es completamente insoluble en ella. Tiene un enorme tamaño. Su gran tamaño va a afectar en el movimiento. Las frecuencias que nosotros vamos a aplicar sobre los alimentos son muy altas como para que las moléculas polares grandes puedan seguir el ritmo de las oscilaciones del campo eléctrico externo.

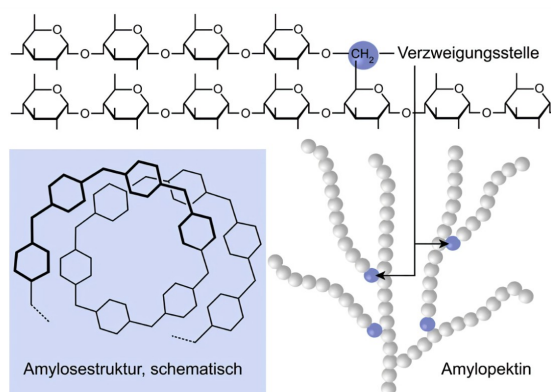


Figura 18: La amilopectina es un polisacárido que constituye alrededor del 75% de los almidones más comunes.

5.2. Prótidos:



Figura 19: Nos los encontramos en alimentos como carnes, pescados, leche, huevos, frutos secos, etc.

Dentro de las cuatro clases de biomoléculas, se encuentran los **prótidos**. De acuerdo a su complejidad estructural, los prótidos pueden ser clasificados en tres categorías: **Aminoácidos, péptidos y proteínas**. Los prótidos son compuestos orgánicos formados por elementos de carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno, aunque a veces también pueden llevar elementos como azufre, fósforo, hierro, magnesio y cobre [LINK 14]. Están formados por aminoácidos, que se unen a otros aminoácidos a través de "enlaces peptídicos". Debido a la enorme variedad que hay de aminoácidos y proteínas, no podemos generalizar y va a haber un amplio abanico de posibles interacciones con la radiación electromagnética milimétrica y submilimétrica

(rango del THz) [WANG], [POPP], [SHERWIN]. Tendrán una interacción importante con la interacción de la radiación milimétrica cuando irradiemos a los alimentos. Nosotros mencionaremos mayormente a las proteínas, puesto que, en los envases de los alimentos, son las que vienen reflejadas.

5.2.1. Aminoácidos

Los aminoácidos **son las unidades básicas que forman las proteínas**. Su denominación responde a la composición química general que presentan [LINK 15]. Su estructura responde a un grupo amino ($-NH_2$) y otro carboxilo o ácido ($-COOH$) unidos a un carbono. Las otras dos valencias de ese carbono quedan saturadas con un átomo de hidrógeno ($-H$) y con un grupo químico variable al que se denomina radical ($-R$). Los radicales confieren al aminoácido unas características propias. Por ello, estos radicales se utilizan como criterio de clasificación de los aminoácidos. Formando parte de las proteínas existen veinte aminoácidos, que son α -aminoácidos. Existen otros muchos tipos de aminoácidos, pero no se asocian formando macromoléculas. Dentro de las clases de aminoácidos según el grupo funcional que aporta el radical, R, nos encontramos con: **aminoácidos apolares**⁵, **polares con carga**⁶ y **polares sin carga**⁷ (ácidos y bases), por lo que pueden influir de una manera muy diferente en la radiación electromagnética que vamos a aplicar.

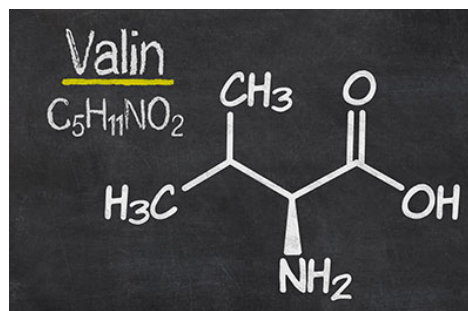


Figura 20: La valina es uno de los veinte aminoácidos codificados por el ADN en la Tierra, siendo uno de los aminoácidos esenciales.

5.2.2. Péptidos

Dos aminoácidos se unen mediante un enlace de tipo covalente $CO - NH$ llamado **enlace peptídico**. Como producto de esta unión, obtenemos un dipéptido [GUILLÉN]. Podemos seguir añadiendo aminoácidos al péptido, porque siempre hay un extremo NH_2 terminal y otro $COOH$ terminal. Si seguimos uniendo aminoácidos a través de enlaces peptídicos, obtenemos un péptido. **Es una cadena corta de aminoácidos** (habitualmente entre 2 y 10 péptidos). A partir de ese número de enlaces peptídicos, se le nombra como **polipéptido** [LINK 16]. El enlace peptídico otorga un carácter parcial de doble enlace que determina la disposición espacial de éste en un mismo plano, con distancias y ángulos fijos. **Como consecuencia, el enlace peptídico presenta cierta rigidez e inmoviliza en el plano a los átomos que lo forman**. Dado que el tamaño puede variar mucho de unos péptidos a otros, presumiblemente no vamos a tener la misma interacción con la radiación emitida con todos los péptidos. Puesto que tienen un grupo amino-terminal y un carboxilo-terminal, y pueden tener grupos R ionizables, los péptidos tienen un comportamiento ácido/básico similar al de los aminoácidos [LINK 17], pudiendo ser un factor a tener en cuenta cuando irradiemos los alimentos.

Human Insulin

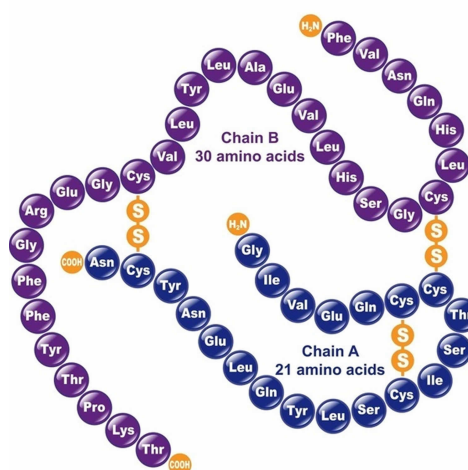


Figura 21: La insulina es una hormona polipeptídica formada por 2 cadenas, una de 21 aminoácidos y otra de 30 aminoácidos.

⁵**Apolar:** Molécula que no tiene un momento dipolar permanente.

⁶**Aminoácidos polares con carga:** Aminoácidos en los que el radical presenta un grupo ácido: presentan momento dipolar permanente y carga neta distinta de cero.

⁷**Aminoácidos polares sin carga:** Aminoácidos en los que el radical es una cadena con radicales que forman enlaces de hidrógeno con el agua: presentan momento dipolar y carga neta igual a cero.

5.2.3. Proteínas

Si seguimos uniendo péptidos, llegamos a tener estructuras más complejas llamadas proteínas [CASTRO], [GUILLÉN]. Las proteínas se definen en cuatro niveles estructurales (*primaria, secundaria, terciaria y cuaternaria*). Las proteínas son moléculas cuyos **modos de vibración colectivos están relacionados con la estructura activa en el rango del THz** [XU], [MARKELZ], [SHERWIN]. Vamos a tener absorción de las ondas electromagnéticas del rango del THz correspondiente a esos modos de vibración, lo que se traducirá en una menor transmitancia. Las proteínas son prácticamente inertes a frecuencias de microondas pero tienen cargas superficiales que pueden unirse a moléculas de agua (*agua ligada*) o sales debido a los radicales ($-R$) libres de los aminoácidos que, al ionizarse, establecen enlaces débiles (*enlaces de hidrógeno*) con las moléculas de agua [LINK 18]. **Las propiedades dieléctricas de las proteínas dependen en gran medida de sus cadenas laterales, las cuales pueden ser apolares o polares.** Es importante mencionar que **la desnaturalización de las proteínas afectará a las propiedades dieléctricas** ya que debido a la desnaturalización de las proteínas se producen cambios en la estructura de las mismas, así como en el contenido de agua libre del sistema, afectando por ello significativamente a las propiedades dieléctricas.

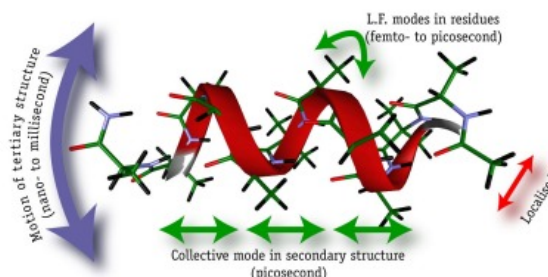


Figura 22: Representación esquemática del dinamismo de una proteína en general en función de su escala.

5.3. Lípidos



Figura 23: Se encuentran en alimentos como carnes, pescados, aceites, frutas, semillas, etc.

Los lípidos forman un conjunto biomolecular. Están compuestos, mayormente, por carbono, hidrógeno y oxígeno. En algunos casos, pueden estar formados además por más elementos como el fósforo, nitrógeno y azufre [LINK 6]. La familia de los lípidos es muy amplia, algunos de los más importantes son: **Triglicéridos, Colesterol, ácidos grasos, fosfolípidos, ceras, glucolípidos y eicosanoides.** La gran heterogeneidad estructural de los lípidos dificulta la clasificación. Los ácidos carboxílicos de cadena larga y los ácidos grasos forman parte de la inmensa mayoría de los lípidos [MACARULLA]. Nosotros nos centraremos en los ácidos grasos, en los que hay dos grandes grupos: **grasas saturadas** y de **grasas insaturadas** [LINK 7], ya que es la información que encontramos en los envases de los alimentos que vamos a irradiar (*aunque también pueden ser lineales, ramificados y alicíclicos*). La tabla nutricional sólo aporta información general, por lo que nuestros resultados y explicaciones van a ser generales. Se ha demostrado que **distintos tipos de aceites muestran diferentes índices de refracción con la radiación THz**, lo que puede ser interesante para la clasificación de los aceites [HU].

5.3.1. Ácidos grasos saturados e insaturados

Las **grasas saturadas** son un tipo de grasa que **no cuenta con dobles enlaces o insaturaciones en la estructura química de sus ácidos grasos saturados**. Esta característica afecta a factores como el punto de fusión [MACARULLA]. A temperatura ambiente suelen ser sólidos. De forma general, **las grasas saturadas se encuentran mayormente en alimentos de origen animal**, como los huevos, lácteos, carnes y pescados. Sin embargo, también tienen cierta presencia en el reino vegetal formando parte de alimentos, como, por ejemplo, en el coco, el cacao o el aceite de palma [LINK 7]. Las **grasas insaturadas** son un tipo de grasa que **contiene dobles enlaces químicos en la estructura de sus ácidos grasos**. Estos dobles enlaces o insaturaciones pueden variar de posición y número, dando lugar a grasas **monoinsaturadas** cuando únicamente existe un doble enlace y a grasas **poliinsaturadas** cuando estamos ante varios dobles enlaces. A diferencia de las grasas saturadas, **las grasas insaturadas predominan en el reino vegetal**, siendo especialmente relevante su concentración en alimentos como el aceite de oliva, aguacate, frutos secos y semillas. **Los ácidos grasos insaturados tienen menos enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals debido al codo de su cadena** [LINK 20]. Suelen ser líquidos a temperatura ambiente.

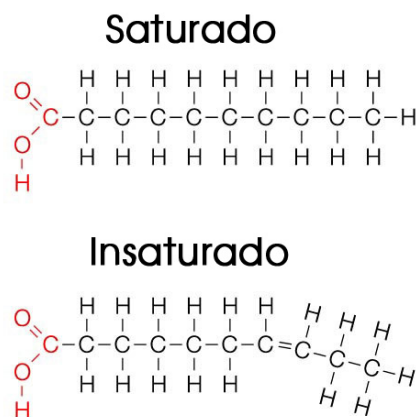


Figura 24: Los triglicéridos están presentes en el organismo humano y en los alimentos cotidianos.

Los ácidos grasos tienen una región apolar hidrófoba⁸ y una región polar hidrófila⁹ [LINK 19]. Las moléculas son de muy variado tamaño, por lo que no todas las moléculas tendrán los mismos tiempos de relajación. Por otro lado, **las colas hidrófilas tienden a juntarse formando enlaces de Van der Waals** [LINK 19]. Las ondas electromagnéticas en el rango del THz, interactúan con los enlaces débiles como son los enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals [TAKAHASHI], [BANERJEE] lo que indica que es posible que vayamos a tener una cierta interacción cuando irradiemos las muestras.

Existe **otro tipo de grasa que se obtiene de forma artificial**. Nos lo encontramos en la elaboración de **productos ultraprocesados** [LINK 7]. Cuando los sustituyentes unidos a los carbonos del doble enlace ocupan posiciones similares en cada uno de los dos carbonos, tenemos el isómero que es conocido como **cis** y cuando están en lados opuestos, se llama isómero **trans** [VALENZUELA]. El cuerpo humano carece de las enzimas apropiadas para descomponer la configuración *trans*, por esta razón, son peligrosas e insanas. Suelen estar ocultas en el etiquetado. Los isómeros **suelen tener propiedades físicas y químicas diferentes** [MACARULLA 2]. Podría suponer una buena línea de investigación, ya que quizás podríamos diferenciarlas debido a una interacción diferente con la radiación en el rango del THz.

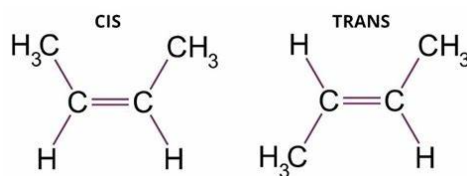


Figura 25: Las grasas *cis* y *trans*, tienen idéntica fórmula química, tan sólo se diferencian en la posición de sus átomos (son isómeros).

⁸**Hidrófobo,ba:** dicho de una materia o una sustancia: due no adsorbe el agua [Def: Rae a 19 Feb. 2023].

⁹**Hidrófilo,la:** dicho de una materia o una sustancia: due adsorbe el agua con gran facilidad [Def: Rae a 19 Feb. 2023].

6. Instrumentación

Nuestro sistema de equipos, consiste en dos **fuentes de radiación electromagnética**, un **espejo colimador** y un **sensor de radiación milimétrica**. Dentro de nuestro equipo podemos añadir la parte de Software aunque no entraré en detalle. Los dispositivos van anclados a una estructura rígida de aluminio, lo suficientemente estable para evitar las vibraciones mecánicas todo lo posible.

Fuentes de radiación electromagnética: Nosotros vamos a poder manejar dos fuentes de radiación electromagnética, una fuente de 100 GHz y otra fuente de 300 GHz. Ambas pertenecen a la marca TeraSense.

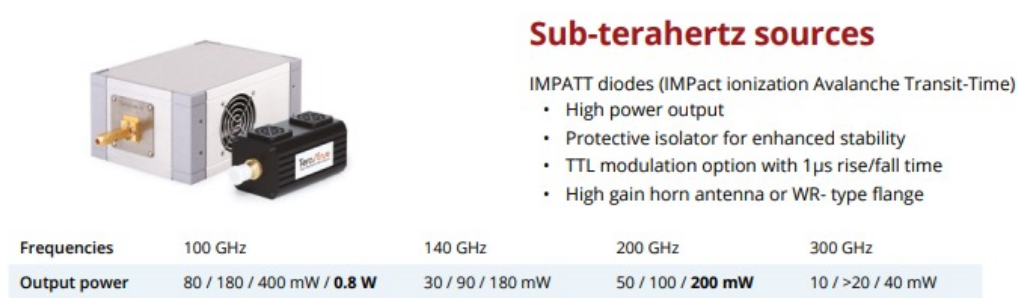


Figura 26: Diferentes fuentes TeraSense.

En la *figura 26* podemos ver la potencia suministrada por las fuentes de los dos modelos que vamos a utilizar. En concreto nosotros **vamos a operar con la fuente de 100 GHz con 0,8 W**. Por otro lado, **vamos a trabajar con la fuente de 300 GHz que nos proporciona 40 mW** de potencia. Esto nos da una idea de la baja potencia con la que vamos a operar. Esto tiene sus consecuencias. Vamos a tener una intensidad de radiación muy baja, por lo que vamos a tener que aprovechar toda la radiación de la fuente que podamos. A la salida de la fuente, se colocará una antena del tamaño de la longitud de onda, de tal forma que guíe nuestro haz en dirección al espejo. La salida de la onda por esta guía ha de ser lo más suave posible para que no haya dispersión en los bordes. Por esa razón, sobre todo la fuente de 100 GHz, tiene una forma de cono. Ha de abrirse de forma exponencial.



Figura 27: Fuente que produce ondas electromagnéticas a 100 GHz de frecuencia.

La fuente de 100 GHz va a generar ondas electromagnéticas capaces de atravesar algunos materiales. Va a haber una transmitancia y una absorbancia. **La información que podemos obtener va a depender de las interacciones con la materia. Esas interacciones dependen de la escala que se utilice.** Las ondas electromagnéticas de 100 GHz (3 mm), van a interactuar con fenómenos físico-químicos que se producen a esa escala como pueden ser las vibraciones colectivas de ciertas moléculas o enlaces moleculares débiles [XU], [SHERWIN], [TAKAHASHI], [BANERJEE]. Debido al tamaño de la longitud de onda de las ondas producidas por esta fuente, vamos a encontrarnos fenómenos de difracción muy visibles, ya que muchos alimentos tienen dimensiones de mismo orden, como, por ejemplo, las legumbres.

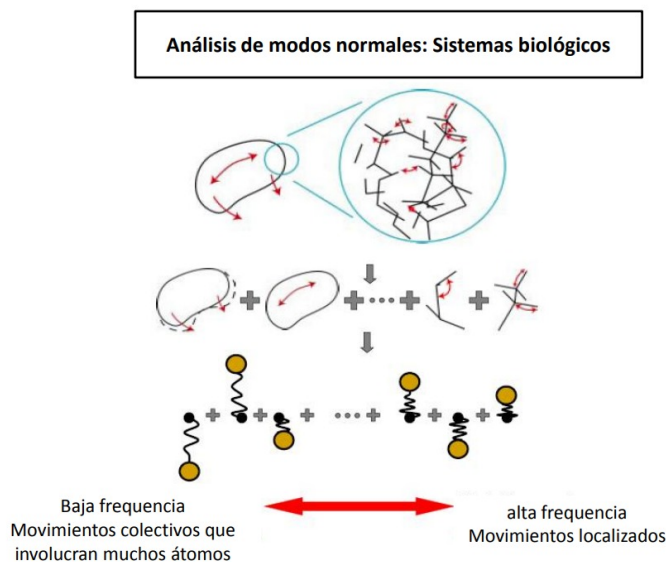


Figura 28: Modos de vibración colectivos e individuales.

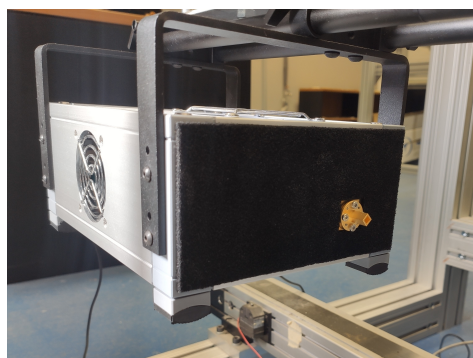


Figura 29: Fuente que produce ondas electromagnéticas a 300 GHz de frecuencia.

La fuente de 300 GHz presentará problemas diferentes a los de la fuente de 100 GHz y en otros casos serán los mismos problemas. **Tenemos una longitud de onda de 1,0 mm.** Como consecuencia, los patrones de difracción son menos vistosos (*aunque igualmente existentes*). Al aumentar la frecuencia con respecto a la fuente de 100 GHz, aumentarán también las interacciones con la materia. Habrá una mayor interacción con los modos de vibración colectivos de las moléculas. Habrá también una mayor interacción con los enlaces moleculares. La fuente de 300 GHz tiene una potencia de salida muy baja, lo que hará que tengamos problemas para ver detalles en algunos alimentos con escasa transmitancia. Por este motivo, tenemos que colimar muy bien el haz dirigido al sensor.

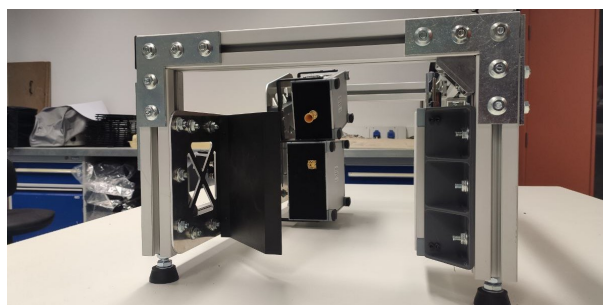


Figura 30: Disposición de fuentes (prueba).

Espejo: La función que va a tener el espejo metálico en nuestro experimento va a ser **colimar el haz de ondas electromagnéticas** y así poder concentrar el haz en un determinado área y con ello obtener una mayor irradiancia¹⁰. El espejo está constituido por una lámina metálica con una forma paraboloide elíptico. Gracias a la geometría del espejo, podemos recoger toda la radiación que sale de la fuente, concentrarla y redirigirla hacia el sensor formando una línea. Esto es útil y necesario porque nuestro sensor es lineal. El espejo debe ser un **material conductor** necesariamente para que se puedan reflejar las ondas electromagnéticas, (*más información en el anexo A*).

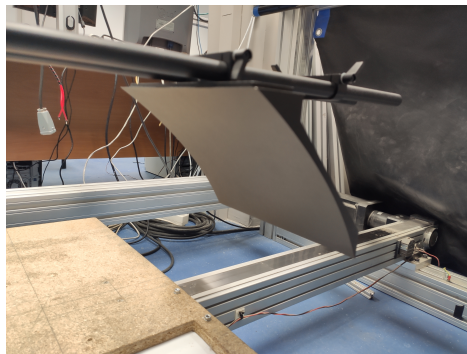


Figura 31: Espejo.

Sensor: El detector es una cámara formada por semiconductores (*diodos IMPATT*)¹¹ que cubre los rangos de ondas milimétricas y THz del espectro electromagnético.

Number of pixels:	256 x 1 / 512 x 1	Dynamic range	200
Pixel pitch	0.5 mm	Dimensions, camera	189 x 128 x 80 mm / 320 x 130 x 90 mm
Image acquisition rate	up to 5 kHz (5000 lps)	Dimensions, control unit	205 x 125 x 40 mm
Imaging area	128 x 0.5 mm / 256 x 0.5 mm	Included software	TeraFAST® Viewer C++ SDK, LabView SDK
Sync Out, Sync In	TTL (+5V)	Power supply	24 V, 40 W

Figura 32: Sensor para ondas milimétricas (TeraSense).

Como podemos ver en la *figura 32*, debido al número de píxeles¹², vemos que se trata de un **sensor lineal**. Tenemos 256 x 1 píxeles. **Nos encontramos con una resolución¹³ bastante escasa**. Si queremos una mayor resolución, necesitamos más píxeles, por lo que necesitaremos un sensor más grande. La radiación tiene que abarcar una mayor área, y, en consecuencia, tendremos una pérdida de potencia. La necesidad de hacer un sensor más grande, es que no se pueden hacer los píxeles (*unidades de área*) más pequeños porque, **como mínimo, debe caber una longitud de onda entera en ese píxel**. Por ejemplo, para la fuente de radiación de 100 GHz, tenemos una longitud de onda de 3 mm. Necesitamos que cada píxel sea de al menos 3 mm. Se puede "salvar" ese límite mediante el uso de **metamateriales** (*ver anexo F*).

Otro detalle importante que cabe destacar acerca del sensor es su **rango dinámico¹⁴**. Como podemos apreciar en la *figura 32*, tenemos un rango dinámico de 200. Normalmente este dato se suele dar en decibelios. Haciendo las cuentas, $20 \log 200 = 46 \text{ dB}$, tenemos un rango de dinámico de 46 dB. Tenemos un rango dinámico muy bajo. La consecuencia de todo esto es que **vamos a trabajar con muy poco contraste**. La idea para solventar en la medida de lo posible este problema es concentrar el haz lo máximo posible para aprovechar al máximo el rango dinámico. Por esa razón el espejo debe estar muy bien calibrado.

¹⁰**Irradiancia:** Potencia de radiación que incide sobre una superficie determinada. Se mide en $\frac{W}{m^2}$.

¹¹**El diodo IMPATT** toma su nombre del acrónimo inglés **IMP**act ionization **A**valanche **T**ransit **T**ime (en español, Tiempo de Tránsito por Avalanche con Ionización por Choque).

¹²**Pixel:** (*acrónimo del inglés picture element, "elemento de imagen"*), es la menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital.

¹³**Resolución de una imagen:** Indica la cantidad de detalles que puede observarse en la imagen.

¹⁴**Rango dinámico:** Proporción entre las partes más brillantes y las más oscuras de una imagen, desde el negro puro hasta el blanco más claro.

7. Medidas

7.1. Fuente de 100 GHz

Agua líquida: Para empezar, vamos a ver cómo se comportan las ondas electromagnéticas con una frecuencia de 100 GHz con el agua, ya que el agua está presente en todos los alimentos (*aunque no sólo en estado libre, sino que también como agua ligada*). Sabemos que las moléculas de agua son moléculas polares. Las moléculas de agua, ante un campo eléctrico externo, se van a orientar con el campo externo. Cada dipolo tiene su propio campo eléctrico y, al estar algunos de esos dipolos orientados, esos campos eléctricos de origen dipolar se van a sumar. Dado que se van a orientar de forma con el campo externo, atenuará al campo externo.

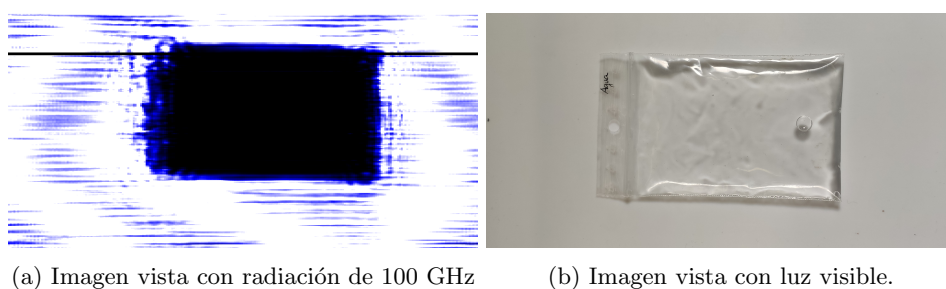


Figura 33: Agua líquida (100 GHz).

La permitividad del agua es muy elevada comparada con la del aire. Debido a ello, como podemos ver, **se atenúa toda la radiación que se dirige al sensor** y, por esa razón, la imagen es completamente negra (*nula información*). Hay que tener en cuenta que el espesor de agua que debe atravesar es bastante pequeño. Tiene aproximadamente un espesor de 0,5 cm. Por otro lado, **no es agua destilada o pura**, sino que **contiene iones en disolución que le dan cierta conductividad**. La energía de la onda electromagnética se invertirá en mover cargas eléctricas (*iones*) atenuándose las ondas electromagnéticas antes de llegar al sensor.

Agua congelada: Ahora vamos a ver qué ocurre con el agua cuando la congelamos. **Las moléculas de agua al congelarse forman cristales**. Al congelar el agua se reduce drásticamente el número de grados de libertad de las moléculas, que ya no pueden orientarse con la misma libertad debido a las fuerzas de enlace con otras moléculas que conforman el cristal.

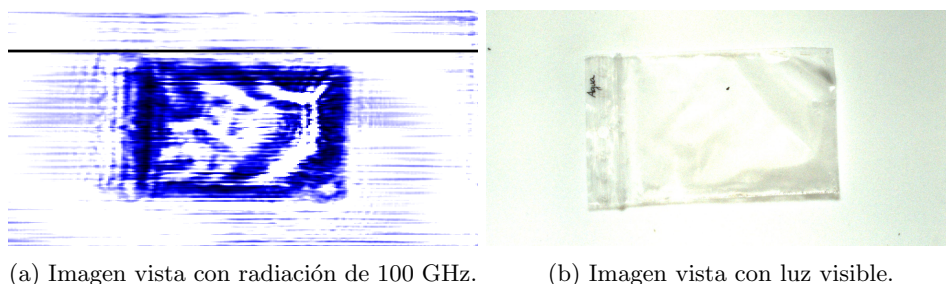


Figura 34: Agua congelada (100 GHz).

Podemos ver en la *figura 34* que **tenemos una gran transmitancia**, se ha vuelto prácticamente transparente. **La permitividad relativa ha cambiado enormemente**. Por otro lado, podemos

ver otros fenómenos. Aparecen zonas sombreadas, siendo estas más oscuras en los bordes. No hay que olvidar que la radiación emitida interacciona con la materia como una onda, por lo tanto, **sufre los fenómenos de difracción, reflexión, transmisión y dispersión**. Entonces, como la superficie no es completamente regular, cabe esperar que haya ángulos de incidencia en los que se produzca reflexión de la onda. Esto es más acusado en los bordes, donde debido a la curvatura tenemos muchos ángulos de incidencia. Tenemos por lo tanto los llamados **efectos de borde**.

Azúcar blanco: A continuación vamos a ver alimentos con **altas concentraciones en glúcidos**. En primer lugar vamos a ver el azúcar blanco. La sacarosa es un disacárido que es soluble en agua gracias a su naturaleza polar. El azúcar blanco, tal y como lo vamos a ver a continuación, se encuentra en **forma cristalina**. Esto es una propiedad muy importante ya que afecta directamente a los grados de libertad de las moléculas. El azúcar blanco es un sólido molecular. Puede haber una pequeña interacción con los enlaces débiles de las moléculas (*fuerzas de Van der Waals y enlaces de hidrógeno*).

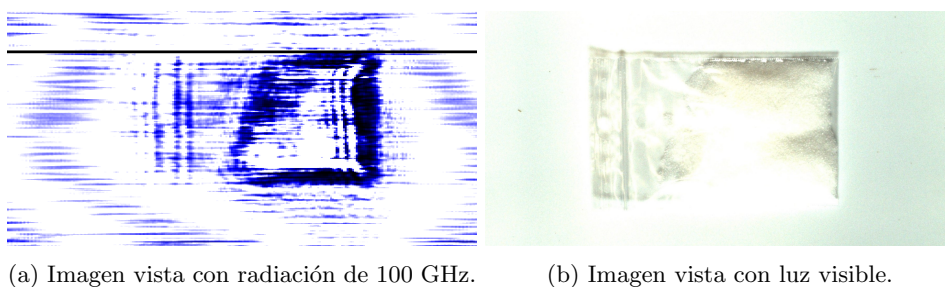


Figura 35: *Azúcar blanco (100 GHz)*.

Podemos decir que tenemos una gran transmitancia, salvo en los bordes debido a los **efectos de borde**. La sacarosa cristalizada interacciona muy poco con las ondas electromagnéticas de 100 GHz, ya que no hay polarizaciones ni conductividad debido a su estructura cristalina. Los cristales moleculares pueden tener ligeras interacciones en el rango de los THz con los enlaces débiles como pueden ser las fuerzas de Van der Waals y enlaces de hidrógeno.

Azúcar moreno: Hemos visto que el azúcar blanco cristalizado es muy transparente a la radiación electromagnética de 100 GHz. Ahora vamos a ver el azúcar moreno. El azúcar moreno, al igual que el azúcar blanco, está compuesto principalmente de sacarosa. En este caso no está refinado, por lo que contiene, además de la sacarosa, fibras vegetales.

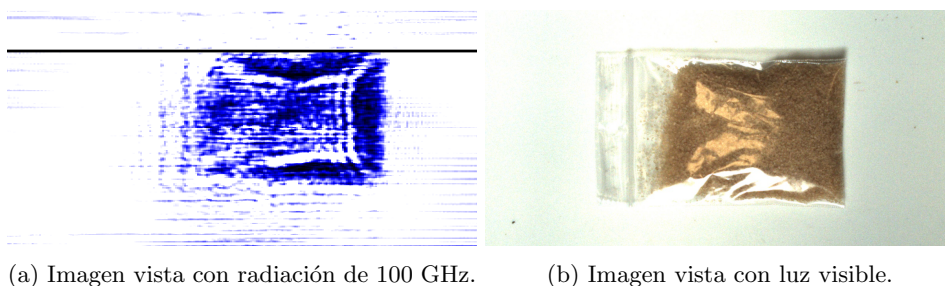


Figura 36: *Azúcar moreno (100 GHz)*.

Notamos un **oscurecimiento de la imagen importante con respecto al azúcar blanco**. La causa más probable de esta diferencia no atiende a la química del compuesto sino que se debe al **tamaño de los granos de azúcar**. El azúcar moreno contiene granos más grandes que el azúcar blanco ($\simeq 1\text{ mm}$) y es muy probable que las ondas interactúen con los granos creando nuevos focos y haya extinciones de onda (*absorción más dispersión*). Es un fenómeno de interferencia ondulatoria.

Azúcar moreno triturado: Dado que el factor más probable de que viésemos oscuro el azúcar moreno es el tamaño de los granos, vamos a probar a triturar los granos de azúcar para hacerlos más pequeños y ver si hay algún cambio.

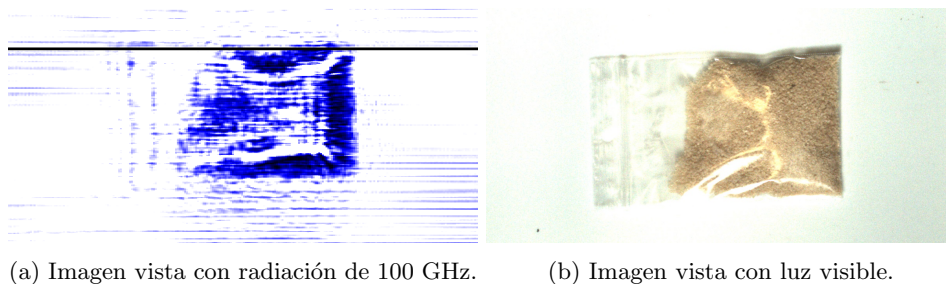


Figura 37: Azúcar moreno con granos más finos (100 GHz).

Efectivamente, hay un cambio notable. En principio, nuestra hipótesis parece ser correcta. **Hay que tener mucho cuidado con el tamaño y geometría de los alimentos que irradiamos** porque puede crear efectos indeseados debido a la naturaleza ondulatoria de la radiación. Tenemos una longitud de onda de 3 mm y cuanto más parecido sea el tamaño del objeto al tamaño de la longitud de onda, mayores efectos de extinción de onda tendremos, puesto que mayores serán las dispersiones.

Miel de flores: Veamos ahora cómo se ve la miel de flores. La miel es un alimento que contiene una **alta concentración de azúcares**. Gran parte de estos azúcares son monosacáridos, como, glucosa y fructosa en su mayoría. También tiene, en menor medida, sacarosa y una **concentración importante de agua**, en torno al 18% en masa del alimento es agua. Esto invita a pensar que la mayoría de azúcares se encuentra en disolución, lo cual, es interesante comprobar qué cambia con respecto al estado cristalino.

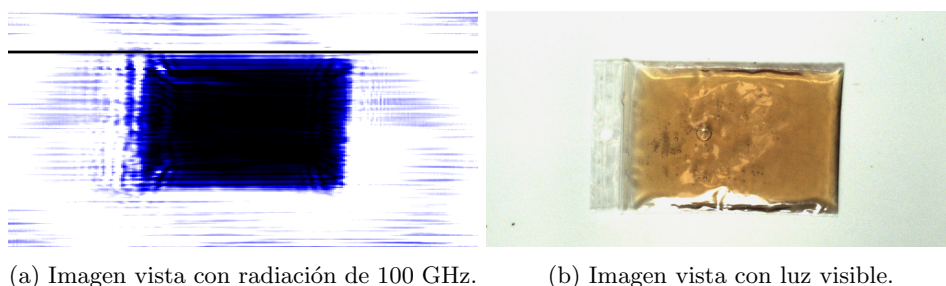


Figura 38: Miel de flores (100 GHz).

La miel de flores es un alimento muy absorbente de la radiación electromagnética a la frecuencia de 100 GHz. Tenemos una imagen prácticamente negra debido a una **permitividad relativa alta**. Podemos ver en los bordes, donde hay un menor grosor, cómo aparece una ligera transmitancia, pero, es recomendable no sacar conclusiones a partir de lo que se ve en los bordes debido a los efectos de borde. Recordemos que contiene en torno a un 18% de agua, que es una sustancia polar con una permitividad grande. Además, los azúcares, que tienen una naturaleza polar, ahora se encuentran en disolución, por lo que tienen los suficientes grados de libertad para orientarse con el campo eléctrico externo, es probable que puedan seguir el ritmo de las oscilaciones del campo eléctrico externo. Las moléculas polares crearían un campo eléctrico de origen dipolar en sentido contrario al campo externo que apantallaría al campo externo. Dado que el azúcar disuelto no forma iones, descartamos una presencia importante de conductividad.

Miel de flores congelada: Hemos visto que la miel de flores es prácticamente opaca frente a la radiación de 100 GHz. Dado que tiene un 18 % de agua, vamos a probar a congelarla y ver si cambia la permitividad al reducir los grados de libertad.

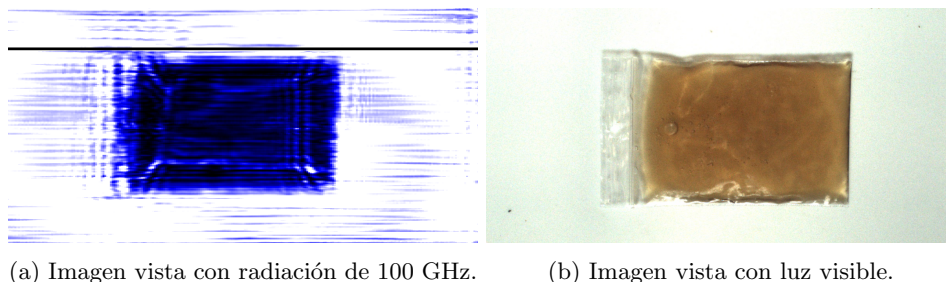


Figura 39: *Miel de flores congelada (100 GHz).*

Al bajar la temperatura lo suficiente como para congelar la miel de flores, notamos una significativa **disminución de la permitividad** con respecto a la miel a temperatura ambiente. Ahora podemos hablar de verdadera transmitancia. Suponemos que los azúcares que se encuentran en disolución tienen mayor libertad de movimiento y pueden orientarse con el campo eléctrico externo debido a su naturaleza polar. Al congelar la muestra, las moléculas encuentran mayor dificultad para orientarse debido al "rozamiento" con las moléculas adyacentes. La dificultad para orientarse puede deberse a las moléculas de agua, cuyos enlaces de hidrógeno ven acortadas sus distancias debido a una menor agitación térmica.

Chocolate a la taza: Vamos a ver ahora una porción de chocolate a la taza. Según la tabla de valores nutricionales tenemos un 37,9 % en masa de grasas, de las cuales 23,4 % son saturadas, contiene un 41,9 % de hidratos de carbono, de los cuales el 0,4 % son azúcares, un 8,2 % de fibra y un 7,4 % de proteínas. Los ingredientes son: Manteca de cacao, cacao desgrasado en polvo, emulgentes, y aromatizantes. Tenemos un alimento con abundantes grasas e hidratos de carbono.

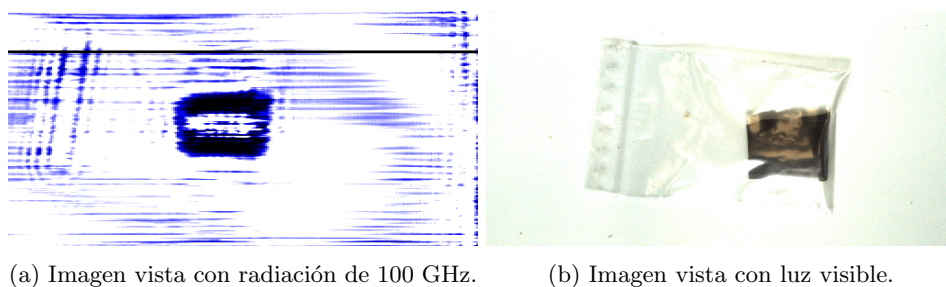


Figura 40: *Chocolate a la taza (100 GHz).*

Vemos que tenemos una **gran transmitancia** en el centro de la pieza mientras que en los bordes lo vemos completamente opaco. Es probable que la **geometría** de la pieza de chocolate cause ese **efecto en los bordes**. Tiene una forma de semicilindro, por lo tanto, en los bordes no va a incidir la radiación perpendicular al plano y se van a crear reflexiones y dispersiones haciendo que no llegue radiación al sensor. Si nos fijamos únicamente en el centro, vemos que hay una **gran transmitancia**. Los **hidratos de carbono** (*componente mayoritario*) son muy transparentes al igual que las grasas. Otro factor ondulatorio que debemos tener en cuenta, es la **refracción** que sufre la radiación al penetrar en un medio con un índice de refracción mayor. La radiación cambiará de trayectoria acercándose a la normal del plano de incidencia. Esto haría que haya radiación que no llegue a los bordes, concentrándose una mayor parte de la radiación en torno al centro del material.

Harina de trigo: Dentro del grupo de los glúcidos, vamos a probar con alimentos con concentraciones altas de **almidón**. La harina está compuesta en su mayoría por almidón. Según el envase, tenemos un 71,00 % en masa de hidratos de carbono, de los cuales el 1,70 % son azúcares, (*el resto sería almidón*), por otro lado, tenemos un 3,00 % de fibra, un 2,60 % de grasas de las cuales un 0,50 % son saturadas, un 9,90 % son proteínas, y un 0,02 % de sal. Haciendo una diferencia de porcentajes de la masa reflejada en el envase, podemos ver que tenemos aproximadamente un 13,00 % de agua.

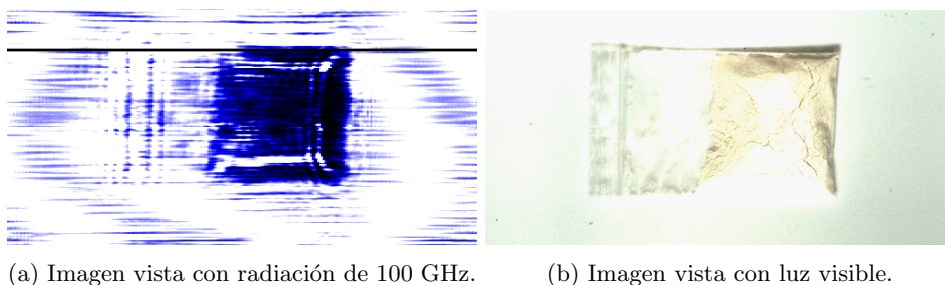


Figura 41: *Harina de trigo (100 GHz)*.

Vemos que la harina de trigo tiene una **absorbancia considerable**, ya que el espesor de la muestra no es muy elevado, luego tiene una permitividad relativa mediana. Tenemos efectos de borde que obviaremos para centrarnos en el centro de la muestra. El almidón es un carbohidrato complejo (*se trata de una macromolécula*) formado principalmente por amilosa y amilopectina. La amilopectina contiene ramificaciones cuyas vibraciones pueden estar en el rango de la frecuencia de la radiación emitida. La radiación sería absorbida incrementando las vibraciones de las moléculas. Por ese motivo, vemos una imagen oscura.

Harina de trigo integral: Ahora vamos a ver la harina integral y las posibles diferencias con la harina blanca. Según la tabla nutricional, tenemos un 3,80 % en masa de grasas, de las cuales el 0,70 % son grasas saturadas, tenemos un 57,00 % de hidratos de carbono, de los cuales el 2,02 % son azúcares, un 15,00 % de fibra, un 12,00 % de proteínas y un 0,01 % de sal. Se trata por lo tanto de un alimento con una **alta concentración de hidratos de carbono**, que presumiblemente la gran mayoría es almidón al igual que la harina blanca.

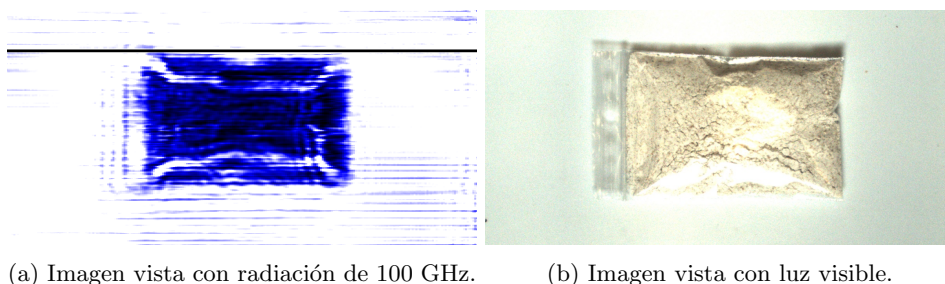


Figura 42: *Harina de trigo integral (100 GHz)*.

Podemos ver que es ligeramente **más transparente que la harina blanca a pesar de que hay un mayor espesor**. La causa más probable de esta menor absorción es que hay un menor contenido de almidón. La harina blanca tiene un 69,3 % de almidón frente a un 54,8 % de almidón de la harina integral, pudiendo ser este el motivo de que haya más transmitancia, ya que se ha sustituido el almidón por una **mayor concentración de fibras** que interactúan débilmente con la radiación de 100 GHz.

Galletas saladas: A continuación vamos a irradiar unas galletas saladas. Las galletas saladas tienen según el envase un 26,0 % en masa de grasas, de las cuales el 2,8 % son saturadas, un 61,0 % de hidratos de carbono de los cuales un 8,7 % son azúcares, un 2,5 % de fibra, un 6,4 % de proteínas y un 2,0 % de sal. Tenemos un alimento con **abundantes hidratos de carbono** (*almidón en su mayoría*) y una **alta concentración de grasas**.

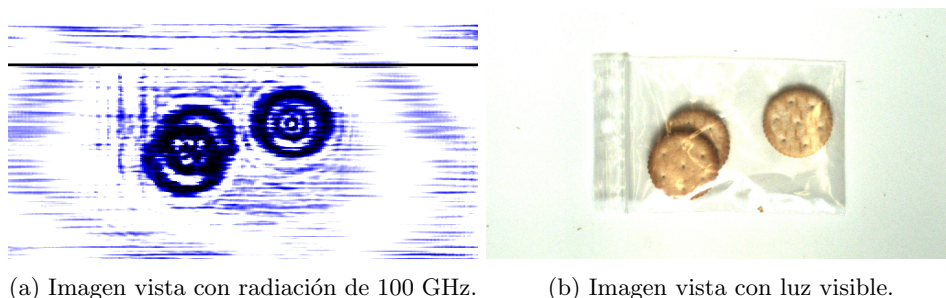


Figura 43: *Galletas saladas (100 GHz)*.

Tenemos unos **patrones de difracción con forma de anillos concéntricos**. Este patrón de difracción está causado por la interacción de las ondas milimétricas (*3 mm de longitud de onda*) con el borde de la galleta, ya que es del orden de magnitud. Nos dificulta la observación de la imagen puesto que nos falsea la verdadera tonalidad que adquiere el dieléctrico.

LEGUMBRES Y CARNES

A continuación vamos a ver alimentos que contengan una relativa **alta concentración de proteínas**. Tenemos, por ejemplo, a las **legumbres y a las carnes**. Hay una diversidad muy grande de proteínas, por lo que tenemos que generalizar en nuestras conclusiones. **El problema de las carnes**, es que acompañado de una abundante concentración de proteínas hay una alta concentración de agua y sales. **El problema de las legumbres** es que vamos a tener un problema con su tamaño y forma. Tenemos una longitud de onda de *3 mm*, por lo que objetos de un tamaño similar, va hacer que tengamos difracciones muy notorias y grandes reflexiones.

Lentejas patrón de difracción: Colocamos unas lentejas esparcidas para que se puedan ver bien los patrones de difracción como consecuencia de la interacción entre la radiación milimétrica y el objeto.

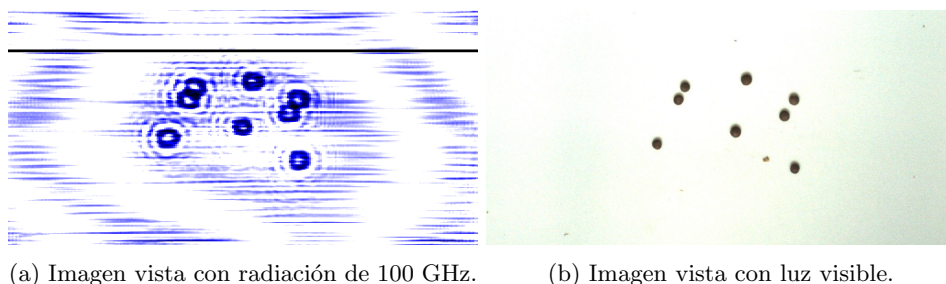


Figura 44: *Difracción causada por las lentejas (100 GHz)*.

Como vemos aparece un **patrón de difracción** con forma de anillos concéntricos. Esto es un problema para la observación. Estas ondas tienden a interferir con las de sus vecinas creando extinciones de las ondas. Cuando acercamos varios objetos a los que les sucede este fenómeno, lo que vamos a ver es una imagen negra como consecuencia de las múltiples **extinciones de onda**.

Lentejas: Las lentejas contienen una alta concentración de proteínas e hidratos de carbono. Leyendo la tabla nutricional del envase, vemos que contiene un 54,0% en masa de hidratos de carbono (*almidón en su mayoría*), contienen un 1,8% de lípidos, de los cuales la mayoría son insaturados. También tiene un 11,7% de fibra alimentaria y un 24,0% de proteínas.

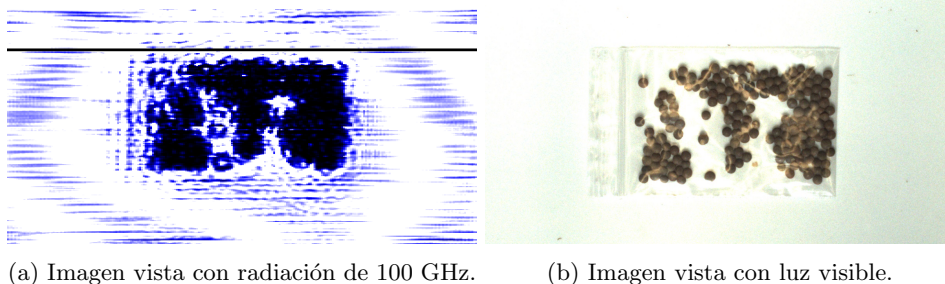


Figura 45: *Lentejas (100 GHz)*.

Debido al tamaño y espesor y composición de las lentejas, deberíamos tener una gran transmitancia. Sin embargo, tenemos una imagen muy oscura. Como hemos argumentado, lo que nos encontramos en la imagen son **extinciones de las ondas** más que una permitividad alta. Es un problema que vamos a ver en otros alimentos.

Proteínas en polvo (*Whey prime protein*): Vamos a ver cómo se ve el polvo de proteína que algunas personas consumen como complemento con el ejercicio físico. Según la tabla nutricional del envase, por cada 100 g de producto, tenemos 5,10% en masa de grasas, un 3,40% de hidratos de carbono, un 85,00% de proteínas y un 0,29% de sal. En principio, la presencia de agua en este alimento es bastante despreciable.

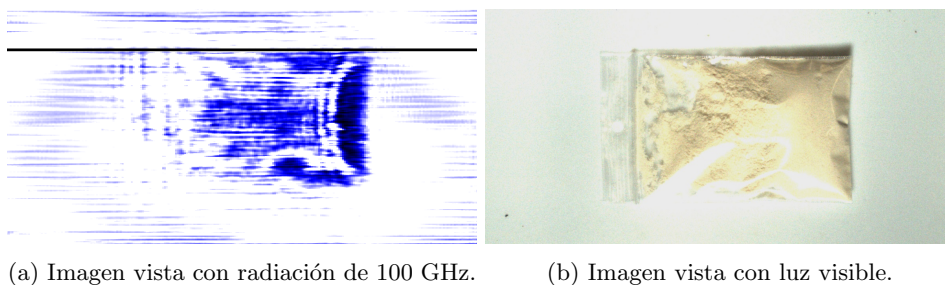


Figura 46: *Proteínas en polvo (100 GHz)*.

Despreciando los efectos de borde, podemos ver una **transmitancia alta**, aunque hay una interacción no despreciable con la radiación milimétrica. Un detalle importante que no podemos olvidar, es que este alimento contiene algunas de las proteínas que existen, pero de ninguna manera representa al conjunto de todas las proteínas. Se ha escogido este alimento para poder en la medida de lo posible, justificar que realmente a esta frecuencia hay cierta interacción con las proteínas. La interacción será más intensa con la radiación de 300 GHz. La interacción de la radiación con la materia, probablemente, sea debido a la interacción con las **vibraciones colectivas** de las cadenas laterales de algunas proteínas.

Beicon: Según la tabla nutricional que viene reflejado en el envase, contiene por cada 100 g de producto un 22,5% en masa de lípidos, un 14,0% de proteínas, un 1,0% de hidratos de carbono y 2,2% de sal. Por lo tanto, si hacemos la suma de todas las concentraciones, obtenemos un 39,7% que interpretamos que el resto hasta llegar a la masa total es agua. Por lo tanto podemos presuponer que aproximadamente el 60,3% en masa es agua.

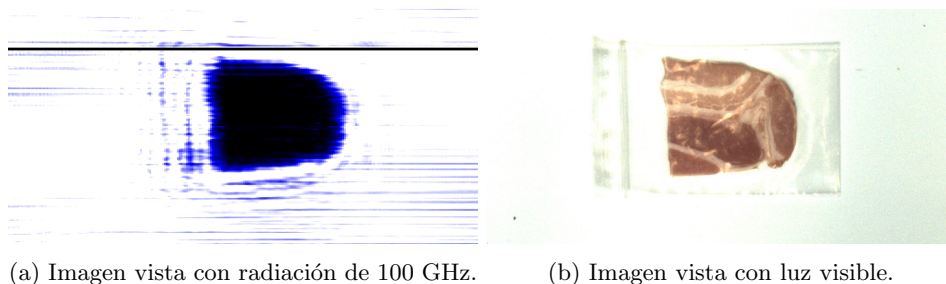


Figura 47: Porción de loncha de beicon (100 GHz).

Tenemos una **nula transmitancia** debido a una **alta permitividad**. El beicon contiene una **alta concentración de agua** que en su mayoría estará ligada a las proteínas y grasas. El agua es capaz de absorber gran parte de la radiación que le llega debido en gran medida a su naturaleza polar pero también debido a que es capaz de vibrar con muchos modos de vibración. También tenemos a las proteínas, cuyas cadenas laterales tienen cierta interacción en el rango de los THz. Un detalle a tener en cuenta es la presencia de sales. Estas sales están disueltas, y, por lo tanto, forman iones que pueden otorgar al alimento una **cierta conductividad** que haría aumentar las pérdidas energéticas y atenuar el campo externo.

Aceite de oliva virgen extra: Un alimento con una **alta concentración de lípidos** es el aceite de oliva. En los lípidos existe una gran variedad de moléculas con diferentes masas y estructuras que pueden interactuar de manera distinta con la radiación electromagnética. El aceite de oliva virgen extra, tiene como principal ácido graso el ácido oleico $C_{18}H_{34}O_2$. Los ácidos grasos **tienen en común una cabeza polar** (*extremo carboxílico*) y **tienen una larga cola apolar** (*cadena hidrocarbonada*).

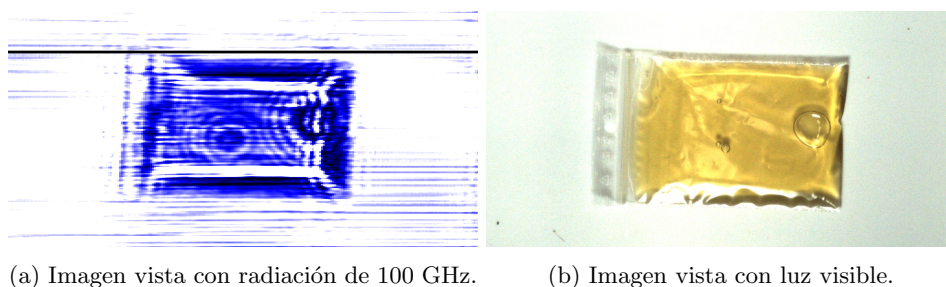


Figura 48: Aceite de oliva virgen extra (100 GHz).

Vemos que el aceite de oliva virgen extra sí que interactúa con la radiación electromagnética de 100 GHz. Tenemos una **permitividad suficientemente baja** como para que la radiación pueda atravesar la muestra. Podemos hablar de una **ligera absorbancia**. Los ácidos grasos tienen una cabeza polar, pero, dado que son moléculas muy grandes, es probable que la disminución de la intensidad de la radiación no se deba a las polarizaciones sino que se deba a otros fenómenos como **vibraciones colectivas** que puedan darse en los lípidos. Otra posible causa es la **interacción de los enlaces débiles con la radiación THz** como son las fuerzas de Van der Waals que hay entre las cadenas hidrocarbonadas. El aceite no es conductor de la electricidad, por lo tanto, queda descartada la conductividad. Como curiosidad, podemos ver el patrón de ondas en torno a las burbujas de aire.

Aceite de oliva virgen extra congelado: Dado que la permitividad depende de la temperatura, es natural preguntarnos qué ocurre si disminuimos la temperatura del aceite hasta solidificarlo. Con ello vamos a disminuir la agitación térmica de las moléculas que están vibrando. Por otro lado, estaríamos reduciendo sus grados de libertad.

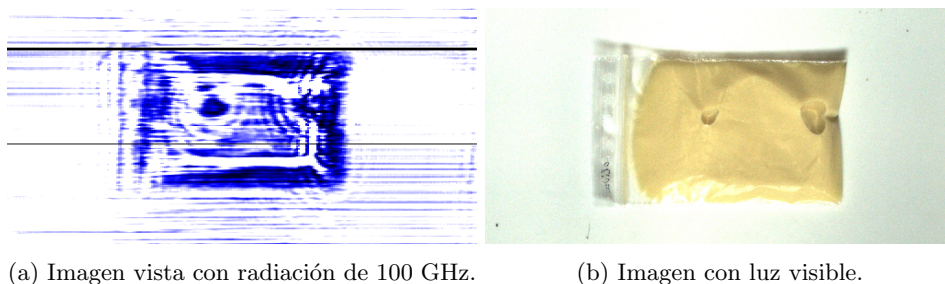


Figura 49: *Aceite de oliva virgen (congelado) (100 GHz).*

Notamos un cambio muy significativo con respecto al aceite de oliva virgen a temperatura ambiente. Tenemos una **permitividad menor**. Como consecuencia, podemos ver como un **aumento de la transmitancia**. Hemos reducido la agitación térmica y, por lo tanto, la frecuencia de las vibraciones. Es posible que al reducir la frecuencia de las vibraciones, los modos de vibración no coincidan con la frecuencia de la radiación electromagnética aplicada y no sea absorbida. Una posible explicación para la débil interacción es que, al bajar la temperatura, los enlaces de hidrógeno van a tener una energía diferente, entonces, la interacción con la radiación electromagnética va ser distinta (*en este caso, la interacción es menor*). Como curiosidad podemos ver dos puntos negros con unos patrones de difracción debido a las burbujas de aire que se ven negras (*cuando la permitividad del aire es la más baja de todas ya que es el patrón*) debido a las dispersiones.

Sal común (NaCl): Un ingrediente casi básico de todas las comidas es la sal común (*también llamada sal de mesa*). Se trata de un cristal iónico formado por cloruro de sodio ($NaCl$). Las moléculas están formadas por un ion sodio y un ion cloro de muy diferente electronegatividad. Eso hace que formen un enlace iónico, y, por lo tanto, forman un dipolo. Se agrupan en estructuras periódicas conformando lo que llamamos un **cristal**.

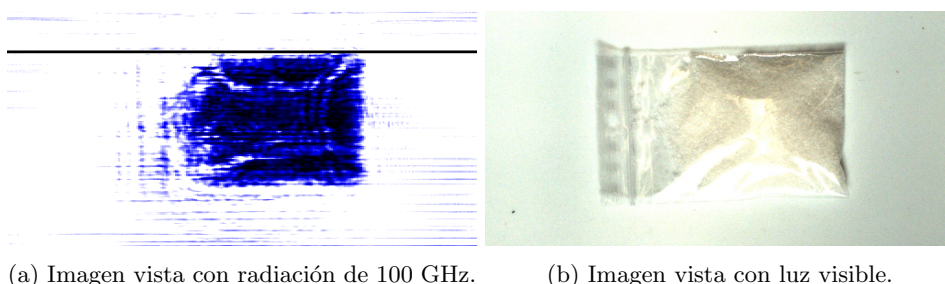


Figura 50: *Sal común (100 GHz).*

Tenemos una imagen bastante oscura. Recordemos lo que sucedía con el azúcar moreno. Tenemos un tamaño de los cristales menores de 3 mm , pero tienen un tamaño cercano a ese orden. **Vamos a tener un fenómeno de extinción de onda**. Acompañando a este fenómeno de extinción de onda, cabe la posibilidad que exista otro fenómeno que explique una imagen oscura. El campo eléctrico hace que los iones realicen oscilaciones pequeñas alrededor de su posición de equilibrio. El desplazamiento mutuo de los iones induce un **momento dipolar** de forma que el cristal iónico se comporta como un material con permitividad dieléctrica.

7.2. Fuente de 300GHz

Azúcar blanco: Veamos en primer lugar alimentos con relativas **altas concentraciones en glúcidos**. Vamos a ver azúcar común. La sacarosa es un disacárido que es soluble en agua gracias a su naturaleza polar. El azúcar común se encuentra en **forma cristalina**. El estado cristalino es importante, ya que afecta directamente a los grados de libertad de las moléculas. Estas encuentran una gran dificultad para orientarse con el campo eléctrico externo y afecta también a las vibraciones de las moléculas. **Se trata de un sólido cristalino molecular** que le da propiedades de aislante.

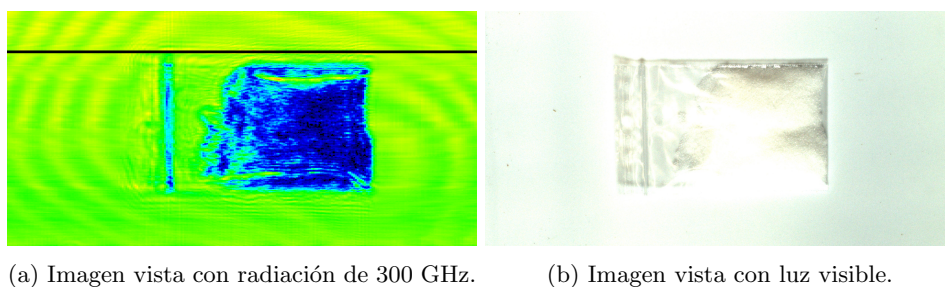


Figura 51: *Azúcar blanco (300 GHz)*.

Notamos una diferencia con el azúcar visto con la fuente de 100 GHz. Ahora vemos que con la **radiación de 300 GHz hay un notable oscurecimiento**. Dado que es un cristal, no puede orientarse con el campo externo. Una posibilidad es que al disminuir la longitud de onda, que ahora es de 1 mm , **el tamaño de los granos de azúcar se acercan más al de la longitud de onda**. Es probable que lo que tengamos aquí son **extinciones de onda**. Por otro lado, es posible que a esta frecuencia, empecemos a ver las primeras interacciones con los enlaces débiles en el rango del THz.

Mermelada de frambuesa: Otro alimento con **alta concentración de azúcares** es la mermelada de frambuesa. Según la tabla nutricional del envase, tenemos un 50,0% en masa de hidratos de carbono, de los cuales el 50,0% son azúcares, contiene también un 0,6% de proteínas. Dado que esos son los únicos valores que nos vienen reflejados, tenemos por lo tanto un 49,4% de ingredientes que no conocemos. Presumiblemente ese porcentaje en masa que nos falta corresponde con el agua. Tenemos por lo tanto una **abundante concentración de agua**.

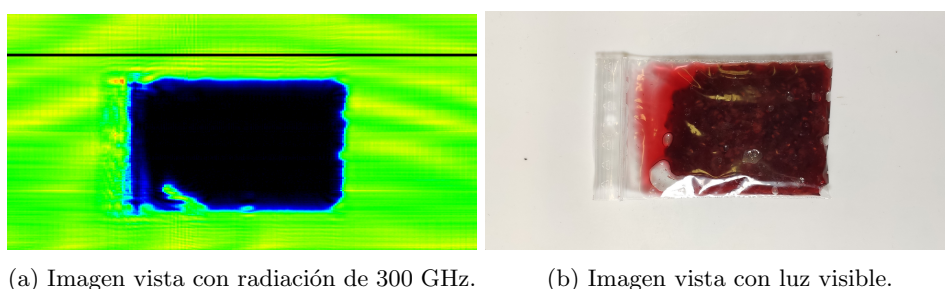


Figura 52: *Mermelada de frambuesa 300 GHz*.

Tenemos una **nula transmitancia** debido a una **permitividad muy alta**. Se trata de un alimento con una alta concentración de agua y de azúcares que impiden el paso de la radiación electromagnética debido a su naturaleza polar. Podemos incluso ver cómo una fina capa de agua con azúcar (*izquierda de la figura*) es capaz de absorber toda la radiación.

Mermelada de frambuesa a temperatura bajo cero: Vamos a enfriar la muestra con la intención de reducir los grados de libertad de las moléculas. Dado que es un alimento con una alta concentración de agua, resulta interesante comprobar si al congelar la muestra podemos reducir lo suficiente la permitividad como para que la radiación de 300 GHz traspase la muestra y llegue radiación al sensor.

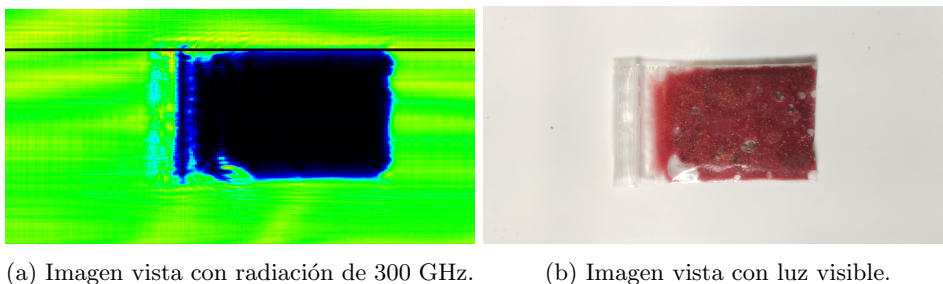


Figura 53: Mermelada de frambuesa (300 GHz).

Vemos que al congelar la muestra, seguimos teniendo una **alta permitividad**. Tenemos una **nula transmitancia**, incluso con pequeños espesores como podemos apreciar en la izquierda de la figura. El agua congelada es muy transparente a la radiación de 300 GHz. Sin embargo **los azúcares en disolución hacen que la permitividad sea elevada** opacando la muestra. Parece ser que los alimentos con azúcares disueltos van a impedir el paso de la radiación electromagnética notablemente y no vamos a poder apreciar detalles en esta clase de alimentos. Una posible causa es pese a que se ha congelado, el azúcar todavía tiene un mayor grado de libertad que en su forma cristalina y las moléculas formar un campo dipolar que atenuaría el campo electromagnético externo.

Chocolate 99 % de cacao: Vamos a ver chocolate con un 99 % de cacao. Se trata de una **pieza plana**, con lo que evitaremos la geometría curva que puede darnos problemas de reflexiones, como, por ejemplo, en el chocolate a la taza. Según la tabla nutricional reflejada en el envoltorio contiene un 49,0 % en masa de grasas, de las cuales el 30,0 % son saturadas, por otro lado contiene un 10,0 % de hidratos de carbono de los cuales el 1,0 % son azúcares, contiene también un 14,0 % de proteínas y un 0,7 % de sal. Tenemos un alimento con **altas concentraciones en grasas** y un valor no despreciable de proteínas. Podemos deducir del porcentaje en masa total que aproximadamente un 26,3 % de la masa es agua, aunque no podemos saberlo y es sólo una estimación.

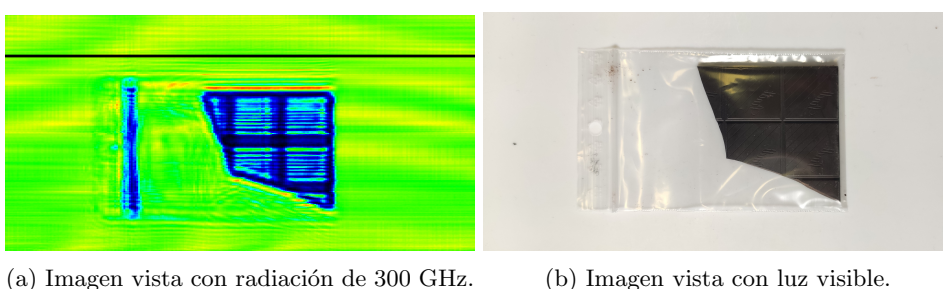
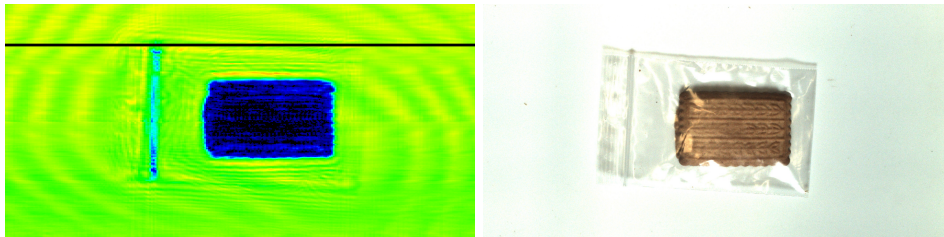


Figura 54: Chocolate 99 % de cacao (300 GHz).

Podemos ver numerosos **patrones de difracción horizontales**. Están formados debido a las marcas del chocolate. La permitividad es muy difícil de predecir debido a estos patrones de difracción, pero la muestra presenta una **transmitancia apreciable**. Por otro lado, la muestra no tiene un gran espesor por lo que tampoco podemos hablar de una gran transmitancia. Probablemente la absorción se deba a los lípidos, ya que estos interactúan notablemente con la radiación de 300 GHz. Cabe preguntarnos por la presencia de agua. Probablemente se encuentre hidratando a los lípidos alterando a los modos de vibración, pudiendo afectar a la interacción con la radiación.

Galleta con miel: Vamos a ver ahora cómo se ve una galleta con miel. Según la tabla nutricional reflejada en el envase, tenemos un 70,0% en masa de harina de trigo, azúcar (*sin especificar qué azúcares ni cantidad*), un 16,0% aceite de girasol, un 2,1% de miel, antioxidantes, huevo, extracto de malta de cebada, coco rallado, carbonatos de amonio y sodio, leche en polvo, sal y aromatizantes. Por lo tanto, tenemos un alimento con una **alta concentración de harina de trigo**.

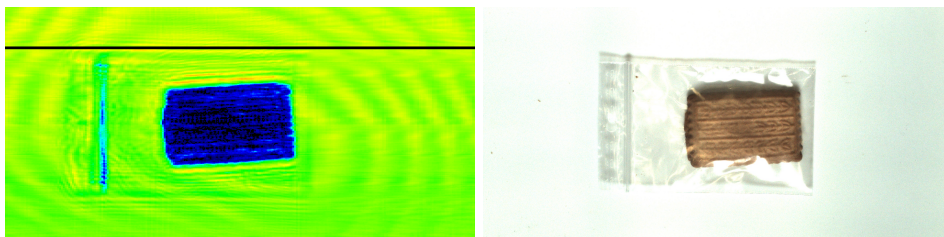


(a) Imagen vista con radiación de 300 GHz. (b) Imagen vista con luz visible.

Figura 55: *Galleta con miel (300 GHz)*.

Tenemos una imagen en la que podemos apreciar **una absorción casi total en el centro** de la galleta, mientras que en los **bordes tenemos una significativa transmitancia**. Parece indicar que tenemos dos permitividades diferentes. Es posible que tengamos diferentes concentraciones de ingredientes en el centro y en los exteriores. La miel a esta frecuencia es muy absorbente (*no visto en este trabajo*) y **es posible que la miel se encuentre concentrada en el centro de la galleta**. Por otro lado, **podemos apreciar las estrías del relieve de la galleta**. Esto nos da idea de lo sensible que es la radiación de 300 GHz a las marcas en la superficie.

Galleta con miel a temperatura bajo cero: Vamos a bajar la temperatura de la galleta y vamos a ver si apreciamos algún cambio en la permitividad. Los principales ingredientes son almidón y lípidos, que en principio tienden a una menor permitividad al bajar la temperatura (*no se muestra en este trabajo, pero se comprobó que la harina de trigo aumentaba la transmitancia al bajar la temperatura*). Recordemos que el 70,0% en masa es harina de trigo y un 16,0% es aceite de girasol.

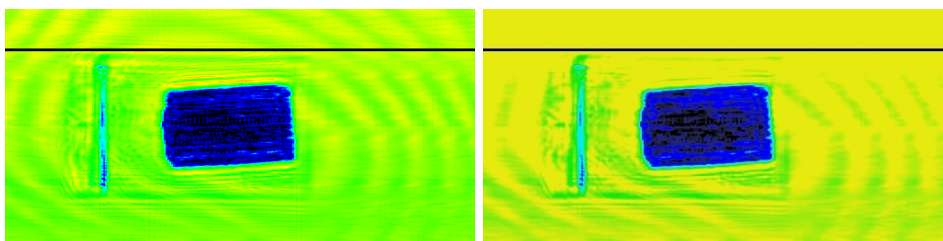


(a) Imagen vista con radiación de 300 GHz. (b) Imagen vista con luz visible.

Figura 56: *Galleta con miel (300 GHz)*.

Tenemos un contraste aún mayor entre las zonas del centro y el exterior. En el centro debemos tener algún ingrediente con una **relativa alta permitividad** que cambie relativamente poco con la temperatura (*podríamos pensar en la miel*). El exterior podría corresponder perfectamente con el almidón y lípidos, puesto que la permitividad disminuye con la temperatura (*sobre todo los lípidos*). Esto **podría ser la evidencia de que tenemos concentraciones de distintos elementos** en lugares distintos de la galleta, como ya sospechábamos en la galleta a temperatura ambiente.

Un detalle que puede ser importante, es **tener unas imágenes postprocesado que puedan mejorar significativamente la visualización de las imágenes**. Vamos a ver un ejemplo comparando una galleta procesada con una galleta a la que se le ha hecho un tratamiento postprocesado (*figura de la derecha*).

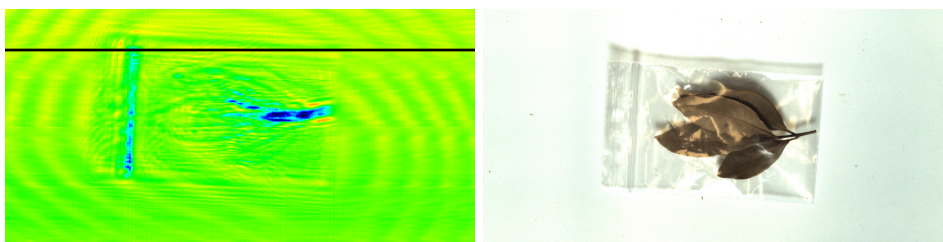


(a) Imagen sin postprocesar de una galleta. (b) Imagen postprocesada de una galleta.

Figura 57: *Imagen comparación de galleta postprocesada (300 GHz).*

Esta pequeña mejora de la visualización, **tiene aún un margen amplio de mejora**. Tan solo se le ha mejorado la iluminación y aumentado el contraste. Puede utilizarse, por ejemplo, **inteligencia artificial** para tratar de mejorar la visualización de los detalles. Esto que acabo de mostrar lo he comprobado con varios alimentos, y los resultados han sido satisfactorios en general. Quizás para ver detalles en alimentos no sea útil o práctico, pero hay otras líneas de investigación para las que si puede ser útil, como, por ejemplo, la rama médica.

Hojas de laurel: Ahora vamos a ver unas hojas de laurel. Las hojas de laurel contienen una **alta concentración de celulosa**, un carbohidrato complejo. La celulosa está formada por macromoléculas apolares. Las hojas de laurel están extremadamente secas por lo que la humedad no debería ser un inconveniente.



(a) Imagen vista con radiación de 300 GHz. (b) Imagen vista con luz visible.

Figura 58: *Hojas de laurel (300 GHz).*

Vemos que las hojas de laurel son muy transparentes. Tienen una **permitividad muy baja**. Podemos **ver únicamente el peciolo, debido a que el tamaño y la geometría** del orden del milímetro crean reflexiones y dispersiones haciendo que la radiación no llegue al sensor. Además, podemos ver tenuemente el borde de las hojas debido a los **efectos de borde**. La celulosa es muy transparente a la luz de 300 GHz. No hay polarizaciones, ni efectos conductivos, ni vibraciones en el orden del THz. (*Se hicieron más pruebas con elementos con una alta concentración en celulosa, como, por ejemplo, el algodón, que no es mostrado en este trabajo. El algodón es completamente transparente*).

Proteínas en polvo (*Whey prime protein*): A continuación vamos a ver cómo se ven los polvos de proteínas. Según la tabla nutricional del envase, por cada 100 g de producto, tenemos 5,10% en masa de grasas, un 3,40% de hidratos de carbono, un 85,00% de proteínas y un 0,29% de sal. La presencia de agua no parece que tenga una presencia importante.

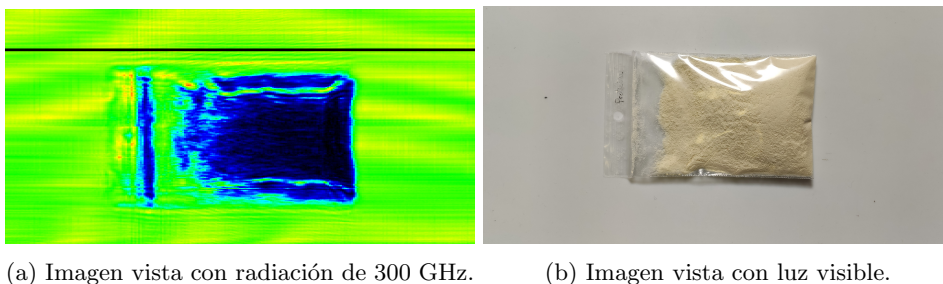


Figura 59: *Proteínas en polvo (300 GHz)*.

Despreciando los efectos de borde, podemos ver una **transmitancia intermedia-alta**. Podemos ver como en la parte derecha de la muestra, donde hay mayor espesor, tenemos prácticamente una absorbancia total. A medida que nos movemos hacia la izquierda, vamos teniendo un menor espesor y con ello aparece una transmitancia. Las cadenas laterales de algunas proteínas tienen unos **modos de vibración colectivos en el orden del THz**. Al aumentar la frecuencia y acercarnos al THz, tenemos una mayor interacción con las ondas electromagnéticas. La radiación es absorbida por los modos de vibración.

Alubias blancas: Vamos a ver una legumbre que contiene una **alta concentración en proteínas**. Vamos a ver la alubia blanca. Según el envase, las alubias blancas contienen un 56% en masa de carbohidratos, un 22% de proteínas, un 5% de fibra y un 3% de lípidos. Las alubias blancas contienen una concentración no despreciable de agua, en torno al 10% en masa del alimento es agua.

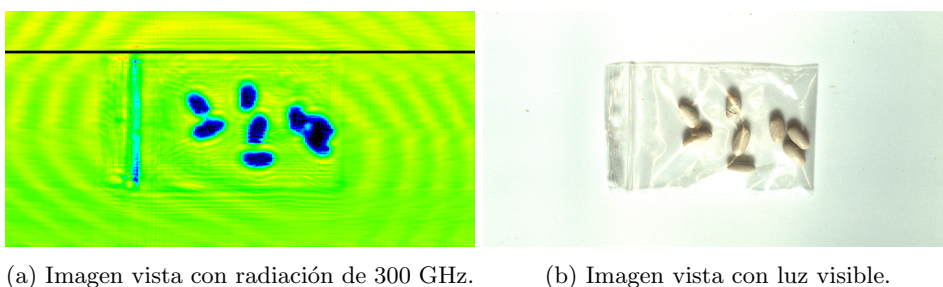
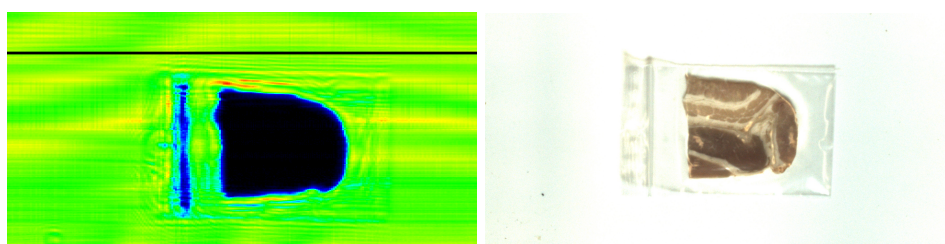


Figura 60: *Alubias blancas (300 GHz)*.

Podemos ver que las alubias son completamente opacas a la radiación de 300 GHz. Los componentes mayoritarios son los hidratos de carbono (*presumiblemente almidón*) y proteínas. Sin embargo, **esta opacidad es muy probable que se deba a la geometría de las alubias**. Ya hemos visto que la luz milimétrica es muy sensible a la geometría tamaño de los alimentos (*lo hemos podido observar en otros alimentos como cacahuetes pelados, pistachos, pipas de girasol, pipas de calabaza, lentejas, maíz seco, etc. que no son mostrados en este trabajo*). Debido a una naturaleza curva, va a haber **múltiples planos de incidencia**, por lo que va a haber muchas **reflexiones**. Todo esto se traduce en que no va a llegar luz al sensor.

Beicon: Las carnes, en general, son alimentos con una **alta concentración de proteínas**. Un problema que tienen las carnes es que **vienen acompañadas de una concentración muy alta de agua**, que es un agente muy absorbente de la radiación electromagnética a esta frecuencia. El beicon, según la tabla nutricional que viene reflejado en el envase, contiene por cada 100 g de producto un 22,5% en masa de lípidos, un 14,0% de proteínas, un 1,0% de hidratos de carbono y 2,2% de sal. Por lo tanto, si hacemos la suma de todas las concentraciones, obtenemos un 39,7%. Interpretamos que el resto, hasta llegar a la masa total, es agua: podemos presuponer que el 60,3% en masa es agua.



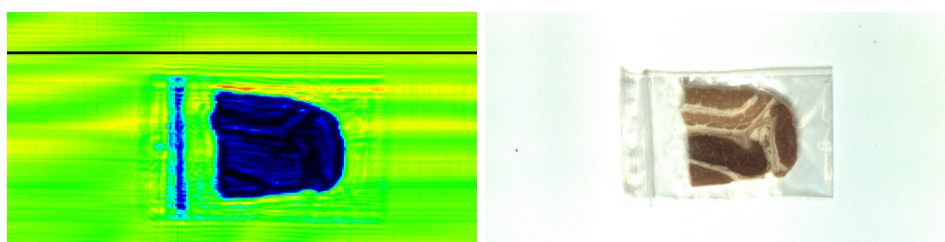
(a) Imagen vista con radiación de 300 GHz.

(b) Imagen vista con luz visible.

Figura 61: *Porción de loncha de beicon (300 GHz).*

Vemos una absorción total. El principal agente sospechoso es el agua. Las ondas electromagnéticas, interactuarán con las **moléculas polares**. Las moléculas de agua son capaces de oscilar con el campo eléctrico externo y orientarse en sentido del campo externo, creando un **campo eléctrico de origen dipolar** opuesto al campo eléctrico externo y debilitándolo. Por otro lado, las proteínas también tienen su papel protagonista en el rango del THz y es posible que la radiación de 300 GHz interactúe con los **modos de vibración colectivos de las cadenas laterales de las proteínas**. No despreciemos la presencia de sales disueltas que puedan dar una cierta **conductividad** al material, por lo que la energía se invertiría en mover cargas (*iones*) habiendo una disminución de campo que llega al sensor.

Beicon congelado: Dado que el beicon es completamente opaco a la radiación de 300 GHz y el principal agente absorbente es el agua, vamos a congelar la muestra para ver si hay cambios en la permitividad y llegamos a tener transmitancia.



(a) Imagen vista con radiación de 300 GHz.

(b) Imagen vista con luz visible.

Figura 62: *Beicon congelado (300 GHz).*

La permitividad ha cambiado notablemente. Tenemos una **ligera transmitancia** en las zonas donde está la carne, mientras que las líneas de tocino todavía es completamente opaco. **Podemos hablar de dos permitividades distintas en la misma muestra, lo que nos permite ver detalles**. Esto podría ser una muestra de cómo afecta el agua congelada a las proteínas y a las grasas. Es posible que la cabeza polar de los lípidos tienda a rodearse de agua y la opacidad se deba a las interacciones y vibraciones en el rango de los THz.

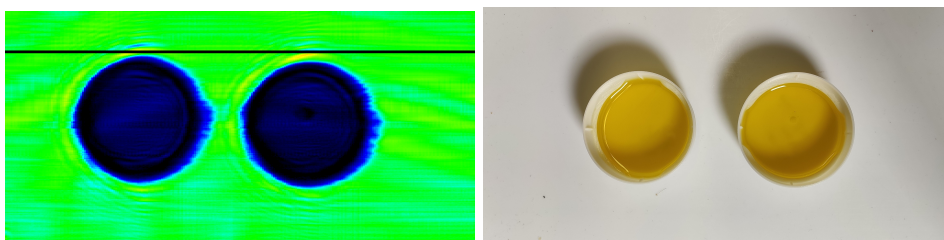
Comparación entre aceite de oliva virgen extra y aceite de oliva virgen extra gran selección: Hemos encontrado diferencias entre ambos aceites (*en un análisis por separado*), por lo que es interesante compararlo en una misma imagen. Para tratar de tener un mayor rigor en la comparación, vamos a asegurarnos de tener un espesor lo más similar posible. Para ello nos vamos a ayudar con unos vasos de precipitado y de los mismos recipientes plásticos cuyas dimensiones son exactamente las mismas.



(a) Vasos de precipitado con 20 mL de aceite de oliva. (b) Vasos de precipitado con recipientes de plástico.

Figura 63: *Medición de aceite de oliva.*

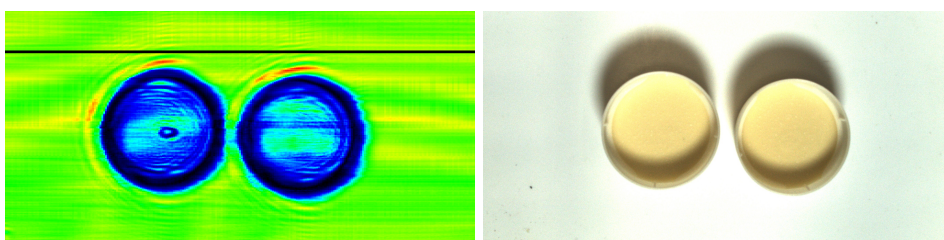
Dado que los recipientes de plástico son iguales y vamos a verter el mismo volumen de aceite, esperamos tener el **mismo espesor de aceite** para poder hacer una comparativa realista entre ambos aceites al aplicar radiación electromagnética de 300 GHz (*suponiendo también que ambos aceites presentan la misma densidad*).



(a) Imagen vista con radiación de 300 GHz. (b) Imagen vista con luz visible.

Figura 64: *Comparación directa entre aceites de oliva (300 GHz).*

Aunque la diferencia es realmente pequeña, **hay una mayor transmitancia en el aceite de la izquierda** en la *figura 64*, que corresponde al aceite de oliva virgen de menor calidad. **El aceite de la misma marca de supuesta mayor calidad tiene una mayor absorbancia** para esta frecuencia, lo que nos permite distinguir un aceite de otro cuando **en el espectro visible la diferencia es inapreciable**.

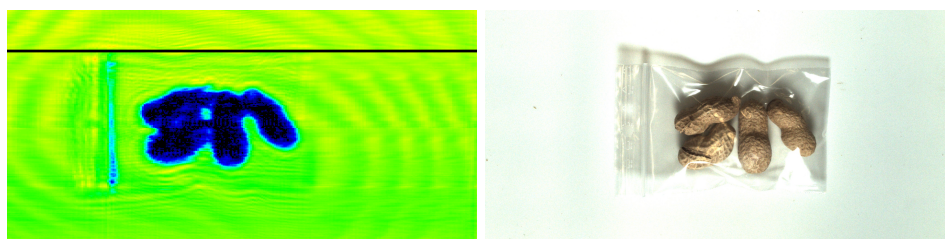


(a) Imagen vista con radiación de 300 GHz. (b) Imagen vista con luz visible.

Figura 65: *Comparación entre aceites de oliva congelados (300 GHz).*

Podemos ver que al bajar la temperatura, la diferencia se puede apreciar mejor. Puede ser interesante hacer un estudio más intensivo para evitar el posible fraude en la industria.

Cacahuets con cáscara: Los cacahuets, según la información nutricional del envase, contienen un 24,3% en masa de proteínas, un 49,7% de grasas, de los cuales un 7,7% son ácidos grasos saturados, un 42,0% son ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados, tenemos también un 21,3% de hidratos de carbono, de los cuales un 4,7% son azúcares, que presumiblemente el restante de los hidratos de carbono es almidón. Veamos si somos capaces de distinguir las semillas del recubrimiento.

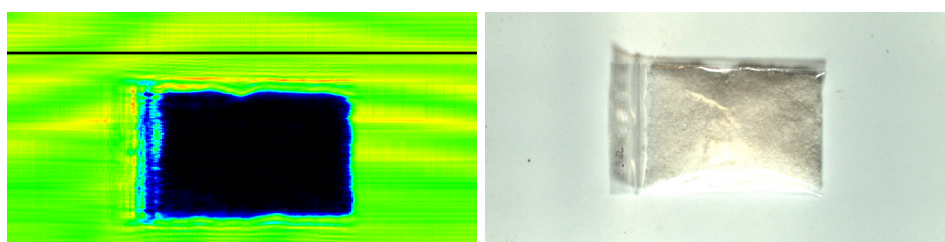


(a) Imagen vista con radiación de 300 GHz. (b) Imagen vista con luz visible.

Figura 66: *Cacahuets con vaina (300 GHz).*

Tenemos dificultades para distinguir las semillas de cacahuete de su envoltura. Todo apunta a que sigue siendo un problema de **reflexión** de las ondas debido a la geometría curva, en la que la luz incide con ángulos tan alejados de la normal que se reflejan y crean sombras que podemos ver en la imagen como color negro (*ausencia de radiación que llega al sensor*). A este efecto, le podemos sumar el efecto de la **refracción**. La radiación se desvía de su trayectoria original al cambiar a un medio con mayor permitividad. La radiación se alejaría de los bordes ya que tiende a acercarse a la normal del plano de incidencia (*desde el aire*).

Sal común (NaCl): Vamos a ver con la radiación de 300 GHz la sal común (*también llamada sal de mesa*). Se trata de un cristal iónico formado por cloruro de sodio ($NaCl$). Las moléculas están formadas por un ion sodio y un ion cloro de muy diferente electronegatividad que forman un enlace iónico, y, por lo tanto, forman un dipolo. Se agrupan en estructuras periódicas conformando lo que llamamos un **crystal**.



(a) Imagen vista con radiación de 300 GHz. (b) Imagen vista con luz visible.

Figura 67: *Sal común (300 GHz).*

Tenemos una **opacidad total**. Tenemos un tamaño de los cristales del orden de la longitud de onda, recordemos que nuestra longitud de onda es de 1 mm , implica que vamos a tener muchos **centros dispersores** y vamos a tener un **fenómeno de extinción de onda**. Acompañando a este fenómeno de extinción de onda, cabe la posibilidad de que exista otro fenómeno que explique que la opacidad sea tan alta. **El campo eléctrico hace que los iones realicen oscilaciones pequeñas alrededor de su posición de equilibrio**. El desplazamiento mutuo de los iones induce un **momento dipolar**, de forma que el **crystal iónico se comporta como un material con permitividad dieléctrica**.

8. Conclusiones

El uso de las ondas electromagnéticas en el rango espectral del THz, pese a sus limitaciones, tiene posibles aplicaciones dentro de la industria agroalimentaria que pueden ser muy interesantes.

Hemos comprobado que **la radiación electromagnética en el rango del THz puede atravesar algunos alimentos**. La profundidad de penetración de las ondas electromagnéticas en los alimentos, depende en gran medida del tipo de alimento y del espesor, ya que no todos los alimentos interactúan del mismo modo con la radiación. Para un mismo alimento, la transmitancia puede llegar a ser muy diferente al irradiar con ondas electromagnéticas de 100 GHz y de 300 GHz. Esta diferencia de información adquirida entre frecuencias, da pie a la sugerencia de utilizar otras frecuencias distintas en el estudio de los alimentos e invita a trabajar con **imágenes hiperespectrales**¹⁵.

Para poder interpretar lo que estábamos viendo en las imágenes obtenidas en el rango THz, hemos hecho una clasificación a partir de los conjuntos de biomoléculas que existen. **La clasificación ha sido, en grandes rasgos, acertada, puesto que hemos sido capaces de predecir en un gran número de alimentos los resultados que obtendríamos** debido a que la interacción con las ondas electromagnéticas es diferente en cada grupo. La dificultad se encuentra en que la mayoría de alimentos no contienen un sólo grupo de biomoléculas. La clasificación se ha hecho en función de qué grupo de biomoléculas predomina sobre el resto.

Los alimentos expuestos a una baja temperatura tienen una mayor transmitancia. Se ha justificado con que, en realidad, lo que estábamos viendo era la interacción con los enlaces débiles y modos vibracionales colectivos. Al enfriar las muestras, cambian de frecuencia las vibraciones naturales y la interacción con las ondas electromagnéticas es menor. Los análisis **pueden ser útiles para poder examinar la calidad de un determinado producto dentro de un lote.** Con ello, **podemos prevenir la falsificación y la adulteración de los productos**, eligiendo aleatoriamente que se encuentren en un lote de productos y observar si cumple con las características dadas.

Tenemos una serie de inconvenientes inevitables que limitan las ventajas de esta tecnología. Para empezar, podemos hablar de la baja potencia proporcionada por las fuentes, hace que la cantidad de radiación que consigue atravesar el material sea pequeña. Hay una fuerte **limitación a la hora de ver objetos comparables a la longitud de onda y con una geometría curva.** Aparecen **patrones de difracción** no deseables sumado a unos **efectos de borde** en la que perdemos información debido a las dispersiones y reflexiones. Cuando juntamos muchos alimentos en la que hay poca homogeneidad, perdemos mucha información debido a las **extinciones de onda.** **El comportamiento de las ondas electromagnéticas depende fuertemente de los valores relativos de la longitud de onda con los tamaños de los objetos físicos con los que interacciona.**

La presencia de agua afecta de un modo diferente si el agua se asocia a lípidos, proteínas o glúcidos. **La presencia de agua en los alimentos es un problema a la hora de ver a través de los alimentos** puesto que tiene una permitividad elevada a las frecuencias de trabajo.

Se pueden mejorar notablemente nuestras observaciones aplicando algún software que nos mejore la calidad de las imágenes. En la **sección 7.2** pudimos ver la diferencia entre dos galletas, aplicando un programa informático dedicado al diseño de imágenes. Tan sólo mejoramos aspectos como la iluminación y el contraste. Se pueden añadir programas de **inteligencia artificial** que ayuden en la detección de errores o anomalías.

¹⁵**Imagen hiperespectral:** Es un tipo de imagen digital que captura información detallada de la "luz" reflejada o emitida por objetos o escenas en múltiples bandas espectrales estrechas y contiguas.

Referencias

- [AFSAH] Afsah-Hejri, Leili, et al. "A comprehensive review on food applications of terahertz spectroscopy and imaging." *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 18.5 (2019): 1563-1621.
- [ÁLVAREZ] Álvarez Izquierdo, José Manuel. "Física de película: Invisibilidad." (2019). TFG UVa.
- [ARGÁEZ] Argáez-Mendoza, S., and A. I. Oliva. "El principio de Fermat, la braquistócrona y ¿la curvatura de la luz?." *Ingeniería* 15.1 (2011): 47-55.
- [ARMENDANO] Armendano, Andrea, Alda González, and Sergio Roberto Martorelli. "Conceptos claves en biología." *Series: Libros de Cátedra* (2016).
- [ASADA] Asada, Masahiro, Safumi Suzuki, and Naomichi Kishimoto. "Resonant tunneling diodes for sub-terahertz and terahertz oscillators." *Japanese Journal of Applied Physics* 47.6R (2008): 4375.
- [AUSTON] Auston, David H., Kin P. Cheung, and Peter R. Smith. "Picosecond photoconducting Hertzian dipoles." *Applied physics letters* 45.3 (1984): 284-286.
- [BANERJEE] Banerjee, Pujarini, and Tapas Chakraborty. "Weak hydrogen bonds: insights from vibrational spectroscopic studies." *International Reviews in Physical Chemistry* 37.1 (2018): 83-123.
- [BARBA] Barba García, Ismael. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, 1997.
- [BELÉNDEZ] Beléndez, Tarsicio, and Augusto Beléndez. "Tema 19-ITOP: Corriente eléctrica (Resumen)." *Física General* (2002).
- [BELÉNDEZ 2] Beléndez, Augusto. "Tema 14: Difracción de la luz (Resumen)." *Fundamentos Físicos de la Ingeniería* (2000).
- [BENACLOCHE] Benacloche Llácer, Cristina. Estimación de funciones de transferencia en el rango de los THz mediante modelos autorregresivos. Diss. Universitat Politècnica de València, 2021.
- [BIBI] Bibi, Fabien, et al. "A review: Origins of the dielectric properties of proteins and potential development as bio-sensors." *Sensors* 16.8 (2016): 1232.
- [BIURRUN] Biurrun Quel, Carlos. "Integration of a photodiode for THz generation in the framework of TERALINKS Project." (2018).
- [BOHREN] Bohren, Craig F., and Donald R. Huffman. *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley & Sons, 2008.
- [BURFORD] Burford, Nathan M., and Magda O. El-Shenawee. "Review of terahertz photoconductive antenna technology." *Optical Engineering* 56.1 (2017): 010901-010901.
- [BYKHOVSKI] Bykhovski, Alexei, and Boris Gelmont. "The influence of environment on terahertz spectra of biological molecules." *The Journal of Physical Chemistry B* 114.38 (2010): 12349-12357.
- [CALDERÓN] Calderón-Ramón, Celia & López-Calderón, Hector & Escalante-Martínez, Jesús & Cruz-Orduña, María. (2019). Comparación entre la función de cole-cole y la función de Debye para modelar el tejido biológico. *Revista de Ingeniería Biomédica y Biotecnología*. 1-5. 10.35429/JBEB.2019.9.3.1.5.
- [CARBALLIDO] Carballido Reboredo, Ma Raquel. Síntesis asistida por microondas de compuestos de interés biológico e industrial: haloarenos, fulvenos, tricloropirrolidonas, azoles y flavonoides. Modelado de espectros de absorción electrónica de flavonoides. Univ Santiago de Compostela, 2008.

- [CASAS] Casas Piedrafita, Óscar. Contribución a la obtención de imágenes paramétricas en tomografía de impedancia eléctrica para la caracterización de tejidos biológicos. Universitat Politècnica de Catalunya, 1998.
- [CASAS 2] Casas, Justiniano. Óptica. Universidad de Zaragoza. Facultad de Ciencias. Departamento de Optica, 1972.
- [CASTRO] Castro Giráldez, Marta. Estudio de los espectros dieléctricos para el control de calidad de alimentos. Diss. Universitat Politècnica de València, 2010.
- [CHEN] Chen, Tao, Suyan Li, and Hui Sun. "Metamaterials application in sensing." *Sensors* 12.3 (2012): 2742-2765.
- [CHEN 2] Chen, Gang, et al. "Terahertz-wave imaging system based on backward wave oscillator." *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* 2.5 (2012): 504-512.
- [CHEUNG] Cheung, A. C., et al. "Detection of N H 3 Molecules in the Interstellar Medium by Their Microwave Emission." *Physical Review Letters* 21.25 (1968): 1701.
- [DAI] Dai, Jianming, Jingle Liu, and Xi-Cheng Zhang. "Terahertz wave air photonics: terahertz wave generation and detection with laser-induced gas plasma." *IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics* 17.1 (2010): 183-190.
- [DANCIU] Danciu, Mihai, et al. "Terahertz spectroscopy and imaging: a cutting-edge method for diagnosing digestive cancers." *Materials* 12.9 (2019): 1519.
- [DE LEÓN] de León Zapata, Ramón Díaz, et al. "SEGMENTO DE LOS THZ EN EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y SUS APLICACIONES." *Pistas Educativas* 38.124 (2017).
- [DÍAZ] Díaz, J. Ángel Menéndez, and Ángel S. Hernández Moreno. Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas. UTC, 2017.
- [DÍAZ 2] Díaz, Nieves Abril, et al. "Espectrofometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas." Universidad de Córdoba (2010): 1-8.
- [DROUIN] Drouin, Brian J., et al. "Terahertz spectroscopy for space applications: 2.5–2.7 THz spectra of HD, H₂O and NH₃." *Journal of molecular structure* 1006.1-3 (2011): 2-12.
- [EAGLEMAN] Eagleman, David. El cerebro. Vol. 510. Anagrama, 2017.
- [ECHEVARRÍA] Echevarría Pastrana, Lucía. "Estudio del electromagnetismo en el rango de radiofrecuencia para las Ciencias de la Salud." (2021).TFG UVa.
- [EDMINISTER] Edminister, Joseph A., and Santiago Pinto. Electromagnetismo. McGraw-Hill, 1992.
- [ERMOLINA] Ermolina, I., Joseph Darkwah, and Geoff Smith. "Characterisation of crystalline-amorphous blends of sucrose with terahertz-pulsed spectroscopy: the development of a prediction technique for estimating the degree of crystallinity with partial least squares regression." *AAPS PharmSciTech* 15.2 (2014): 253-260.
- [ESPURZ] Espurz Sánchez, Antonio, and Demetrio Espurz Sánchez. "Tiempo de relajación el los dieléctricos polares." (1972).
- [GÓMEZ] Gómez Zárate, René Saúl. "Obtención de nanofibras por el método de electrospinning y films biodegradables de amilosa y amilopectina."
- [GROSSE] Grosse, C. "Propiedades dieléctricas de sistemas biológicos (conferencia invitada)." *ANALES AFA*. Vol. 1. No. 1. 2013.

- [GUILLÉN] Guillén, M. Victoria Luque. "Estructura y propiedades de las proteínas." Obtenido de <http://www.uv.es>: http://www.uv.es/tunon/pdf_doc/proteinas.09.pdf. 34p (2009).
- [GUO] Guo, Lei. "Photo-cathode studies for High Performance Linear Accelerator."
- [HECHT] Hecht, Eugene. Optics. Pearson Education India, 2012.
- [HU] Hu, Ying, et al. "THz time-domain spectroscopy on plant oils and animal fats." Infrared Components and Their Applications. Vol. 5640. SPIE, 2005.
- [ILCHENKO] Ilchenko, M., T. Narynyk, and G. Avdeyenko. "Wireless Communication Systems of Terahertz Frequency Range." Current Trends in Communication and Information Technologies. Cham: Springer International Publishing, 2021. 189-222.
- [ILYAKOV] Ilyakov, Evgeny V., et al. "Relativistic carcinotron with a thermionic injector of electrons." IEEE transactions on plasma science 26.3 (1998): 332-335.
- [JÁUREGUI] Jáuregui López, Irati. "Design of THz metasurfaces for thin-film sensing." (2018).
- [LANDAU] Landau, Lev Davidovich, and E. M. Lifshitz. Física teórica. Electrodinámica de los medios continuos. Vol. 8. Reverté, 1975.
- [LEE] Lee, Yun-Shik. "Continuous-wave terahertz sources and detectors." Principles of Terahertz Science and technology. Springer, Boston, MA, 2009. 1-41.
- [LEE 2] Lee, Yun-Shik. Principles of terahertz science and technology. Vol. 170. Springer Science & Business Media, 2009.
- [LEVITT] Levitt, Michael, Christian Sander, and Peter S. Stern. "Protein normal-mode dynamics: trypsin inhibitor, crambin, ribonuclease and lysozyme." Journal of molecular biology 181.3 (1985): 423-447.
- [LI] Li, Jitao, and Jie Li. "Terahertz (THz) generator and detection." Electrical Science & Engineering 2.1 (2020).
- [LI 2] Li, Dandan, et al. "Detecting melanoma with a terahertz spectroscopy imaging technique." Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy 234 (2020): 118229.
- [LINK 1] http://laplace.us.es/wiki/index.php/Vector_desplazamiento [Último acceso: 20 Ene. 2023]
- [LINK 2] https://hmong.es/wiki/Dielectric_permittivity [Último acceso: 23 Feb. 2023]
- [LINK 3] https://hmong.es/wiki/Dielectric_relaxation [Último acceso: 15 Feb. 2023].
- [LINK 4] <https://www.quimica.es/enciclopedia/Gl%C3%BAcido.html> [Último acceso: 15 Feb. 2023].
- [LINK 5] <https://medicina.usac.edu.gt/quimica/biomol/carbo.htm> [15 Feb. 2023].
- [LINK 6] <https://www.tipos.co/tipos-de-lipidos/> [Último acceso: 15 Feb. 2023].
- [LINK 7] <https://www.myprotein.es/thezone/nutricion/grasas-saturadas-insaturadas/> [Último acceso: 15 Feb. 2023].
- [LINK 8] <https://www.spektrum.de/news/faenger-des-rampenlichts/1138089> [Último acceso: 15 Feb. 2023].
- [LINK 9] <https://publicaciones.defensa.gob.es/los-metamateriales-y-sus-aplicaciones-en-defensa.html> [Último acceso: 15 Feb. 2023].
- [LINK 10] <https://www.nanowerk.com/what-are-metamaterials.php> [Último acceso: 15 Feb. 2023].

- [LINK 11] <https://eltamiz.com/2012/01/30/las-ecuaciones-de-maxwell-la-ecuacion-de-onda-electromagnetica/> [último acceso: 15 Feb. 2023].
- [LINK 12] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/atmos/blusky.html> [Último acceso: 16 Feb. 2023].
- [LINK 13] <https://www.aulafacil.com/cursos/fisica-y-quimica/el-color/esparcimiento-l37431> [Último acceso: 16 Feb. 2023]
- [LINK 14] <https://www.um.es/molecula/prot01.htm> [Último acceso: 19 Feb. 2023].
- [LINK 15] <https://www.um.es/molecula/prot02.htm> [Último acceso: 19 Feb. 2023].
- [LINK 16] <https://www.um.es/molecula/prot04.htm> [Último acceso: 19 Feb. 2023].
- [LINK 17] <https://www.quimica.es/enciclopedia/P%C3%A9ptido.html> [Último acceso: 19 Feb. 2023].
- [LINK 18] <https://www.um.es/molecula/prot06.htm> [Último acceso: 19 Feb. 2023].
- [LINK 19] https://www.quimica.es/enciclopedia/%C3%81cido_graso.html [Último acceso: 19 Feb. 2023].
- [LINK 20] <https://www.um.es/molecula/lipi01.htm> [Último acceso: 19 Feb. 2023].
- [LINK 21] https://www.ecorfan.org/booklets/Booklets_CIERMML2019/02-%C3%81rea%20Ciencias%20Agropecuaria%20y%20Biotecnologia%20CIER-558%20LISTO/CIER-558.pdf [Último acceso: 22 Feb. 2023].
- [LINK 22] <https://triplenlace.com/2018/10/22/fundamento-y-aplicaciones-de-la-espectroscopia-de-terahercios> [Último acceso: 11 Mar. 2023].
- [LINK 23] <https://www.yubrain.com/ciencia/definicion-del-efecto-tyndall/> [Último acceso: 13 Mar. 2023].
- [MACARULLA] Macarulla, José M., and Félix M. Goñi. Biomoléculas: lecciones de bioquímica estructural. Reverté, 1993.
- [MACARULLA 2] Macarulla, José M., and Félix M. Goñi. Bioquímica humana. Curso básico. Vol. 5. Reverté, 1994.
- [MACDOWELL] MacDowell, Luis González. Termodinámica estadística de moléculas flexibles: Teoría y simulación. Universidad Complutense de Madrid, 2000.
- [MANCEBO] Mancebo Sánchez, Elena María. "Laboratorio de Óptica." Universidad de Valladolid (2013).
- [MANGADO] Mangado del Rincón, Amaia. "Procesado de imágenes en terahercios en 3D." (2012).
- [MARKELZ] Markelz, Andrea, et al. "THz time domain spectroscopy of biomolecular conformational modes." *Physics in Medicine & Biology* 47.21 (2002): 3797.
- [MARTÍNEZ] Martínez, Alfonso Lastras, and Raúl Eduardo Balderas Navarro. "Fabricación de Láseres de Cascada Cuántica basados en GaAs/AlGaAs."
- [MONGE] Monge-Nájera, Julián. *Biología general*. EUNED, 2002.
- [MORÉ] Moré, ZO Rodríguez. "Determinación de la permitividad dieléctrica del Ron y sus mezclas en frecuencia de RF/microondas usando sonda coaxial y sensor balanceado." (2019): 160.
- [MUÑOZ] Muñoz, Jordi Bonastre. "Propagación de ondas electromagnéticas." *Universitat Oberta de Catalunya* (2012): 9-21.

- [NOVOTNY] Novotny, Lukas, and Bert Hecht. Principles of nano-optics. Cambridge university press, 2012.
- [NUSINOVICH] Nusinovich, Gregory S., Manfred KA Thumm, and Michael I. Petelin. "The gyrotron at 50: Historical overview." *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* 35 (2014): 325-381.
- [OH] OH, H. "Clasificación de los glúcidos."
- [PANOFSKY] Panofsky, Wolfgang KH, and Melba Phillips. Classical electricity and magnetism. Courier Corporation, 2005.
- [PAWAR] Pawar, Ashish Y., et al. "Terahertz technology and its applications." *Drug invention today* 5.2 (2013): 157-163.
- [POCE] Poce Mendoza, Karen Tanya. Determinación de propiedades electromagnéticas de materiales sólidos utilizando guías de onda rectangulares en el rango de frecuencias de 8-12 GHz. Diciembre 2010. <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/212>.
- [POPP] Popp, Alexander. Untersuchung von Peptiddynamik mittels zeitaufgelöster Infrarotspektroskopie. Diss. 2015.
- [QIN] Qin Z, Buehler MJ. Analysis of the vibrational and sound spectrum of over 100,000 protein structures and application in sonification. *Extreme Mech Lett.* 2019 May;29:100460. doi: 10.1016/j.eml.2019.100460. Epub 2019 Apr 16. PMID: 32832588; PMCID: PMC7437953.
- [QUINTANA] Quintana-Hernández, P. A., et al. "Evaluación del crecimiento de cristales de azúcar y determinación del factor de forma de área superficial." *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 4.1 (2005): 123-129.
- [RODRÍGUEZ] Rodríguez Morante, Mauricio. "Excitaciones de modos colectivos en cristales fotónicos unidimensionales."
- [RUIZ] Ruiz Fernández, Raúl. "Caracterización experimental de metamateriales quirales basados en tecnología de circuito impreso a frecuencias de microondas." (2014).
- [RUIZ 2] Ruiz, M., and C. León. "Alimentación y nutrición." (2011).
- [SHERWIN] Sherwin, M. A., et al. DOE-NSF-NIH Workshop on Opportunities in THz Science, February 12-14, 2004. DOESC (USDOE Office of Science (SC)), 2004.
- [TAKAHASHI] Takahashi, Masae. "Terahertz vibrations and hydrogen-bonded networks in crystals." *Crystals* 4.2 (2014): 74-103.
- [TAN] Tan, Thomas CaiWei, Eric Plum, and Ranjan Singh. "Surface lattice resonances in THz metamaterials." *Photonics*. Vol. 6. No. 3. MDPI, 2019.
- [TAN 2] Tan, Ping, et al. "Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications." *Science China Information Sciences* 55 (2012): 1-15.
- [TANG] Tang, Mingjie, et al. "Terahertz spectroscopy of oligonucleotides in aqueous solutions." *Journal of Biomedical Optics* 20.9 (2015): 095009.
- [TANI] Tani, Masahiko, et al. "Generation of terahertz radiation by photomixing with dual-and multiple-mode lasers." *Semiconductor Science and Technology* 20.7 (2005): S151.
- [TAYLOR] Taylor, Catherine. "Consumiendo una Dieta Baja en Grasa Saturada, Grasas Trans, y Colesterol."
- [THUMM] Thumm, Manfred. "Progress in gyrotron development." *Fusion Engineering and Design* 66 (2003): 69-90.

- [TIELROOIJ] Tielrooij, K. J., et al. "Dielectric relaxation dynamics of water in model membranes probed by terahertz spectroscopy." *Biophysical journal* 97.9 (2009): 2484-2492.
- [TREJO] Trejo, Alfonso Cárabez, and Anahí Chavarría Krauser. "de los carbohidratos."
- [VALCÁRCEL] Valcárcel José, Alexandre, Francisco Aznar Ballesta, and Ferran Martín. "Diseño de inversores de impedancias de microondas compactos basados en metamateriales: aplicación a divisores de potencia." (2008).
- [VALENZUELA] Valenzuela, Alfonso. "Ácidos grasos con isomería trans i: Su origen y los efectos en la salud humana." *Revista chilena de nutrición* 35.3 (2008): 162-171.
- [VAN DE HULST] Van de Hulst, H. C. (1957). *Light scattering by small particles*. By HC van de Hulst.
- [VAN EXTER] Van Exter, Martin, Ch Fattinger, and D. Grischkowsky. "Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor." *Optics letters* 14.20 (1989): 1128-1130.
- [VILLAFUERTE] Villafuerte Cobos, Angi Lilibeth. *Análisis del uso de tecnología de imágenes THz como alternativa para el control de calidad de alimentos procesados*. Diss. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Carrera de Ingeniería en Teleinformática., 2021.
- [WALTHER] Walther, M., et al. "Collective vibrational modes in biological molecules investigated by terahertz time-domain spectroscopy." *Biopolymers: Original Research on Biomolecules* 67.4-5 (2002): 310-313.
- [WANG] Wang, Kaiqiang, Da-Wen Sun y Hongbin Pu. "Emerging non-destructive terahertz spectroscopic imaging technique: Principle and applications in the agri-food industry." *Trends in Food Science & Technology* 67 (2017): 93-105.
- [WANG 2] Wang, Fan, et al. "A high-efficiency regime for gas-phase terahertz lasers." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115.26 (2018): 6614-6619.
- [WANGSNESS] Wangsness, Roald K., and Ronald K. Wangsness. *Electromagnetic fields*. Vol. 2. New York: Wiley, 1979.
- [WATERS] Waters, J. W., et al. "The UARS and EOS microwave limb sounder (MLS) experiments." *Journal of the Atmospheric Sciences* 56.2 (1999): 194-218.
- [WEININGER] Weininger, Stephen J., and Frank R. Stermitz. *Química orgánica*. Reverté, 1988.
- [WEISS] Weiss, Carsten, et al. "Tuning characteristics of narrowband THz radiation generated via optical rectification in periodically poled lithium niobate." *Optics Express* 8.9 (2001): 497-502.
- [WILLIAMS] Williams, Benjamin S. "Terahertz quantum-cascade lasers." *Nature photonics* 1.9 (2007): 517-525.
- [WU] Wu, Kaijie, et al. "Terahertz wave accelerates DNA unwinding: A molecular dynamics simulation study." *The Journal of Physical Chemistry Letters* 11.17 (2020): 7002-7008.
- [XU] Xu, Jing, Kevin W. Plaxco, and S. James Allen. "Probing the collective vibrational dynamics of a protein in liquid water by terahertz absorption spectroscopy." *protein Science* 15.5 (2006): 1175-1181.
- [XU 2] Xu W, Xie L, Ye Z, Gao W, Yao Y, Chen M, Qin J, Ying Y. Discrimination of Transgenic Rice containing the Cry1Ab Protein using Terahertz Spectroscopy and Chemometrics. *Sci Rep*. 2015 Jul 8;5:11115. doi: 10.1038/srep11115. PMID: 26154950; PMCID: PMC4495602.
- [YU] Yu, Calvin, et al. "The potential of terahertz imaging for cancer diagnosis: A review of investigations to date." *Quantitative imaging in medicine and surgery* 2.1 (2012): 33.
- [ZHAO] Zhao, Hang, et al. "Ultrafast hydrogen bond dynamics of liquid water revealed by terahertz-induced transient birefringence." *Light: Science & Applications* 9.1 (2020): 1-10.

Anexos

A. Anexo I: Ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas **han de obedecer las leyes del electromagnetismo**, se cumple para cualquier onda electromagnética, independientemente de su longitud de onda. Son muchos los científicos a lo largo de la historia que han aportado información a su comportamiento, y han tratado de reproducir matemáticamente ese comportamiento. Finalmente fue el escocés James Clerk Maxwell quién aunó todas las explicaciones que los científicos iban dando en unas ecuaciones matemáticas que cumplen a la perfección hasta la fecha el comportamiento de la luz. Se las conoce como las **leyes de Maxwell**, que generalmente se escriben como cuatro ecuaciones [PANOFSKY]:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (7)$$

Siendo \vec{E} el vector campo eléctrico, $\vec{\nabla}$ el operador nabla, que representa la derivada espacial, ρ la densidad de carga eléctrica, ϵ la constante dieléctrica del vacío, μ es la permeabilidad magnética del vacío, \vec{B} es el vector campo magnético. La primera de las ecuaciones corresponde a la **ley de Gauss** y establece que la divergencia del campo eléctrico en un punto es proporcional a la densidad de carga eléctrica en ese punto. La segunda ecuación es la llamada **ley de Gauss para el campo magnético** y establece que el campo magnético es solenoidal, es decir, no tiene fuentes ni sumideros magnéticos. La tercera ley es la llamada **ley de Faraday**, establece que la circulación del campo eléctrico alrededor de una curva cerrada es proporcional a la variación temporal del flujo magnético a través de una superficie apoyada en esa curva. La cuarta ecuación es la llamada **ley de Ampère-Maxwell** y establece que la circulación del campo magnético alrededor de una curva cerrada es proporcional a la corriente eléctrica y a la variación temporal del flujo eléctrico a través de la superficie encerrada por esa curva.

Las ecuaciones quedarían consolidadas cuando el genio alemán Heinrich Rudolph Hertz comprobó experimentalmente su validez. Por lo tanto, **la luz está compuesta por ondas de naturaleza electromagnética** que pueden propagarse incluso en el vacío y lo hacen a una velocidad constante. Con estas cuatro ecuaciones podemos encontrar una ecuación de onda para los campos.

Fijémonos por un momento en las dos últimas ecuaciones. Podemos ver que el campo eléctrico se escribe en función del campo magnético. Para obtener conclusiones sobre alguno de los dos campos, lo ideal sería encontrar una ecuación que describiera sólo ese campo. Es precisamente lo que Maxwell se propuso hacer manipulando sus ecuaciones [LINK 11].

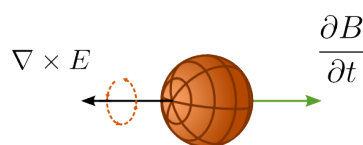


Figura 68: Representación de la ley de Faraday.

Supongamos que tenemos un campo magnético dirigido hacia la derecha (figura 68) que **varía con el tiempo**, y además, lo hace de un modo que su módulo aumenta con el tiempo. De acuerdo con la tercera ecuación (**ley de Faraday**), aparecerá un campo eléctrico no conservativo que se opone a la variación del campo magnético (véase el signo negativo). Veremos que junto con la cuarta ecuación, ese signo negativo es una consecuencia de la conservación de la energía. De no ser así, se producirían campos infinitamente grandes una vez que se inicie el mecanismo, puesto que ambos campos se retroalimentarían indefinidamente, pudiendo tener como consecuencia campos infinitamente grandes o infinitesimales.

Siguiendo la misma lógica que acabamos de ver, en la cuarta ecuación de Maxwell (**ley de Ampère-Maxwell**) también hay un rotacional para el campo magnético. Cuando tenemos una variación con el tiempo del campo eléctrico (figura 69) aparece un campo magnético perpendicular al campo eléctrico. Como el campo eléctrico es perpendicular al campo magnético, el campo magnético que se acaba de crear como consecuencia de la variación del campo eléctrico, debe ser paralelo al campo magnético obtenido en la tercera ecuación (caso anterior). Esto se puede entender como si hubiéramos hecho el rotacional dos veces [LINK 11]:

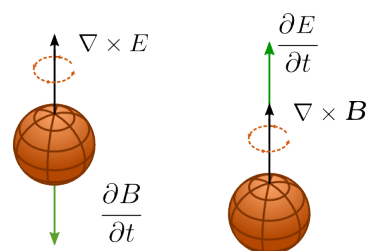


Figura 69: Representación de la ley de Ampère-Maxwell.

$$\nabla \times (\nabla \times E) = \nabla (\nabla \cdot E) - \nabla^2 E = \nabla \times \left(-\frac{\partial B}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times B) = -\mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (8)$$

$$\nabla \times (\nabla \times B) = \nabla (\nabla \cdot B) - \nabla^2 B = \left(\nabla \times \mu\epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) = \mu\epsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times E) = -\mu\epsilon \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (9)$$

No existen fuentes escalares de campo eléctrico (*cargas*), lo que implica que se cumple que $\nabla \cdot E = 0$. Por otro lado, como la divergencia de los campos magnéticos es cero, ya que no existen fuentes escalares de campo magnético, tenemos que se cumple que $\nabla \cdot B = 0$. En este caso, las ecuaciones se simplifican un poco y llegamos a las llamadas **ecuaciones de Helmholtz**:

$$\nabla^2 E = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (10)$$

$$\nabla^2 B = \mu\epsilon \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (11)$$

Lo que hemos hecho en realidad es combinar ambas ecuaciones. Hemos partido de la variación del campo magnético para obtener un campo eléctrico no conservativo. A su vez, el campo eléctrico no conservativo crea un campo magnético variable en el tiempo. Podemos observar que en realidad lo que hicimos fue encontrar dos ecuaciones que explican cómo los campos se influyen mutuamente y, con ello, **hemos conseguido aislar los campos en dos ecuaciones independientes**. Vemos que nos aparece una letra griega, ∇^2 , se trata del operador laplaciano que se define como la divergencia del gradiente de una función. Las ecuaciones de Helmholtz describen la propagación de las ondas.

Una consecuencia de la ley de Faraday, y que nos es útil para **explicar la funcionalidad del espejo en nuestro equipo de laboratorio**, es que, al hacer incidir un haz de ondas electromagnéticas (*variable en el tiempo*) sobre una superficie conductora, va a generar un **campo eléctrico no conservativo**. Va a generar unas corrientes cerradas sobre la superficie del conductor. A estas

corrientes se las conoce como: **corrientes de Foucault** [LANDAU]. Estas corrientes generadas a partir del campo eléctrico no conservativo, van a generar un campo magnético perpendicular a la superficie (*en principio en los dos sentidos*). Como no puede atravesar el material, irá dirigido en un único sentido.

A.1. Propagación de ondas

Vamos a ver a continuación cómo es la **propagación de la radiación**. Para ello, vamos a suponer que la onda ha viajado por el espacio el suficiente tiempo como para que el frente de ondas sea lo suficientemente amplio y se pueda considerar como un **frente plano**. Vamos a tener una onda plana con una única frecuencia que avanza en la dirección de propagación (*figura 70*).

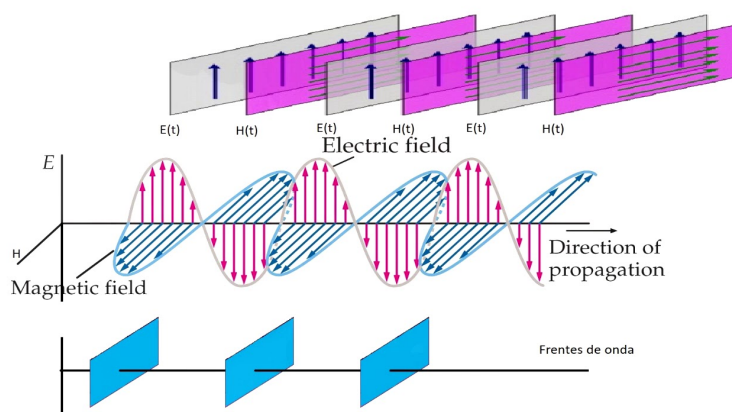


Figura 70: Propagación de una onda electromagnética con frente plano.

Matemáticamente podemos representar las soluciones de la propagación del campo eléctrico y del campo magnético en dos ecuaciones, **ecuaciones de onda**, para ello vamos a elegir una dirección de avance de la onda, utilizaremos coordenadas cartesianas (x,y,z) siendo la dirección de avance la coordenada z [WANGSNESS], [VAN DE HULST].

$$\vec{E}(x, y, z, t) = E_0 e^{j(kz - \omega t)} \hat{x} \quad (12)$$

$$\vec{B}(x, y, z, t) = B_0 e^{j(kz - \omega t)} \hat{y} \quad (13)$$

Vemos que en las ecuaciones aparecen E_0 y B_0 , que son las amplitudes de las ondas del campo eléctrico y campo magnético respectivamente. También nos aparece una función exponencial con la unidad imaginaria "j" ya que hablamos de ondas periódicas y éstas se combinan en una amplitud compleja. Otro parámetro que nos aparece es el llamado **número de onda, k**, definido como $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ siendo λ la longitud de onda. Después nos aparece ω que es la frecuencia angular y t es el tiempo, ya que **dependen del espacio y del tiempo**.

Hemos visto que, como no hay fuentes de campo eléctrico, se cumplía que $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$. Se tiene entonces que los módulos $(E_0)_z$ y $(B_0)_z$ son constantes en la dirección de avance de la onda, eso implica que las ondas electromagnéticas son transversales, **los campos eléctricos y magnéticos son perpendiculares a la dirección de propagación y entre sí**.

Además la ley de Faraday implica una relación entre las amplitudes del campo eléctrico y el campo magnético.

$$-k(\vec{E}_0)_y = \omega(\vec{B}_0)_x \quad (14)$$

$$-k(\vec{E}_0)_x = \omega(\vec{B}_0)_y \quad (15)$$

De manera equivalente, como son vectores ortogonales entre sí, podemos relacionarlos con la coordenada que hemos elegido como propagación y escribimos la siguiente expresión:

$$\vec{B}_0 = \frac{k}{\omega}(\hat{z} \times \vec{E}_0) \quad (16)$$

Por otro lado, podemos expresar el campo de inducción magnética \vec{B} con el **vector intensidad del campo magnético**, \vec{H} , con la siguiente relación: $\vec{B} = \mu\vec{H}$ (*trabajamos en medios lineales*¹⁶). De forma análoga, podemos comparar el vector campo eléctrico \vec{E} con el **vector desplazamiento**, \vec{D} , con la relación: $\vec{D} = \epsilon\vec{E}$, siendo μ y ϵ la permeabilidad magnética y la permitividad eléctrica respectivamente. Con esta relación **podemos escribir las soluciones de la propagación de las ondas electromagnéticas** para un medio libre como:

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega\mu\vec{H} \quad (17)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega\epsilon\vec{E} \quad (18)$$

Donde \vec{k} , \vec{E} y \vec{H} forman un triedro directo. Además, en la propagación en un medio libre, la **constante de propagación**, β , es igual al número de onda, k , de esa forma, podemos escribir lo siguiente [RUIZ]:

$$k^2 = \beta^2 = \epsilon\mu \frac{\omega^2}{c^2} \quad (19)$$

Como podemos apreciar para las soluciones en la propagación de las ondas planas, éstas **dependen del medio por el que viajan**, ya que dependen de los parámetros ϵ y μ . **Dichos parámetros están relacionados con la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas**. La velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío se representan con la letra c , y está relacionado con el medio mediante la siguiente expresión: $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$. De forma análoga, la velocidad dentro de un medio material lo podemos representar como: $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$. La relación de cambio de velocidad que sufre la luz al atravesar un medio, viene recogida por un parámetro adimensional, n , llamado **coeficiente de refracción** [RUIZ], [MUÑOZ].

$$n = \frac{c}{v} \equiv \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} \quad (20)$$

Esta reducción de velocidad que sufren las ondas electromagnéticas al pasar del vacío a un medio material tiene consecuencias. Las ondas electromagnéticas cambiarán de trayectoria siguiendo el **principio de Fermat**. Las ondas trazarán un camino tal que el tiempo que tarde en recorrerlo sea mínimo. El principio de Fermat es una consecuencia de la ley de la reflexión y la ley de la refracción. Por lo tanto, habrá un ángulo entre el rayo incidente y el rayo refractado cumpliéndose las **condiciones de contorno** (*más información en el anexo B*). Este cambio de ángulos con una superficie de separación entre dos medios diferentes viene recogido por la **ley de Snell** que tiene la siguiente expresión [CASAS 2], [VALCÁRCEL].

$$n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_r) \quad (21)$$

Las ondas electromagnéticas libres, que acabamos de describir, incidirán con la materia, y por lo tanto, obedecerán la ley de Snell. Vimos que el índice de refracción, n , cuya definición es el cociente

¹⁶Medios lineales: en electromagnetismo, un medio se considera lineal si satisface la ley de superposición, es decir, si la respuesta del medio a una excitación es proporcional a la excitación misma. Las propiedades del medio no dependen de la intensidad del campo aplicado.

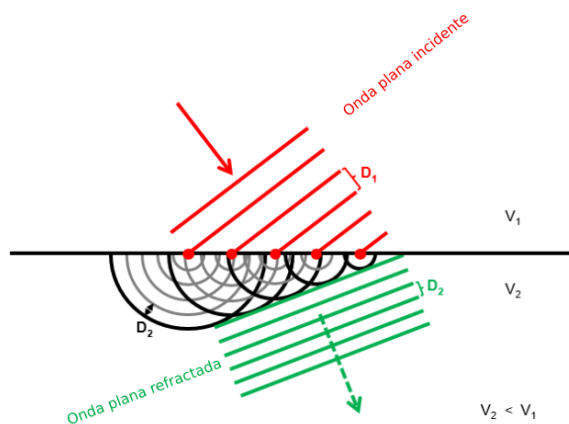


Figura 71: Refracción de un frente plano (Ley de Snell).

entre velocidades, $n = \frac{c}{v}$, entonces, volviendo a ello, podemos llegar un poco más lejos si utilizamos convenientemente el número de onda y la velocidad de fase [RUIZ]:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\omega/\nu}{\omega/c} = \frac{k}{k_0} = \pm \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} = \pm \sqrt{\epsilon_r\mu_r} \quad (22)$$

Hemos llegado a una expresión que nos permite relacionar el índice de refracción con la permitividad del medio. Por otro lado, en la expresión podemos observar que nos aparecen los signos \pm , ya que la velocidad de fase puede ser positiva y/o negativa, lo que implica la posibilidad de tener un **índice de refracción negativo**. Los índices de refracción negativos son objeto de estudio y suponen una revolución en el campo de los materiales. No se han encontrado en la naturaleza, pero se pueden elaborar artificialmente. A estos materiales se los denomina **metamateriales** [ÁLVAREZ], [JÁUREGUI] (*más información en el anexo F*).

A.2. Propagación de las ondas electromagnéticas con centros dispersivos

Hemos visto anteriormente la expresión del campo eléctrico y magnético, su propagación como onda libre. Esto es válido para cualquier tipo de onda escalar (*ya sea sonora, electromagnética, etc.*), cuya función se puede escribir matemáticamente como [VAN DE HULST]:

$$\Psi_0 = e^{jkz - j\omega t} \quad (23)$$

Esta onda cuando atraviesa un material, se desvía de su trayectoria. **Cada punto material se convierte en un nuevo foco emisor**, por lo que cualquier punto del espacio es atravesado por dos sistemas de ondas: la onda incidente y la onda dispersada. **Cada onda electromagnética viajará en su propia dirección y con su propia intensidad**. La intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda.

A.2.1. Extinción de ondas para un cuerpo

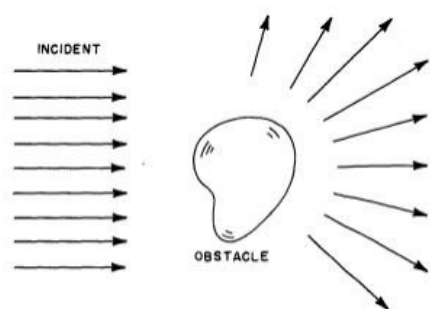


Figura 72: *Obstáculo entre fuente y sensor.*

Supongamos un haz de ondas electromagnéticas que provienen del infinito (*por lo que tendrá un frente de ondas plano*), y nosotros pretendemos recoger esas ondas en una pantalla o algún tipo de receptor como sucede en nuestro experimento. Resulta que las ondas electromagnéticas en su camino hasta nuestro receptor, se encuentran con un obstáculo (*en nuestro caso un alimento*). La información que lleva la onda ha sido alterada, de tal forma que no hay ningún modo de observar esa onda inicial que pretendíamos ver, ya que **ahora tenemos dos focos**. Tenemos que hablar de la onda que proviene del infinito y de la onda que parte del objeto con el que ha interactuado. Para saber qué sucede en este caso con la intensidad de la onda, podemos sumar las amplitudes de las dos ondas (*de la fuente y del objeto*). Nos vamos a encontrar con una situación en la que la radiación total que llega al receptor tiene una menor intensidad que la intensidad que parte

originalmente de la fuente. Nos encontramos con un **fenómeno de extinción** (*dispersión más absorción*). Se trata de un fenómeno de **interferencia ondulatoria**, no se trata de un bloqueo de la onda. La onda dispersa elimina parte de la energía de la onda original por interferencia [VAN DE HULST].

A.2.2. Extinción de la luz para varias partículas

Consideremos una situación en la que nos encontramos numerosos objetos en el camino de la onda electromagnética que se dirige al sensor. Un ejemplo válido en nuestro experimento puede ser, por ejemplo, azúcar de mesa. Si sumamos todas las amplitudes como en el caso de una sola partícula, pasamos a un medio continuo, en el que la suma pasa a ser una integral. El resultado puede representarse como la influencia de un número complejo. Se trata del **índice de refracción del medio en su conjunto** [VAN DE HULST].

$$\tilde{m} = n - jn' \quad (24)$$

Se distingue, n , como la parte real y n' , como la parte imaginaria del índice de refracción, por lo tanto, vamos a tener dos efectos. **La parte real determina un retraso de la fase de la onda que viaja a través del medio.** Es el **fenómeno de dispersión**, la velocidad de la fase cambia de la forma $\frac{c}{n}$. **La parte imaginaria determina una pérdida de la intensidad** de la onda [BOHREN].

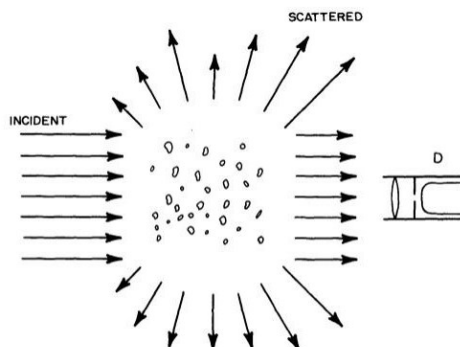


Figura 73: *Múltiples obstáculos entre fuente y sensor.*

A.3. Ondas milimétricas y submilimétricas

Nosotros en el análisis nos enfocamos en una región del espectro electromagnético muy estrecha, llamada región de las **ondas milimétricas**. Utilizamos dos fuentes de radiación electromagnética, cuyas ondas tienen una longitud de onda de $1,0\text{ mm}$ para la fuente de radiación de 300 GHz , y $3,0\text{ mm}$ de longitud de onda para la fuente de radiación de 100 GHz . A las ondas electromagnéticas que utilizamos se les pone el apellido de *milimétricas* debido a que su longitud de onda es del orden del milímetro. Las frecuencias de estas fuentes **comparten frontera con las ondas de Terahercio** (10^{12}Hz), una región del espectro poco utilizada en la tecnología debido a las dificultades técnicas de operar con estas frecuencias. A estas ondas milimétricas, de hasta 3 mm , se las engloba dentro del rango espectral del THz. Debido a esta dificultad para operar con este tipo de frecuencias, se le suele denominar **brecha del THz** [LEE].

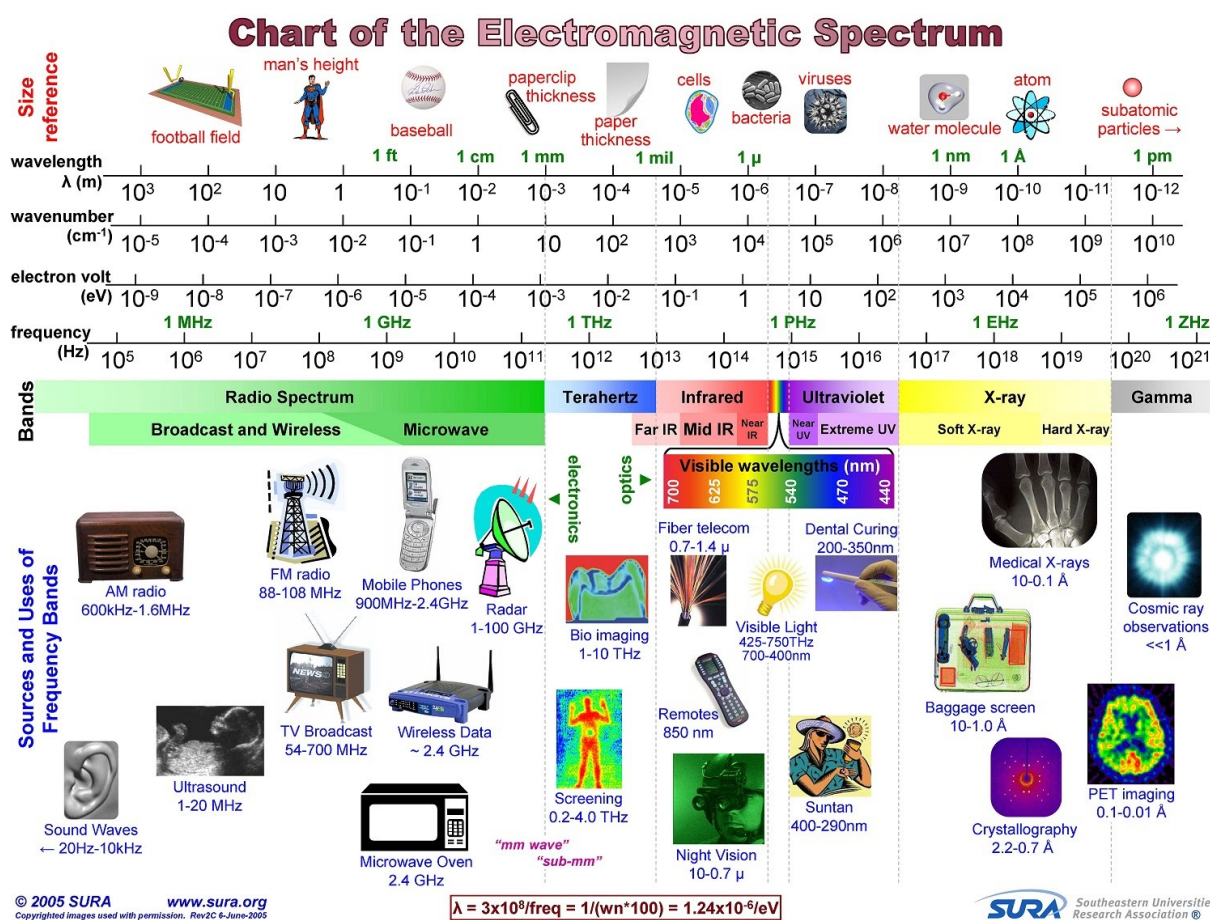


Figura 74: Espectro electromagnético

B. Anexo II: Condiciones de contorno

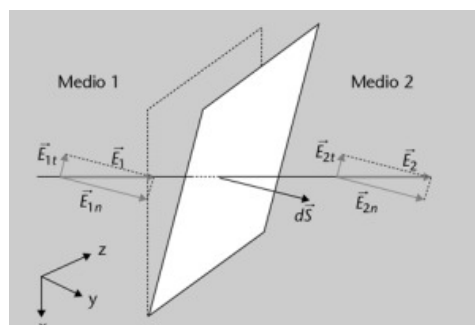


Figura 75: Condiciones de contorno.

Cuando las ondas electromagnéticas cambian de medio material en su camino, deben satisfacer una serie de condiciones que denominamos como **condiciones de contorno**. Estas condiciones son aplicables a los campos eléctricos y magnéticos en toda la **región cercana a la zona de separación de los dos medios**, que puede ser llamada como zona interfacial o interfaz [WANGSNES]. Las condiciones de contorno se deducen a partir de las ecuaciones de Maxwell (*más información en el anexo A*). Podemos separar los campos eléctricos y magnéticos en dos componentes: paralelo (o *tangencial*) a la superficie de separación y perpendicular (o *normal*) a la superficie de separación.

Para la **componente perpendicular a la superficie de separación del campo eléctrico**, se deben satisfacer ciertas condiciones. Supongamos que **no existen cargas eléctricas en la zona interfacial**. Eso implica que el número de líneas que entran en la interfaz deben ser igual al número de líneas que salen de campo eléctrico. El campo eléctrico es el mismo en los dos lados. Supongamos ahora que **sí existen cargas eléctricas en la zona interfacial**. En este caso, el campo eléctrico no será el mismo en ambos lados de la superficie. Habrá por lo tanto una discontinuidad en el valor del campo eléctrico. Podemos escribir las siguientes expresiones matemáticas (*medios lineales*):

$$\epsilon_1 E_{1\perp} - \epsilon_2 E_{2\perp} = \sigma \quad (25)$$

$$D_{1\perp} - D_{2\perp} = \sigma \quad (26)$$

Para la **componente paralela a la superficie de separación del campo eléctrico**, tenemos que, independientemente de que haya o no carga en la interfaz, son idénticas en ambos lados de la superficie de separación:

$$E_{1\parallel} = E_{2\parallel} \quad (27)$$

$$\frac{D_{1\parallel}}{\epsilon_1} = \frac{D_{2\parallel}}{\epsilon_2} \quad (28)$$

Para la **componente perpendicular a la superficie de separación del campo magnético** hay una diferencia. Dado que **no existen cargas magnéticas**, no se pueden generar las líneas de campo magnético ni destruir en ningún lugar. Esto va a generar una potente implicación. Las componentes perpendiculares (*normales a la superficie*) del campo magnético entre dos medios materiales distintos (*medios lineales*), **son idénticas**:

$$B_{1\perp} = B_{2\perp} \quad (29)$$

$$\mu_1 H_{1\perp} = \mu_2 H_{2\perp} \quad (30)$$

Para la **componente paralela a la superficie de separación del campo magnético**, esperamos que en cada uno de los medios, sea proporcional a la densidad de corriente superficial en la interfaz. Matemáticamente esto es:

$$\frac{B_{1\parallel}}{\mu_1} - \frac{B_{2\parallel}}{\mu_2} = J_s \quad (31)$$

$$H_{1\parallel} - H_{2\parallel} = J_s \quad (32)$$

C. Anexo III: Incidencia de las ondas electromagnéticas sobre la materia: Transmitancia y reflectancia

Las ondas electromagnéticas que irradiamos en los alimentos pueden incidir normalmente en la superficie o con un cierto ángulo. Esta diferencia entre la dirección del avance de la onda y el plano de incidencia del material, tiene consecuencias. Vamos a ver el caso de la incidencia normal y paralela a la superficie de separación de los dos medios.

C.1. Incidencia normal

Por simplicidad, empecemos por el caso en el que la onda incide perpendicularmente a la superficie. A través de la ley de Snell podemos deducir que los rayos que inciden con un ángulo de $\frac{\pi}{2}$ con respecto a la superficie de separación de dos medios, el rayo continuará sin desviarse.

Aplicando las condiciones de contorno (*más información en el anexo B*) para la componente paralela del campo eléctrico, podemos obtener la siguiente relación [HECHT], [MUÑOZ], [NOVOTNY]:

$$E_t = E_i + E_r \quad (33)$$

Donde E_t , E_i y E_r son los campos eléctricos para las ondas transmitida, incidente y reflejada respectivamente. Esta condición por sí sola no es suficiente para explicar el valor de los campos. Apliquemos ahora otra condición. Veamos las condiciones de frontera de la componente paralela del campo magnético.

$$\frac{B_t \cos \theta_t}{\mu_2} = \frac{B_i \cos \theta_i}{\mu_1} - \frac{B_r \cos \theta_r}{\mu_1} \quad (34)$$

Donde B_t , B_i y B_r son los campos magnéticos para las ondas transmitida, incidente y reflejada respectivamente. Como en general los medios no son magnéticos, podemos aproximar las permitividades a la del vacío: $\mu_1 \approx \mu_2 \approx \mu_0$. Al hacer la aproximación, podemos simplificar la **ecuación (34)** eliminando la permeabilidad magnética. Teniendo en cuenta que $E = vB$, siendo, v , la velocidad de la carga y teniendo en cuenta también la siguiente relación $E = \frac{cB}{n}$, obtenemos las siguientes expresiones:

$$E_t = E_i + E_r \quad (35)$$

$$n_1(E_i - E_r) \cos \theta_i = n_2 E_t \cos \theta_t \quad (36)$$

Conocido E_i , podemos operar con estas últimas ecuaciones para hallar los valores de E_r y de E_t .

Onda reflejada: para obtener la onda reflejada, operamos con las **ecuaciones (35) y (36)**, con lo que llegamos a la siguiente relación:

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} = r_s \quad (37)$$

Hemos obtenido la relación entre la onda reflejada y la incidente. Con ello, hemos obtenido también el primer coeficiente de Fresnel para la incidencia perpendicular. **Los coeficientes de Fresnel muestran las relaciones entre las amplitudes de las ondas incidente, reflejada y transmitida.**

Onda transmitida: podemos encontrar también el coeficiente de Fresnel para la onda transmitida operando del mismo modo:

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} = t_s \quad (38)$$

Estos coeficientes son muy útiles para calcular la reflectancia y transmitancia. **La reflectancia y la transmitancia, muestran las relaciones entre las intensidades de las ondas incidente, reflejada y transmitida.** Definamos en primer lugar la **intensidad de una onda electromagnética.**

$$I \propto \|E\|^2 \quad (39)$$

Vemos que la intensidad de una onda electromagnética es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico. La **reflectancia** y la **transmitancia**, tienen las siguientes expresiones:

$$R_s = \frac{I_r}{I_i} = r_s^2 = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (40)$$

$$T_s = \frac{I_t}{I_i} = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} t_s^2 = \left(\frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (41)$$

El valor de la intensidad de la onda reflejada o transmitida nunca podrá ser más grande que el de la onda incidente. Ha de cumplirse el principio de conservación de la energía.

C.2. Incidencia oblicua

El razonamiento es análogo, aunque se torna algo más complicado. Existe una simplificación para encontrar la relación entre los campos que nos conducen a los coeficientes de Fresnel, reflectancia y transmitancia. Para ello, es conveniente utilizar el campo magnético en lugar del campo eléctrico [HECHT] [MUÑOZ]. Aplicando las condiciones de contorno:

$$B_t = B_i - B_r \quad (42)$$

Donde B_t es el campo magnético de la onda transmitida, B_i es el campo magnético de la onda incidente y B_r es el campo magnético de la onda reflejada. Del mismo modo que hicimos con la incidencia normal, podemos relacionar las amplitudes con el campo eléctrico haciendo uso de las relaciones $E = vB$ y $E = \frac{cB}{n}$:

$$\frac{n_2 E_t}{c} = \frac{n_1 E_i}{c} - \frac{n_1 E_r}{c} \quad (43)$$

$$n_1(E_i - E_r) = n_2 E_t \quad (44)$$

Onda reflejada: operando con estas ecuaciones, y teniendo en cuenta las condiciones de contorno, podemos obtener la relación entre las ondas reflejada con la incidente y la relación entre las ondas transmitidas y la incidente. Obtenemos con ello, el coeficiente de Fresnel para la onda reflejada paralela.

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{-n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} = r_\rho \quad (45)$$

Onda transmitida: ahora veamos la relación entre las ondas transmitidas y las ondas incidentes. Obtenemos con ello, el coeficiente de Fresnel para la onda transmitida paralela.

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} = t_\rho \quad (46)$$

Podemos relacionar las intensidades de las ondas reflejadas con la de las ondas incidentes, y las ondas transmitidas con las ondas incidentes para calcular la **reflectancia** y **transmitancia** en la situación de incidencia paralela.

$$R_\rho = \frac{I_r}{I_i} = r_\rho^2 = \left(\frac{-n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (47)$$

$$T_\rho = \frac{I_t}{I_i} = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} t_\rho^2 = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \left(\frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (48)$$

D. Anexo IV: Absorción y profundidad de penetración

Los medios materiales en general, y en particular los alimentos que hemos irradiado, presentan una opacidad en función del espesor. Por esa razón, decir que un material es transparente u opaco no es riguroso ya que depende de su espesor. A medida que la onda electromagnética va interactuando con la materia, va cediendo parte de su energía, a este fenómeno se le conoce como **atenuación**. El fenómeno de atenuación está definido dentro del **índice de refracción**. El índice de refracción es un número complejo que tiene la siguiente forma [HECHT]:

$$\tilde{m} = n - in' \quad (49)$$

La parte real describe la refracción sin pérdidas de energía. La parte imaginaria, llamada **coeficiente de extinción**, describe las pérdidas energéticas de las ondas electromagnéticas al propagarse por un medio. A este fenómeno se le denomina atenuación. Cuando se produce una atenuación, la amplitud de **la onda decrece exponencialmente**. Podemos describir ese proceso matemáticamente con la siguiente expresión:

$$I = I_0 e^{-\alpha z} \quad (50)$$

Donde I_0 es la intensidad de la onda inicial, α es el coeficiente de atenuación y z es la distancia recorrida por la onda electromagnética dentro del medio. El coeficiente de atenuación depende de cada medio material, mide la rapidez con la que se reduce la intensidad de la onda electromagnética cuando se propaga por el medio.

A veces, es útil utilizar este mismo concepto desde el punto de vista de la capacidad de atravesar un material sin experimentar pérdidas significativas. Para ello definimos un nuevo parámetro, llamado **profundidad de penetración**. **Es un valor inverso del coeficiente de atenuación**. Podemos expresarlo matemáticamente de la siguiente forma:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\pi\omega\mu\sigma}} \quad (51)$$

Donde ω es la frecuencia de la onda que se propaga, μ es la permeabilidad magnética del medio y σ la conductividad del medio material.

Desde el punto de vista de la intensidad, el factor profundidad de penetración corresponde a la distancia que recorre la onda electromagnética para que su intensidad disminuya un factor e . Matemáticamente podemos describir este fenómeno con la siguiente ecuación:

$$I = I_0 e^{-\frac{z}{\delta}} \quad (52)$$

E. Anexo V: Mecanismos del comportamiento dieléctrico

Para ahondar más en la explicación de la interacción de los materiales dieléctricos con la radiación electromagnética, vamos a hablar de los **mecanismos que afectan al comportamiento dieléctrico** que son los **fenómenos de resonancia** y **fenómenos de relajación** [ECHEVARRÍA], [RODRÍGUEZ], [DÍAZ 2], [CARBALLIDO], [MORÉ].

E.1. Fenómenos de resonancia

Hemos comentado en la **sección 3.1** que uno de los factores más importantes que afecta directamente a la permitividad es la frecuencia. **Todos los materiales presentan propiedades que dependen de la frecuencia.** Dentro del marco de las **resonancias**, nos encontramos con las **polarizaciones**, una de las propiedades más importantes que vamos a tener en cuenta.

Polarización electrónica: Cuando explicamos la naturaleza de los materiales dieléctricos, hablamos de separación parcial de las cargas en cada átomo cuando el material se expone a un campo eléctrico externo. Las cargas negativas (*electrones*) son atraídas por el campo eléctrico externo y se separan ligeramente de los átomos a los que "*pertenecen*". De esta manera, al haber una separación entre cargas de distinto signo se origina un campo eléctrico. En este caso, decimos que se ha formado un **dipolo eléctrico**. Este campo eléctrico de origen dipolar (*en realidad formado por muchos dipolos*) tendrá un sentido opuesto al campo incidente (*nuestra fuente de radiación milimétrica*) y va a traer como consecuencia una disminución de campo eléctrico que entra en el sistema, ya que va a haber un campo de origen dipolar que va a impedir que la radiación externa penetre en el material.

Polarización iónica: Cuando una molécula es expuesta a un campo eléctrico, hay situaciones en las que la respuesta viene dada por un desplazamiento relativo entre los iones positivos y negativos de una molécula. De este modo, aparecen centros de carga separados de distinto signo. Este desplazamiento afectará a las vibraciones moleculares, que dependerán en última instancia de la naturaleza del sólido. Esta nueva distribución parcial de carga hará que el conjunto de dipolos genere un campo dipolar propio que tenga un sentido opuesto al campo externo, de tal manera, que apantallará en cierta medida al campo eléctrico.

Dipolos permanentes: En la naturaleza algunas sustancias presentan dipolos permanentes. Estas sustancias presentan una distribución electrónica que está repartida de manera que forman un dipolo incluso en ausencia de un campo eléctrico externo. Un ejemplo de dipolo permanente es la molécula de agua. Es una molécula muy común y que, además, vamos a tener muy presente en los alimentos. Este tipo de moléculas vibrarán debido a la agitación térmica y rotarán (*si pueden*) con una frecuencia natural, dada en función de la temperatura y del **tamaño de la molécula**. En general, su distribución será aleatoria y no habrá un campo eléctrico dipolar, ya que se cancelan unos campos con otros. Cuando se aplica un campo eléctrico externo, los dipolos se orientan de tal manera que aparece un campo dipolar con sentido opuesto al campo externo impidiendo su penetración en el material. Este giro de las moléculas polares depende a su vez de la viscosidad del medio, ya que cuando un medio se polariza, tenemos fricciones entre moléculas que se traducen en **pérdidas energéticas en forma de calor**.

No por el mero hecho de que las moléculas sean polares implica que se vaya a polarizar el material con la presencia de un campo eléctrico externo, sino que existen mecanismos para ello. Nosotros asociamos los **grados de libertad** de un sistema a la cantidad de movimientos que puede realizar con respecto a un punto (*generalmente el centro de cargas*), pero resulta que no siempre estos movimientos son realizables debido a causas externas (*enlaces*). Decimos por lo tanto que el sistema pierde grados de libertad. Hay ocasiones que una molécula polar siente la presencia de un campo externo pero no puede realizar ciertos movimientos porque hay alguna restricción que se lo impide.

E.2. Fenómenos de relajación

Un mecanismo importante dentro de la permitividad dieléctrica es el **fenómeno de relajación**. La radiación que vamos a emitir está compuesta por ondas electromagnéticas oscilantes en el tiempo. Eso implica que habrá un intervalo de tiempo en el que las moléculas polares sientan la perturbación del campo eléctrico externo desde que inciden en la materia y se **orienten con el campo eléctrico externo**. Tras un tiempo, en el que ese campo externo cesa su actividad, las moléculas recuperarían su frecuencia natural. A ese tiempo, tras el cual la molécula recupera la frecuencia natural previa y una vez que cesa la actividad del campo eléctrico externo, toma el nombre de **tiempo de relajación** que generalmente se escribe con la letra griega "τ". El problema de establecer un tiempo τ, es que **el comportamiento está influenciado también por las interacciones con las moléculas adyacentes** [POCE].

Por ese motivo, se asigna más de un tiempo de relajación. Podemos hablar del tiempo de relajación, τ_1 , correspondiente a la molécula en sí, y otro tiempo de relajación, τ_2 , correspondiente al momento dipolar del grupo [ESPURZ]. Cuando la frecuencia de las ondas electromagnéticas emitidas por la fuente coincide con la frecuencia natural de vibración del sistema, aparece un fenómeno de **resonancia**. Según aumenta la frecuencia de las ondas electromagnéticas, nos encontramos con diferentes fenómenos de dispersión (*figura 76*) que afectan a la interacción con los diferentes sistemas biológicos. **Hay resonancias moleculares y atómicas que ocurren a frecuencias que están en el rango de las microondas y THz. Esto implica que existe una gran variedad de aplicaciones en áreas de ciencia básica, sensores remotos, diagnóstico, tratamiento médico, etc.**

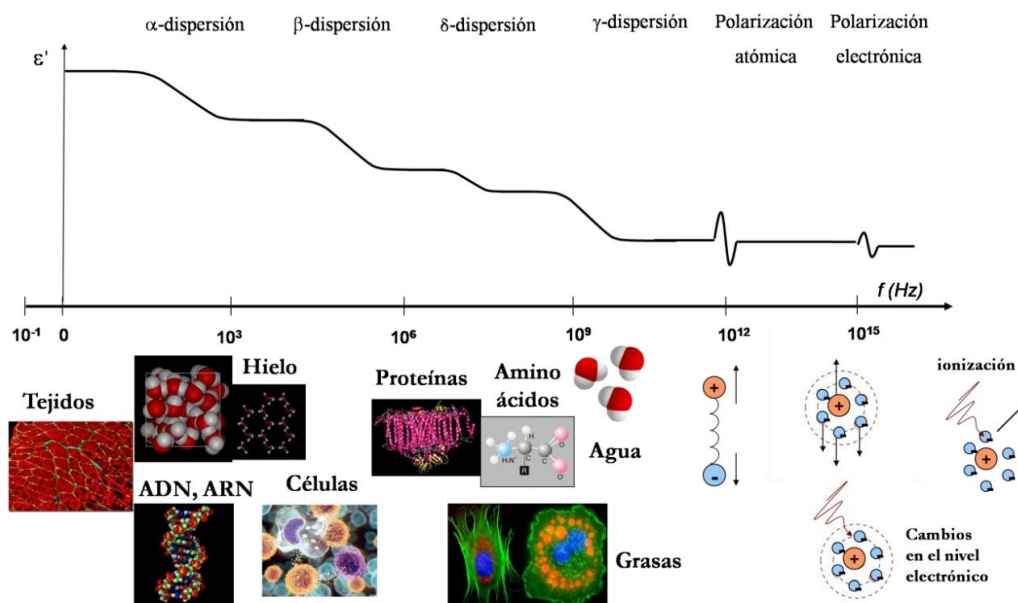


Figura 76: Espectro electromagnético en escala logarítmica de los diferentes factores que contribuyen a la constante dieléctrica en sistemas biológicos, siendo α, β, δ y γ las dispersiones dadas dependiendo de la frecuencia [CASTRO].

Nosotros tenemos dos fuentes de radiación electromagnética milimétrica, una fuente de 100 GHz ($1 \cdot 10^{11}$ Hz) y otra fuente de 300 GHz ($3 \cdot 10^{11}$ Hz). Vamos a estar en una región del espectro electromagnético cuya frecuencia es del orden de la frecuencia de las rotaciones y las vibraciones de las moléculas más pequeñas. Nos encontramos en la dispersión γ . **Es uno de los procesos que contribuyen a la constante dieléctrica en sistemas biológicos.** [CASTRO]. **La relajación**

gamma es un proceso rápido que se produce en escalas de tiempo de picosegundos a nanosegundos. La contribución relativa de este y otros procesos a la constante dieléctrica depende de factores como la composición química y la estructura del material. A medida que las moléculas de agua se adhieren a moléculas más grandes, las vibraciones colectivas reducen su frecuencia, y la interacción con las ondas electromagnéticas emitidas es diferente. Al aumentar la masa de las moléculas, el ritmo con el que vibran disminuye, por lo que si queremos encontrar una frecuencia de resonancia, deberemos hacer incidir ondas electromagnéticas de una menor frecuencia.

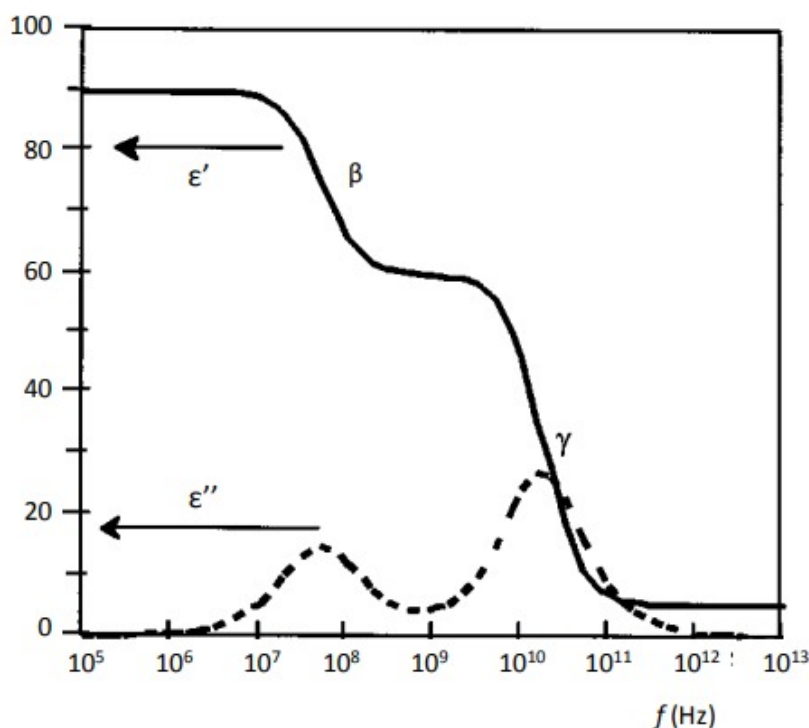


Figura 77: Representación gráfica del tiempo de relajación [CASTRO].

Podemos apreciar en la *figura 77* que en la región del espectro electromagnético en la que nos encontramos (*dispersión γ*), a medida que la frecuencia aumenta, el factor de pérdidas, ϵ'' , aumenta hasta un máximo, pero el factor de absorción, ϵ'_r , disminuye debido al desfase (*retardo en el tiempo*) entre la alineación del dipolo y el campo eléctrico [POCE]. Tomando el concepto de frecuencia de relajación, tanto ϵ'_r como ϵ'' permiten que el campo eléctrico oscile a una frecuencia tan elevada que a los dipolos les sea imposible seguir el ritmo para alinearse con el campo eléctrico, por lo que la rotación dipolar deja de influir y la polarización desaparece.

A continuación, en *figura 78* se muestra cómo en la dispersión γ , la **conductividad** aumenta enormemente en decremento de la permitividad. Esto es debido a las pérdidas dieléctricas moleculares y a la polarización dieléctrica del agua contenida en los tejidos [LINK 21].

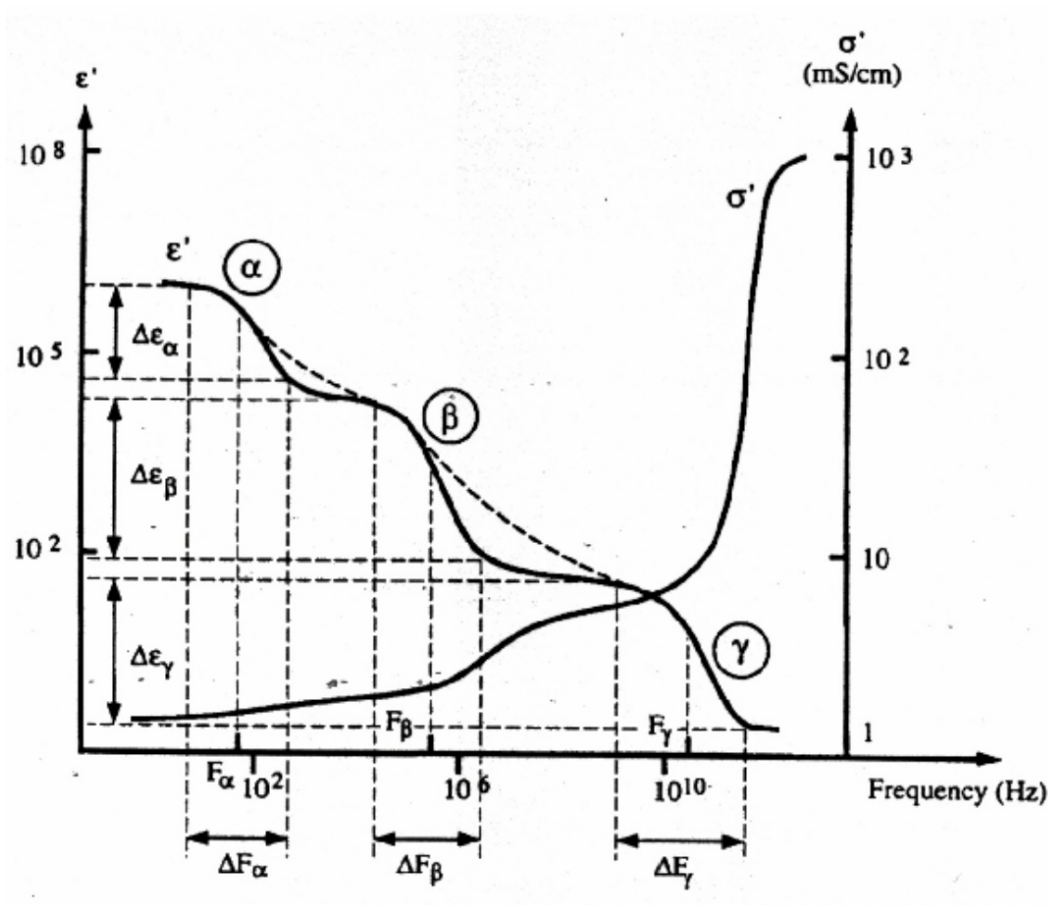


Figura 78: Representación del aumento de la conductividad con la frecuencia [CASAS].

Existen varios modelos microscópicos clásicos sencillos para describir el comportamiento eléctrico con base fenomenológica.

Modelo de Debye:

Queda más o menos claro que si nosotros tenemos una serie de moléculas con una distribución aleatoria, y ahora aplicamos un campo eléctrico externo, las moléculas polares sienten esa perturbación y se orientan en el sentido del campo. Esto ha de obedecer **las leyes de Maxwell**, por lo tanto, retrocediendo al principio, donde escribimos las cuatro ecuaciones descritas por Maxwell, en concreto la ecuación formulada por **Gauss**, (*más información en el anexo A*).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \tag{53}$$

La densidad de carga podemos dividirla en dos entidades diferentes [MORÉ], [LINK 1]. La densidad de carga libre, ρ_l , correspondiente a las cargas libres del material y la densidad de carga de polarización, ρ_p , que son las cargas ligadas a las moléculas y que no pueden moverse libremente.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho_p + \rho_l}{\epsilon_0} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{0} \tag{54}$$

Si nos quedamos únicamente con la densidad de carga de polarización, por definición su expresión matemática es la siguiente:

$$\rho_p = -\vec{\nabla} \cdot \vec{P} \quad (55)$$

Sin más que sustituir en la ecuación de Gauss esta nueva expresión para la densidad de carga de polarización [LINK 1]:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\frac{\vec{\nabla} \cdot \vec{P}}{\epsilon_0} + \frac{\rho_l}{\epsilon_0} \quad (56)$$

A continuación despejando la densidad de carga libre, y operando un poco obtenemos lo siguiente:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} + \frac{\vec{\nabla} \cdot \vec{P}}{\epsilon_0} = \frac{\rho_l}{\epsilon_0} \longrightarrow \vec{\nabla} \cdot (\epsilon_0 \vec{E}) + \vec{\nabla} \cdot \vec{P} = \rho_l \quad (57)$$

Sacando factor común al vector $\vec{\nabla}$:

$$\vec{\nabla} (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) = \rho_l \quad (58)$$

Si expresamos la densidad de carga libre mediante un vector, llegamos a la definición del vector desplazamiento [LINK 1]:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (59)$$

Es un vector del campo cuyas fuentes son las densidades de carga libre y, por lo tanto, la ley de Gauss nos dice:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_l \quad (60)$$

Si comparamos con el vector campo eléctrico podemos escribir la siguiente relación:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon \vec{E} \quad (61)$$

Donde ϵ es la permitividad del material. Podemos usar la anterior expresión y tratar de despejar el vector de polarización, \vec{P} :

$$\vec{P} = \vec{D} - \epsilon \vec{E} \quad (62)$$

Escribiendo el vector desplazamiento en función del campo eléctrico y despejando el vector polarización, llegamos a una expresión que relaciona el vector polarización \vec{P} con la permitividad y el campo eléctrico [MORÉ], [LINK 2].

$$\vec{P} = (\epsilon_0 - \epsilon) \vec{E} \quad (63)$$

Hemos conseguido relacionar la polarización con la permitividad del medio y el campo eléctrico. No obstante, todavía no hemos relacionado estos parámetros con la frecuencia, algo imprescindible, ya que, como hemos dicho, la permitividad depende de la frecuencia. Escribamos, por lo tanto, ahora la polarización en función de la susceptibilidad eléctrica, que la designamos con la letra griega χ_e . Se trata de un tensor que nos relaciona el campo eléctrico \vec{E} con la polarización inducida \vec{P} tal que $\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E}$, con $\chi_e = \epsilon_r - 1$, siendo ϵ_r la permitividad relativa $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$. De esta manera, hemos construido dos formas de escribir la polarización:

$$\vec{P} = (\epsilon_0 - \epsilon) \vec{E} \quad (64)$$

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (65)$$

Nos permite ver la relación con la permitividad del medio [LINK 2]. Por definición:

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \quad (66)$$

Sustituyendo esta relación en la expresión que obtuvimos para el vector desplazamiento, $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, obtenemos la siguiente expresión:

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (67)$$

Nosotros vamos a trabajar con frecuencias de 100 GHz y 300 GHz. Con estas frecuencias, la cinemática de las moléculas polares que interactúan con el campo eléctrico externo entra dentro de la teoría de la relajación. El caso más sencillo será un proceso de relajación a primer orden caracterizado por un **tiempo de relajación**, τ . Escribimos la respuesta transitoria de la siguiente manera [POCE]:

$$\vec{D} = \vec{D}_\infty + \left(\vec{D}_0 - \vec{D}_\infty \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (68)$$

Ya conocemos la relación del vector desplazamiento con el campo eléctrico y la permitividad. A su vez conocemos la relación del campo eléctrico con la susceptibilidad eléctrica. Sustituyendo en la anterior expresión la relación $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$:

$$\epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon_\infty \epsilon_0 \vec{E} + \left(\epsilon_s \epsilon_0 \vec{E} - \epsilon_\infty \epsilon_0 \vec{E} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (69)$$

Podemos sacar factor común a $\epsilon_0 \vec{E}$ por lo que se nos terminaría cancelando en los dos lados de la ecuación:

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (70)$$

Haciendo ese producto y agrupando términos:

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) (\epsilon_s - \epsilon_\infty) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (71)$$

A continuación hacemos la **transformada de Laplace**¹⁷ para pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia que es con lo que nos interesa operar:

$$\frac{\epsilon_r}{S} = \frac{\epsilon_\infty}{S} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{S} - \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{S + \tau^{-1}} \quad (72)$$

Donde S es una variable compleja. A continuación, multiplicamos esa variable compleja, S, en todos los términos y operamos:

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) - \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) S}{S + \tau^{-1}} \quad (73)$$

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\tau (\epsilon_s - \epsilon_\infty) (S + \tau^{-1}) - (\epsilon_s - \epsilon_\infty) S \tau}{1 + S \tau} \quad (74)$$

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{S \tau \epsilon_s - S \tau \epsilon_\infty + \epsilon_s - \epsilon_\infty - S \tau \epsilon_s + S \tau \epsilon_\infty}{1 + S \tau} \quad (75)$$

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + S \tau} \quad (76)$$

Hemos llegado a la llamada **ecuación de Debye**, que da cuenta de la respuesta de los dipolos ante un campo eléctrico externo [POCE].

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\Delta_\epsilon}{1 + j\omega\tau} \quad \Delta_\epsilon = \epsilon_s - \epsilon_\infty \quad (77)$$

También podemos escribirlo mediante la polarización, ya que vimos que eran proporcionales el uno con respecto del otro [CASAS].

¹⁷**Transformada de Laplace:** Es una herramienta matemática que se utiliza para convertir una función del tiempo (dominio temporal) en una función de la frecuencia compleja (dominio de Laplace). La transformada de Laplace se utiliza para resolver ecuaciones diferenciales lineales y para analizar sistemas dinámicos.

$$P(\omega) = P_\infty + \frac{P_s - P_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (78)$$

Tenemos la expresión de la **constante dieléctrica a frecuencia infinita**, ϵ_∞ , considerando el infinito como una frecuencia muy por encima de la frecuencia de relajación. Si la frecuencia del campo externo es muy elevada, los dipolos no pueden seguir el ritmo de las oscilaciones del campo eléctrico externo y no interactuarán con dicho campo externo. Para una relajación simple, esta ecuación exhibe una frecuencia centrada en $f_c = \frac{1}{2\pi\tau}$ [POCE]. También tenemos la constante dieléctrica a muy baja frecuencia, ϵ_s , llamada **constante dieléctrica estática**. Si la frecuencia es muy baja, la polarización del material es capaz de seguir instantáneamente las oscilaciones del campo eléctrico externo. Por esa razón, la permitividad coincide con la permitividad estática.

La expresión que hemos escrito para la permitividad, debe poder relacionarse con la expresión que habíamos escrito en la **ecuación (1)**:

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (79)$$

A partir de esta expresión podemos identificar la constante dieléctrica y el factor de pérdidas [CASTRO]:

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (80)$$

$$\epsilon'' = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (81)$$

El factor de pérdidas alcanzará su valor máximo cuando alcance el mismo valor que la frecuencia de relajación, f_c . Cuanto más masivas sean las moléculas, sus oscilaciones serán más lentas, por lo que tendrán también un mayor tiempo de relajación.

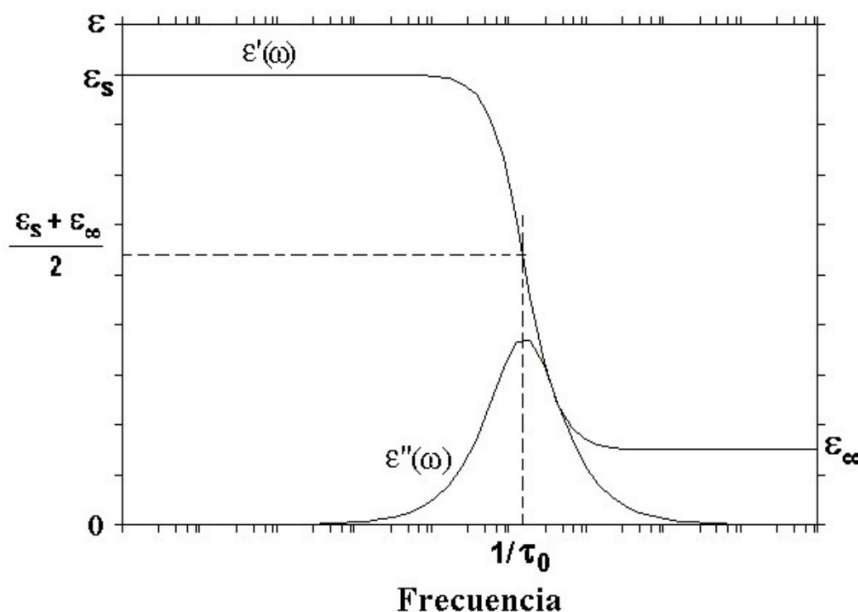


Figura 79: *Permitividad de un medio de tipo Debye respecto a la frecuencia* [BARBA].

Las **ecuaciones (80)** y **(81)** que acabamos de ver describen el comportamiento de la permitividad dieléctrica de materiales cuya polarización evoluciona con el tiempo siguiendo una ecuación diferencial de primer orden. La permitividad compleja está comprendida entre un valor inicial y un valor final.

Existen muchos materiales que presentan un comportamiento similar. Sin embargo, existen materiales con moléculas que a bajas temperaturas presentan desviaciones respecto al comportamiento de Debye [BARBA]. Una explicación razonable para explicar este comportamiento, es que, las moléculas al polarizarse (*dado que no son esféricas*), se van a encontrar con una resistencia por parte de las moléculas de su entorno. Se van a encontrar una **fricción**. Otra posible causa, es que **una molécula grande puede tener varios dipolos**, de tal forma que haya diferentes mecanismos de relajación, por ese motivo, interaccionará de manera diferente con las moléculas adyacentes.

Si tenemos un conjunto de tiempos de relajación, podemos definir una función de distribución $\Phi(\tau)$, tal que $\Phi(\tau) d\tau$ es la fracción de todos los procesos de orientación de polarización (*tipo Debye*). En este tipo de casos, el valor total de la permitividad será la suma de todas las contribuciones en el proceso de polarización. Matemáticamente lo podemos definir con una suma entre el intervalo de tiempos de relajación que existen en la distribución.

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \int_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} \frac{\Phi(\tau)}{1 + j\omega\tau} d\tau \quad (82)$$

Hemos descrito a través de la ecuación de Debye las pérdidas de energía asociadas cuando las ondas electromagnéticas atraviesan un material. Hay un factor que no se ha tenido en cuenta y que se encuentra con frecuencia en muchos materiales (*sobre todo en materiales orgánicos*). Se trata de la presencia de la **conductividad**. Atendiendo a la cuarta ecuación de Maxwell [7], tenemos que para un campo eléctrico que varía con el tiempo, tenemos asociado una **densidad de corriente de desplazamiento**, J_{des} . Se trata de una densidad de corriente que no está asociado al movimiento de las cargas eléctricas. Está asociado a la propia variación del campo eléctrico. Eso es precisamente lo que nos dice el segundo término de la cuarta ecuación de Maxwell [BARBA].

$$\vec{J}_{des} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = j\omega\epsilon(\omega)\vec{E} \quad (83)$$

En los materiales dieléctricos (*como es el caso de los alimentos*), también hay una ligera contribución debido al desplazamiento de las **cargas ligadas a los átomos**, es decir, a la polarización dieléctrica. Como $\vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + P$, la corriente de desplazamiento toma la siguiente forma:

$$\vec{J}_{des} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \quad (84)$$

El primer término está presente tanto en los materiales como en el vacío. Está dado por el cambio del vector campo eléctrico. El segundo término se produce en los medios materiales. Las cargas de las moléculas se separan por la influencia del campo eléctrico externo provocando un aumento de la polarización.

Por otro lado, en la **cuarta ecuación (7)**, tenemos el vector densidad de corriente \vec{J} , que da cuenta de la corriente producida por las cargas libres. Esa corriente cumple la **ley de Ohm (medios lineales)**[BELÉNDEZ]:

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (85)$$

Donde σ es la conductividad del medio. Comparando (83) y (85), podemos deducir que el medio se comporta como si tuviera una permitividad de la forma $\frac{\sigma}{j\omega}$. Con este razonamiento podemos añadir a la ecuación de Debye una conductividad. Con ello nos acercamos un poco más a la realidad del comportamiento del material en respuesta a los campos electromagnéticos.

$$\epsilon_r = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau} - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (86)$$

Modelo de Cole-Cole

Muchos materiales, especialmente los materiales orgánicos, están formados por moléculas que tienen cadenas largas. Estas moléculas largas presentan relajaciones dipolares más lentas que las descritas por Debye y con pérdidas menores [BARBA]. Además, **en moléculas grandes no existe un único mecanismo de relajación sino que vamos a tener varios mecanismos de relajación**. En primera aproximación, podemos considerar que estas constantes de relajación están muy separadas tal que $\tau_1 \ll \tau_2 \ll \tau_3$ [CASAS]. Respondiendo todos los tiempos a un comportamiento de primer orden, la permitividad se puede expresar del siguiente modo:

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty - \frac{j\sigma_s}{\omega\epsilon_0} + \frac{\Delta\epsilon_1}{1 + \omega\tau_1} + \frac{\Delta\epsilon_2}{1 + \omega\tau_2} + \frac{\Delta\epsilon_3}{1 + \omega\tau_3} + \dots = \epsilon' + j\epsilon'' \quad (87)$$

Esos intervalos representados por la letra $\Delta\epsilon$, con $\Delta\epsilon = \epsilon_s - \epsilon_\infty$, muestran un ensanchamiento simétrico del pico de pérdida dieléctrica. Ahora para cada tiempo de relajación, tendremos ciertos intervalos constantes con pérdidas. Si estas constantes no estuvieran lo suficientemente separadas, perderíamos esa discretización y habría que integrar apareciendo una relajación dieléctrica más ancha dada por la siguiente expresión [BARBA]:

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \int_0^\infty \frac{\rho(\tau)}{1 + j\omega\tau} d\tau \quad (88)$$

Vemos que nos aparece una función $\rho(\tau)$ que es la función de distribución normalizada de las constantes de tiempo. Con esta expresión podemos escribir el comportamiento de un dieléctrico siempre y cuando tenga un comportamiento lineal. Nuestro problema se resume ahora a encontrar una función de distribución adecuada al comportamiento, lo que supone una tarea muy compleja, por ello, un posible mecanismo a este problema pasa por encontrar alguna expresión más sencilla que se ajuste con los datos experimentales:

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{(1-\alpha)}} - \frac{j\sigma_s}{\omega\epsilon_0} \quad (89)$$

Nos aparece un nuevo parámetro, designado con la letra griega, α , que nos da el grado de dispersión de las constantes de tiempo asociados a la relajación dieléctrica. Si tomamos el caso particular de asignar el valor $\alpha = 0$, tan sólo nos aparecerá una constante de tiempo, τ , y la expresión de la permitividad coincidirá con la expresión previamente descrita de Debye. Por lo tanto, cuando aumente el parámetro α , aumentará la dispersión de las constantes de tiempo, dando una idea del grado de homogeneidad del dieléctrico. De nuevo nos aparecerá una distribución de constantes si no hay suficiente separación entre constantes. La ecuación que rige esta distribución de constantes para el modelo de Cole-Cole es [CASAS]:

$$\rho(\tau) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sin(\alpha\pi)}{\cosh\left[(1-\alpha)\ln\frac{\tau}{\tau_c}\right] - \cos(\alpha\pi)} \quad (90)$$

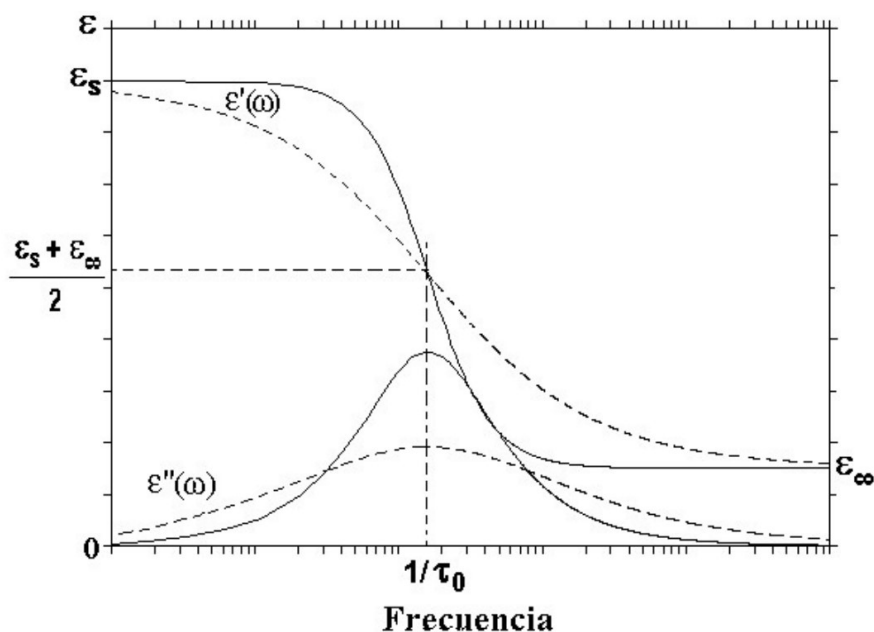


Figura 80: Permitividad respecto a la frecuencia de un medio que sigue el modelo de Debye (líneas continuas) y de un medio que sigue el de Cole-Cole (líneas a trazos). [BARBA].

El modelo de Cole-Cole, es un modelo que deriva del modelo de Debye, pero no es el único modelo. Hay modelos más complicados que tratan de describir los procesos de polarización de una manera más aproximada a la realidad, pero nosotros sólo vamos a citar algunos de ellos [LINK 3]:

Ecuación de Cole-Davidson: Esta ecuación se utiliza cuando el pico de pérdida dieléctrica muestra un ensanchamiento asimétrico. Recordemos que nosotros hemos hablado de la ecuación de Cole-Cole que es el análogo para un ensanchamiento simétrico.

Relajación Havriliak-Negami: Esta ecuación se utiliza en un caso híbrido, en el que tenemos un ensanchamiento simétrico y asimétrico.

Función Kohlrausch - Williams - Watts: Conocida como función de estiramiento exponencial (también conocida en matemáticas como función de distribución acumulada de Weibull). Se utiliza en física para describir fenomenológicamente la relajación en sistemas ordenados.

Cristales iónicos

Algunos alimentos, como por ejemplo, la sal común ($NaCl$), nos obliga a preguntarnos por la interacción de la luz con los cristales. Los cristales iónicos no son conductores de la electricidad ni tampoco pueden polarizarse debido a que tienen limitados sus movimientos. **Cuando una onda electromagnética alcanza un cristal iónico, cada ion es desplazado de su posición de equilibrio sobre el cual aparece una fuerza elástica** [RODRÍGUEZ]. El campo eléctrico hace que los iones realicen oscilaciones pequeñas alrededor de su posición de equilibrio. **El desplazamiento mutuo de los iones induce un momento dipolar** de tal forma que **el cristal iónico se comporta como un material con una permitividad dieléctrica:**

$$\epsilon(\omega) = \epsilon(\infty) \frac{\omega^2 - \omega_L^2}{\omega^2 - \omega_0^2} \quad (91)$$

Donde ω es la frecuencia de trabajo, ω_0 es la frecuencia natural del cristal y ω_L^2 es $\omega_L^2 = \omega_0^2 + \frac{nq^2}{\epsilon_0\mu}$, siendo n el número de celdas unitarias de la red cristalina por unidad de volumen, y q , la masa.

Cristales moleculares

Otro tipo de cristales que nos vamos a encontrar en los alimentos, son los **cristales moleculares** como el hielo o el azúcar. Son sólidos que mantienen unidas las moléculas mediante fuerzas de Van der Waals y/o mediante enlaces de hidrógeno. Estos enlaces son más débiles que los enlaces iónicos y covalentes, lo que hace que fundan a temperaturas relativamente bajas. Dado que son cristales, tienen una seria restricción en los grados de libertad y pese a que, por ejemplo, el hielo o el azúcar están constituidos a partir de moléculas polares, no pueden orientarse con el campo eléctrico externo. Por otro lado, no tienen cargas libres de movimiento, como por ejemplo, sucede en los cristales metálicos. Tampoco tienen centros de carga de distinto signo separadas como ocurre con los sólidos iónicos. Aparentemente, **este tipo de materiales no parece interactuar con los campos eléctricos externos ya que no hay ningún mecanismo que impida ser atravesado por las ondas eléctricas**, este tipo de materiales corresponden a los **materiales aislantes** (*ver figura 5*).

Sin embargo, **en la práctica resulta que sí hay interacción** con este tipo de materiales. Estas interacciones corresponden precisamente a los enlaces débiles [TAKAHASHI]. Dentro de los numerosos modos de vibración que se dan en las moléculas con enlaces de hidrógeno, **los modos más débiles se encuentran en la región del THz**. Cuanto más débil sea el enlace, más baja será la frecuencia a la que resuene. Esa es la razón de por qué es sensible a los modos vibracionales colectivos. **En definitiva se utiliza radiación de poca energía para ver interacciones de baja energía**.

F. Anexo VI: Metamateriales

Hay un gran margen de mejora en la tecnología basada en el empleo de las ondas electromagnéticas en el rango del THz. Esta tecnología, pese a sus inconvenientes, es una puerta a nuevas posibilidades como hemos visto en el sector de la agroalimentación, aunque se puede aplicar a muchos otros campos.

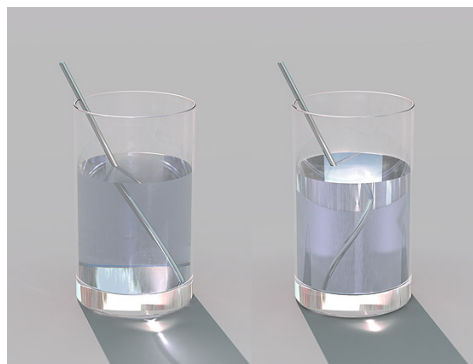


Figura 81: Refracción en agua normal (izquierda) y en un metamaterial (derecha).

Hay una línea de investigación de nuevos materiales muy prometedora para solventar los problemas que tenemos con la baja potencia de las fuentes de radiación milimétrica. Tenemos dispersiones cuando irradiamos los alimentos que hace que muy poca radiación termine llegando al sensor, obteniendo imágenes muy oscuras. Esos materiales son los llamados **metamateriales**, también llamados con el nombre más publicitario **materiales del futuro**, y de una forma más técnica llamados también como **materiales zurdos o doblemente negativos** [JÁUREGUI]. Llamados así porque la luz viaja a contrasentido de como lo vemos normalmente, y digo normalmente porque estos materiales **no se han conseguido encontrar en la naturaleza**. Son materiales que se han obtenido de manera artificial. Poder utilizar los medios materiales para utilizar la trayectoria de las ondas electromagnéticas como queramos, nos va a permitir

potenciar la instrumentación óptica. Un ejemplo, sería poder reducir el tamaño de las lentes. Hasta ahora, hemos estado subordinados a la trayectoria de las ondas electromagnéticas. Ahora podemos modificar esa trayectoria, y se abre con ello un abanico de posibilidades muy interesantes.

El ángulo de refracción que podemos ver en la *figura 81* puede ser calculado mediante la ley de Snell (*ver anexo A*) [RUIZ].

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad (92)$$

Suponiendo, por ejemplo, que el segundo medio es un medio doblemente negativo, podemos extraer de la ecuación de la ley de Snell, que el ángulo es negativo:

$$\theta_2 = - \arcsin \frac{n_1}{n_2 \sin \theta_1} \quad (93)$$

El ángulo negativo, nos indica que el sentido que tiene la propagación del rayo refractado toma el sentido contrario al de la propagación de la onda incidente. La interpretación esquemática que podemos dar a las ondas electromagnéticas que siguen un medio zurdo con respecto a un medio diestro es la siguiente:

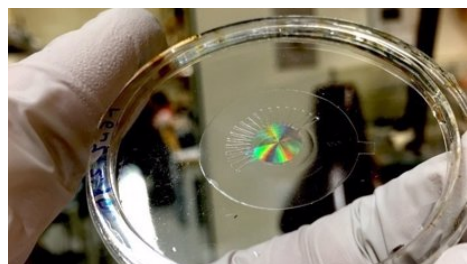


Figura 82: Combinan metalentes con músculo artificial inspirados en el ojo humano [Europa Press: 26 Feb. 2018].

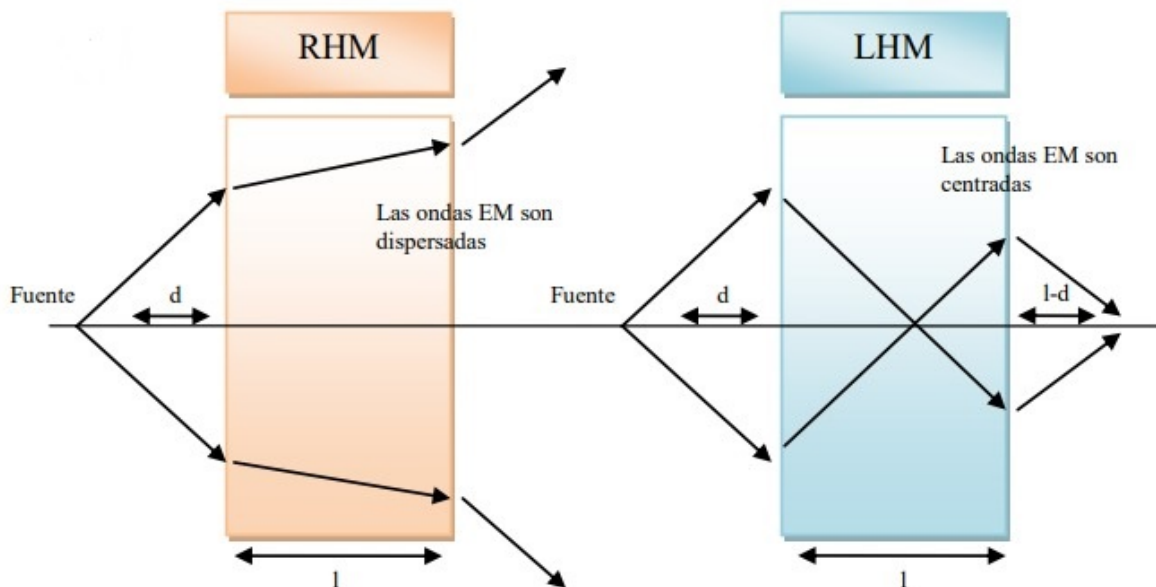


Figura 83: Comparación entre la transmisión de las ondas a través de un material diestro (RHM) y uno zurdo (LHM).

F.1. Superlentes.

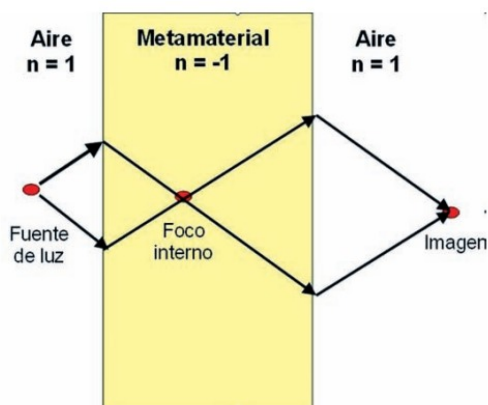


Figura 84: Esquema de la lente perfecta de Pendry.

La resolución que se puede obtener con los sistemas convencionales están limitados por lo que se conoce como **límite de difracción**. Este límite viene a decirnos que **no es posible discriminar objetos con un tamaño inferior a la longitud de onda que se le está aplicando para verlos**. Esto es debido porque los detalles de menor tamaño de la imagen se propagan como ondas evanescentes (*ondas que se atenúan muy rápido*), por lo tanto, la información no llegaría al sensor. La utilización de metamateriales solventaría este problema ya que pueden **amplificar las ondas evanescentes**. La primera publicación acerca de este tipo de lentes surgió en el año 2000 (Pendry, *Physical Review Letters*), pero no hay un consenso en la interpretación ya que muchos científicos cuestionan la ruptura del límite de

difracción, argumentando que en principio, esto violaría principios físicos firmemente establecidos como el **principio de incertidumbre de Heisenberg**. En defensa de Pendry, otros autores argumentan que realmente no es una lente en el sentido de la óptica geométrica, sino que son *dispositivos adaptadores* que enfocan la energía a puntos más pequeños que la longitud de onda [RUIZ],[LINK 9],[LINK 10].

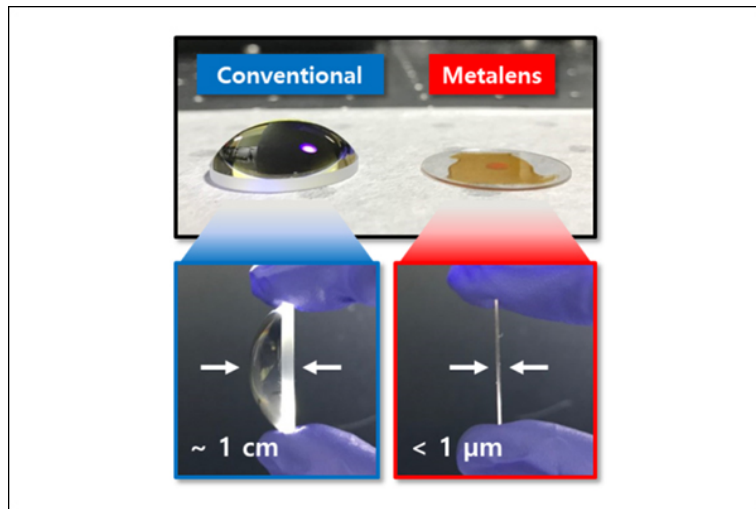


Figura 85: Comparación entre una lente convencional y una metalente.

