



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

CENTRO DE FÍSICA APLICADA Y TECNOLOGÍA
AVANZADA

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL
CUERPO HUMANO EN LOS SISTEMAS
INALÁMBRICOS DE ENTRADA REMOTA
DE UN AUTOMÓVIL

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

Licenciado en Tecnología

PRESENTA:

Víctor Hugo Maya Sandoval

TUTOR:

Dr. Carlos Romo Fuentes



Santiago de Querétaro, Qro., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Agradecimientos

Al Proyecto PAPIIT TA100516 por la Beca de Terminación de Estudios durante el periodo de realización de la tesis.

Al Proyecto CONACYT 205012 Laboratorio de Compatibilidad Electromagnética de la FI UNAM en la Unidad de Alta Tecnología, Campus Juriquilla.

Al Proyecto CONACYT 232660 Laboratorio Nacional de Ingeniería Espacial y Automotriz de la Facultad de Ingeniería en la Unidad de Alta Tecnología, Campus Juriquilla.

A la Unidad de Alta Tecnología de la Facultad de Ingeniería en el campus Juriquilla de la UNAM.

Al Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM y a todos sus docentes que influyeron en mi formación profesional.

Al Dr. Rafael Quintero Torres, por su gran amistad y sus valiosos consejos que me proporcionó en los momentos de mayor incertidumbre de mi carrera.

Al Dr. Carlos Romo Fuentes, por su valioso apoyo, comprensión y amistad durante todos estos años.

A mi jurado de examen profesional: Dr. Domingo Rangel Miranda, Dr. Jorge Luis Domínguez Juárez, Dr. Rafael Quintero Torres, Dr. Carlos Romo Fuentes y al Dr. Jorge Alfredo Ferrer Pérez, por su valioso tiempo y correcciones.

A mis amigos de carrera: Rodrigo Brito, Pablo Gómez, Narciso Martínez y Ángel Tinoco, que me permitieron compartir con ellos tantas experiencias maravillosas que marcaron mi vida.

A mi amigo Ángel Tinoco, por sus valiosos consejos y amistad incondicional durante todos estos años.

A mi motor de vida, mi familia, ya que sin ellos nada de esto fuera posible. Agradezco su apoyo incondicional y la fortuna de tenerlos en mi vida.

2. Índice de contenido

1. Agradecimientos	2
3. Índice de figuras	5
4. Índice de tablas	7
5. Resumen.....	8
6. Alcance	9
6.1. Hipótesis	9
6.2. Objetivos	9
6.2.1. General	9
6.2.2. Particulares	9
6.3. Justificación	10
7. Marco Teórico	11
7.1. Electromagnetismo	11
7.1.1. Ecuaciones de Maxwell	12
7.1.2. Interferencia electromagnética	12
7.1.3. Compatibilidad electromagnética	12
7.2. Sistemas electrónicos de comunicaciones	13
7.3. Comunicaciones inalámbricas de los automóviles	13
7.3.1. Modulación y demodulación	13
7.4. Sistemas inalámbricos de entrada (RKE)	16
7.5. Diseño de un RKE	17
7.5.1. Restricciones de diseño	18
7.6. Interacción de las ondas electromagnéticas con la materia	18
7.6.1. Blindaje electromagnético	18
7.6.2. Pérdidas por absorción	19
7.6.3. Reflector	19
8. Antecedentes	20
8.1. Técnica de medición para la caracterizar el patrón de radiación y la polarización de un sistema de apertura remota (Brunett, 2010)	20
8.2. Modelación y medición de la transmisión de luz a través de tejidos humanos (Z. KRAWIECKI, 2008)	21
8.3. Estudio de los efectos de los tejidos humanos sobre el desempeño de una antena de cuadro (Khaoula Tayari, 2016)	21
9. Metodología	22

9.1. Diseño de experimentos	23
9.1.1. Objeto de estudio.....	23
9.1.2. Emisiones electromagnéticas radiadas por la alarma en funcionamiento	23
9.1.3. Simulación de emisiones radiadas	24
9.1.4. Análisis de atenuación y coeficientes de reflexión y transmisión.....	31
9.1.5. Análisis teórico del coeficiente de atenuación α , β y la distancia mínima de detección 31	
10. Resultados	34
10.2. COMSOL	36
10.3. Análisis de la atenuación de una onda electromagnética plana a 433 MHz en los diferentes materiales.....	38
10.3.1. Comsol - Polietileno	38
10.3.2. Comsol - Piel seca.....	39
10.3.3. Comsol – Piel mojada.....	39
10.3.4. Comsol – Grasa.....	40
10.3.5. Comsol - Uña	40
10.4. Obtención de los coeficientes de transmisión y reflexión de una onda electromagnética al haber un cambio de medio dieléctrico	41
10.5. Análisis del coeficiente de atenuación α	43
10.5.1. Análisis del Aire	43
10.5.2. Análisis de la piel seca.....	44
10.5.3. Análisis del polietileno	45
10.5.4. Análisis de la grasa subcutánea.....	45
10.5.5. Análisis de la Uña	46
10.5.6. Análisis del hueso.....	47
10.5.7. Análisis del músculo	47
10.5.8. Profundidad de penetración	49
11. Análisis de resultados.....	50
12. Conclusiones.....	51
13. Trabajo a futuro.....	53
14. Bibliografía	54
15. Anexo A: Código en Mathematica.....	56

3. Índice de figuras

Figura 1: Representación de una onda electromagnética plana que se mueve en dirección x positiva con velocidad c (Young, 2009).....	11
Figura 2: Diagrama simplificado de bloques de un sistema de comunicaciones electrónicas (Tomasi, 2003) .	13
Figura 3: Ejemplo de modulación AM (Zanuy, 2001).....	14
Figura 4: Representación gráfica de una onda.....	14
Figura 5: Tipos de modulaciones (Tomasi, 2003)	15
Figura 6: Ondas electromagnéticas más representativas en un automóvil	16
Figura 7: Un sistema RKE consiste en una llave (parte baja del diagrama) que transmite a un receptor dentro del vehículo (parte superior del diagrama) (integrated, 2004)	17
Figura 8: Blindaje electromagnético.....	18
Figura 9: Diagrama experimental propuesto por Joseph D. Brunett (Brunett, 2010).....	20
Figura 10: Modelo estructural basado en capas propuesto por (Z. KRAWIECKI, 2008).....	21
Figura 11: Simulación efectuada en (Khaoula Tayari, 2016).....	21
Figura 12: Esquema simplificado de la metodología.....	22
Figura 13: Alarma 3100V de Viper.....	23
Figura 14: Instrumento de medición EMScan.....	23
Figura 15: Sección transversal del dedo índice. Obtenido de Modeling and measurements of tight transmission through human tissues. Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences. Krawiecki, et al.....	24
Figura 16: Geometría de la simulación, con capas de material a los 1000 mm	25
Figura 17: Subcapas conformadas por el dedo índice del dedo	26
Figura 18: Orden espacial de la transición de materiales en la simulación (siguiendo el orden de las flechas).....	26
Figura 19: Condición de valores iniciales $E=0$	27
Figura 20: Condición de Frontera “Conductor eléctrico perfecto”	28
Figura 21: Condición de frontera “Contorno de difracción”	28
Figura 22: Condición de frontera “Contorno de impedancia”	29
Figura 23: Mallado de la simulación.....	30
Figura 24: Inicialización de variables en Mathematica	32
Figura 25: Cálculo en Mathematica de la distancia mínima a la cual el receptor ya no es capaz de identificar al transmisor	33
Figura 26: Emisiones del transmisor sin presionar algún botón	34
Figura 27: Emisiones radiadas del transmisor al presionar el botón de abrir puertas	34
Figura 28: Espectrograma del campo eléctrico cuando no se aprieta el botón	35
Figura 29: Intensidad del campo eléctrico cuando se aprieta el botón	36
Figura 30: $\text{freq}(1)=4.33\text{E}8$ Hz Superficie: Campo eléctrico, componente y (V/m)	36
Figura 31: $\text{freq}(1)=4.33\text{E}8$ Hz Superficie 3D: Campo eléctrico, componente y (V/m)	37
Figura 32: Gráfico lineal: Campo eléctrico, componente y (V/m).....	37
Figura 33: Campo eléctrico, componente y (V/m) en polietileno	38
Figura 34: Campo eléctrico, componente y (V/m) en piel seca	39
Figura 35: Campo eléctrico, componente y (V/m) en piel mojada	39
Figura 36: Campo eléctrico, componente y (V/m) en grasa	40
Figura 37: Campo eléctrico, componente y (V/m) en uña	40
Figura 38: Coeficientes de transmisión y reflexión en los materiales presentes en la interfaz RKE-dedo índice	42
Figura 39: Campo eléctrico atenuado por el aire	43
Figura 40: Campo eléctrico atenuado por la piel seca.....	44
Figura 41: Campo eléctrico atenuado por el polietileno.....	45

<i>Figura 42: Campo eléctrico atenuado por la grasa</i>	<i>45</i>
<i>Figura 43: Campo eléctrico atenuado por la uña</i>	<i>46</i>
<i>Figura 44: Campo eléctrico atenuado por el hueso</i>	<i>47</i>
<i>Figura 45: Campo eléctrico atenuado por el músculo</i>	<i>47</i>
<i>Figura 46: Atenuación de una onda electromagnética en los diferentes tejidos del cuerpo humano.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 47: Profundidad de penetración al variar la frecuencia y los tejidos.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 48: Carcasa del RKE diseñada en SolidWorks.....</i>	<i>53</i>

4. Índice de tablas

<i>Tabla 1: Parámetros de simulación</i>	24
<i>Tabla 2: Geometría general</i>	24
<i>Tabla 3: División por capas de la geometría, referente a la sección transversal "a" del dedo índice</i>	25
<i>Tabla 4: Propiedades dieléctricas de los materiales que conforman la simulación (COUNCIL, 2018)</i>	26
<i>Tabla 5: Propiedades dieléctricas utilizados en la simulación</i>	27
<i>Tabla 6: Propiedades del contorno de difracción</i>	29
<i>Tabla 7: Propiedades del contorno de impedancia</i>	30
<i>Tabla 8: Propiedades del mallado</i>	31
<i>Tabla 9: Física utilizada en la simulación</i>	31
<i>Tabla 10: Impedancia de los diferentes medios</i>	41
<i>Tabla 11: Coeficientes de reflexión y transmisión</i>	42
<i>Tabla 12: Coeficientes α y β</i>	48

5. Resumen

Con el avance de la tecnología el uso de dispositivos electrónicos ha crecido exponencialmente en todos los ámbitos, ya sea en las comunicaciones, en el procesamiento de señales, en la automatización de procesos, entre muchos otros tópicos, haciendo que los dispositivos operen cada vez más cerca entre sí. Con mucha regularidad, estos dispositivos interactúan entre sí de forma negativa provocando problemas de interferencia electromagnética (EMI). Hoy en día, los circuitos electrónicos tienden a ser cada vez más pequeños y potentes, lo que aumenta la probabilidad de interferencia entre ellos mismos (Balcells, 1992). Además, las frecuencias de operación aún aumentado drásticamente, teniendo hoy en día dispositivos con frecuencias de reloj de más de 1 GHz (Balcells, 1992). Lo que hace que los diseñadores actuales se tengan que preocupar no solo en el buen funcionamiento del dispositivo, sino también en el ambiente electromagnético que lo rodea, cumpliendo así con los estándares de compatibilidad electromagnética (EMC). Esto significa que el dispositivo no debe ser afectado por fuentes externas electromagnéticas, y a su vez el mismo dispositivo no debe de ser una fuente de interferencia electromagnética.

En los últimos años los sistemas inalámbricos de apertura para automóviles se han vuelto cada vez más populares y complejos. Sin embargo, estos dispositivos han presentado fallas al momento de interactuar con el usuario.

En las siguientes páginas, se analizarán los conceptos básicos de comunicación electrónica, y se presentará como es la interacción del cuerpo humano con los sistemas de apertura inalámbrica para automóviles, proponiendo una metodología de simulación, y a su vez identificando los diversos tejidos del cuerpo humano que provocan mayor interferencia con los sistemas de entrada remota sin llave, RKE.

6. Alcance

Se analizará y se modelará mediante análisis de elemento finito y teoría electromagnética, la interacción entre el cuerpo humano y el sistema de entrada remota sin llave RKE. Caracterizando la señal emitida de una alarma para automóvil, y modelando su interacción con los diferentes materiales que está constituido el cuerpo humano. Con lo que se podrán sugerir mejoras a los diseños actuales de sistemas de entrada remota sin llave.

6.1. Hipótesis

Las características eléctricas del cuerpo humano modificarán el comportamiento de emisiones radiadas de las llaves inalámbricas de los automóviles.

6.2. Objetivos

6.2.1. General

Determinar la influencia del cuerpo humano sobre las emisiones electromagnéticas radiadas en los sistemas inalámbricos de apertura de puertas de vehículos, para poder identificar los problemas de interferencia, a partir de un análisis de compatibilidad electromagnética entre los sistemas.

6.2.2. Particulares

- Estudiar y caracterizar un sistema inalámbrico de apertura de puertas, para entender el comportamiento de las emisiones radiadas de acuerdo con la industria automotriz.
- Investigar las propiedades dieléctricas de los materiales que conforma el cuerpo humano, para entender su interaccionan con ondas electromagnéticas radiadas.
- Determinar la influencia del cuerpo humano sobre los sistemas de apertura de un automóvil, a partir del análisis eléctrico, electromagnético y de diseño de una llave inteligente, para poder identificar los posibles casos de fallo del sistema.

6.3. Justificación

Los sistemas remotos de entrada sin llave (RKE por sus siglas en inglés) se han convertido muy populares en los últimos años (Tomasi, 2003). La tasa de instalaciones para los sistemas de RKE en los vehículos nuevos es de más del 80% en América del Norte y más del 70% en Europa (Tomasi, 2003).

La mayoría de estos sistemas emplean comunicaciones unidireccionales (simplex). Pero los sistemas de segunda y tercera generación pueden comunicarse de nuevo a la llave, para avisar que el coche necesita más gasolina o incluso avisar si es necesario aumentar el nivel de presión en las llantas.

Con lo que podemos notar que los sistemas de entrada sin llave se están volviendo cada vez más complejos, tanto por su electrónica, su proceso de codificación y encriptación, como a su vez las funciones que realizan. Por lo que un correcto análisis electromagnético de las señales eléctricas y electromagnéticas del dispositivo, es primordial para asegurar la integridad y seguridad del automóvil y del mismo usuario.

Esto es algo que las empresas tecnológicas automotrices están tratando de mejorar, ya que se están presentando problemas al momento de la interacción entre la llave y el usuario, el cual se puede modelar como un sistema eléctrico equivalente al cuerpo humano que interacciona con el sistema de comunicaciones. Lo que puede provocar problemas o accidentes dependiendo de la complejidad del sistema de control inalámbrico, en consecuencia, obteniendo problemas con el usuario final del automóvil.

7. Marco Teórico

En las siguientes páginas se analizarán los conceptos necesarios para poder entender el fenómeno de radiación electromagnética proveniente de los dispositivos de entrada remota sin llave.

7.1. Electromagnetismo

El electromagnetismo es la rama de la física que se encarga del estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos, producidos por las cargas eléctricas en reposo o en movimiento, y a las variaciones temporales de los campos eléctricos y magnéticos (Cheng, 1998). Siendo un campo la distribución espacial de una magnitud física que puede ser o no ser dependiente del tiempo.

Un campo eléctrico que varía en el tiempo da origen a un campo magnético (B), de igual forma un campo magnético que varía en el tiempo da origen a un campo eléctrico (E) (Reese, 2002), por lo que los campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo están acoplados, produciendo así un campo electromagnético.

Las siguientes ecuaciones son las ecuaciones de Maxwell, que denotan la dependencia de ambos fenómenos. Es decir, cuando tenemos un campo eléctrico que está variando en el tiempo vamos a tener un campo magnético que oscila en forma perpendicular a éste, a lo que llamaremos onda electromagnética (ver Figura 1).

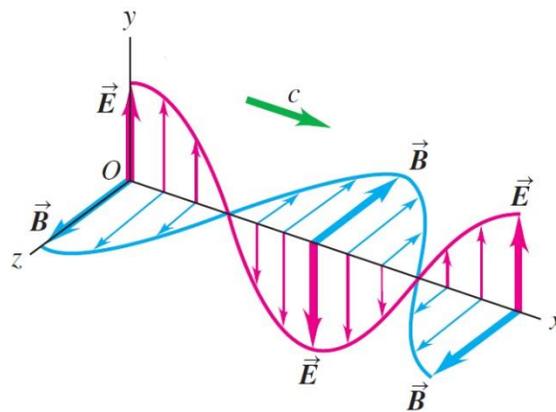


Figura 1: Representación de una onda electromagnética plana que se mueve en dirección x positiva con velocidad c (Young, 2009)

7.1.1. Ecuaciones de Maxwell

Las siguientes ecuaciones son las ecuaciones de Maxwell en forma diferencial, siendo estas consideradas como los postulados fundamentales de la teoría electromagnética, dado que describen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos. Estas fueron desarrolladas de forma experimental y son válidas y consistentes para cualquier caso (JIN, 2015).

Ley de Gauss para campo eléctrico $\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ (1)

Ley de Gauss para campo magnético $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ (2)

Ley de Faraday $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ (3)

Ley de Ampere-Maxwell $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ (4)

7.1.2. Interferencia electromagnética

Cuando un dispositivo electrónico es energizado con una batería, este inmediatamente empezará a generar radiación electromagnética, la cual puede interferir electromagnéticamente con otro dispositivo. Este fenómeno se llama interferencia electromagnética (EMI), la cual se puede definir como la energía electromagnética que afecta directamente a los dispositivos cercanos, creando respuestas indeseables como funcionamiento degradado del sistema receptor (Daura).

La susceptibilidad electromagnética por otro lado, es la falta de habilidad de un sistema electrónico para funcionar correctamente al momento que se presenta una interferencia electromagnética (Daura).

7.1.3. Compatibilidad electromagnética

La compatibilidad electromagnética (EMC) es la capacidad de un sistema, equipo o dispositivo de funcionar correctamente sin causar interferencias electromagnéticas a otros dispositivos, y de igual forma de no ser susceptible a emisiones radiadas de otros sistemas (Balcells, 1992).

7.2. Sistemas electrónicos de comunicaciones

La Figura 2 muestra el diagrama de bloques simplificado de un sistema electrónico de comunicaciones, el cual consiste en tres elementos principales: El transmisor, el medio por el cual se propaga la información y el receptor. El transmisor es un conjunto de dispositivos y componentes electrónicos que transducen la información de la fuente en una señal capaz de transmitirse de manera óptima por el medio de transmisión. El medio de transmisión transporta las señales desde el transmisor hasta el receptor, siendo este un cable de cobre, el aire o incluso una fibra óptica. Un receptor es un conjunto de dispositivos y circuitos electrónicos que reciben la señal del medio y la transducen en otra señal capaz de ser manipulada por el usuario.

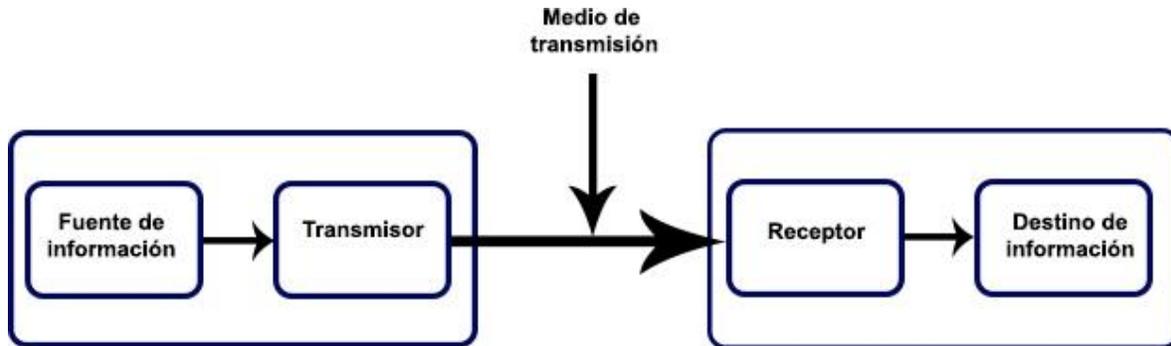


Figura 2: Diagrama simplificado de bloques de un sistema de comunicaciones electrónicas (Tomasi, 2003)

7.3. Comunicaciones inalámbricas de los automóviles

En los últimos años, el mercado de las comunicaciones inalámbricas de los automóviles se ha expandido.

Es bien sabido que los carros modernos pueden contener múltiples antenas que capturan emisiones de AM/FM, audio digital satelital, sistemas de posicionamiento global, comunicaciones de teléfonos celulares, entrada remota sin llaves, sistema de motor de arranque a control remoto, recepción de televisión y radar anticollisiones (Victor Rabinovich, 2010).

7.3.1. Modulación y demodulación

Por lo general, propagar una señal de información a través de cables metálicos, de fibra óptica o incluso a través de la atmosfera terrestre, con frecuencia es necesario modular la información de la fuente con una señal analógica de mayor frecuencia llamada portadora (Tomasi, 2003). En forma general, la señal portadora transporta la información a través del medio de propagación. Por otro lado, la señal de la información modula a la portadora, cambiando su amplitud, su frecuencia o su fase. La modulación es el proceso por el cual se cambian una o más propiedades de la señal portadora, en proporción con la señal de la información (ver Figura 3).

Existen dos razones primordiales por las cuales el proceso de modulación es necesario en las comunicaciones electrónicas:

- Es difícil irradiar con una antena señales de baja frecuencia en forma de energía electromagnética.
- Las señales de la información por lo general tienen la misma frecuencia, y si estas se transmiten al mismo tiempo pueden interferir entre sí.

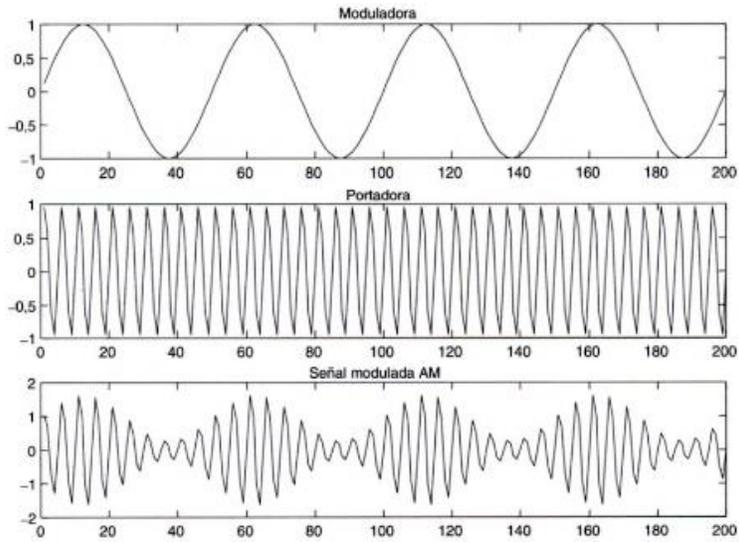


Figura 3: Ejemplo de modulación AM (Zanuy, 2001)

7.3.1.1. Modelo matemático básico de una onda

Podemos modelar matemáticamente una onda eléctrica con la función trigonométrica seno de la siguiente forma:

$$v(t) = A \sin(2\pi f t + \theta). \quad (5)$$

Donde $v(t)$ es el voltaje que varía en el tiempo, A la amplitud de la onda, f la frecuencia de la onda y θ el desfase de fase de la onda (ver Figura 4).

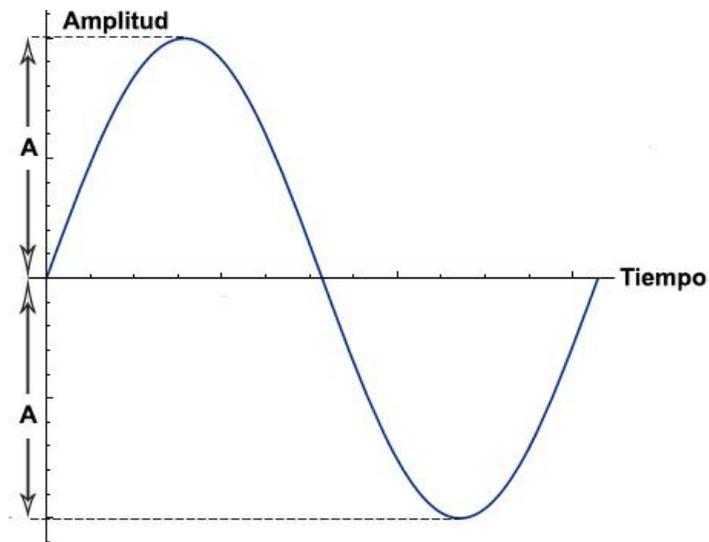


Figura 4: Representación gráfica de una onda

Como se puede ver en la Figura 5, si la señal de información es analógica, y la amplitud A de la portadora es proporcional a ella, se produce la modulación de amplitud (Tomasi, 2003)(AM, amplitude modulation por sus siglas en inglés). Si de igual forma la frecuencia es proporcional a la señal de la información, se produce la modulación de frecuencia (FM, frequency modulation por sus siglas en inglés) y si la fase θ varía de manera proporcional a la señal de la información se produce la modulación por conmutación de fase (PSK, phase shift keying por sus siglas en inglés). Si se varían al mismo tiempo la amplitud y la fase en proporción con la señal de información, se dice que hubo una modulación de amplitud en cuadratura (QAM, quadrature amplitude modulation).

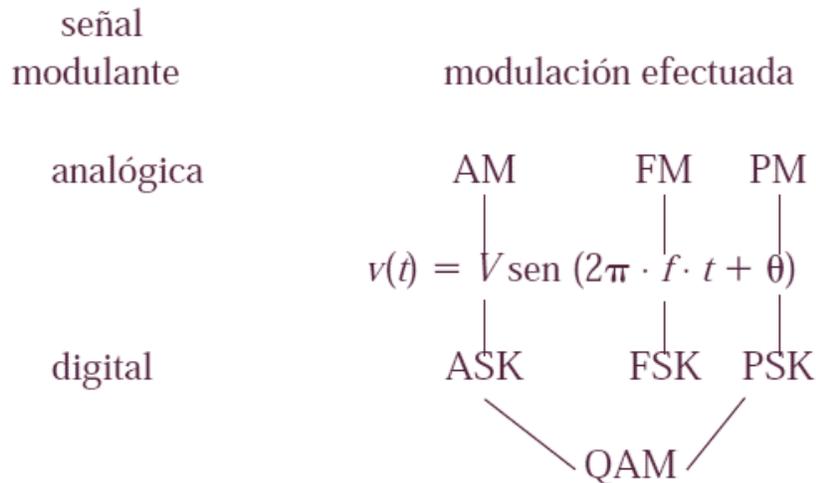


Figura 5: Tipos de modulaciones (Tomasi, 2003)

Existen dos tipos básicos de comunicaciones electrónicas, la analógica y la digital. Un sistema analógico de comunicaciones es aquel en donde la señal se transmite y se recibe en forma analógica, es decir, en una variación continua de la señal (e.g. una señal sinusoidal). Por otro lado, un sistema digital es aquel donde se utilizan pulsos eléctricos con valores discretos, comprendidos generalmente entre +5V y la tierra. Con la transmisión digital no hay portadora analógica, y la fuente original de información puede tener forma digital o analógica. Si está en forma analógica se debe convertir a pulsos digitales antes de transmitirla, y se reconvierte a la forma analógica en el extremo de la recepción (Cheng, 1998). Los sistemas de transmisión digital requieren una instalación física entre el transmisor y el receptor, ya sea una fibra óptica o un conductor metálico (Tomasi, 2003).

7.4. Sistemas inalámbricos de entrada (RKE)

Dentro de un automóvil existen diversos tipos de señales electromagnéticas, algunas de las más representativas se pueden observar en la Figura 6. En nuestro caso particular, nuestro objeto de estudio son las señales electromagnéticas provenientes de las llaves inteligentes con frecuencia de operación en 433 MHz (ver recuadro amarillo de la Figura 6).

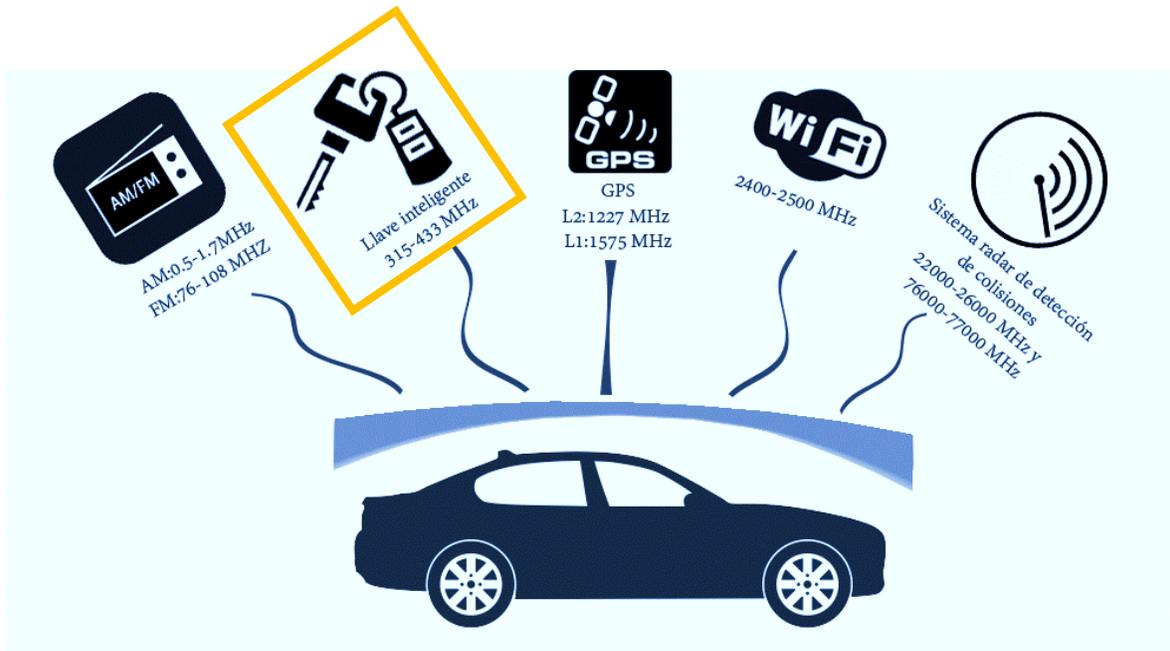


Figura 6: Ondas electromagnéticas más representativas en un automóvil

El sistema de entrada remota sin llave, RKE por sus siglas en inglés, es un sistema inalámbrico que consiste en una llave y un receptor que forma parte de la computadora del vehículo, siendo el propósito central del RKE cerrar y abrir el carro a distancia, operando entre el rango de 315 a 433MHz.

La mayoría de estos sistemas emplean comunicaciones unidireccionales (simplex). Pero los sistemas de segunda y tercera generación pueden comunicarse de nuevo a la llave, para avisar que el coche necesita más gasolina o incluso avisar si es necesario aumentar el nivel de presión en las llantas.

Un sistema RKE consiste en un transmisor de radiofrecuencias colocado en la llave, que envía una serie de datos digitales a un receptor en el vehículo, donde se decodifica y se interpreta para mandar señales de control, ya sea para abrir las puertas o activar el motor mediante actuadores.

En Japón, la modulación es por desplazamiento de frecuencia (FSK), pero en la mayoría de las otras partes del mundo se utiliza la modulación por desplazamiento de amplitud (ASK).

7.5. Diseño de un RKE

Los sistemas RKE incluyen generalmente un microcontrolador en la llave, de tal manera que pueda ser desbloqueado el carro presionando un botón, el cual despierta al microcontrolador de su etapa de bajo consumo y manda una cadena de bits de 64 ó 128 bits al transmisor, donde esta señal de información es modulada y radiada a través de una antena impresa sobre el circuito., ver Figura 7.

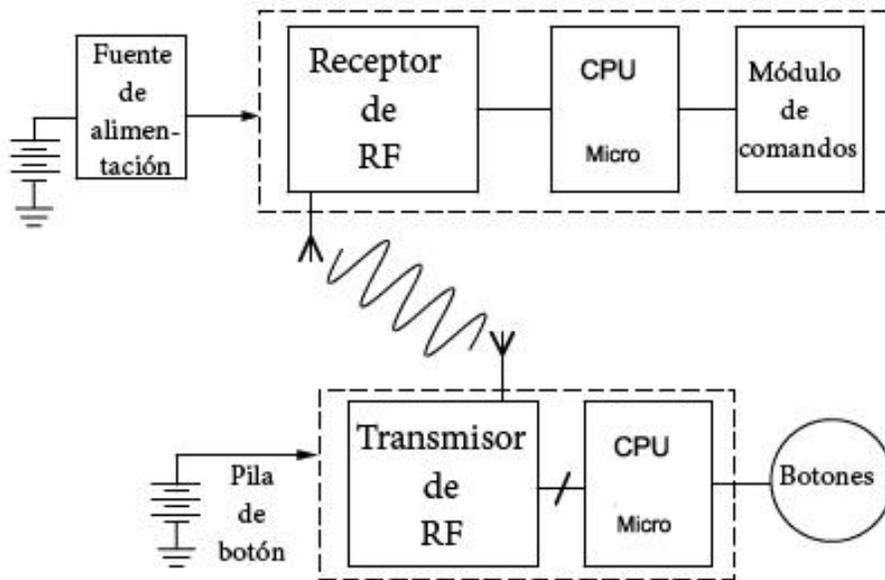


Figura 7: Un sistema RKE consiste en una llave (parte baja del diagrama) que transmite a un receptor dentro del vehículo (parte superior del diagrama) (integrated, 2004)

En el vehículo, un receptor de radiofrecuencias captura la información y lo manda a otro microcontrolador, que decodifica la información y envía una señal de control para abrir las puertas o iniciar el motor. Las llaves multibotones dan la opción de abrir la puerta del conductor, todas las puertas, la cajuela, etc.

El flujo de datos digitales, transmitido entre 2.14 kbps y 20 kbps, por lo general consiste en un preámbulo de datos, un código de comando, algunos bits de control y un código variable que garantiza la seguridad del vehículo mediante su cambio constante en cada uso del dispositivo. Sin este código variable, su señal transmitida puede desbloquear accidentalmente a otro vehículo o ser desbloqueado por un ladrón de coches.

7.5.1. Restricciones de diseño

Las restricciones de diseño incluyen las normativas locales para los dispositivos de corto alcance, tal como por ejemplo las regulaciones de la FCC en estados unidos.

Algunos ejemplos de cómo las regularizaciones de la FCC imponen límites en el diseño de un RKE, son los siguientes:

- El tiempo de transmisión no debe exceder de cinco segundos, y la transmisión periódica puede ser máximo de un segundo a intervalos regulares, siempre y cuando la tasa de transmisión es de menos de una hora.
- La intensidad de campo eléctrico a tres metros de la antena deberá ser linealmente proporcional a la frecuencia fundamental.

7.6. Interacción de las ondas electromagnéticas con la materia

En el siguiente apartado se explicarán los comportamientos principales, que pueden presentar los materiales al momento del paso de una onda electromagnética.

7.6.1. Blindaje electromagnético

Un blindaje electromagnético es una superficie metálica colocada entre dos regiones del espacio, que se utiliza para atenuar la propagación de los campos electromagnéticos (Balcells, 1992). Un blindaje electromagnético sirve para no dejar salir el flujo electromagnético (Figura 8 a) como a su vez no dejar que entre (Figura 8 b).

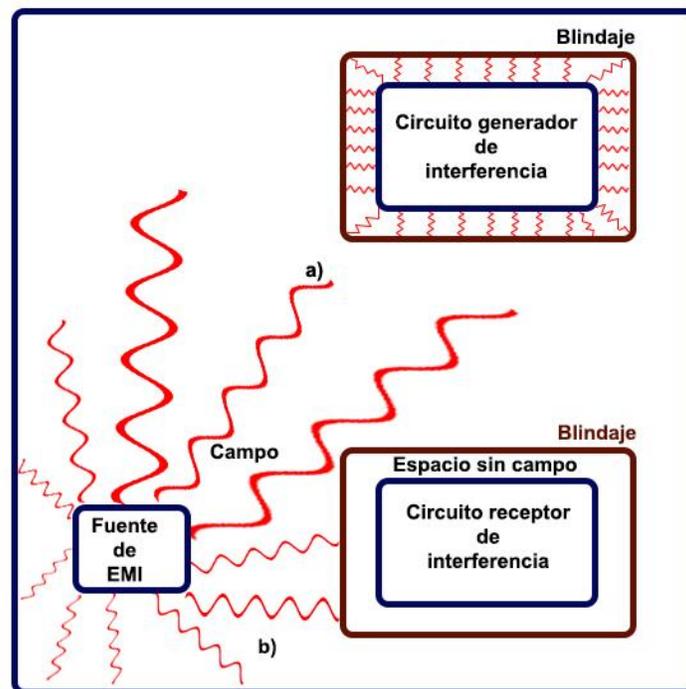


Figura 8: Blindaje electromagnético

7.6.2. Pérdidas por absorción

Cuando una onda electromagnética incide sobre un material metálico existen dos principales efectos a considerar. Por un lado, la onda es parcialmente reflejada por la superficie, y la parte no reflejada se transmite y es atenuada al pasar a través del blindaje. Cuando una onda electromagnética pasa a través de un blindaje, su amplitud decrece exponencialmente debido a las corrientes inducidas en el mismo (Balcells, 1992). Provocando pérdidas por efecto Joule y por tanto disipación de la energía en forma de cambios en la temperatura del material.

7.6.3. Reflector

En esencia hay dos tipos de elementos de antenas: los excitados y los no excitados (parásitos) (Tomasi, 2003). Los elementos excitados son aquellos que se conectan directamente a la línea de transmisión y reciben la potencia directamente de la fuente. Los elementos parásitos no se conectan a la línea de transmisión y su energía proviene de otro elemento parásito. Un elemento parásito más largo que el elemento excitado del que recibe la energía, se llama reflector.

Un reflector reduce la intensidad de señal en su dirección y la aumentan en dirección contraria. En consecuencia, funciona como un espejo cóncavo.

8. Antecedentes

Como parte del estudio del estado del arte, a continuación se presenta una síntesis de los artículos más representativos relacionados con la interacción del cuerpo humano con los sistemas de entrada remota de un automóvil.

8.1. Técnica de medición para la caracterizar el patrón de radiación y la polarización de un sistema de apertura remota (Brunett, 2010)

En el artículo *Measuring Radiation Characteristics of Remote Keyless Entry Transmitters* de Joseph D. Brunett propone una simple técnica para determinar los patrones de radiación de dispositivos de comunicaciones portátiles (ver Figura 9), enfatizando en la medición de las transmisiones de los sistemas RKE. El patrón de radiación del dispositivo y la polarización se caracterizaron sin la necesidad de cables de alimentación que pueden causar errores por fuentes desfasadas, por lo cual presentan un método útil cuando se mide fuentes que se acoplan al cuerpo humano.

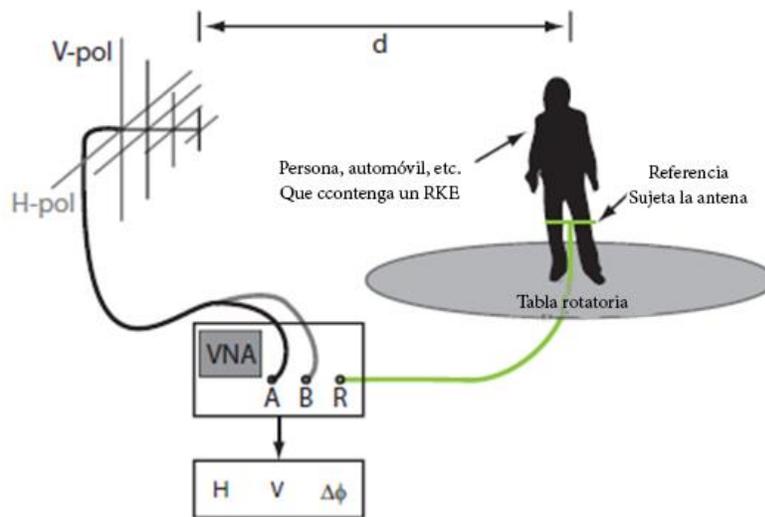


Figura 9: Diagrama experimental propuesto por Joseph D. Brunett (Brunett, 2010)

8.2. Modelación y medición de la transmisión de luz a través de tejidos humanos (Z. KRAWIECKI, 2008)

En el artículo Modeling and measurements of light transmission through human tissues de Z. KRAWIECKI, et al. Se propone un método para la modelación y la medición de la transmitancia de la luz a través de tejidos humanos, proponiendo un método estructural innovador basado en capas (ver Figura 10).

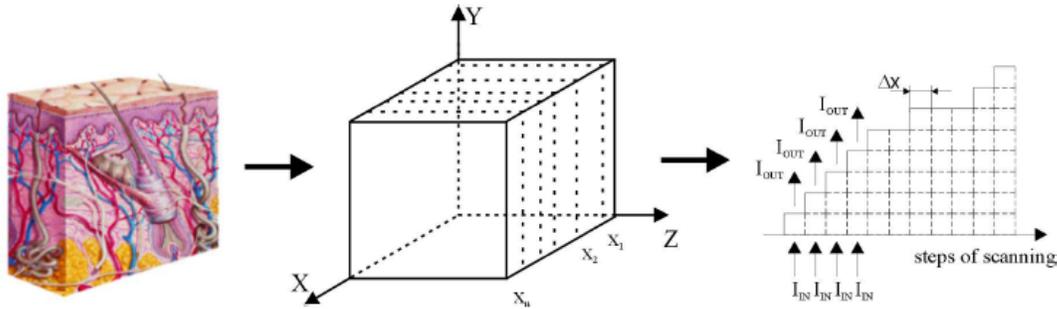


Figura 10: Modelo estructural basado en capas propuesto por (Z. KRAWIECKI, 2008)

8.3. Estudio de los efectos de los tejidos humanos sobre el desempeño de una antena de cuadro (Khaoula Tayari, 2016)

En el artículo Study of the effects of human tissue on performance of a loop antenna de Khaoula Tayari, et al. Se estudió por medio de simulación, el desempeño de una antena de cuadro a partir de la interacción de la antena con el músculo, la grasa y la piel humana (ver Figura 11).

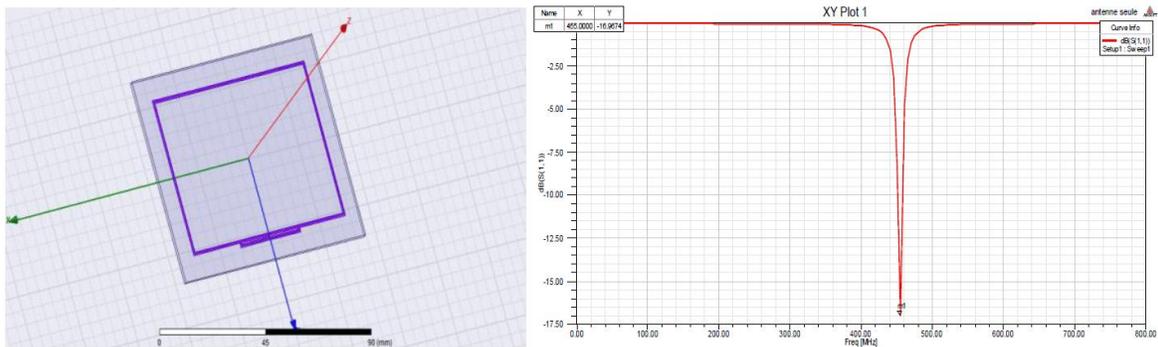


Figura 11: Simulación efectuada en (Khaoula Tayari, 2016)

9. Metodología

De forma simplificada se puede observar en la Figura 12, los pasos que se realizaron en este trabajo de investigación.

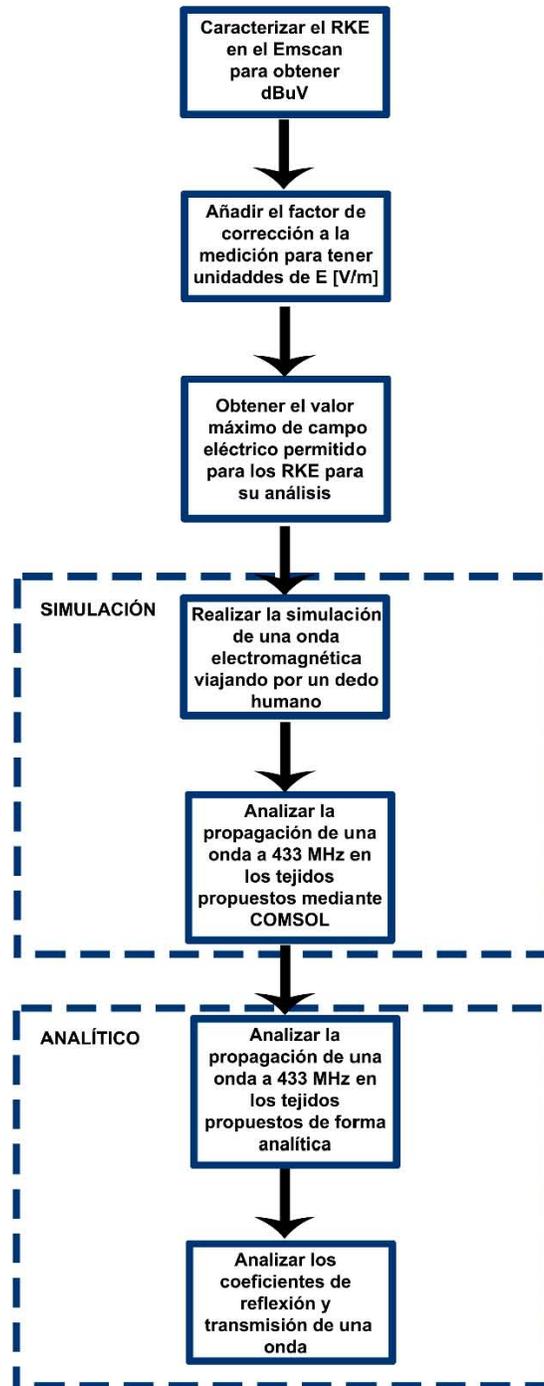


Figura 12: Esquema simplificado de la metodología

9.1. Diseño de experimentos

A continuación se presentan las diversas etapas de experimentación con sus respectivas características.

9.1.1. Objeto de estudio

Para poder analizar el comportamiento electromagnético de las llaves inteligentes, se prosiguió a comprar el sistema de alarma 3100v de la marca Viper, como se muestra en la Figura 13, el cual contiene dos transmisores (dos llaves), un receptor, una sirena y el cableado necesario.



Figura 13: Alarma 3100V de Viper

9.1.2. Emisiones electromagnéticas radiadas por la alarma en funcionamiento

Para conocer mejor nuestro dispositivo de entrada remota, se utilizó el instrumento de medición EMScan (Figura 14), el cual arroja un espectrograma de la radiación del dispositivo, como a su vez una distribución espacial de la misma radiación.

El EMScan es un escáner autónomo de campo muy cercano que consiste en 1218 sondas de campo magnético espaciadas cada 7.5 mm en un arreglo electrónico que provee una resolución efectiva de 3.75 mm. El sistema opera desde los 150 kHz a los 8 GHz, a su vez el EMScan contiene un analizador de espectros integrado.



Figura 14: Instrumento de medición EMScan

9.1.3. Simulación de emisiones radiadas

Para poder analizar cómo es la interacción del cuerpo humano con los sistemas de entrada remota de un automóvil, se prosiguió a hacer una simulación de una onda electromagnética a 433 MHz con una intensidad de campo eléctrico de 10958.3 $\mu\text{V/m}$ (máxima intensidad de campo eléctrico permitida por e-CFR (Regulations, 2018)), propagándose en la dirección x de un sistema de capas en COMSOL, conformado por los materiales presentes en la sección transversal “a” de un dedo índice (ver Figura 15) y el plástico de la carcasa del transmisor del sistema RKE, todo esto a fin de simplificar el modelo.

9.1.3.1.

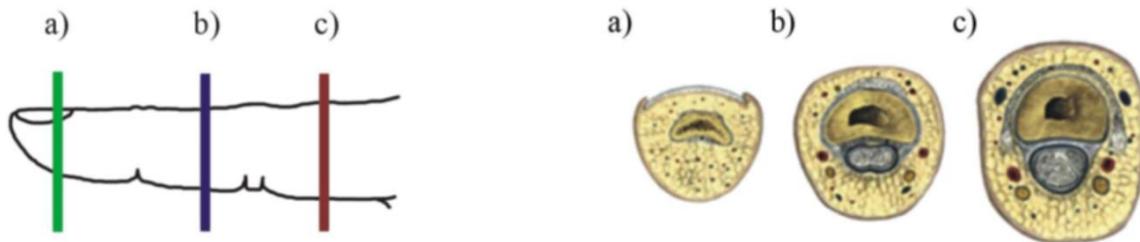


Figura 15: Sección transversal del dedo índice. Obtenido de *Modeling and measurements of tight transmission through human tissues. Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences. Krawiecki, et al.*

9.1.3.2. Parámetros

Los parámetros que se utilizaron en la simulación se muestran en la Tabla 1, los cuales son la frecuencia y su longitud de onda.

Nombre	Expresión	Valor	Descripción
f0	433 [MHz]	433 MHz	Frecuencia de la onda
long	$c_const/(433[\text{MHz}])$	0.69236 m	Longitud de onda

Tabla 1: Parámetros de simulación

9.1.3.3. Geometría

Para la simulación, se prosiguió a crear un rectángulo con dimensiones $\text{long}^*4 \times 500$ mm, al cual se le hicieron subdivisiones como se muestra en la Tabla 3, las cuales representan los múltiples materiales que utilizamos para representar al cuerpo humano.

Descripción	Valor
Ancho	long^*4
Altura	500

Tabla 2: Geometría general

Como se puede observar en la Figura 16, se prosiguió a hacer subdivisiones a un metro de distancia del emisor, con el fin de hacer pasar una onda plana a través de los diferentes materiales conformados por la sección transversal “a” del dedo índice.

Nombre de capa	Grosor (mm)
Plástico	3
Piel	1
Grasa	3
Hueso	5
Grasa	3
Piel	1
Uña	1

Tabla 3: División por capas de la geometría, referente a la sección transversal "a" del dedo índice

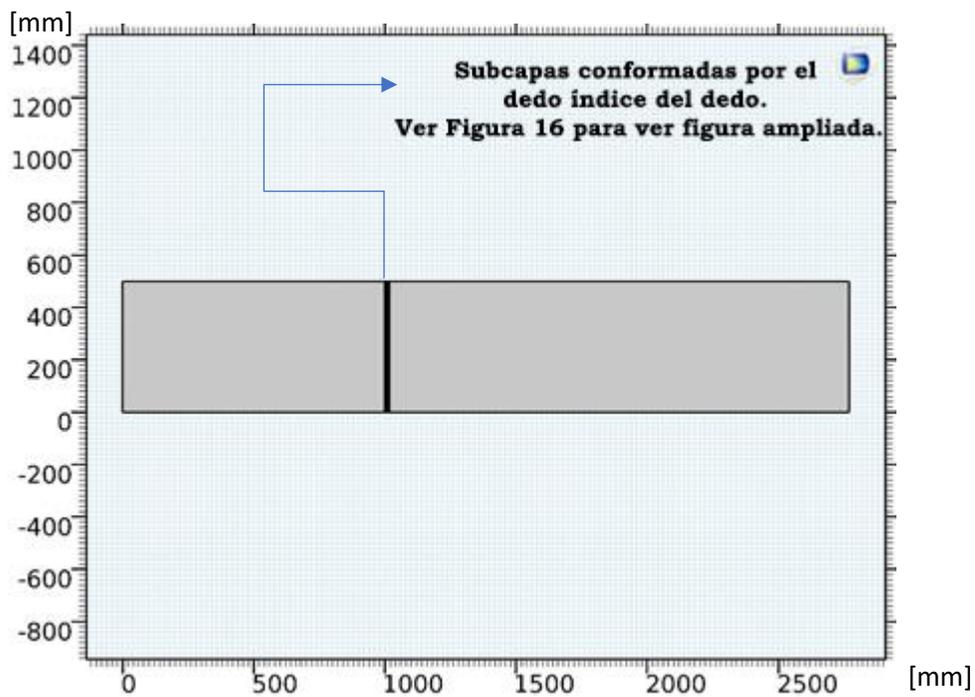


Figura 16: Geometría de la simulación, con capas de material a los 1000 mm

Las subcapas fueron localizadas como se muestra en las Figuras 17 y 18, donde se puede observar la distribución espacial de los diferentes materiales.

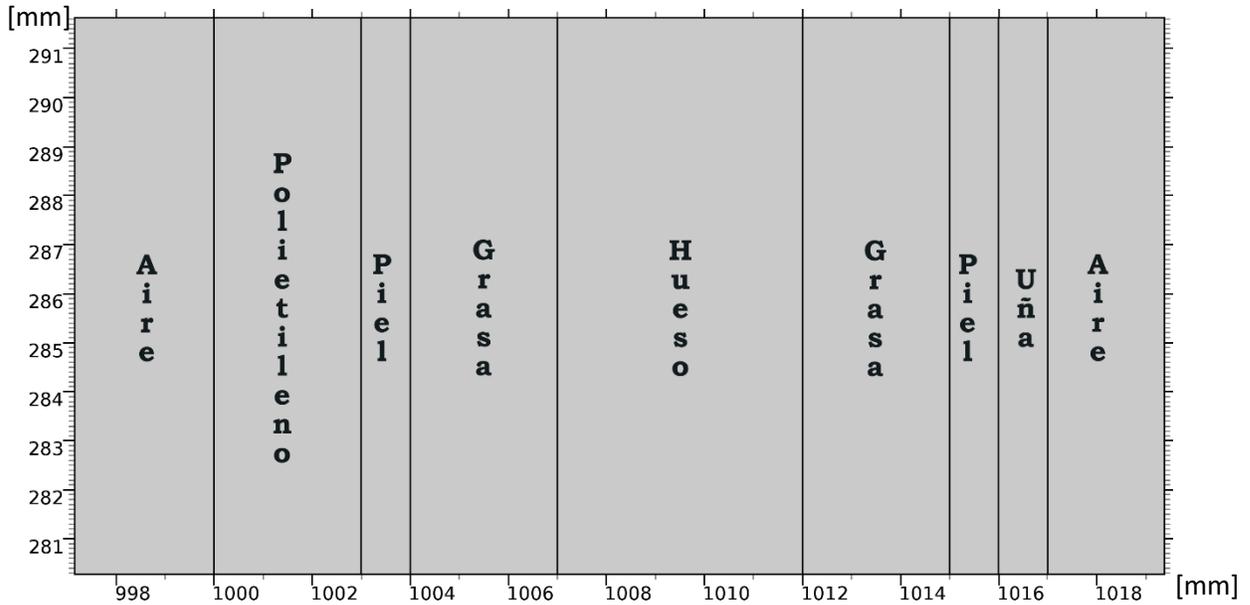


Figura 17: Subcapas conformadas por el dedo índice del dedo

9.1.3.4. Materiales

Los materiales que se utilizaron en la simulación fueron: Aire, polietileno, piel seca, grasa y hueso. Todos estos se definieron en los materiales globales de Comsol, utilizando las propiedades dieléctricas de la Tabla 4.

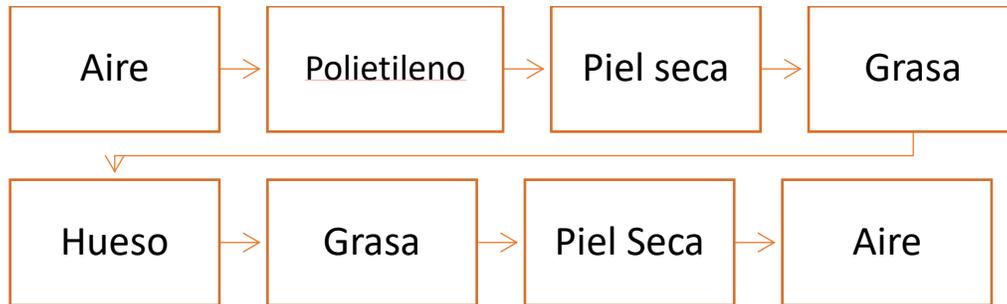


Figura 18: Orden espacial de la transición de materiales en la simulación (siguiendo el orden de las flechas)

Material	Permitividad relativa ϵ_r	Permeabilidad relativa μ_r	Conductividad eléctrica [S/m]
Aire	1	1	0
Plástico	2.3	1	0
Uña	13.074	1	0.09429
Piel seca	46.079	1	0.7019
Grasa Subcutánea	5.5667	1	0.041656
Hueso	13.074	1	0.09429

Tabla 4: Propiedades dieléctricas de los materiales que conforman la simulación (COUNCIL, 2018)

9.1.3.5. Ondas electromagnéticas, dominio de la frecuencia

9.1.3.5.1. Ecuación

Las ecuaciones fundamentales que se utilizaron en la simulación son las que se muestran a continuación. Las cuales describen la propagación del campo eléctrico a través de los materiales.

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times \mathbf{E}) - \kappa_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \tilde{\mathbf{E}}(x, y)e^{-ik_z z} \quad (7)$$

9.1.3.5.2. Configuración

Descripción	Valor
Modelo de campo de desplazamiento eléctrico	Permitividad relativa
Permitividad relativa	Del material
Relación constitutiva	Permeabilidad relativa
Permeabilidad relativa	Del material
Conductividad eléctrica	Del material

Tabla 5: Propiedades dieléctricos utilizados en la simulación

9.1.3.6. Condiciones de frontera y valores iniciales

Para poder efectuar la simulación, es necesario establecer las condiciones de frontera y valores iniciales, los cuales nos permiten establecer las condiciones físicas necesarias para cada problema en particular.

9.1.3.6.1. Valores iniciales

Se definió la condición inicial de $\mathbf{E} = 0$, para todo el dominio de la simulación (ver Figura 19).

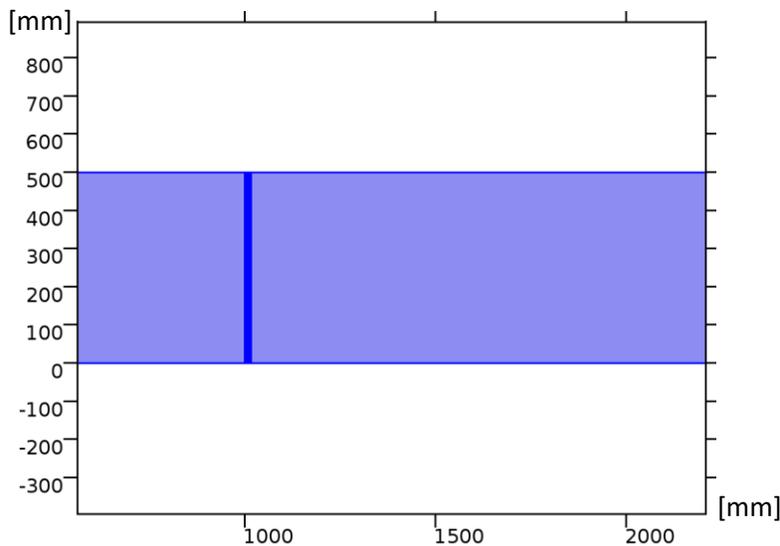


Figura 19: Condición de valores iniciales $E=0$

9.1.3.6.2. Conductor eléctrico perfecto

Se prosiguió a definir la condición de conductor eléctrico perfecto, mostrado en color azul en la Figura 20, para delimitar la zona de estudio.

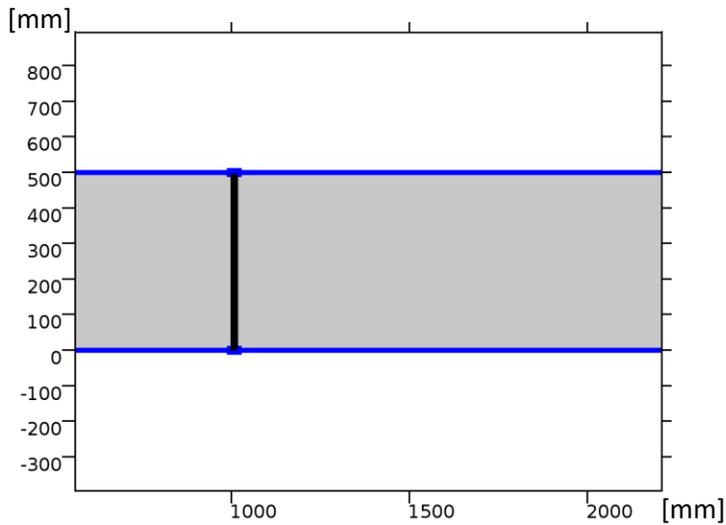


Figura 20: Condición de Frontera "Conductor eléctrico perfecto"

9.1.3.6.2.1. Ecuación

$$n \times \mathbf{E} = 0 \quad (8)$$

9.1.3.6.3. Condición de contorno de difracción

Para poder producir la onda que utilizamos para simular, se prosiguió a utilizar el contorno de difracción (ver Figura 21), el cual genera una onda plana en dirección x con amplitud de 10958.3 mV/m, correspondiente a la máxima amplitud de campo eléctrico permitida para la frecuencia fundamental de emisión de 433 MHz, de acuerdo al Código Federal de Regulaciones de Estados Unidos de América (CFR) (Regulations, 2018) . Para más información del proceso de generación de una onda plana, se recomienda leer el manual de usuario RF Module de Comsol (COMSOL, 2012).

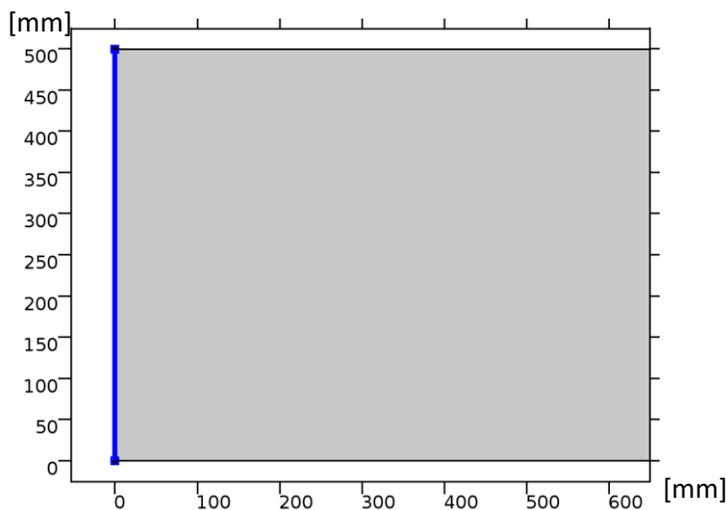


Figura 21: Condición de frontera "Contorno de difracción"

9.1.3.6.3.1. Ecuación

Ecuación utilizada por Comsol para generar la onda plana.

$$\mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{E}) - jk\mathbf{n} \times (\mathbf{E} \times \mathbf{n}) = -\mathbf{n} \times \left((\mathbf{E}_0 \times jk(\mathbf{n} - \mathbf{k}_{dir})) \right) e^{-jk_{dir} \cdot \mathbf{r}} \quad (9)$$

Descripción	Valor
Campo incidente	Onda dada por campo E
Campo eléctrico incidente, componente x	0
Campo eléctrico incidente, componente y	0.000013489628825916533
Campo eléctrico incidente, componente z	0
Tipo de onda difractada	Onda plana
Dirección de onda incidente, componente x	-emw.nx
Dirección de onda incidente, componente y	-emw.ny
Dirección de onda incidente, componente z	0
Orden	Primer orden

Tabla 6: Propiedades del contorno de difracción

9.1.3.6.4. Condición de contorno de impedancia

La condición de contorno de impedancia fue definida para evitar la reflexión e interferencia de la onda en todo el dominio de la simulación (ver Figura 22). Sin esta frontera, cuando la longitud de la geometría coincide con la longitud de onda, observaríamos puntos de interferencia muy bien definidos.

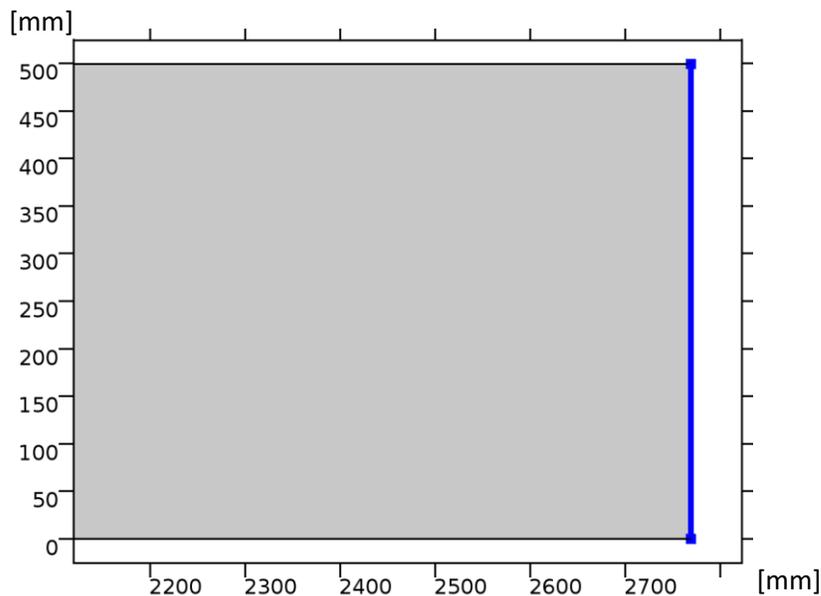


Figura 22: Condición de frontera "Contorno de impedancia"

9.1.3.6.4.1. Ecuación

Ecuación utilizada por Comsol para definir el contorno de impedancia.

$$\sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega}}} \mathbf{n} \times \mathbf{H} + \mathbf{E} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) \mathbf{n} = (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_s) \mathbf{n} - \mathbf{E}_s \quad (10)$$

Descripción	Valor
Modelo de campo de desplazamiento eléctrico	Permitividad relativa
Permitividad relativa	Definido por el usuario
Permitividad relativa	{{1, 0, 0}, {0, 1, 0}, {0, 0, 1}}
Fuente de campo eléctrico, componente x	0
Fuente de campo eléctrico, componente y	0
Fuente de campo eléctrico, componente z	0
Permeabilidad relativa	Definido por el usuario
Permeabilidad relativa	1
Conductividad eléctrica	Definido por el usuario
Conductividad eléctrica	0

Tabla 7: Propiedades del contorno de impedancia

9.1.3.7. Malla

La malla es la distribución de puntos en los cuales se harán los cálculos necesarios para la simulación. En nuestro caso, la malla fue definida bajo el criterio de *malla controlada por la física* (ver Figura 23), la cual nos asegura una distribución de mallado dirigido por la frecuencia de operación del RKE. Si la malla es muy gruesa, se pueden observar en la simulación picos que no deberían existir en el caso teórico.

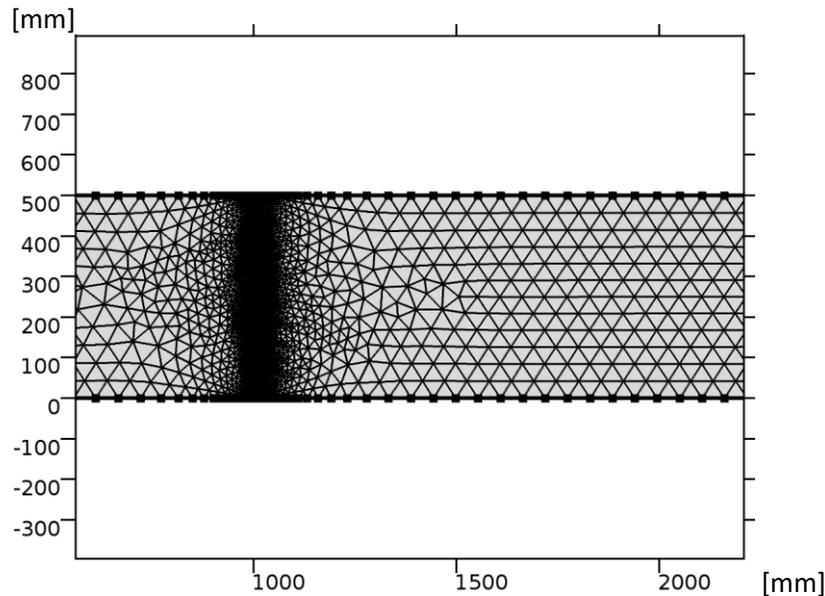


Figura 23: Mallado de la simulación

Descripción	Valor
Tamaño máximo de elemento	55.4
Tamaño mínimo de elemento	0.208
Factor de curvatura	0.25
Tasa de crecimiento máxima de elemento	1.2
Tamaño predefinido	Extra fina

Tabla 8: Propiedades del mallado

9.1.3.7.1. Dominio de la frecuencia

Frecuencias: 433 [MHz]

9.1.3.7.1.1. Selección de físicas y variables

Dado que la herramienta es multifísica, es necesario establecer qué tipo de física se va a utilizar (ver Tabla 9).

Interfaz física	Discretización
Ondas electromagnéticas, dominio de la frecuencia (emw)	physics

Tabla 9: Física utilizada en la simulación

9.1.4. Análisis de atenuación y coeficientes de reflexión y transmisión

Para poder conocer que tanta energía es transmitida a partir de una onda incidente, se prosiguió a calcular los coeficientes de transmisión y reflexión de una onda electromagnética en Excel, para la transición de los diferentes medios presentes en la sección transversal “a” del dedo índice.

De igual forma se calculó el coeficiente de atenuación α , que denota la disminución de una señal que se propaga en un medio.

9.1.5. Análisis teórico del coeficiente de atenuación α , β y la distancia mínima de detección

Se utilizó el software Mathematica para poder analizar de forma eficiente los modelos matemáticos que describen la propagación de una onda plana a través de varios medios.

El primer paso fue establecer las definiciones iniciales (ver Figura 24), con las cuales nuestro programa en Mathematica trabaja.

```

In[3]= f=433*10^(6); (*Frecuencia de la onda*)
λ = 299792458 / f; (*Longitud de onda*)
N[λ]; (*Valor numérico de la onda*)
|valor numérico
ω = 2 * Pi * f; (*Frecuencia angular*)
|número pi

α[μ_, ε_, ω_, σ_] := ω * √( (μ * ε / 2) * (√(1 + (σ / (ω * ε))^2) - 1) ); (*Coeficiente de atenuación*)

β[μ_, ε_, ω_, σ_] := ω * √( (μ * ε / 2) * (√(1 + (σ / (ω * ε))^2) + 1) );

In[9]= depht[μ_, ε_, f_, σ_] :=
1
2 * Pi * f * √( (μ * ε / 2) * (√(1 + (σ / (f * 2 * Pi * ε))^2) - 1) )

(*Distancia de penetración*)

In[10]= envolvente[α_, x_] := E^-α * x

In[11]= Ey[E0_, α_, β_, ω_, x_, t_] := E0 * E^-α * x * Cos[ω * t - β * x];
|coseno
(*Campo eléctrico en y con desplazamiento en x*)
E0 = 10958.3 * 10^(-3);
(*Intensidad de campo eléctrico del RKE en milivolts/metro*)
limite = 177.828 * 10^(-3);
(*Sensibilidad del dispositivo de recepción en milivolts/metro*)
resolucion = 0.000001; (*Resolución del elemento más pequeño de búsqueda*)

```

Figura 24: Inicialización de variables en Mathematica

Posterior a esto, se establecieron los diferentes parámetros dieléctricos para cada material (μ permeabilidad magnética, ϵ permitividad eléctrica, α conductividad eléctrica).

Una vez ingresados los parámetros dieléctricos, se calculó los coeficientes α y β para cada material.

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right)} \quad (11)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right)} \quad (12)$$

De igual forma se calculó la distancia mínima a la cual el receptor ya no es capaz de identificar al transmisor (ver Figura 25), con base en el parámetro de sensibilidad del receptor $177.82 \mu V/m$ (Frankiewicz, 2015).

```
paso = 0;  
iteracion = 0;  
While[E0 * envolvente[ $\alpha_{\text{pielseca}}$ , paso] >= limite, paso = paso + resolucio; iteracion++]  
[mientras  
Dpielseca = 0;  
Dpielseca = paso - resolucio
```

Figura 25: Cálculo en Mathematica de la distancia mínima a la cual el receptor ya no es capaz de identificar al transmisor

10. Resultados

10.1.1.1. Emisiones radiadas de la llave sin presionar ningún botón

Para poder determinar la intensidad del campo eléctrico del dispositivo se colocó la llave en el Ensacan en el área comprendida de A a F y de 1 a 7, ver Figura 26.

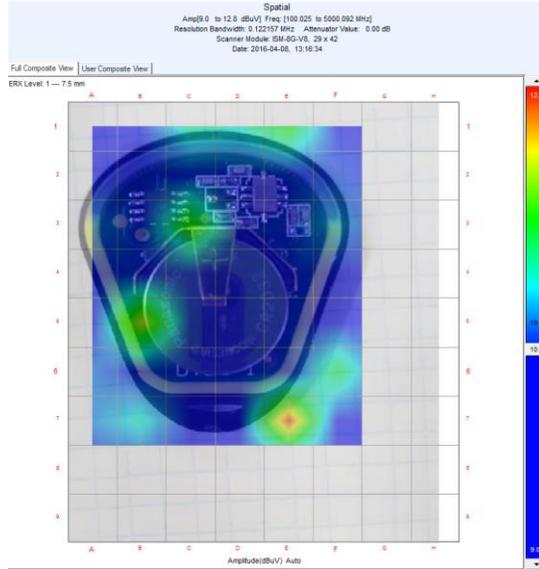


Figura 26: Emisiones del transmisor sin presionar algún botón

10.1.1.2. Emisiones radiadas de la llave presionando el botón de apertura de puertas

Para poder determinar la intensidad del campo eléctrico del dispositivo, se colocó la llave en el EMScan en el área comprendida de J a Q y de 15 a 22, ver Figura 27.

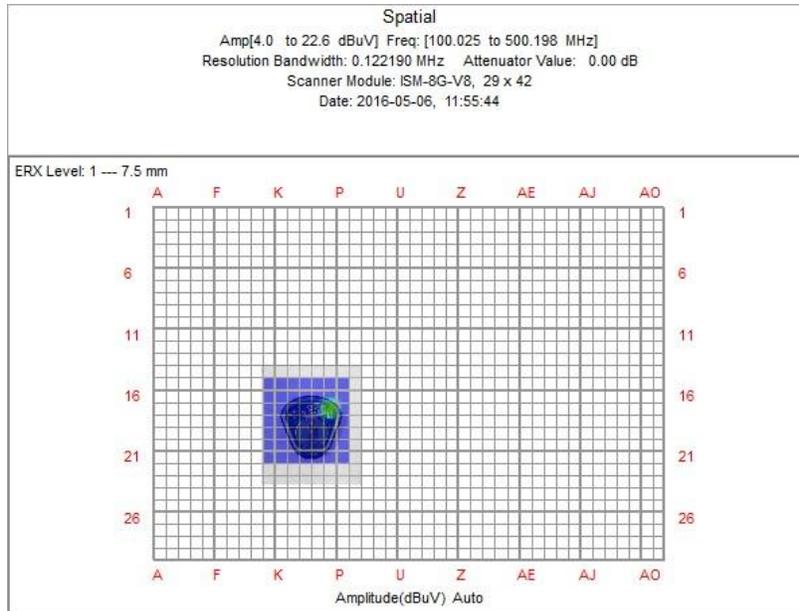


Figura 27: Emisiones radiadas del transmisor al presionar el botón de abrir puertas

Para no interactuar directamente con la llave, se dejó presionado el botón de apertura de puertas utilizando cinta adhesiva.

En Figura 28 y 29 se muestran respectivamente los espectrogramas correspondientes a las intensidades de campo eléctrico, cuando no se aprieta y cuando se aprieta el RKE.

Se puede notar en la Figuras 28, bandas muy anchas en 2350.89 MHz, 2657.80 MHz y 2887.98 MHz y 28 bandas muy anchas de poca intensidad, estas se pueden deber principalmente al microcontrolador de la llave en modo de espera. Por otra parte, en la Figura 29 se aprecia un pico muy bien definido con una intensidad de campo eléctrico de 22.6dBuV en la frecuencia de 433MHz, correspondiente a la frecuencia de emisión al momento de presionar la llave.

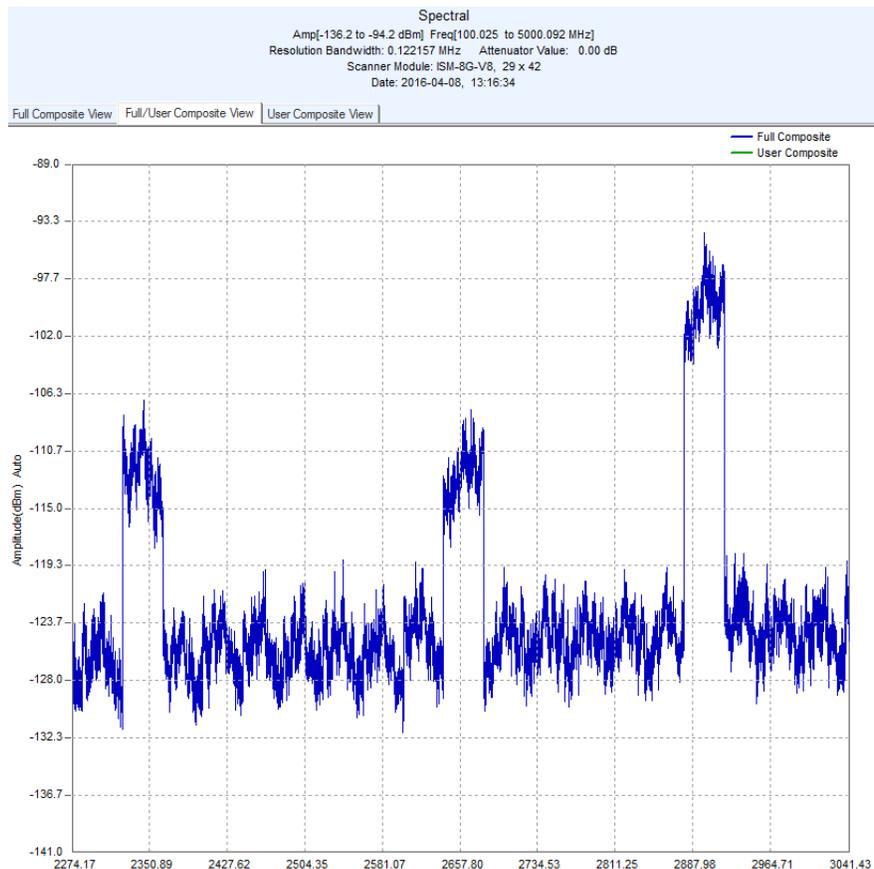


Figura 28:Espectrograma del campo eléctrico cuando no se aprieta el botón

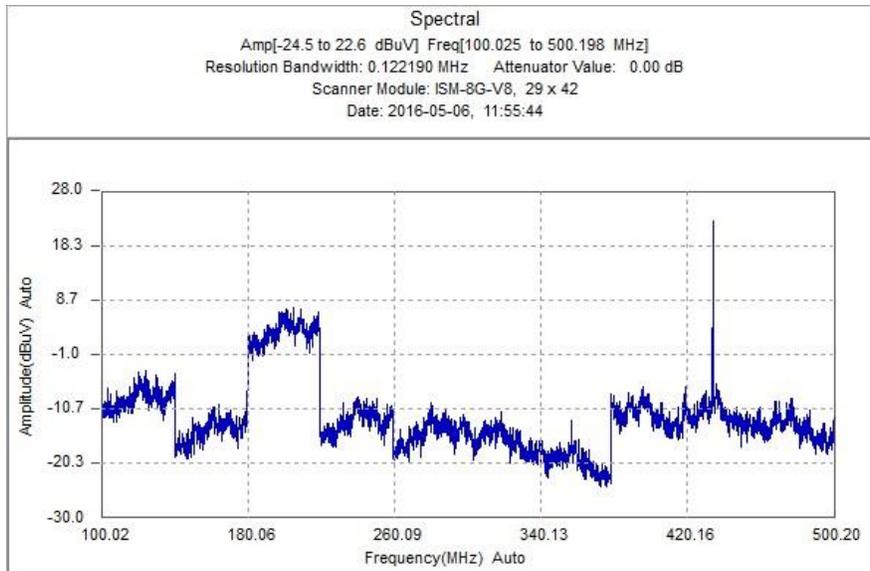


Figura 29: Intensidad del campo eléctrico cuando se aprieta el botón

10.2. COMSOL

Para el caso básico, se prosiguió a usar la anatomía del dedo índice como referencia, siguiendo los lineamientos antes descritos.

Las Figuras 30, 31 y 32, son los resultados de la simulación antes descrita, en donde una onda electromagnética plana es transmitida del lado izquierdo de la simulación y desplazada horizontalmente hasta que llega a los 1000mm, dónde se encuentran las capas que representan los tejidos del dedo de una persona.

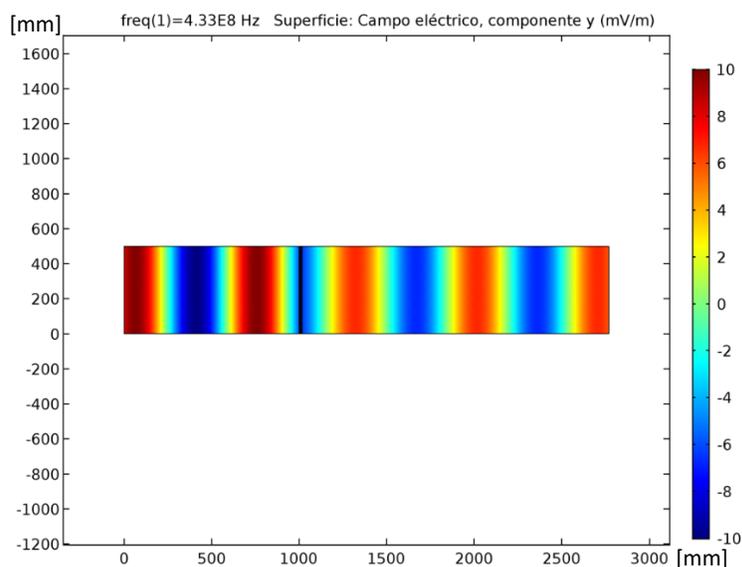


Figura 30: $\text{freq}(1)=4.33\text{E}8$ Hz Superficie: Campo eléctrico, componente y (V/m)

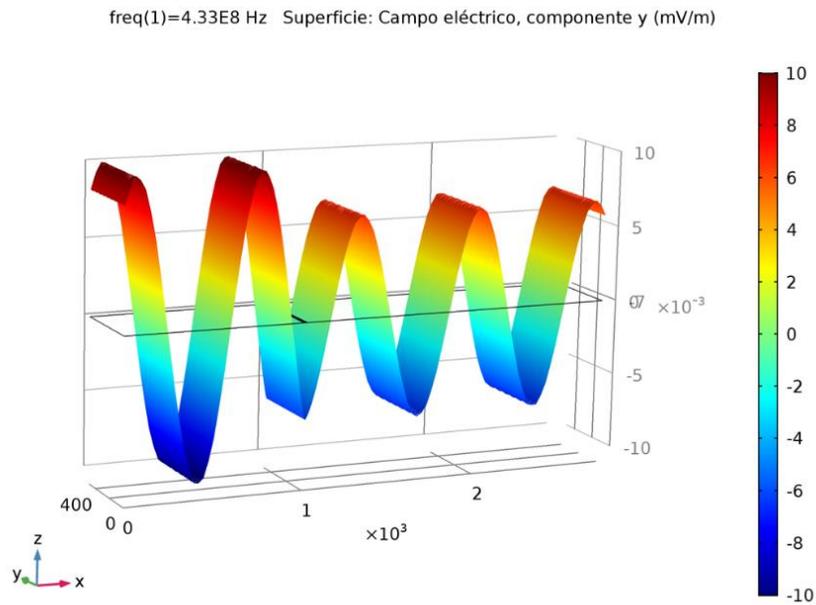


Figura 31: freq(1)=4.33E8 Hz Superficie 3D: Campo eléctrico, componente y (V/m)

Se puede observar claramente en la Figura 32, que después de que la onda pasa por el dedo humano (1000 mm), existe un desfase y disminución de la amplitud del campo eléctrico del 32.15%.

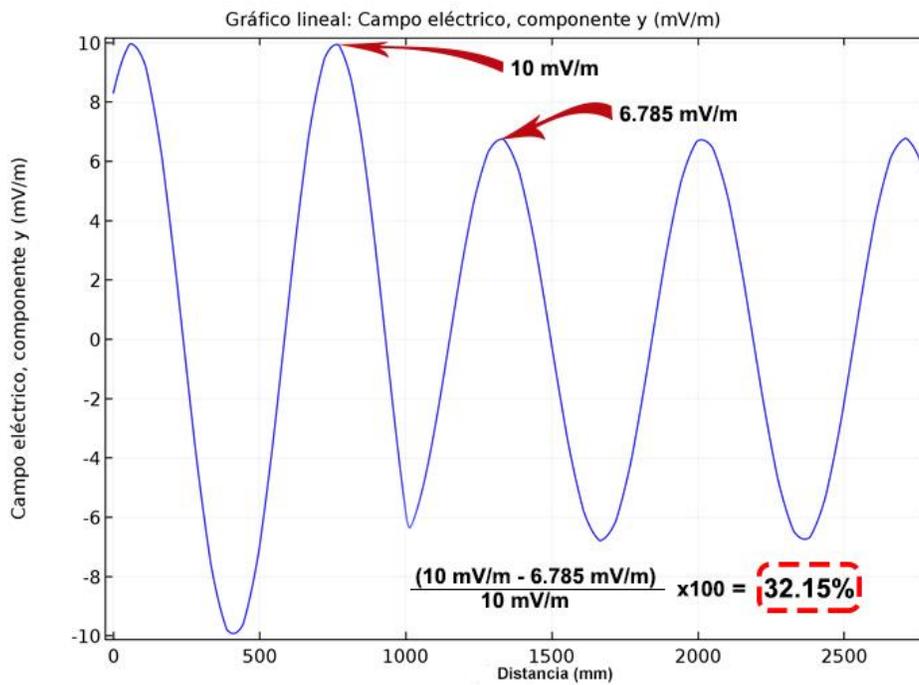


Figura 32: Gráfico lineal: Campo eléctrico, componente y (V/m)

10.3. Análisis de la atenuación de una onda electromagnética plana a 433 MHz en los diferentes materiales

Para conocer cómo una onda electromagnética es atenuada al interactuar con un medio (ver Figuras 33-37), se realizaron simulaciones en COMSOL, en dónde se hace propagar una onda electromagnética plana a 433 MHz, a través de diferentes materiales.

10.3.1. Comsol - Polietileno

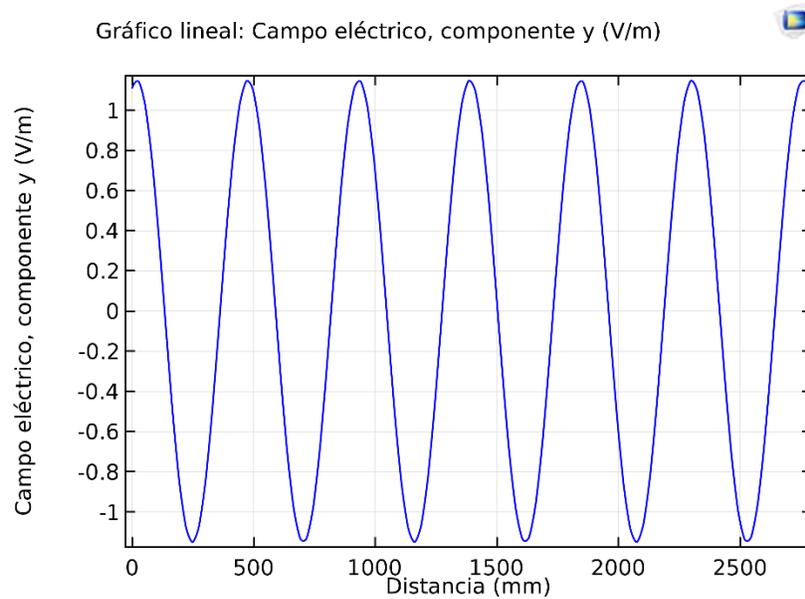


Figura 33: Campo eléctrico, componente y (V/m) en polietileno

10.3.2. Comsol - Piel seca

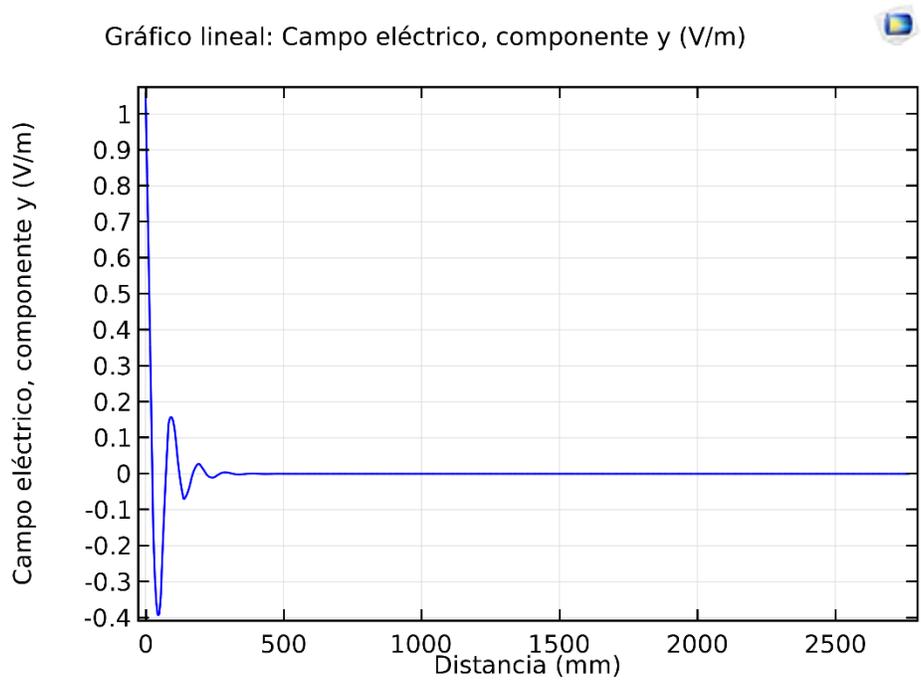


Figura 34: Campo eléctrico, componente y (V/m) en piel seca

10.3.3. Comsol – Piel mojada

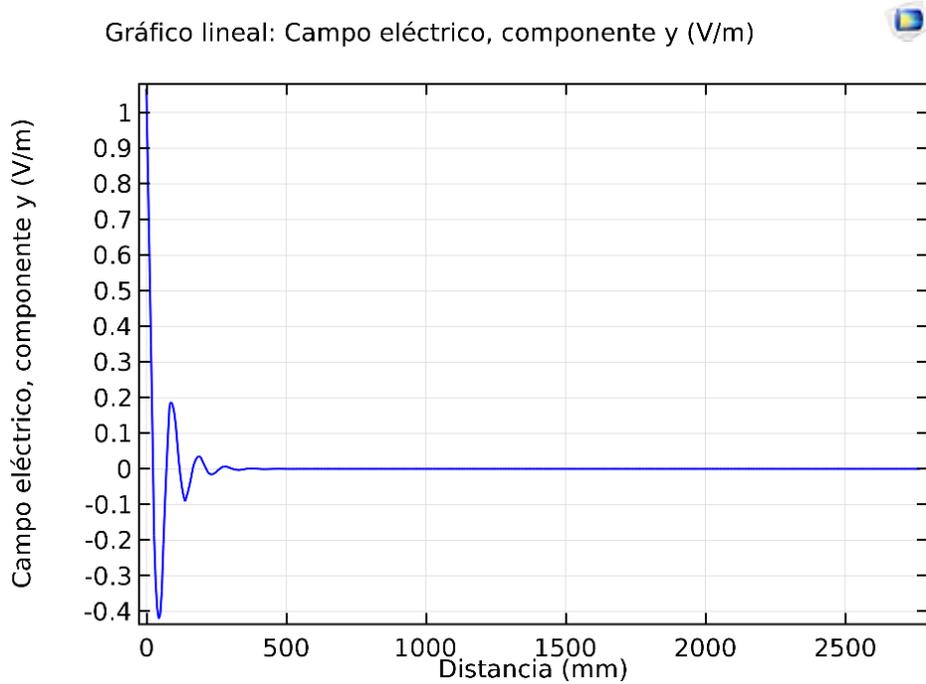


Figura 35: Campo eléctrico, componente y (V/m) en piel mojada

10.3.4. Comsol – Grasa

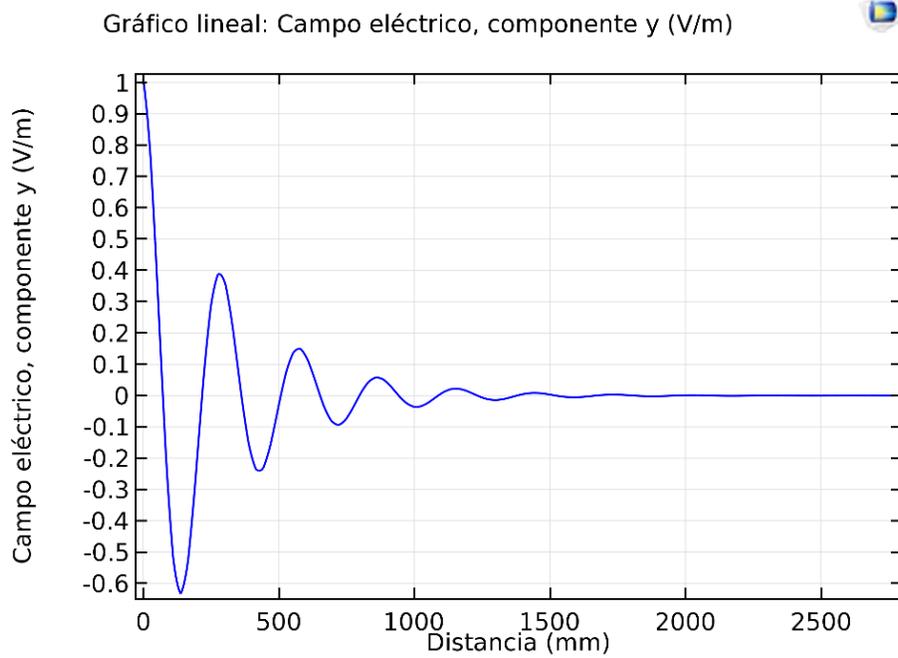


Figura 36: Campo eléctrico, componente y (V/m) en grasa

10.3.5. Comsol - Uña

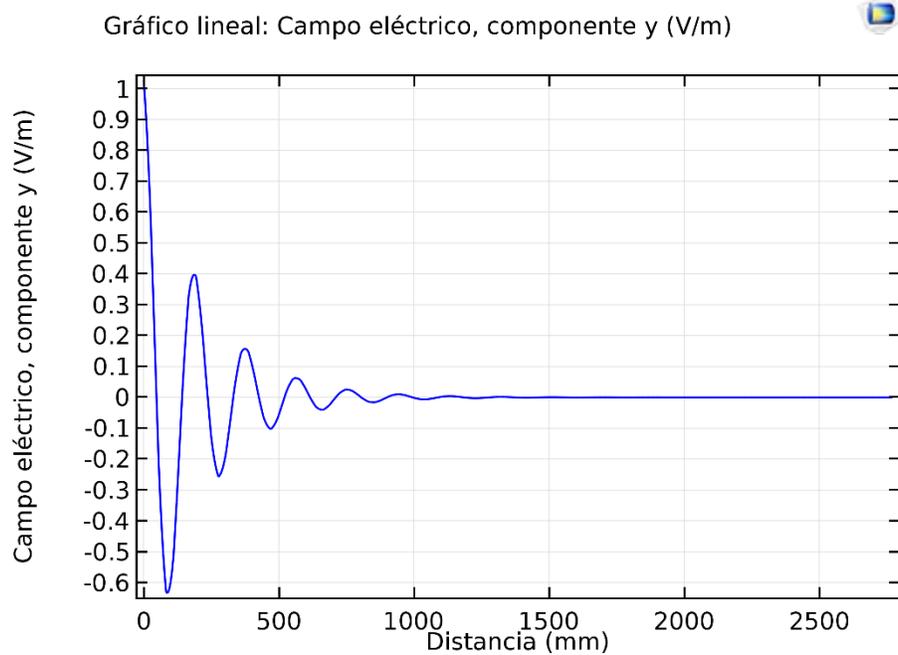


Figura 37: Campo eléctrico, componente y (V/m) en uña

10.4. Obtención de los coeficientes de transmisión y reflexión de una onda electromagnética al haber un cambio de medio dieléctrico

Para poder conocer que tanta energía es transmitida a partir una onda incidente, se prosiguió a calcular al coeficiente de transmisión reflexión de una onda electromagnética en Excel, utilizando las siguientes formulas:

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}} \quad (13)$$

$$\eta_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\epsilon_2}} \quad (14)$$

$$r = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} \quad (15)$$

$$t = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} \quad (16)$$

Material	Permitividad relativa ϵ_r	Permitividad absoluta ϵ [F/m]	Permeabilidad relativa μ_r	Permeabilidad absoluta μ [H/m]	Conductividad eléctrica σ [S/m]	Impedancia η [Ω]
Aire	1	8.85419E-12	1	1.25664E-06	0	376.7303135
Plástico	2.3	2.03646E-11	1	1.25664E-06	0	248.4086124
Uña	13.074	1.15813E-10	1	1.25664E-06	0.09429	104.1661697
Piel seca	46.079	4.08523E-10	1	1.25664E-06	0.7019	55.46212154
Piel mojada	49.418	4.37556E-10	1	1.25664E-06	0.68085	53.59052164
Grasa Subcutánea	5.5667	4.92293E-11	1	1.25664E-06	0.041656	159.7692407
Músculo	56.873	5.03564E-10	1	1.25664E-06	0.80484	49.95483148

Tabla 10: Impedancia de los diferentes medios

Casos	C. Reflexión "r"	C. Transmisión "t"
Aire-Plástico	-0.205269094	0.794730906
Plástico-piel	-0.634768205	0.365231795
Piel-Grasa	0.48414846	1.48414846
Grasa-Piel	-0.48414846	0.51585154
Piel-Uña	0.304918107	1.304918107
Uña-Aire	0.566705538	1.566705538

Tabla 11: Coeficientes de reflexión y transmisión

Se puede observar de forma gráfica en la Figura 38 que el coeficiente de reflexión, dependiendo del caso de estudio es positivo o negativo. Esto se debe principalmente al sentido de la onda después de ser reflejada.

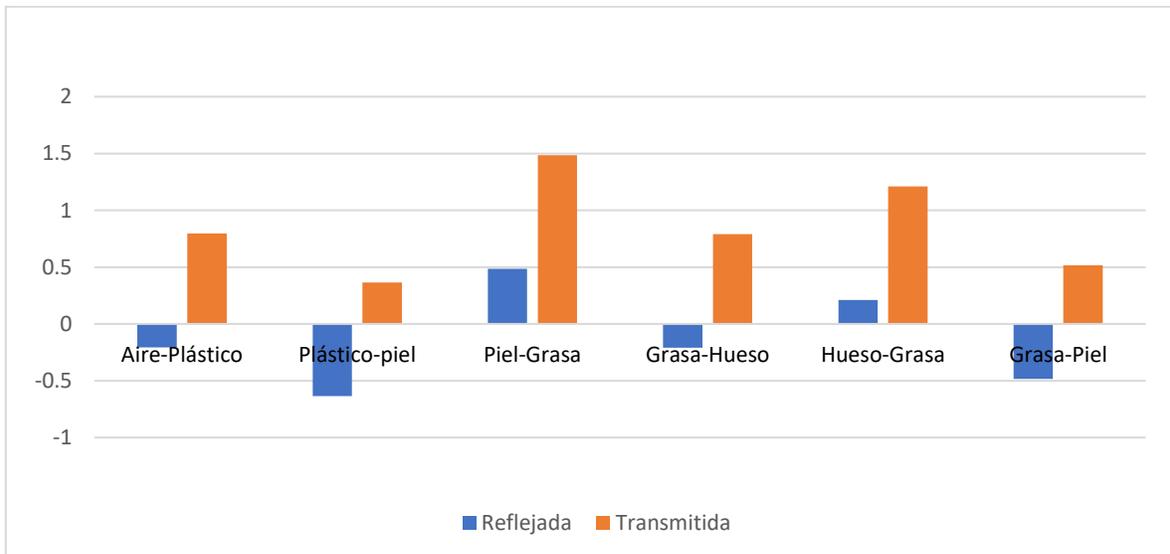


Figura 38: Coeficientes de transmisión y reflexión en los materiales presentes en la interfaz RKE-dedo índice

10.5. Análisis del coeficiente de atenuación α

Para poder conocer de forma analítica cómo una onda es atenuada, se prosiguió a calcular mediante Mathematica el coeficiente de atenuación α , y la distancia mínima necesaria para que una onda electromagnética ya no sea detectada por un receptor de automóvil **D**.

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right)} \quad (17)$$

Las gráficas mostradas a continuación (Figuras 39-45), denotan la función $E_y(x)$ en azul, con sus respectivas envolventes. La intersección de las dos líneas punteadas rojas muestra el punto en dónde la intensidad de $E_y(x)$ es menor que la sensibilidad del receptor del RKE "D".

10.5.1. Análisis del Aire

$$\alpha_{\text{aire}} = 0 \quad (18)$$

$$\beta_{\text{aire}} = 9.07501 \quad (19)$$

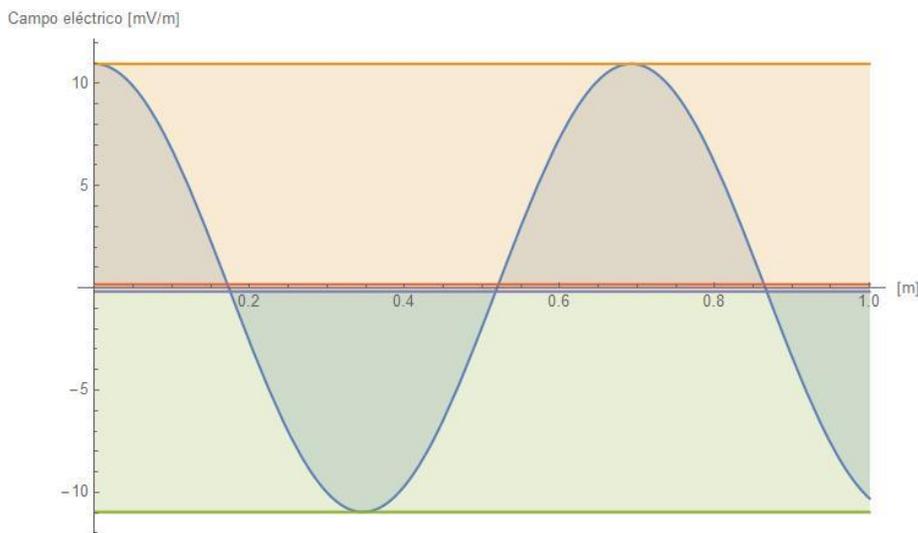


Figura 39: Campo eléctrico atenuado por el aire

10.5.2. Análisis de la piel seca

$$\alpha_{\text{pielseca}} = 18.60155 \quad (20)$$

$$D_{\text{pielseca}} = 0.221059 \text{ m} \quad (21)$$

$$\beta_{\text{pielseca}} = 64.3881 \quad (22)$$

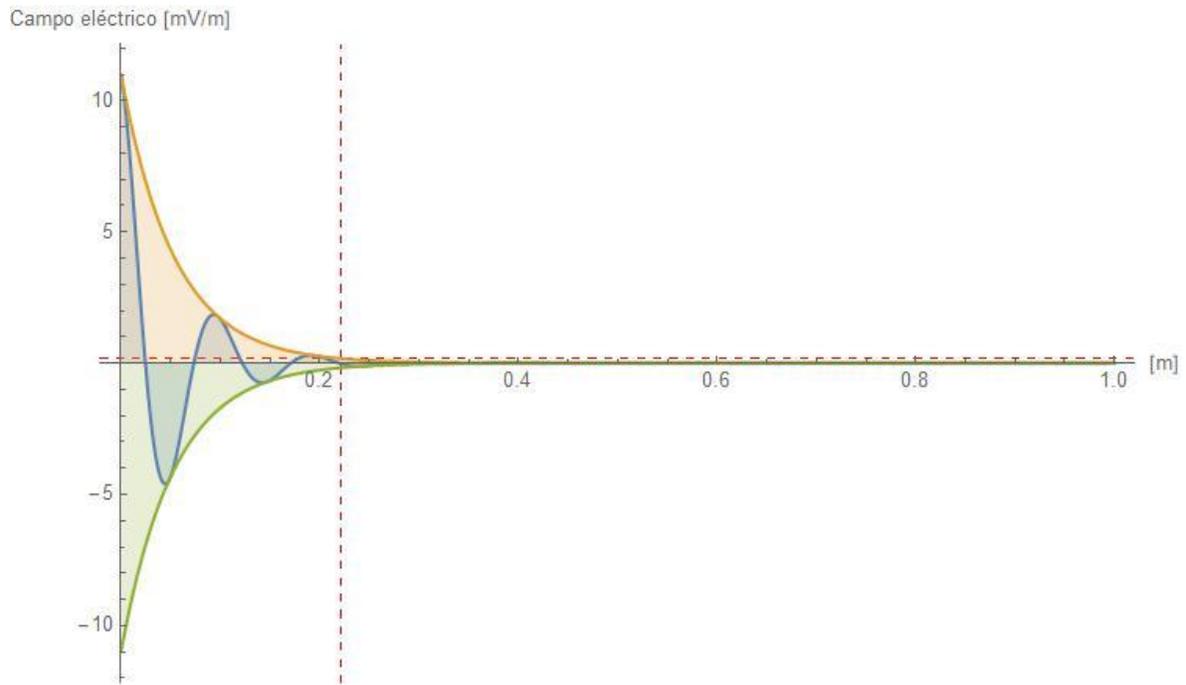


Figura 40: Campo eléctrico atenuado por la piel seca

10.5.3. Análisis del polietileno

$$\alpha_{\text{polietileno}} = 0 \quad (23)$$

$$\beta_{\text{aire}} = 13.7629 \quad (24)$$

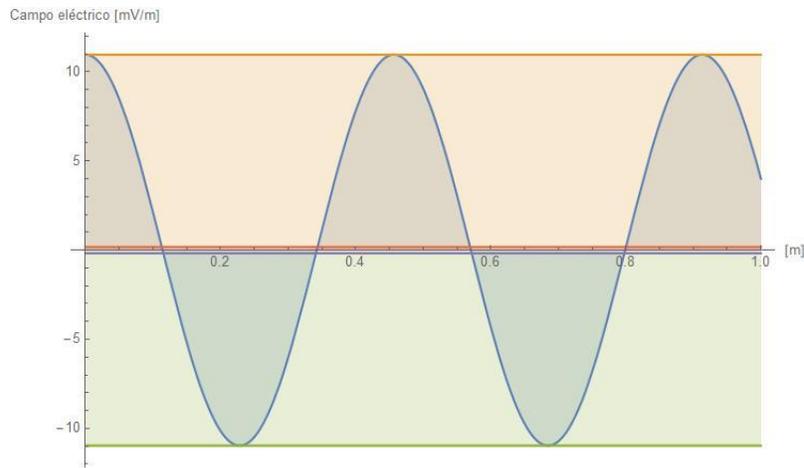


Figura 41: Campo eléctrico atenuado por el polietileno

10.5.4. Análisis de la grasa subcutánea

$$\alpha_{\text{grasa}} = 3.2851897 \quad (25)$$

$$D_{\text{grasa}} = 1.25368 \text{ m} \quad (26)$$

$$\beta_{\text{aire}} = 21.649264 \quad (27)$$

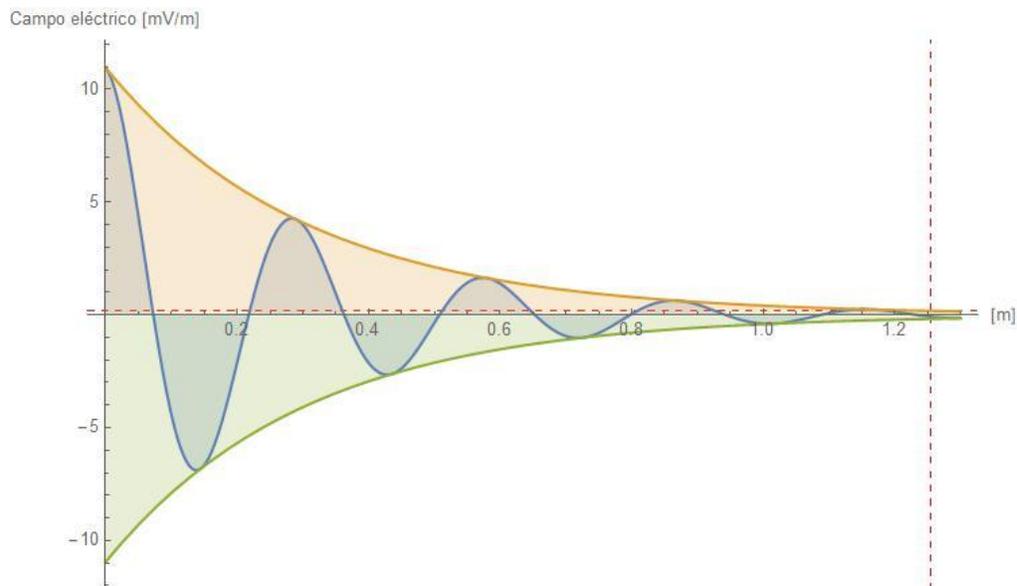


Figura 42: Campo eléctrico atenuado por la grasa

10.5.5. Análisis de la Uña

$$\alpha_{\text{uña}} = 4.84432 \quad (28)$$

$$D_{\text{uña}} = 0.848114 \text{ m} \quad (29)$$

$$\beta_{\text{aire}} = 33.1765 \quad (30)$$

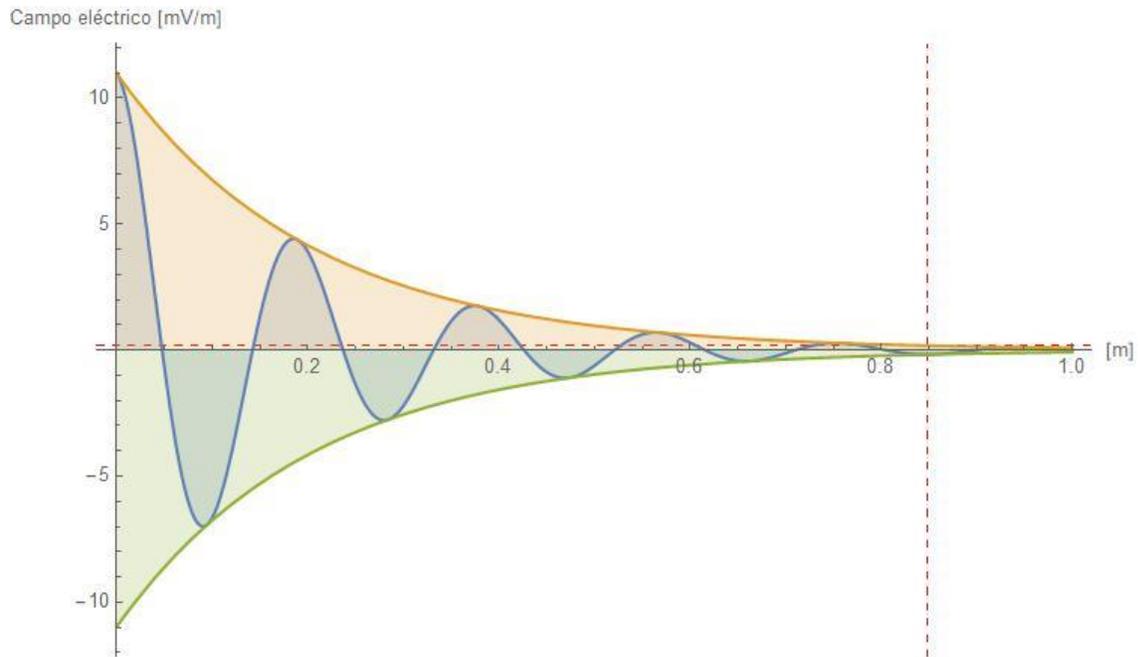


Figura 43: Campo eléctrico atenuado por la uña

10.5.6. Análisis del hueso

$$\alpha_{\text{hueso}} = 4.85494 \quad (31)$$

$$D_{\text{hueso}} = 0.84811 \text{ m} \quad (32)$$

$$\beta_{\text{hueso}} = 3.2029 \quad (33)$$

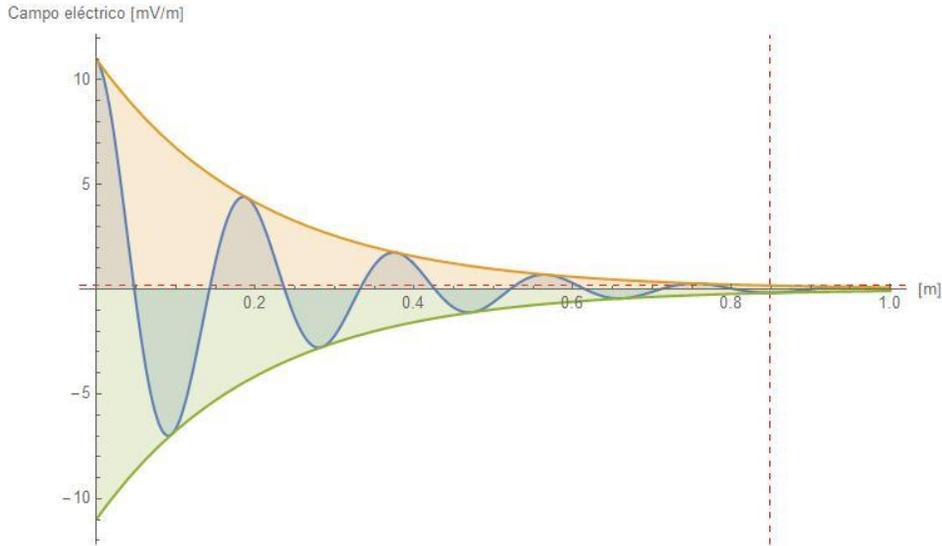


Figura 44: Campo eléctrico atenuado por el hueso

10.5.7. Análisis del músculo

$$\alpha_{\text{músculo}} = 19.34487 \quad (34)$$

$$D_{\text{músculo}} = 0.213029 \text{ m} \quad (35)$$

$$\beta_{\text{músculo}} = 71.119932 \quad (36)$$

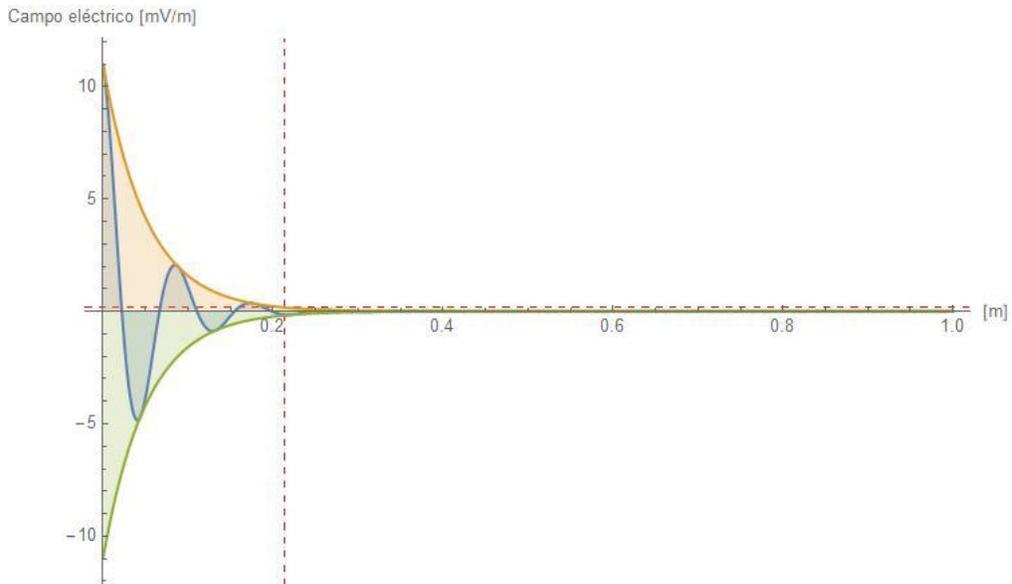


Figura 45: Campo eléctrico atenuado por el músculo

En la Tabla 12 se puede ver de forma resumida los coeficientes α y β de cada medio y la distancia mínima en la cual la onda electromagnética proveniente del RKE ya no es detectada por el receptor “D”.

Medio	α [Np/m]	β [rad/m]	D[m]
Aire	0	9.07501	-
Polietileno	0	13.7629	-
Piel seca	18.60155	64.3881	0.221059 m
Piel mojada	17.5874	66.1753	0.234316 m
Grasa subcutánea	3.2851897	21.649264	1.253676 m
Uña	4.84432	33.1765	0.848114 m
Hueso	4.85494	3.2029	0.848114 m
Músculo	19.3449	71.1199	0.213029 m

Tabla 12: Coeficientes α y β

Para poder observar de forma gráfica el amortiguamiento de la señal electromagnética, se graficó en la Figura 46 el comportamiento de la señal en los diferentes medios. Se puede notar un mayor amortiguamiento dentro del músculo, la piel seca y la piel mojada.

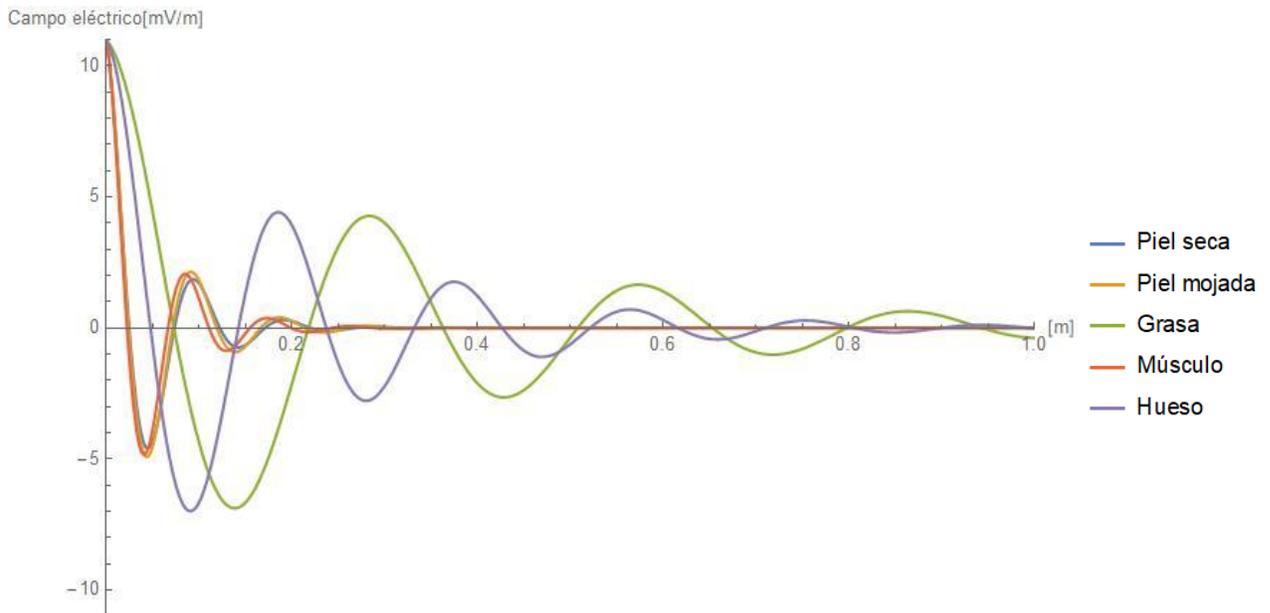


Figura 46: Atenuación de una onda electromagnética en los diferentes tejidos del cuerpo humano

10.5.8. Profundidad de penetración

Para tener una medida cuantitativa de que tanto una onda electromagnética puede penetrar un tejido, se define la medida de profundidad de penetración como la distancia a la cual una onda electromagnética reduce su magnitud a $1/e$, es decir a un 36.78%.

$$\delta[m] = \frac{1}{\alpha} \quad (37)$$

En la Figura 47 se muestra el comportamiento de la profundidad de penetración en diferentes tejidos al cambiar la frecuencia.

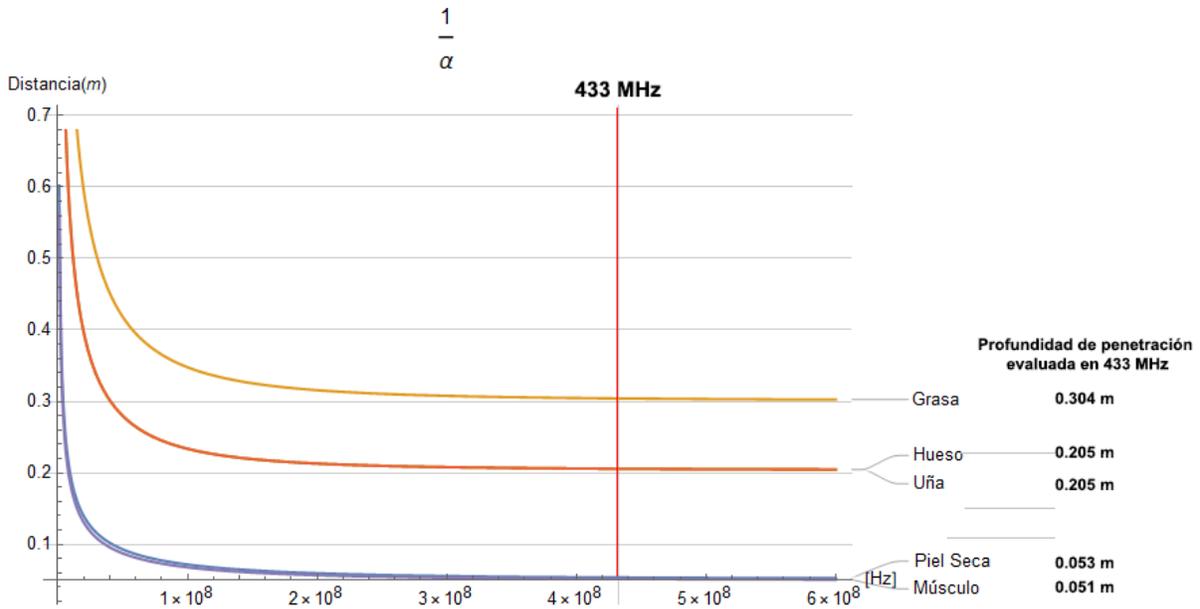


Figura 47: Profundidad de penetración al variar la frecuencia y los tejidos

11. Análisis de resultados

A partir de los experimentos realizados se prosiguió a hacer el siguiente análisis de resultados:

- Como se puede observar en la Figura 29, el pico de máxima intensidad se encuentra en la frecuencia de 433 MHz, el cual es un pico muy definido, con lo que su comportamiento se puede aproximar a una delta de Dirac.
- Si se hace el cociente entre la intensidad de campo eléctrico suministrado por el transmisor de la alarma y la sensibilidad mínima del receptor, podemos notar que la intensidad del campo eléctrico es 61.62 veces más grande que la sensibilidad del receptor.

$$\frac{10958.3 \mu V/m}{177.82 \mu V/m} = 61.62 \quad (38)$$

- Se pueden observar en la simulación de COMSOL, que las interfaces en los materiales presentes en la sección transversal “a” del dedo índice, provocan desfasamiento y atenuación del 32.15% a la onda electromagnética.
- Al momento de analizar cómo la onda electromagnética es atenuada por los diferentes materiales propuestos en el análisis, se puede notar que entre mayor conductividad más rápida será la atenuación.
- Podemos notar mediante los coeficientes de transmisión y reflexión, que las interfaces plástico-piel y grasa-piel son las interfaces en dónde mayor porcentaje de la onda es reflejada, de igual forma podemos observar que existen cambios de sentido del campo eléctrico en la frontera de las interfaces aire—plástico, plástico-piel, grasa-hueso y grasa-piel.
- Al observar las simulaciones y las soluciones analíticas de la ecuación de onda, podemos ver que el comportamiento de la onda en ambos casos coincide, verificando así nuestra simulación.

12. Conclusiones

- Dado que el pico de emisión de datos está muy bien definido en la frecuencia de 433 MHz, se puede concluir que el dispositivo posee una gran calidad de sus elementos de transmisión. Por otro lado, según el *Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias*, el dispositivo RKE con frecuencia de operación en 433 MHz puede interferir con las señales procedentes del Móvil (salvo móvil aeronáutico), radiolocalización y aficionados.
- Mediante el coeficiente de atenuación α , podemos percatarnos que una onda electromagnética de 433 MHz es más susceptible a perder intensidad cuando los parámetros de grosor de la piel y del músculo son modificados, siendo todos estos parámetros que cambian con la edad, el sexo y estilo de vida de cada persona.
- Para que la señal proveniente del RKE sea atenuada hasta que sea completamente indetectable por el receptor, es necesario reducir 61.62 veces la sensibilidad del receptor a la señal de transmisión, siendo esta una relación muy grande en comparación.
- Dado que se estudió el caso básico de propagación de una onda plana a través de un RKE y el dedo índice, se dejaron muchos posibles casos de estudio sin analizar, tales como:
 - Existencia de carga electrostática en los materiales
 - Incidencia no oblicua en los diferentes materiales
 - Análisis de reflexión total interna
 - Estudio de los modos de propagación
 - Estudio de la propagación y modificación de los datos al momento de propagarse por los diferentes medios
 - Análisis de la propagación de una onda a través del cuerpo completo
- Al observar las simulaciones, una onda plana que atraviesa el dedo índice pierde alrededor del 32.15% de su intensidad, por lo que podemos confirmar que el cuerpo humano funciona como un atenuador. Posterior a esto, es necesario la realización de otro estudio dónde se contemplen las longitudes máximas del cuerpo humano, para así tener la máxima atenuación promedio que puede generar el cuerpo humano.
- Los principales retos que se enfrentaron fueron:
 - La integración de muchas áreas del conocimiento, tales como electromagnetismo, electrónica, biología, teoría de comunicaciones, programación (Mathematica) y matemáticas dirigidas a la simulación por elemento finito.
 - Aprender a usar la herramienta Comsol. Aunque Comsol es muy poderoso, la documentación se encuentra muy dispersa en diferentes ejemplos documentados, por lo cual se tiene que aprender a hacer varios tipos de simulaciones y obtener de ahí las metodologías que más se adaptaban a la simulación.
- Realizar este proyecto de investigación sirvió para plantear un problema e integrarlo desde diferentes tipos de enfoques, aterrizándolo a la industria automotriz.

- El cuerpo humano está conformado por diferentes tipos de tejidos biológicos, los cuales poseen diferentes propiedades dieléctricas: Permitividad eléctrica, permeabilidad magnética y conductividad. Los cuales provocan que el cuerpo humano no presente un ambiente ideal para la propagación de ondas electromagnéticas.
- A partir de este estudio, pudimos comprobar que el cuerpo humano es capaz de reducir considerablemente una señal electromagnética, sobre todo a altas frecuencias.
- El método de distribución de capas propuesto, depende en gran medida de las dimensiones de los espesores de los tejidos, debido a que se presentan ondas estacionarias, por lo cual una medición precisa del grosor de los tejidos es fundamental para mejorar la simulación.
- El EMScan es un dispositivo que te permite relacionar la distribución espacial y la radiación en términos de dBuV, sin embargo la conversión de dBuV a unidades de campo eléctrico no es un proceso trivial, es necesario conocer las propiedades electromagnéticas de las antenas embebidas en el EMScan, y generar un factor de corrección a través de aproximaciones.
- Los objetivos de este trabajo de investigación se lograron exitosamente, dado que se determinó que el cuerpo humano atenúa las señales electromagnéticas. Sirviendo como antecedente para futuras investigaciones con dispositivos más complejos.

13. Trabajo a futuro

Para poder avanzar en el proyecto se propone crear un modelo en tres dimensiones (3D) de la carcasa del dispositivo de entrada remota (ver Figura 48), incluyendo así la estructura mecánica y los componentes electrónicos del RKE, para poder visualizar de forma precisa como el patrón de radiación es modificado por la estructura física del RKE y el cuerpo entero, a su vez se propone implementar el software ANSYS para explorar como el efecto térmico influye en las emisiones radiadas.

De igual forma se pretende caracterizar electromagnética la comunicación entre el receptor y el transmisor, utilizando la cámara anecoica, el analizador de señales y las antenas correspondientes.



Figura 48: Carcasa del RKE diseñada en SolidWorks

14. Bibliografía

- Balcells, J. (1992). *Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos*. Marcombo.
- Brunett, J. D. (2010). Measuring Radiation Characteristics of Remote Keyless Entry Transmitters. *IEEE Vehicular Technology Conference*.
- Cheng, D. K. (1998). *Fundamentos de electromagnetismo para ingeniería*. PEARSON EDUCATION.
- COMSOL. (2012). RF Module User's Guide. *RF Module User's Guide*, 1-194.
- COUNCIL, I. N. (03 de 05 de 2018). *Institute for Applied Physics*. Obtenido de Dielectric Properties of Body Tissues: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>
- Daura, F. (s.f.). Introducción a la compatibilidad electromagnética en la automoción. *TECNOLOGÍA_STA Introducción*, 16-25.
- Denton, T. (2004). *AUTOMOBILE ELECTRICAL AND ELECTRONICS SYSTEMS*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Frankiewicz, M. (2015). Method for 315/433 MHz Remote Keyless Entry Sensitivity and Range Statistical Analysis for Automotive Applications. *22nd International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems"*, 481-485.
- integrated, m. (2004). APPLICATION NOTE 3395 Requirements of Remote Keyless Entry (RKE). 1-7. Obtenido de <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/3395>
- JIN, J.-M. (2015). *THEORY AND COMPUTATION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS* (Second ed.). IEE WILEY.
- Khaoula Tayari, H. W. (2016). Study of the effects of human tissue on performance of a loop antenna. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 6-12. doi:10.9790/1676-1104010612
- Ott, H. W. (2009). *Electromagnetic Capability Engineering*. WILEY.
- Paul, C. R. (2006). *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. WILEY-INTERSCIENCE.
- Pereyra, V. R. (2004). INTRODUCCIÓN A LAS CÁMARAS ANECOICAS PARA MEDICIONES DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO. *Simposio de Metrología*, 1-5.
- Reese, R. L. (2002). *Física universitaria volumen 2*. International Thomson Editores.
- Regulations, E. C. (26 de 09 de 2018). *Electronic Code of Federal Regulations*. Obtenido de https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=8aa3a7c053d741a2776e99fe16ee368e&mc=true&node=se47.1.15_1231&rgn=div8
- Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Victor Rabinovich, N. A. (2010). *Automotive Antenna Design and Applications*. CRC Press.

- Young, H. D. (2009). *Física Universitaria, con física moderna volumen 2*. México: Pearson educación.
- Z. KRAWIECKI, A. C.-S. (2008). Modeling and measurements of light transmission through human tissues. *Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences*, 56, 147-154.
- Zanuy, M. F. (2001). *Sistemas de comunicaciones*. Barcelona, España: Marcombo.

15. Anexo A: Código en Mathematica

In[1]= **Análisis de α y β en una onda electromagnética**

Definiciones

Out[1]= Análisis de electromagnética en onda una y α β

Out[2]= Definiciones

In[3]= **f=433*10⁶;** (*Frecuencia de la onda*)

$\lambda = 299792458 / f$; (*Longitud de onda*)

N[λ]; (*Valor numérico de la onda*)

[valor numérico

$\omega = 2 * \text{Pi} * f$; (*Frecuencia angular*)

[número pi

$$\alpha[\mu_, \epsilon_, \omega_, \sigma_] := \omega * \sqrt{\frac{\mu * \epsilon}{2} * \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega * \epsilon} \right)^2} - 1 \right)}; \text{ (*Coeficiente de atenuación*)}$$

$$\beta[\mu_, \epsilon_, \omega_, \sigma_] := \omega * \sqrt{\frac{\mu * \epsilon}{2} * \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega * \epsilon} \right)^2} + 1 \right)};$$

$$\text{In[9]= } \text{depht}[\mu_, \epsilon_, f_, \sigma_] := \frac{1}{2 * \text{Pi} * f * \sqrt{\frac{\mu * \epsilon}{2} * \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{f * 2 * \text{Pi} * \epsilon} \right)^2} - 1 \right)}}$$

(*Distancia de penetración*)

$$\text{In[10]= } \text{envolvente}[\alpha_, x_] := E^{-\alpha * x}$$

$$\text{In[11]= } \text{Ey}[E0_, \alpha_, \beta_, \omega_, x_, t_] := E0 * E^{-\alpha * x} * \text{Cos}[\omega * t - \beta * x];$$

[coseno

(*Campo eléctrico en y con desplazamiento en x*)

E0 = 10958.3 * 10⁻³;

(*Intensidad de campo eléctrico del RKE en milivolts/metro*)

limite = 177.828 * 10⁻³;

(*Sensibilidad del dispositivo de recepción en milivolts/metro*)

resolucion = 0.000001; (*Resolución del elemento más pequeño de búsqueda*)

In[15]=

Constantes dieléctricas

In[16]= **Aire**

$$\epsilon_{\text{aire}} = 1 * 8.8541878176 * 10^{(-12)};$$

$$\mu_{\text{aire}} = 4 * \text{Pi} * 10^{(-7)};$$

[número pi]

$$\sigma_{\text{aire}} = 0;$$

$$\alpha_{\text{aire}} = \alpha[\mu_{\text{aire}}, \epsilon_{\text{aire}}, \omega, \sigma_{\text{aire}}]$$

$$\beta_{\text{aire}} = \beta[\mu_{\text{aire}}, \epsilon_{\text{aire}}, \omega, \sigma_{\text{aire}}]$$

Out[16]= Aire

Out[20]= 0.

Out[21]= 9.07501

In[22]= **Polietileno**

$$\epsilon_{\text{polietileno}} = 2.3 * 8.8541878176 * 10^{(-12)};$$

$$\mu_{\text{polietileno}} = 1 * 4 * \text{Pi} * 10^{(-7)};$$

[número pi]

$$\sigma_{\text{polietileno}} = 10^{(-15)};$$

$$\alpha_{\text{polietileno}} = \alpha[\mu_{\text{polietileno}}, \epsilon_{\text{polietileno}}, \omega, \sigma_{\text{polietileno}}]$$

$$\beta_{\text{polietileno}} = \beta[\mu_{\text{polietileno}}, \epsilon_{\text{polietileno}}, \omega, \sigma_{\text{polietileno}}]$$

Out[22]= Polietileno

Out[26]= 0.

Out[27]= 13.7629

In[28]= **Piel seca**

$$\epsilon_{\text{pielseca}} = 46.079 * 8.8541878176 * 10^{(-12)};$$

$$\mu_{\text{pielseca}} = 1 * 4 * \text{Pi} * 10^{(-7)};$$

[número pi]

$$\sigma_{\text{pielseca}} = 0.7019;$$

$$\alpha_{\text{pielseca}} = \alpha[\mu_{\text{pielseca}}, \epsilon_{\text{pielseca}}, \omega, \sigma_{\text{pielseca}}]$$

$$\beta_{\text{pielseca}} = \beta[\mu_{\text{pielseca}}, \epsilon_{\text{pielseca}}, \omega, \sigma_{\text{pielseca}}]$$

Out[28]= Piel seca

Out[32]= 18.6422

Out[33]= 64.3615

In[34]= Piel mojada

```
 $\epsilon_{pielmojada} = 49.418 * 8.8541878176 * 10^{(-12)};$   
 $\mu_{pielmojada} = 1 * 4 * \text{Pi} * 10^{(-7)};$   
[número pi]  
 $\sigma_{pielmojada} = 0.68085;$   
 $\alpha_{pielmojada} = \alpha[\mu_{pielmojada}, \epsilon_{pielmojada}, \omega, \sigma_{pielmojada}]$   
 $\beta_{pielmojada} = \beta[\mu_{pielmojada}, \epsilon_{pielmojada}, \omega, \sigma_{pielmojada}]$ 
```

Out[34]= mojada Piel

Out[38]= 17.5874

Out[39]= 66.1753

In[40]= Uña

```
 $\epsilon_{uña} = 13.074 * 8.8541878176 * 10^{(-12)};$   
 $\mu_{uña} = 1 * 4 * \text{Pi} * 10^{(-7)};$   
[número pi]  
 $\sigma_{uña} = 0.09429;$   
 $\alpha_{uña} = \alpha[\mu_{uña}, \epsilon_{uña}, \omega, \sigma_{uña}]$   
 $\beta_{uña} = \beta[\mu_{uña}, \epsilon_{uña}, \omega, \sigma_{uña}]$ 
```

Out[40]= Uña

Out[44]= 4.85905

Out[45]= 33.1712

In[46]= Grasa

```
 $\epsilon_{grasa} = 5.5667 * 8.8541878176 * 10^{(-12)};$   
 $\mu_{grasa} = 1 * 4 * \text{Pi} * 10^{(-7)};$   
[número pi]  
 $\sigma_{grasa} = 0.041656;$   
 $\alpha_{grasa} = \alpha[\mu_{grasa}, \epsilon_{grasa}, \omega, \sigma_{grasa}]$   
 $\beta_{grasa} = \beta[\mu_{grasa}, \epsilon_{grasa}, \omega, \sigma_{grasa}]$ 
```

Out[46]= Grasa

Out[50]= 3.28716

Out[51]= 21.6623

In[52]= **Hueso**

$$\epsilon_{\text{hueso}} = 13.074 * 8.8541878176 * 10^{(-12)};$$

$$\mu_{\text{hueso}} = 1 * 4 * \text{Pi} * 10^{(-7)};$$

[número pi]

$$\sigma_{\text{hueso}} = 0.09429;$$

$$\alpha_{\text{hueso}} = \alpha[\mu_{\text{hueso}}, \epsilon_{\text{hueso}}, \omega, \sigma_{\text{hueso}}]$$

$$\beta_{\text{hueso}} = \beta[\mu_{\text{hueso}}, \epsilon_{\text{hueso}}, \omega, \sigma_{\text{hueso}}]$$

Out[52]= Hueso

Out[56]= 4.85905

Out[57]= 33.1712

In[58]= **Músculo**

$$\epsilon_{\text{musculo}} = 56.873 * 8.8541878176 * 10^{(-12)};$$

$$\mu_{\text{musculo}} = 1 * 4 * \text{Pi} * 10^{(-7)};$$

[número pi]

$$\sigma_{\text{musculo}} = 0.80484;$$

$$\alpha_{\text{musculo}} = \alpha[\mu_{\text{musculo}}, \epsilon_{\text{musculo}}, \omega, \sigma_{\text{musculo}}]$$

$$\beta_{\text{musculo}} = \beta[\mu_{\text{musculo}}, \epsilon_{\text{musculo}}, \omega, \sigma_{\text{musculo}}]$$

Out[58]= **Músculo**

Out[62]= 19.3449

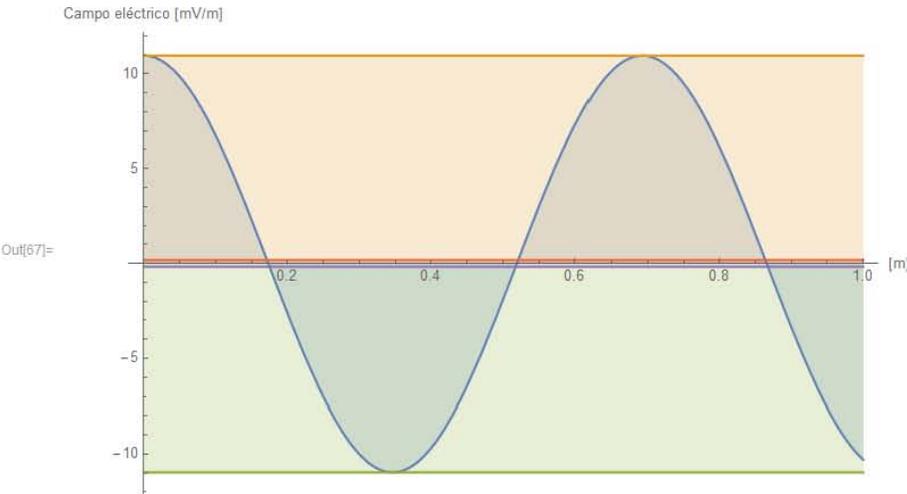
Out[63]= 71.1199

Análisis de distancia máxima

Aire

In[66]=

```
Plot[{Ey[E0,  $\alpha_{\text{aire}}$ ,  $\beta_{\text{aire}}$ ,  $\omega$ , x,  $\theta$ ], E0 * +E $\alpha_{\text{aire}}$  * x, -E0 * E $\alpha_{\text{aire}}$  * x, limite, -limite}, {x, 0, 1}], Filling -> Automatic,
[representación gráfica] [relleno] [automático]
ImageSize -> Large, AxesLabel -> {"[m]"}, HoldForm["Campo eléctrico [mV/m]"]
[tamaño de...] [grande] [etiqueta de ejes] [forma sin evaluación]
```

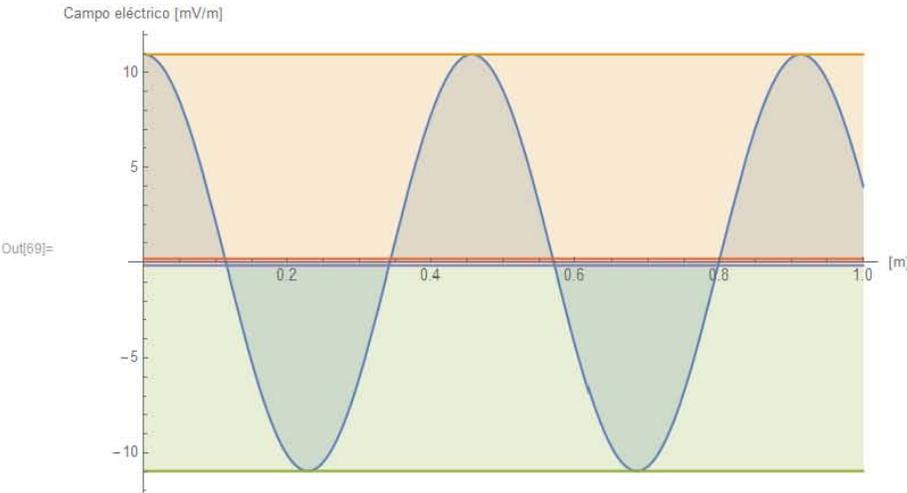


Polietileno

In[68]=

Out[68]= Polietileno

```
Plot[{Ey[E0,  $\alpha_{\text{polietileno}}$ ,  $\beta_{\text{polietileno}}$ ,  $\omega$ , x,  $\theta$ ], E0 (+e- $\alpha_{\text{polietileno}}$  * x), -E0 e- $\alpha_{\text{polietileno}}$  * x, limite, -limite}, {x, 0, 1}],
[representación gráfica]
Filling -> Automatic, ImageSize -> Large, AxesLabel -> {"[m]"}, HoldForm["Campo eléctrico [mV/m]"]
[relleno] [automático] [tamaño de...] [grande] [etiqueta de ejes] [forma sin evaluación]
```

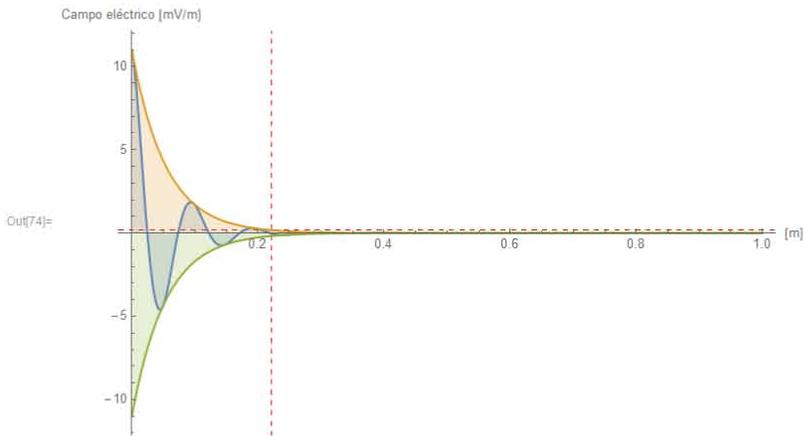


Piel seca

In[70]=

```
In[71]= paso = 0; iteracion = 0; While[E0 * envolvente[ $\alpha_{pielseca}$ , paso] >= limite, paso = paso + resolucion; iteracion++]  
[mientras]  
  
Dpielseca = 0;  
Dpielseca = paso - resolucion  
Plot[{Ey[E0,  $\alpha_{pielseca}$ ,  $\beta_{pielseca}$ ,  $\omega$ , x, 0], E0 (+ e- $\alpha_{pielseca}$  x), -E0 * e- $\alpha_{pielseca}$  x}, {x, 0, 1}], Filling -> Automatic,  
[representación gráfica] [relleno] [automático]  
  
ImageSize -> Large, PlotRange -> All, GridLines -> {{Dpielseca}, {limite}}, GridLinesStyle -> Directive[Red, Dashed],  
[tamaño de ítem] [grande] [rango de rep...] [todo] [parrilla de líneas] [estilo de parrilla de ítem] [directiva] [rojo] [rayado]  
  
AxesLabel -> {"[m]", HoldForm["Campo eléctrico [mV/m]"]}]  
[etiqueta de ejes] [forma sin evaluación]
```

Out[73]= 0.221059

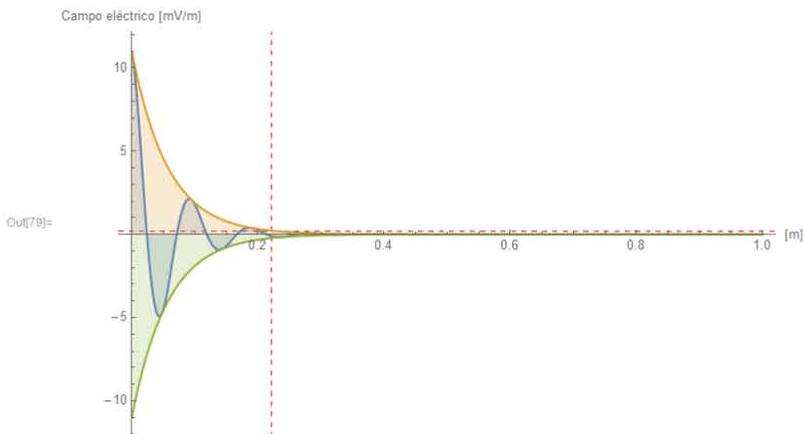


Piel mojada

In[75]=

```
Out[75]= mojada Piel  
  
In[76]= paso = 0;  
iteracion = 0;  
While[E0 * envolvente[ $\alpha_{pielmojada}$ , paso] >= limite, paso = paso + resolucion; iteracion++]  
[mientras]  
  
Dpielmojada = 0;  
Dpielmojada = paso - resolucion  
Plot[{Ey[E0,  $\alpha_{pielmojada}$ ,  $\beta_{pielmojada}$ ,  $\omega$ , x, 0], E0 (+ e- $\alpha_{pielmojada}$  x), -E0 * e- $\alpha_{pielmojada}$  x}, {x, 0, 1}], Filling -> Automatic,  
[representación gráfica] [relleno] [automático]  
  
ImageSize -> Large, PlotRange -> All, GridLines -> {{Dpielseca}, {limite}}, GridLinesStyle -> Directive[Red, Dashed],  
[tamaño de ítem] [grande] [rango de rep...] [todo] [parrilla de líneas] [estilo de parrilla de ítem] [directiva] [rojo] [rayado]  
  
AxesLabel -> {"[m]", HoldForm["Campo eléctrico [mV/m]"]}]  
[etiqueta de ejes] [forma sin evaluación]
```

Out[78]= 0.234316



Uña

In[80]=

```
In[81]= paso = 0; iteracion = 0; While[E0 * envolvente[ $\alpha_{uña}$ , paso] >= limite, paso = paso + resolucio
```

```
n; iteracion++]
```

```
D $_{uña}$  = 0;
```

```
D $_{uña}$  = paso - resolucio
```

```
Plot[{Ey[E0,  $\alpha_{uña}$ ,  $\beta_{uña}$ ,  $\omega$ , x, 0], E0 (+e $^{-\alpha_{uña} x}$ ), -E0 e $^{-\alpha_{uña} x}$ }, {x, 0, 1}], Filling -> Automatic, ImageSize -> Large,
```

```
[representación gráfica
```

```
[relleno
```

```
[automático
```

```
[tamaño de t...
```

```
[grande
```

```
PlotRange -> All, GridLines -> {{D $_{uña}$ }, {limite}}, GridLinesStyle -> Directive[Red, Dashed],
```

```
[rango de rep...
```

```
[todo [parrilla de líneas
```

```
[estilo de parrilla de l...
```

```
[directiva
```

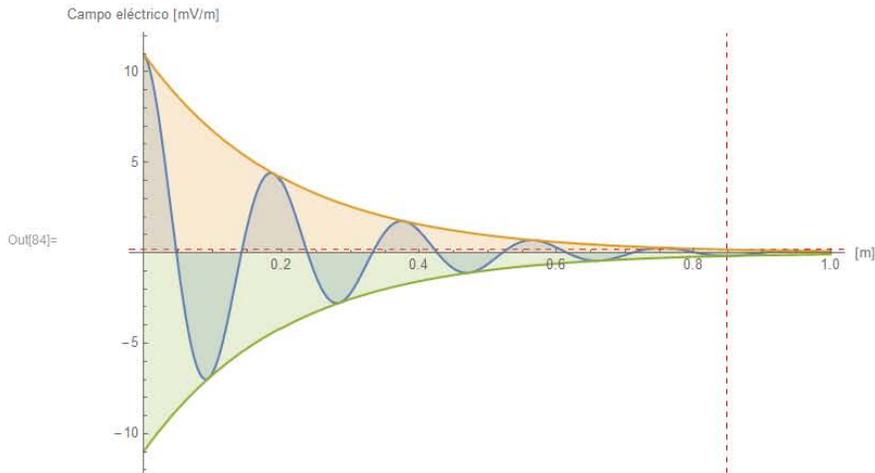
```
[rojo [rayado
```

```
AxesLabel -> {"[m]", HoldForm["Campo eléctrico [mV/m]"]}]
```

```
[etiqueta de ejes
```

```
[forma sin evaluación
```

Out[83]= 0.848114



Grasa

In[85]=

```
In[86]= paso = 0; iteracion = 0; While[E0 * envolvente[ $\alpha_{grasa}$ , paso] >= limite, paso = paso + resolucio
```

```
n; iteracion++]
```

```
D $_{grasa}$  = 0;
```

```
D $_{grasa}$  = paso - resolucio
```

```
Plot[{Ey[E0,  $\alpha_{grasa}$ ,  $\beta_{grasa}$ ,  $\omega$ , x, 0], E0 (+e $^{-\alpha_{grasa} x}$ ), -E0 e $^{-\alpha_{grasa} x}$ }, {x, 0, 1.3}], Filling -> Automatic, ImageSize -> Large,
```

```
[representación gráfica
```

```
[relleno
```

```
[automático
```

```
[tamaño de t...
```

```
[grande
```

```
PlotRange -> All, GridLines -> {{D $_{grasa}$ }, {limite}}, GridLinesStyle -> Directive[Red, Dashed],
```

```
[rango de rep...
```

```
[todo [parrilla de líneas
```

```
[estilo de parrilla de l...
```

```
[directiva
```

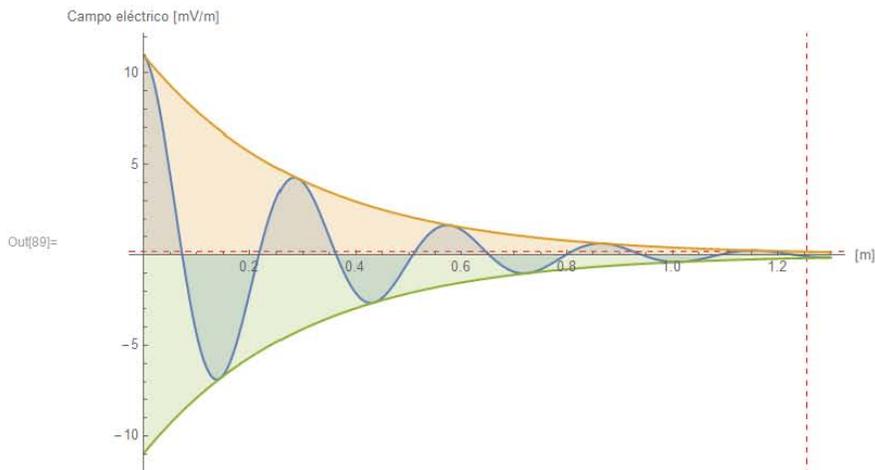
```
[rojo [rayado
```

```
AxesLabel -> {"[m]", HoldForm["Campo eléctrico [mV/m]"]}]
```

```
[etiqueta de ejes
```

```
[forma sin evaluación
```

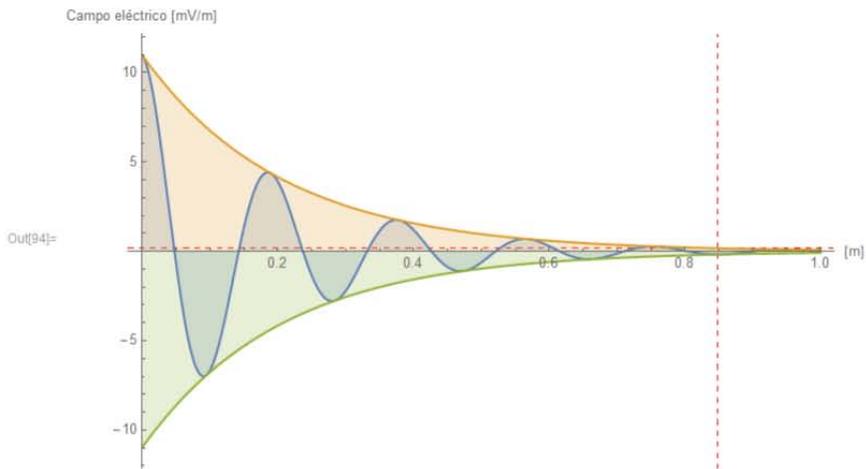
Out[88]= 1.25368



In[90]= Hueso

```
In[91]= paso = 0; iteracion = 0; While[E0 * envolvente[ $\alpha_{\text{hueso}}$ , paso] >= limite, paso = paso + resolucion; iteracion++];  
D_hueso = 0;  
D_hueso = paso - resolucion  
Plot[{Ey[E0,  $\alpha_{\text{hueso}}$ ,  $\beta_{\text{hueso}}$ ,  $\omega$ , x,  $\theta$ ], E0 (+e- $\alpha_{\text{hueso}}$  x), -E0 e- $\alpha_{\text{hueso}}$  x}, {x, 0, 1}], Filling -> Automatic, ImageSize -> Large,  
PlotRange -> All, GridLines -> {{D_hueso}, {limite}}, GridLinesStyle -> Directive[Red, Dashed],  
AxesLabel -> {" [m]", HoldForm["Campo eléctrico [mV/m]"]}]
```

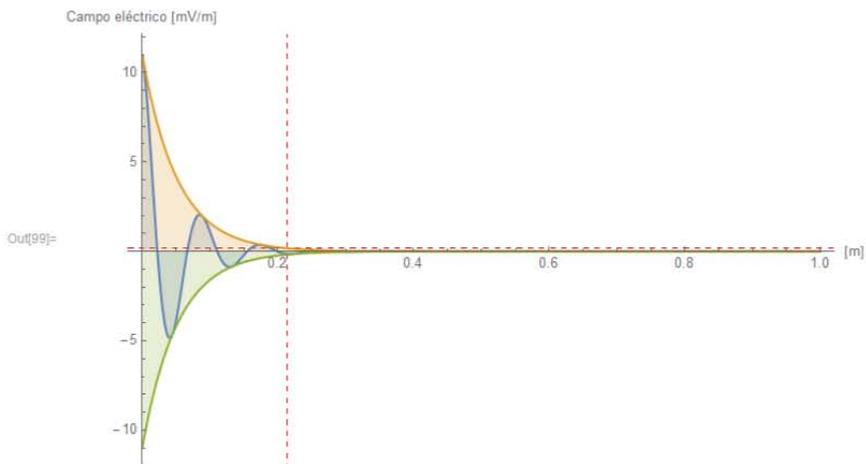
Out[93]= 0.848114



In[95]= Músculo

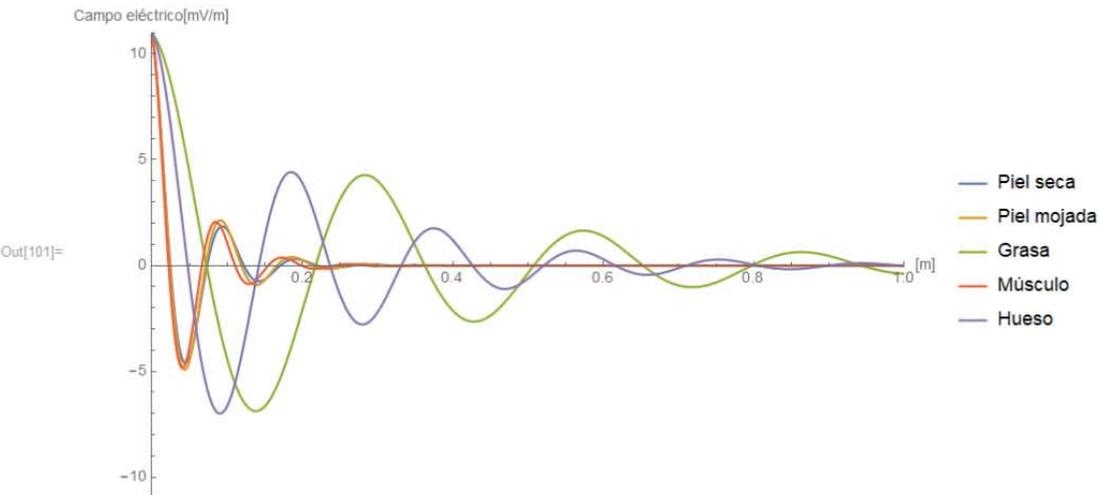
```
In[96]= paso = 0; iteracion = 0; While[E0 * envolvente[ $\alpha_{\text{musculo}}$ , paso] >= limite, paso = paso + resolucion; iteracion++];  
D_musculo = 0;  
D_musculo = paso - resolucion  
Plot[{Ey[E0,  $\alpha_{\text{musculo}}$ ,  $\beta_{\text{musculo}}$ ,  $\omega$ , x,  $\theta$ ], E0 (+e- $\alpha_{\text{musculo}}$  x), -E0 e- $\alpha_{\text{musculo}}$  x}, {x, 0, 1}], Filling -> Automatic,  
ImageSize -> Large, PlotRange -> All, GridLines -> {{D_musculo}, {limite}}, GridLinesStyle -> Directive[Red, Dashed],  
AxesLabel -> {" [m]", HoldForm["Campo eléctrico [mV/m]"]}]
```

Out[98]= 0.213029



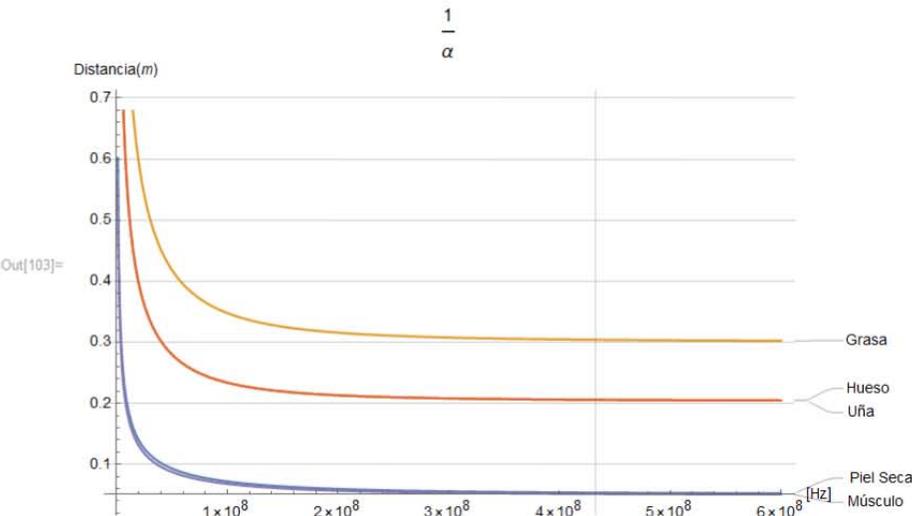
In[100]= Las más representativas

```
In[101]= Plot[{Ey[E0,  $\alpha_{pielseca}$ ,  $\beta_{pielseca}$ ,  $\omega$ , x, 0], Ey[E0,  $\alpha_{pielmojada}$ ,  $\beta_{pielmojada}$ ,  $\omega$ , x, 0], Ey[E0,  $\alpha_{grasa}$ ,  $\beta_{grasa}$ ,  $\omega$ , x, 0],
Ey[E0,  $\alpha_{musculo}$ ,  $\beta_{musculo}$ ,  $\omega$ , x, 0], Ey[E0,  $\alpha_{hueso}$ ,  $\beta_{hueso}$ ,  $\omega$ , x, 0]}, {x, 0, 1},
PlotLegends -> {"Piel seca", "Piel mojada", "Grasa", "Músculo", "Hueso"}, ImageSize -> Large,
AxesLabel -> {"[m]", HoldForm["Campo eléctrico[mV/m]"]}, Filling -> {limite, Axis},
PlotRange -> {{0, 1}, {-E0, E0}}
```



In[102]= Profundidad de penetración

```
In[103]= Plot[{dephth[ $\mu_{pielseca}$ ,  $\epsilon_{pielseca}$ , f,  $\sigma_{pielseca}$ ], dephth[ $\mu_{grasa}$ ,  $\epsilon_{grasa}$ , f,  $\sigma_{grasa}$ ], dephth[ $\mu_{uña}$ ,  $\epsilon_{uña}$ , f,  $\sigma_{uña}$ ],
dephth[ $\mu_{hueso}$ ,  $\epsilon_{hueso}$ , f,  $\sigma_{hueso}$ ], dephth[ $\mu_{musculo}$ ,  $\epsilon_{musculo}$ , f,  $\sigma_{musculo}$ ]}, {f, 1 * 10^6, 600 * 10^6},
PlotLabels -> {"Piel Seca", "Grasa", "Uña", "Hueso", "Músculo"},
GridLines -> {{(433 * 10^6)}, {.1, .2, .3, .4, .5, .6, .7}}, ImageSize -> Large,
AxesLabel -> {"[Hz]", HoldForm[Distancia[m]]}, PlotLabel -> HoldForm[ $\frac{1}{\alpha}$ ], LabelStyle -> {10, GrayLevel[0]}
```



In[104]= **Onda animada**

Out[104]= **animada Onda**

In[105]= **Manipulate**[Plot[Ey[V, a, b, ω , x, t], {x, 0, 1}], ImageSize \rightarrow Medium, PlotRange \rightarrow {-10, 10},
[manipula [representación gráfica [tamaño de im... [tamaño... [rango de representación
{V, 1, "Amplitud"}, 0, 10], {{a, 0, " α "}, 0, 100}, {{b, 0, " β "}, 0, 100}, {{t, 0, "tiempo"}, 0, 30, 1 / (f * 360)}]

Out[105]=

