



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Esta tesis doctoral contiene un índice que enlaza a cada uno de los capítulos de la misma.

Existen asimismo botones de retorno al índice al principio y final de cada uno de los capítulos.

[Ir directamente al índice](#)

Para una correcta visualización del texto es necesaria la versión de [Adobe Acrobat Reader 7.0](#) o posteriores

Aquesta tesi doctoral conté un índex que enllaça a cadascun dels capítols. Existeixen així mateix botons de retorn a l'índex al principi i final de cadascun dels capítols .

[Anar directament a l'índex](#)

Per a una correcta visualització del text és necessària la versió d' [Adobe Acrobat Reader 7.0](#) o posteriors.

UNIVERSIDAD DE ALICANTE

TESIS DOCTORAL

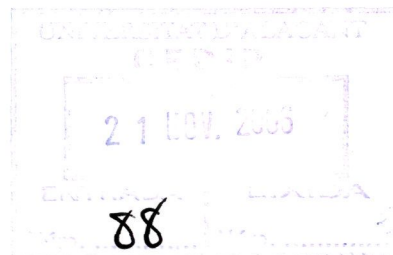
**DERIVA FRECUENCIAL DE LA
TRANSMISIÓN ELECTROMAGNÉTICA
POR EFECTO DEL MEDIO**

Presentada por
FRANCISCO JAVIER FERRÁNDEZ PASTOR

Dirigida por
DR. JUAN MANUEL GARCÍA CHAMIZO

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA INFORMÁTICA Y COMPUTACIÓN

NOVIEMBRE 2006



*A la memoria de Antoñín y de Alfonso, tan ricas y plenas
sus vidas como incomprensible su ausencia*

Agradecimientos

Siempre se queda incompleto cualquier intento de abarcar, en unas líneas, el reconocimiento a todas las personas que han echo posible que un trabajo de estas características vea la luz. Desde el plano familiar, pasando por el nivel profesional, que en este caso, además, es también de amistad y de aprecio, todos han creado las condiciones con las que alcanzar el objetivo más importante que un doctorando tiene desde el primer día que se ve como tal.

Posible, gracias a la dirección de Juanma cuya implicación me ha abierto puertas donde sólo veía muros y cuyos consejos han sido verdaderos manuales de uso con los que plasmar las ideas y los conceptos.

Posible, gracias a la complicidad de todos mis compañeros del departamento que de forma directa bien a través de sus colaboraciones o bien mediante su interés con opiniones y comentarios han creado la atmósfera de realimentación necesaria.

Y posible, por no decir imposible, sin el cariño, comprensión y ternura de Amalia a quien, como no puede ser de otra manera, pido perdón por el tiempo robado. Gracias Javi, Darío y Amalia y, otra vez, perdón por traicionar vuestra inocencia sustrayendo la dedicación inexcusable y querida por estos menesteres.

6 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

Resumen

La tesis propone un método de tratamiento diferencial en la recepción de ondas electromagnéticas y las aplicaciones que de él se derivan. Los fenómenos de interacción producidos durante la transmisión de las ondas electromagnéticas son utilizados en diferentes disciplinas que analizan las características o estado del medio que atraviesan. Entre ellas, a partir de la observación de estos fenómenos, se enuncia una hipótesis de trabajo que pretende sacar partido de un hecho contrastado: diferentes frecuencias inducen diferencias en la interacción para un mismo medio.

Se ha desarrollado una herramienta de simulación que resuelve las ecuaciones electromagnéticas con métodos numéricos para cuantificar la interacción entre la onda y el medio. Su justificación estriba en que constituye un paso previo a la construcción de cualquier solución hardware especializada.

El simulador, además, se ha diseñado en concordancia con los planteamientos de la corriente metodológica denominada Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS) que reconoce la influencia de diferentes aspectos sociales en el desarrollo científico y que, como consecuencia, también valora la transmisión y el acceso a los conocimientos para que puedan ser comprendidos y utilizados de forma universal. En este

8 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

sentido, la herramienta de simulación incorpora utilidades que hacen accesible tanto la comprensión de los fenómenos físicos producidos como la interacción o modificación de los algoritmos que resuelven el problema de interacción entre onda y medio físico. Los sistemas de posicionamiento por satélite, la geología, la geodesia o la meteorología son ejemplos de los diferentes escenarios de trabajo posibles.

Generalmente se trabaja con frecuencias que maximizan la interacción onda-medio para, de ese modo, poder medir en la recepción los efectos producidos. Así, desde el rango de las microondas hasta el espectro visible la elección depende de factores como las características del medio (permitividad, conductividad, constante dieléctrica), la capacidad de penetración de la señal o incluso la geometría o la distancia entre el emisor y el receptor. Para cada aplicación se utiliza un modelo que representa los fenómenos y mecanismos de interacción al cual se aplica la técnica de medición diferencial multifrecuencial mediante el correspondiente núcleo de simulación adaptado.

El método propuesto utiliza técnicas de medición diferencial multifrecuencial en el receptor que contrastan con los sistemas actuales de recepción sobre una frecuencia de trabajo. La medida diferencial supone una nueva propuesta de tratamiento de la señal que introduce ventajas en la sincronización de los dispositivos y que, como consecuencia, simplifica la instalación y mantenimiento de los sistemas de referencia. El objetivo es el de desarrollar sistemas más accesibles, tanto desde el punto de vista técnico como del económico.

Como ejemplo de utilización se abordan escenarios en los que la velocidad de propagación de la señal es función de la frecuencia de la misma. Su uso se concreta en la caracterización de medios para aplicaciones de teledetección y en la medición de distancias para sistemas de posicionamiento.

Resum

La tesi proposa un mètode de tractament diferencial en la recepció d'ones electromagnètiques i les aplicacions que d'ell es deriven. Els fenòmens d'interacció produïts durant la transmissió de les ones electromagnètiques són utilitzats en diferents disciplines que analitzen les característiques o estat del mig que travessen. Entre elles, a partir de l'observació d'estos fenòmens, s'enuncia una hipòtesi de treball que pretén traure partit d'un fet contrastat: diferents freqüències induïxen diferències en la interacció per a un mateix mig.

S'ha desenvolupat una ferramenta de simulació que resol les equacions electromagnètiques amb mètodes numèrics per a quantificar la interacció entre l'ona i el mig. La seua justificació consistix en el fet que constituïx un pas previ a la construcció de qualsevol solució maquinari especialitzada.

El simulador, a més, s'ha dissenyat en concordança amb els plantejaments del corrent metodològic denominat Ciència, Tecnologia i Societat (CTS) que reconeix la influència de diferents aspectes socials en el desenvolupament científic i que, com a conseqüència, també valora la transmissió i l'accés als coneixements perquè puguen ser compresos i utilitzats de forma universal. En este sentit, la ferramenta de simulació incorpora utilitats que fan accessible tant la comprensió dels fenòmens

10 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

físics produïts com la interacció o modificació dels algoritmes que resolen el problema d'interacció entre ona i medi físic. Els sistemes de posicionament per satèl·lit, la geologia, la geodèsia o la meteorologia són exemples dels diferents escenaris de treball possibles.

Generalment es treballa amb freqüències que maximitzen la interacció ona-mig per a, d'esta manera, poder mesurar en la recepció els efectes produïts. Així, des del rang de les microones fins a l'espectre visible l'elecció depèn de factors com les característiques del mig (permitivitat, conductivitat, constant dielèctrica), la capacitat de penetració del senyal o inclús la geometria o la distància entre l'emissor i el receptor. Per a cada aplicació s'utilitza un model que representa els fenòmens i mecanismes d'interacció al qual s'aplica la tècnica de mesurament diferencial multifrecuencial per mitjà del corresponent nucli de simulació adaptat.

El mètode proposat utilitza tècniques de mesurament diferencial multifrecuencial en el receptor que contrasten amb els sistemes actuals de recepció sobre una freqüència de treball. La mesura diferencial suposa una nova proposta de tractament del senyal que introduïx avantatges en la sincronització dels dispositius i que, com a conseqüència, simplifica la instal·lació i manteniment dels sistemes de referència. L'objectiu és el de desenvolupar sistemes més accessibles, tant des del punt de vista tècnic com de l'econòmic.

Com a exemple d'utilització s'aborden escenaris en què la velocitat de propagació del senyal és funció de la freqüència de la mateixa. El seu ús es concreta en la caracterització de mitjans per a aplicacions de teledetecció i en el mesurament de distàncies per a sistemes de posicionament.

Abstract

The thesis proposes a differential treatment in the reception of electromagnetic waves and the applications deriving from this. The interaction phenomena produced during transmission of the electromagnetic waves are used in different disciplines which analyse the characteristics for the state of the medium through which they pass. Based on the observation of these phenomena, a working hypothesis is described which attempts to obtain results from a contrasting fact: different frequencies induce differences in interaction for a same medium.

A simulation tool has been developed which resolves the electromagnetic equations with numerical methods in order to quantify the interaction between the wave and the medium. It is justified in that it constitutes an initial step prior to the construction of any specialised hardware solution.

The simulator has also been designed in line with the current methodology known as Science, Technology and Society (CTS) which recognises the influence of various social aspects in scientific development and which as a result, also values the transmission and access to knowledge so that it may be understood and used universally. In this respect the simulation tool incorporates uses which make it

12 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

accessible both for understanding physical phenomena produced, such as the interaction or modification of algorithms which resolve the problem of interaction between the wave and the physical medium, satellite positioning systems, geology geodesics or meteorology are examples of the different possible working scenarios.

The frequencies generally used are those which maximise the wave-medium interaction so that in this way it is possible to measure the reception of the effects produced, Thus, from the range of microwaves to the visible spectrum, choice depends on factors such as the medium characteristics (permittivity, conductivity, dielectric constant) the penetration capacity of the signal, or even the geometry or distance between the transmitter and the receiver. For each application a model is used representing the phenomena and interactive mechanisms to which the multifrequency differential measurements will be applied using the corresponding adapted simulation nucleus.

The proposed method uses multifrequency differential techniques in the receiver which contrast with current reception systems on a working frequency. The differential measurement supposes a new proposal for treatment of the signal which provides advantages in the synchronisation of the devices which, as a result, simplifies the installation and maintenance of reference systems. The aim is to develop more accessible systems, both from a technical and economic perspective.

As an example of this use, scenarios are addressed in which the speed of signal propagation is a function of its frequency. Its use is specified in the characterisation of media for remote sensing applications and the measurement of distances for positioning systems.

Contenido

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES	17
MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	20
SÍNTESIS DEL CONTENIDO DE LA MEMORIA	24

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

INTRODUCCIÓN	27
RADAR DE SUBSUELO	28
FUNDAMENTOS	
EL RADARGRAMA	
INTERPRETACIÓN DEL RADARGRAMA	
TÉCNICA DE RADAR UTILIZADAS EN SENSORES REMOTOS: APLICACIÓN EN HIDROLOGÍA	33
MEDICIÓN DE LLUVIAS	
SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO Y NAVEGACIÓN	36
TÉCNICAS BASADAS EN EL TIEMPO DE LLEGADA	
ÁNGULO DE RECEPCIÓN DE LA ONDA	
DIFERENCIA EN EL TIEMPO DE LLEGADA	
TRATAMIENTO MULTIFRECUENCIAL EN LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)	42

14 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

ESTUDIO DE LA IONOSFERA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE SEÑALES GPS	44
COMPORTAMIENTO DE LOS TEJIDOS BIOLÓGICOS EN SU INTERACCIÓN CON LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	47
CONCLUSIONES	51

C A P Í T U L O 3

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y PROPUESTA DE RESOLUCIÓN

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	53
PROPUESTA DE RESOLUCIÓN	65
CASO DE ESTUDIO 1: CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO	
CASO DE ESTUDIO 2: SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO	
CONCLUSIONES	83

C A P Í T U L O 4

SIMULACIÓN DEL PROCESO DE INTERACCIÓN ONDA-MEDIO

INTRODUCCIÓN	87
CÁLCULOS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA	90
NÚCLEO DE SIMULACIÓN ADAPTADO	91
IMPLEMENTACIÓN DEL NÚCLEO DE SIMULACIÓN	
UTILIZACIÓN DEL NÚCLEO DE SIMULACIÓN	125
DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UN MEDIO DISPERSIVO	
DETERMINACIÓN DE DISTANCIAS PARA UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO	
PROPAGACIÓN EN MEDIOS DISPERSIVOS	
DIFUSIÓN Y ACCESO AL NÚCLEO DE SIMULACIÓN	140

C A P Í T U L O 5

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

CONCLUSIONES	143
LÍNEAS FUTURAS	146

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA 149

A N E X O I

TEORÍA DEL FENÓMENO ELECTROMAGNÉTICO

INTERACCIÓN DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA CON LA MATERIA 161

MÉTODOS EN LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA ELECTROMAGNÉTICO..... 179

A N E X O I I

DISEÑO DE UN ENTORNO DE SIMULACIÓN ADAPTADO

EL ENTORNO DE SIMULACIÓN ADAPTADO COMO HERRAMIENTA CTS..... 186

DISEÑO DEL ENTORNO DE SIMULACIÓN 195

A N E X O I I I

GRÁFICAS

GRÁFICAS 205

A N E X O I V

LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS

LISTADO 223

16 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

Capítulo 1

Introducción

Imaginemos, por un momento, que Pegaso y Ulises partieran, al despuntar el día, de Atenas para asistir a un encuentro olímpico en Maratón.

A Cronos, bien podría habersele ocurrido explotar las diferencias entre la proverbial diligencia del équido y la infinita pereza de Ulises para determinar la distancia entre las ciudades basándose en el retraso del semidiós. Pitágoras habría necesitado la ayuda de algún discípulo maratoniano y un complejo sistema de coordinación para hacer lo mismo. Ya sabemos lo complicado que es y lo caro que resulta el asunto de la sincronización entre individuos remotos.

La aspiración de igualar a Cronos en habilidades requiere indagar más detenidamente en la teoría de Maxwell hasta ver a Pegaso como la expresión de un corpúsculo electromagnético. Ulises sería otra onda, quizá un poco errática.

1.1 Antecedentes

La conjetura de Maxwell [70] sobre la existencia de ondas electromagnéticas fue, en su momento, una hipótesis plausible que inauguró un nuevo campo de investigaciones. Su convalidación, junto con el posterior desarrollo de diferentes hipótesis, bien fundadas y

empíricamente confirmadas, ha caracterizado a esta rama de la ciencia con un nuevo cuerpo de conocimiento y con sus consecuentes aplicaciones.

Las telecomunicaciones, la medicina, la geología, la geodesia o la meteorología son ejemplos que toman la teoría de las ondas electromagnéticas como motor en el progreso hacia nuevos conocimientos y nuevos retos. Como consecuencia de este ciclo constructivo surgen nuevas aplicaciones y se amplían las posibilidades de las tecnologías que se desarrollan gracias a los resultados de las investigaciones.

Desde que Marconi realizó la primera transmisión telegráfica con ondas hertzianas que cruzaron el Atlántico a principios del siglo XX, hasta los actuales enlaces satelitales, se han sucedido numerosos estudios e investigaciones en el campo de las transmisiones inalámbricas, en los que se han obtenido resultados a diferentes problemas planteados y, paralelamente, se han originado nuevos interrogantes.

Además de aplicaciones en comunicaciones, otras aplicaciones en los otros campos ya citados (meteorología, medicina, geología) participan de los beneficios que supone el conocimiento de los fundamentos de la emisión, propagación y recepción de las ondas electromagnéticas. Como ejemplo se pueden nombrar soluciones aportadas en el campo de la detección realizada tanto por los radares meteorológicos [82], [91], [92], como por radares aplicados en geología [2], [47], [59]. También los fenómenos y mecanismos de interacción de las ondas electromagnéticas con los tejidos biológicos es objeto de estudio e interés [80], [45], [23].

Si observamos el fenómeno electromagnético podremos proponer una taxonomía basada en el tipo de tratamiento que se hace del medio físico con el que interacciona la onda electromagnética. Este criterio nos lleva a enumerar los siguientes tipos de aplicaciones:

- Por una parte, las aplicaciones que consideran el medio físico como barrera o fuente de interferencias en la transmisión de ondas electromagnéticas. En consecuencia, nos encontramos con propuestas que pretenden optimizar los niveles de propagación y reducir al máximo la atenuación o distorsión que produce el medio. Las telecomunicaciones, desde siempre, buscan sistemas de tratamiento de la señal que aumenten la

capacidad de transmisión de datos y disminuyan los ratios de interacción con el medio [48], [38].

- Por otra parte, aquellas que pretenden maximizar la interacción con el medio, de tal manera que podamos detectar determinadas características, propiedades o elementos del mismo (radares, aplicaciones médicas de la radiología clínica). En este caso los estudios realizados intentan deducir qué tipo de señales se deben utilizar y qué tipo de respuesta se obtiene cuando aparece el componente buscado. El objetivo es maximizar la interacción con el medio en un determinado rango o contexto [9], [97].
- Finalmente, los efectos directos que las radiaciones electromagnéticas producen sobre las personas y los equipos electrónicos ha originado un nuevo enfoque sobre el tipo de interacción medio-radiación (compatibilidad electromagnética, efectos sobre el organismo). Aquí lo que se busca es anular cualquier tipo de efecto no deseado sobre las personas o alteraciones en el funcionamiento de los sistemas electrónicos [1], [31].

Ante esta primera aproximación, es lógico pensar que el conocimiento de la interacción señal-medio físico es fundamental para avanzar en cada problema planteado. El hecho de que para un medio dado se produzcan diferentes tipos de interacciones ante diferentes tipos de ondas electromagnéticas forma parte de las leyes básicas del electromagnetismo. Esta aserción será utilizada como parte de la hipótesis de este trabajo. Señales de diferentes características utilizadas en un enlace radioeléctrico provocan diferentes tipos de interacción, pero ¿qué tipo de características y qué tipo de interacción?

Características como la frecuencia o la polarización de las señales utilizadas en los enlaces radioeléctricos inducen interacciones que dependen del rango de la frecuencia o del tipo de polarización utilizados en su formación.

Interacciones como el grado de atenuación de la onda en el medio, el desfase en la transmisión o diferencias en la velocidad de propagación se producen de diferente manera para rangos heterogéneos de señales en un mismo medio físico.

A lo largo del tiempo, determinado tipo de magnitudes e interacciones se han conocido y utilizado más pronto y mejor que otras. Así la amplitud, la fase y la frecuencia han marcado, por este orden, el progreso en el estudio de estos fenómenos. La facilidad para manejarlas, a fin de resolver nuevos problemas, ha sido determinante en esta evolución [101], [81].

De las primeras aplicaciones sustentadas por transmisiones de ondas quilométricas desarrolladas a principio del siglo XX hemos pasado, en la actualidad, a enlaces radioeléctricos basados en microondas. ¿Esto sugiere que la característica principal en la interacción medio-síñal es el rango de frecuencias utilizado? Sin poder afirmarlo de forma categórica lo que sí estamos en condiciones de aseverar es el hecho de que el rango de frecuencias utilizado juega un papel activo y preponderante en el desarrollo de todas las aplicaciones basadas en el fenómeno electromagnético.

Si consideramos que señales multifrecuenciales, en su relación con el medio, producen diferentes magnitudes para un determinado tipo de interacción; si, además, tenemos en cuenta que estas diferencias pueden ser cuantificadas atendiendo al tipo de señal generada y posteriormente recibida (medición de la atenuación, fase, velocidad de propagación, tiempo de llegada, retardo, dispersión); entonces podremos pensar en estudios o aplicaciones que utilicen esta característica como núcleo fundamental en la definición y solución del problema de la interacción señal-medio físico.

1.2 Motivación y objetivos

Conocemos cuáles son las frecuencias de las señales más adecuadas para las comunicaciones terrestres, marítimas o espaciales. Estamos avanzando en el conocimiento de la propagación de las ondas electromagnéticas en diferentes tipos de medios. Podemos medir e interpretar algunas de las radiaciones que la naturaleza emite en función de su estado. Generamos señales que interaccionan con objetos y medios físicos los cuales intentamos caracterizar o detectar. En definitiva, utilizamos el fenómeno electromagnético como mecanismo que provoca interacciones o que es consecuencia de un determinado estado de la materia. Su medición y posterior interpretación aumenta nuestro conocimiento.

En todos los casos citados hay un rasgo común: la elección de un determinado rango de frecuencias que optimiza la relación señal-medio planteada en el problema. Unas veces se intentará paliar (comunicaciones) y otras se buscará plena interacción (teledetección, radar). La convicción de que el rango de frecuencias es determinante parece clara lo cual nos induce a continuar interrogando en esta línea.

Dado que el receptor capta la señal que previamente ha sido enviada por el emisor y que el medio ha ido alterando en función de la interacción producida y dado que dicha interacción depende de la frecuencia, se puede establecer lo siguiente: si de las mediciones en la recepción de señales para una determinada frecuencia podemos conocer el tipo de interacción señal-medio y desarrollar las aplicaciones que de ello se derivan, ¿qué ventajas reportará medir las diferencias existentes en la recepción de señales de diferentes frecuencias?

Para explicar esta pregunta citaremos dos casos de estudio en diferentes ámbitos que, además de aclarar el planteamiento de este trabajo, abarcan dos posibilidades de aplicación del método trazado a lo largo del mismo:

- Las señales utilizadas por los satélites del sistema de posicionamiento global GPS aumentan su precisión utilizando dos frecuencias con las que se mide la distancia entre satélite y receptor [55]. Existe una deriva temporal diferente para cada frecuencia, lo cual se utiliza para corregir la distancia obtenida inicialmente. Si es un hecho que para diferentes frecuencias se producen diferentes efectos en un mismo medio físico, entonces podríamos estimar el estado del medio con la medición relativa en la recepción de señales de diferentes frecuencias.
- Imaginemos un medio del que conocemos los fenómenos de interacción onda-medio para un determinado rango de frecuencias. En este caso podríamos medir las diferencias de comportamiento en la recepción a diferentes frecuencias y determinar otras variables de interés no conocidas como puede ser la distancia entre el emisor y el receptor.

El primer caso se refiere a una aplicación en la que pretendemos caracterizar el medio y tiene aplicaciones en teledetección y sensorización remota. En el segundo conocemos el medio, expresado mediante un modelo parametrizado, y pretendemos determinar

distancias entre objetos. Aquí podremos proponer soluciones en sistemas de posicionamiento y navegación. En ambos casos nos encontramos ante un procesamiento multifrecuencial que trata las diferentes derivas temporales que cada frecuencia induce en su interacción con el medio.

Con estos antecedentes estamos en disposición de enunciar la hipótesis de partida de este trabajo:

H → Cuando los fenómenos de interacción entre la onda electromagnética y el medio que atraviesa dependan de la frecuencia de la señal utilizada estaremos en condiciones de utilizar las diferencias de comportamiento que induce cada frecuencia para obtener, de ese modo, información acerca de las condiciones o de la naturaleza del medio que provoca dicho comportamiento.

El tratamiento multifrecuencial que propone esta memoria plantea el procesamiento y la medición diferencial de enlaces electromagnéticos en los que intervienen más de una frecuencia.

La dificultad para el estudio de este tipo de fenómenos radica en que los sistemas en los que se actúa están sujetos a restricciones impuestas tanto por el medio como por la propia naturaleza de la radiación electromagnética. Por una parte, las propagaciones de las señales están expuestas a interferencias aleatorias, y por otra, los mecanismos de propagación dependen de la propia frecuencia de la señal. Además, conocemos que la interacción de las señales electromagnéticas con el entorno también es función de la disposición y tipo de objetos que encuentran las señales en su trayectoria, dando origen a efectos como la reflexión, difracción o absorción. Por último la propia composición del medio influye directamente en este proceso introduciendo mecanismos de refracción o dispersión de las señales. Todo ello hace que su análisis y estudio pase por experimentaciones cuyos resultados están sujetos a elaborados tratamientos matemáticos, necesarios para la interpretación de los resultados empíricos.

Se presenta por lo tanto un problema complejo, en el que tanto la frecuencia de la señal, como el medio con el que interacciona han de estar acotados y definidos, permitiendo así el estudio teórico de los modelos de propagación que cumplen las condiciones preestablecidas.

Se plantea, pues, una hipótesis de trabajo que nace de la observación del comportamiento de las ondas electromagnéticas a diferentes frecuencias en su interacción con el medio físico. Trataremos de obtener beneficios de un hecho contrastado: diferentes frecuencias implican diferentes tipos de comportamiento en un medio físico dado.

Uno de los fenómenos más significativos que ponen de manifiesto esta diferencia de comportamiento es la deriva temporal de las señales provocada por las diferencias en las velocidades de propagación.

En concreto, los objetivos de este trabajo son:

- En primer lugar se revisará la teoría electromagnética relacionada con la interacción entre el medio físico y las señales radioeléctricas. Todo ello con la perspectiva de la hipótesis de trabajo planteada.
- Se analizarán aquellas aplicaciones que utilizan de forma directa la velocidad de propagación como función de la frecuencia y otras que, si bien no lo hacen, su dependencia con la frecuencia y el tipo de medio que tratan (medios dispersivos) harían posible la utilización de este tipo de tratamiento.
- Se propondrá un modelo formal para el tratamiento multifrecuencial que sirva como base teórica en soluciones que pretendan utilizar el fenómeno de interacción señal-medio físico (teledetección, localización, estudio de medios).
- Del estudio teórico del comportamiento de la onda electromagnética obtendremos la información necesaria para la realización de un entorno de simulación del problema de la interacción señal-medio físico y su dependencia de la frecuencia.
- Finalmente se pretende demostrar la aplicabilidad del método de tratamiento multifrecuencial mediante la medición diferencial de de las señales en el receptor. Con los resultados cuantificados de las diferentes simulaciones podremos estimar el alcance y las limitaciones del método propuesto. Los casos tratados en la simulación del fenómeno electromagnético van desde los primeros análisis teóricos a escenarios realistas que incluyen modelos específicos del medio que se está analizando.

La etapa de simulación se ha dividido en tres niveles. En el primero se simula la propagación de la onda electromagnética en medios dieléctricos simples, medios dispersivos y medios específicos. Aquí se incluyen ejemplos de escenarios reales como la determinación de la tasa de lluvia, el estudio de la ionosfera y el análisis de los parámetros electromagnéticos de los tejidos biológicos. El segundo nivel aprovecha el soporte creado e introduce el método de tratamiento multifrecuencial tanto para medios genéricos como para los casos de medios con modelos específicos. El tercer nivel trata tres escenarios de aplicación del método de tratamiento multifrecuencial: la determinación de los parámetros de un medio dispersivo, el cálculo de la distancia para un sistema de posicionamiento en un medio cuyo modelo de comportamiento se conoce y la detección en el cambio de la permitividad en muestras de tejido biológico.

1.3 Síntesis del contenido de la memoria

En el **capítulo 2** se aborda la historia y estado actual de diferentes disciplinas y campos de aplicación en los que la frecuencia de trabajo es uno de los principales parámetros en la interacción onda-medio. Se realiza una breve introducción a la historia del radar de subsuelo y del radar meteorológico, consideradas como soluciones actuales en la caracterización de diferentes medios. Por otra parte, se introduce el sistema de posicionamiento global GPS en cuyo desarrollo se están aplicando procedimientos de corrección mediante la utilización de dos frecuencias de trabajo. Estas dos frecuencias también se están utilizando para determinar el estado de la ionosfera (una de las capas de la atmósfera que más influye en las comunicaciones). Se observa que aplicaciones diferentes utilizan más de una frecuencia para, bien determinar la distancia emisor-receptor (GPS), bien determinar el estado de la capa electrónica que forma la ionosfera. Como colofón, los estudios encaminados a conocer los efectos que las ondas electromagnéticas y sus diferentes rangos de frecuencia tienen con los tejidos biológicos también son tratados a modo de breve revisión. Son diferentes ámbitos y entornos de trabajo, sin embargo, todos ellos tienen rasgos comunes relacionados con la hipótesis planteada.

El **capítulo 3** presenta las bases teóricas del modelo de tratamiento multifrecuencial propuesto en la memoria. Inicialmente se realiza una aproximación genérica e independiente de cualquier disciplina o

aplicación. El objetivo es dotar al método de la capacidad de adaptarse a la especificidad de la aplicación o entorno concreto bajo los fundamentos teóricos presentados. De esta primera aproximación se pasa a su implantación en dos casos de estudio que muestran su potencialidad y forma de aplicación.

Construidas las bases del entorno de simulación se pasa al **capítulo 4** en donde se realizan diferentes simulaciones estructuradas en núcleos que abarcan los diferentes entornos y ámbitos del tratamiento multifrecuencial. Esta estructura facilita tanto la incorporación de nuevas simulaciones con las que completar las existentes como la introducción de nuevos entornos de trabajo relacionados con el método presentado en la tesis.

Finalmente, se resumen los resultados, se presentan las conclusiones y se indican futuras líneas de trabajo y de investigación en el **capítulo 5**, mostrando en el **capítulo 6** la reseña bibliográfica utilizada.

Con los anexos se pretende completar la información que tanto en el estudio teórico inicial, como en la realización de las diferentes simulaciones y tratamiento numérico se han obtenido. Así, en el **anexo I** se presentan las nociones de la teoría general del electromagnetismo. Se muestran los diferentes mecanismos de interacción de la señal con el medio que atraviesa, los parámetros electromagnéticos con los que caracterizar los diferentes medios analizados y aquellas herramientas de cálculo numérico con las que abordar las fases de simulación y análisis cuantificado. En el **anexo II** se diseña y realiza un entorno de simulación adaptado al problema en estudio. Los métodos numéricos que resuelven los escenarios de trabajo propuestos son convertidos en algoritmos dentro de una herramienta de simulación cuyos objetivos pretenden ir más allá de ser un mero conjunto de programas que resuelven los sistemas de ecuaciones planteados. El diseño del entorno tiene como objetivo construir una herramienta que sirva como soporte para futuros trabajos relacionados con la interacción de la onda electromagnética con diferentes tipos de medios. Además se pretende justificar su desarrollo dentro del contexto Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS) en donde se deberán habilitar servicios que faciliten la comprensión y utilización de dicha herramienta de forma universal. El **anexo III** contiene un conjunto de gráficas que muestran la relación existente entre los parámetros que representan un medio genérico con los valores de la onda electromagnética que lo atraviesa.

Capítulo 2

Estado del arte

Cuando hayamos encontrado y superado la resistencia de nuestra propia mente a la adquisición de nuevas ideas, estaremos mejor capacitados para apreciar los esfuerzos de aquellos que por primera vez pensaron aquellas ideas y nos las transmitieron para que las poseyésemos perpetuamente.

J.C. Maxwell

2.1 Introducción

La interacción onda-medio y su manifestación a través del comportamiento de la señal son inherentes al fenómeno de la transmisión electromagnética. Las consecuencias de esta interacción están en el origen del desarrollo de aplicaciones con soluciones en diferentes campos del conocimiento. Desde la utilización de radares de tierra y atmosféricos, pasando por los sistemas satelitales de posicionamiento global a, incluso, aplicaciones en biomedicina, nos encontramos con diversas líneas de investigación que utilizan la medición de enlaces realizados con ondas electromagnéticas que producen las interacciones deseadas.

En todos ellos el concepto de frecuencia es uno de los factores clave necesario para comprender los fenómenos producidos. Su influencia en los diferentes escenarios planteados será tratada a continuación.

2.2 Radar de subsuelo

El radar de subsuelo es un método de prospección basado en la emisión y propagación de ondas electromagnéticas a través de las capas que componen el subsuelo junto con la posterior recepción y tratamiento de las reflexiones que se producen en sus discontinuidades [17]. Estas discontinuidades son cambios bruscos de los parámetros electromagnéticos del subsuelo, es decir, de la conductividad, la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética. La información obtenida son registros denominados radargramas, en donde se observan las reflexiones que la onda ha sufrido a lo largo de su recorrido. Por regla general se trabaja con los tiempos de llegada de las diferentes reflexiones producidas.

El tipo de estudio de subsuelo más elemental consiste en determinar velocidades de propagación promedio y, junto con los tiempos de propagación registrados para cada evento, localizar la discontinuidad en la que se ha producido la reflexión, determinando de ese modo su situación horizontal y la profundidad a la que se encuentra [30]. La profundidad que se puede alcanzar depende tanto de las condiciones del medio analizado como del equipo utilizado. Los radargramas también pueden aportar más información (composiciones, objetos, etc.) si analizamos las señales de los distintos eventos.

El desarrollo que han experimentado las técnicas de prospección con radar de subsuelo ha ampliado los campos de aplicación abriendo las puertas a nuevos estudios y posibilidades [35]. Debido al gran interés en los estudios superficiales altamente resolutivos del subsuelo este desarrollo se está realizando muy rápidamente. Las, cada vez más numerosas, aportaciones en este campo contribuyen a este espectacular avance. Son muchos los ejemplos de estas aportaciones que van desde estudios de casos concretos [41], [40], [54] hasta simulaciones por computador [11], pasando por ensayos experimentales [88] y desarrollo de programas informáticos y de equipos [43].

Fundamentos de la prospección mediante radar de subsuelo

Este método de prospección es relativamente reciente, ya que aunque los primeros ensayos que podemos asociar con el método datan de las primeras décadas del siglo XX, no se desarrolla como un método práctico de prospección hasta las décadas de los años 60 y de los 70. De los estudios aplicados básicamente a geología y glaciología se pasa a los estudios en ingeniería civil y, posteriormente, a los estudios relacionados con la arqueología y con el patrimonio histórico y artístico.

Trabajos interesantes que pretenden analizar la relación onda-medio en función de la frecuencia los encontramos en los ensayos que realiza Cook sobre la penetración de ondas de radio en diferentes frecuencias y sobre diferentes materiales del subsuelo. Se suceden también ensayos destinados a determinar las propiedades electromagnéticas de los materiales del subsuelo o del hielo [64], [20]. En 1978 Unterberger [103] realiza el estudio de cuatro sistemas de radar diferentes, utilizando tres frecuencias distintas (230MHz, 440 MHz y 4300 MHz), analizando su comportamiento en medios salinos en los que pretende detectar distintos elementos: los flancos de los domos salinos, el contacto superior entre los domos salinos y el medio, fallas, pozos (que pueden encontrarse llenos de agua) y fracturas en las rocas. También calcula la velocidad de las ondas en la sal. Algo más tarde, en 1989, aparece una publicación en la que describen con detalle el funcionamiento del sistema y diferentes métodos de adquisición de datos [15].

Los fundamentos de la prospección con ondas de radio aparecen incluso en algún libro de texto bajo el título de exploración eléctrica con ondas radiofónicas [51]. Se analiza un método de eco de radio que no considera las reflexiones en anomalías, sino las ondas directas que llegan entre dos antenas, una de ellas situada en la superficie del terreno y la otra en el interior de una galería de mina o de un sondeo. Situando esta última en distintas posiciones, es posible detectar medios con distintas conductividades, así como su posición y una estimación de su tamaño mediante las sombras que se producen en el registro debido a la diferente atenuación de la señal, que depende de la conductividad del medio por el que se propaga la señal.

Las aplicaciones del georadar se utilizan también en estudios arqueológicos. Uno de los primeros sistemas es el de Vickers [104], en el yacimiento de Chaco Canyon, en New Mexico. El medio de estudio era

un terreno seco y bastante homogéneo, en el que se intentaba localizar posibles muros enterrados a profundidades inferiores a 1 metro.

En la década de los 90 el radar de subsuelo se presenta en congresos de geología y geofísica, alcanzando últimamente la importancia suficiente para ser protagonista de una sesión propia, como es el caso de los congresos de la European Geophysical Society (EGS) o el congreso de la European Union of Geosciences (EUG). Existe, incluso, un congreso dedicado exclusivamente al georadar, denominado International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). En la actualidad es un método con una gran variedad de campos asociados y de aplicaciones en donde se utiliza como método complementario o incluso como único método de estudio.

Los ensayos de laboratorio con georadar también han experimentado el desarrollo correspondiente al interés suscitado. Algunos de los ensayos utilizan modelos de laboratorio de diferentes materiales y mezclas para determinar sus propiedades y definir el comportamiento de las ondas de radio o de las microondas en su interior. Se realizan medidas para diferentes frecuencias variando el contenido de agua, la compactación, el contenido en arcillas y la mezcla de materiales.

Por último, los estudios basados en simulaciones desarrollan algoritmos y modelos matemáticos que tienen como objetivo explicar los fenómenos que se producen durante la propagación de las ondas por el medio [60], [11]. Estos trabajos pretenden predecir las respuestas del medio, obteniendo radargramas que se comparan con los resultados obtenidos en el medio real o bien en pruebas de laboratorio. Si tenemos en cuenta que los trabajos de modelado numérico anteriores a los 90 han sido escasos, en los últimos años, el número de estos trabajos se ha visto fuertemente incrementado. En algunos casos se han realizado estudios comparativos entre las ondas electromagnéticas y las ondas sísmicas, considerando sus analogías y las diferencias existentes para poder posteriormente adaptar los abundantes programas que hay de simulación y de procesado de datos para los estudios sísmicos [65]. Se han desarrollado modelos y algoritmos de radiación [10], atenuación, teoría de rayos [112] y reflexión de las ondas para poderlos aplicar en los trabajos de simulación dirigidos a diferentes medios y problemas [66].

El radargrama

Está formado por un elevado número de trazas que indican las diferentes reflexiones de la onda electromagnética con las diferentes capas que forman el subsuelo.

En el eje horizontal se representan distancias sobre la superficie del medio por el que se ha deslizado la antena y en el eje vertical quedan representados los tiempos dobles de propagación de las ondas reflejadas en las anomalías internas a dicho medio (contrastes entre parámetros electromagnéticos).

El número de trazas de un radargrama depende de la longitud del registro, de la velocidad a la que se haya deslizado la antena a lo largo del perfil, del número de pulsos por segundo emitidos por la antena, del muestreo seleccionado y de la velocidad de registro del radar. Tal como ya se ha visto, estos parámetros se seleccionan adecuando la prospección al estudio y al medio.

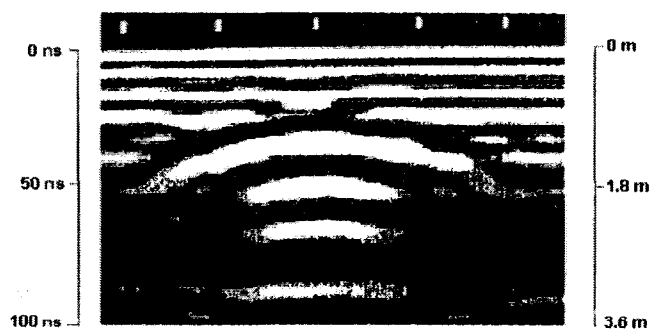


Figura 2.1 Radargrama formado reflexiones del subsuelo. En el eje vertical se indican los tiempos dobles de propagación (en nanosegundos) y su conversión a distancias para una velocidad de propagación media de 10 cm/ns. En el eje horizontal la distancia sobre el medio se indica a partir de unas marcas verticales. En este caso la distancia entre dos marcas verticales representa una distancia horizontal de 1 m [76].

Cada una de las trazas que forman parte del radargrama es un registro de las señales recibidas debidas a las reflexiones producidas en el medio. El conjunto de trazas permite el seguimiento de estas señales a lo largo de la gráfica, representando a los reflectores que las han producido, tal como puede observarse en la figura 2.1. Los incrementos de amplitud

32 *Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio*

que se producen en las trazas son debidos al aporte de energía proveniente de las reflexiones ocasionadas durante la propagación de la señal por el medio. Los registros son, por lo tanto, de amplitudes y de tiempos de llegada.

El resultado final de un estudio de prospección es un modelo del medio analizado representado a partir de una o más secciones. En cada una de ellas la abcisa representa la distancia horizontal sobre el medio y la ordenada el tiempo doble de propagación. En cada sección se tiene que indicar la distribución de velocidades del medio. Por ello, sobre estas secciones debe constar la velocidad de propagación de la onda por cada una de las unidades materiales identificadas del medio. Con las velocidades y los tiempos dobles de propagación se obtiene el espesor de estas unidades materiales.

Se definen las unidades materiales como zonas que presentan características similares frente a la propagación de ondas electromagnéticas, de manera que las variaciones de velocidad para un elemento de volumen sean pequeñas y por lo tanto, despreciables. El cambio de una de estas unidades a otra representa un contraste brusco ya sea en conductividad, permitividad dieléctrica, permeabilidad magnética o en cualquier combinación de estos parámetros, produciéndose en esta zona un cambio brusco en la velocidad de propagación. En estas discontinuidades bruscas se producen las reflexiones, mayores cuantos mayores sean los contrastes entre parámetros electromagnéticos, que quedan registradas en los radargramas. Los eventos producidos en objetos finitos del medio también deben quedar indicados en los radargramas con su tiempo doble de propagación, su tamaño aproximado y la profundidad a la que se localizan.

Para obtener este modelo de velocidades y espesores hay que conocer los parámetros electromagnéticos que determinan tanto la velocidad de propagación como la atenuación de la onda y la amplitud de la reflexión. Para un estudio práctico, los parámetros de mayor interés son los parámetros electromagnéticos efectivos: la velocidad de propagación, la atenuación y la amplitud de la reflexión son valores de referencia para una misma frecuencia y con un mismo medio material (mismo contenido de agua, composición y porosidad).

Una vez conocidas las velocidades medias resultantes para cada una de las unidades materiales también es sencillo calcular los espesores de

dichas unidades y la profundidad a la que se encuentran de la superficie las interfaces de contacto entre ellas. De forma aproximada las distancias se pueden deducir para el caso de medios no magnéticos, a partir del tiempo doble de propagación t , obtenido en los registros tal como se indica en la ecuación 2.1.

$$y = v \frac{t}{2} = \frac{ct}{2\sqrt{\epsilon_{ef}}} \quad (2.1)$$

Donde y es la distancia que se desea obtener, v la velocidad a la que se ha propagado la onda y ϵ_{ef} la permitividad dieléctrica efectiva del medio (que depende de su conductividad y de su permitividad relativa).

Para hallar la equivalencia entre el tiempo doble de propagación y la profundidad es fundamental conocer la permitividad efectiva del medio o la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. Existen diferentes métodos que permiten obtener alguno de estos dos parámetros, como por ejemplo: la utilización de valores tabulados la obtención de los parámetros efectivos del medio con muestras en el laboratorio o la relación existente entre los tiempos de reflexión y el conocimiento previo de la estratigrafía del terreno.

Los radares de subsuelo utilizan la medición del tiempo de llegada como técnica de tratamiento con la que estimar composiciones y espesores de las capas que conforman el terreno. Diferentes materiales inducen diferentes velocidades de propagación. Dado que la velocidad depende de la permitividad efectiva y que esta es, a su vez, función de la frecuencia utilizada podremos concluir que el escenario que este tipo de radar trata de resolver es susceptible de ser estudiado mediante técnicas que analicen la deriva temporal que cada frecuencia introduce en el proceso de emisión, reflexión y posterior recepción de las señales.

2.3 Técnicas de radar utilizadas en sensores remotos: aplicación en hidrología

La teledetección aplicada al sector del medio ambiente ha alcanzado altos niveles de desarrollo tecnológico. El crecimiento de las aplicaciones de los sensores remotos se debe en gran parte a la disponibilidad y accesibilidad de la información así como al desarrollo de herramientas hardware y software para el tratamiento y elaboración de los datos.

Estas son las conclusiones de un estudio que la Comisión Europea desarrolló a finales de los 90 en el que se pone de manifiesto el interés del desarrollo de este tipo de aplicaciones [24]. En dicho informe se enumeran los antecedentes que han originado dicho interés y que se resumen a continuación.

Numerosos proyectos de investigación de la Unión Europea se han dirigido a la comprensión de las causas, impactos y respuestas a los riesgos de inundaciones [75]. Los resultados de estos proyectos indican que para un adecuado manejo del riesgo de inundación, los sistemas de alerta y pronóstico hidrológico y los sistemas de respuesta y mitigación contra las inundaciones deben de estar interrelacionados. Los sistemas de alerta y pronóstico hidrológico se han perfeccionado gracias, entre otros, a lo siguientes aspectos: potenciación de las redes hidrométricas y telemétricas de recolección de datos, diseminación del uso de datos de radar meteorológico y satélite, disponibilidad de pronósticos numéricos y uso de sistemas electrónicos de análisis de datos.

Para evitar inexactitudes espaciales inherentes a las mediciones puntuales de las redes de pluviógrafos, se usan radares meteorológicos [89] y para escalas espaciales mayores se usan sensores multiespectrales sobre plataformas satelitales. Estos sensores proveen estimaciones continuas de la precipitación en el tiempo y en el espacio, desafortunadamente no es posible, al momento, dar una evaluación precisa en la exactitud de estas estimaciones, en cierto modo porque no hay disponible una base de comparación satisfactoria. Por consiguiente algunas preguntas como la correcta estimación de lluvia utilizando mediciones combinadas de sensores diferentes, tales como radares, satélites y pluviógrafos o cómo incorporar información de sensores remotos en los modelos hidrológicos y cuál es el efecto de los errores en las estimaciones de lluvias en los resultados de dichos modelos, son preguntas que se podrán responder solo después que estimaciones de la precipitación basadas en sensores remotos puedan ser ampliamente verificadas.

Medición de lluvias

La estimación de lluvia para propósitos de pronósticos de crecientes es un problema difícil. La lluvia, más quizás que otras variables meteorológicas, es intermitente en el espacio y en el tiempo muestra una gran variabilidad natural. Incluso la medición de lluvias en un punto por

un sólo pluviógrafo es una actividad que presenta una amplia variedad de incertidumbres [93]. Los sensores remotos usan mediciones del espectro electromagnético para medir el estado hidrológico de una cuenca [4] y para registrar las variaciones de cómo los objetos reflejan o emiten energía electromagnética (figura 2.2).

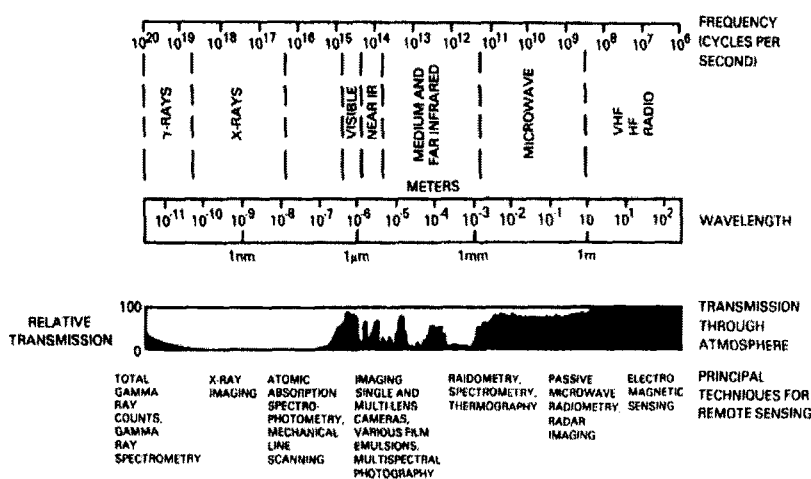


Figura 2.2 Ilustración del espectro electromagnético. Se muestra la relación entre longitud de onda y frecuencia, nombres comunes de las bandas espectrales y transmisión atmosférica relativa. También se muestran las principales técnicas usadas en sensores remotos y su respectiva región espectral [74].

El radar emite energía electromagnética en bandas estrechas que se propagan a través del espacio e interactúan con la materia a lo largo de su trayectoria. La longitud de onda del impulso radar utilizado está normalmente en el rango de 3 a 10 cm. Cuando la onda electromagnética choca con las partículas de lluvia, la energía es parcialmente absorbida, disipada y reflejada, una parte de la energía reflejada regresa al transmisor.

El sistema radar está configurado en forma tal que el transmisor produce radiación electromagnética de una potencia conocida a una frecuencia dada. La radiación es emitida a lo largo de un haz radial desde la antena del radar, que recibe también la parte del haz de retorno (señal de retorno) disipado por las partículas de lluvia. Un receptor detecta la señal de retorno, la amplifica y convierte la señal recibida en

un señal que refleja las propiedades de la interacción onda electromagnética - precipitación.

La señal de retorno producida por un objetivo volumétricamente desagregado como son las partículas de lluvia en el aire, puede representarse según la expresión 2.2 [52].

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (2.2)$$

Donde P_t es la potencia emitida por el radar, P_r es la potencia media de una serie de impulsos reflejados que llegan al receptor del radar, λ es la longitud de onda, G es una característica de la antena (llamada ganancia de la antena), r es el rango del objetivo y σ_i es la sección transversal de la disipación de retorno de una partícula simple, siendo la suma de todas las n partículas disipadas por unidad de volumen [5].

Para este tipo de sistemas la medición de la amplitud del eco es fundamental en la interpretación del medio analizado (lluvia). En principio parece que no existe relación alguna con la hipótesis de trabajo. Sin embargo, el agua es un medio dispersivo que cuenta con modelos de comportamiento dependientes de la frecuencia utilizada: es lógico pensar en diferentes velocidades de propagación en función de la frecuencia utilizada. En este caso se observa la posibilidad de analizar y proponer un tratamiento multifrecuencial diferencial con el que estimar aquellas características que los sistemas actuales miden utilizando mediciones de la amplitud reflejada.

2.4 Sistemas de posicionamiento y navegación

En las aplicaciones anteriores se puede observar la influencia que la frecuencia tiene en el estudio de sistemas cuyo objetivo es el de determinar la composición o condición del medio que atraviesa la onda electromagnética. Existe otro tipo de aplicación donde no se pretende identificar el medio pero en la que también la frecuencia de trabajo es un factor clave en su desarrollo: es el caso de los sistemas de posicionamiento y navegación. Aquí el medio es una fuente de error (y en ocasiones de información) en lugar del elemento a determinar. La clave para estos sistemas es la estimación de la distancia o la dirección al conjunto de referencias adecuadas.

Las técnicas empleadas en la determinación de la posición son diversas como lo son el tipo de redes móviles terrestres que las utilizan: desde la más conocida como la red de posicionamiento global GPS [106], pasando por una de las más emergentes como las redes celulares GSM [85], hasta las menos desarrolladas en este tipo de servicios como las redes inalámbricas WIFI [74] o Bluetooth [105]. En todas ellas existe una red de referencias (local o global) y la técnica de tratamiento de la señal adecuada a la infraestructura y tipo de señal. Las técnicas utilizadas son: medir el ángulo o el tiempo de llegada, establecer la diferencia en el tiempo de llegada o cualquier otra técnica de identidad celular en una red local.

A continuación se describen los fundamentos de cada técnica profundizando en el sistema de posicionamiento global GPS. Este sistema es un caso de estudio significativo puesto que en su desarrollo se utilizan técnicas de tratamiento multifrecuencial que están directamente relacionadas con la hipótesis de trabajo.

Técnicas basadas en el tiempo de llegada

Conocida la velocidad de la onda debemos medir el tiempo que tarda en llegar al destino para determinar la distancia [27]. Existen variantes con origen en los fundamentos de diferentes sistemas de posicionamiento (GPS, Loran-C, GSM).

El sistema GPS se basa en la obtención del retardo de las señales emitidas por los satélites utilizados como referencias. En condiciones de un enlace teórico, la posición se determinaría obteniendo el retardo de tres satélites visibles, estableciendo el siguiente sistema de ecuaciones 2.3.

$$(x_{si} - u_x)^2 + (y_{si} - u_y)^2 + (z_{si} - u_z)^2 = R_{si}^2 \quad (2.3)$$

con $i = 1, 2, 3$

donde (u_x, u_y, u_z) son las coordenadas del receptor, (x_{si}, y_{si}, z_{si}) son las coordenadas de cada satélite, y R_{si} la distancia medida desde el satélite al receptor GPS.

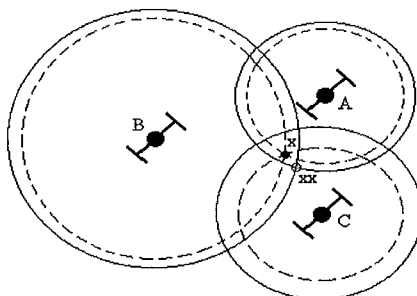


Figura 2.3 GPS con error por deriva

En este sistema de ecuaciones no se incluyen los errores en la medición del tiempo de retardo que en un caso real se producen en el reloj del receptor (el cual obviamente no tiene la precisión del reloj del satélite). Por tanto, en el sistema de ecuaciones se debe introducir la deriva del reloj del receptor, es decir, necesitamos una ecuación más, y, por lo tanto, un satélite más sobre el que medir el retardo. El sistema de ecuaciones final queda expresado en 2.4,

$$(x_i - u_x)^2 + (y_i - u_y)^2 + (z_i - u_z)^2 = (R_i - C_B)^2 \quad (2.4)$$

con $i = 1, 2, 3, 4$

Para resolver el sistema de ecuaciones no lineales planteado, conviene conocer una estimación de la posición real y utilizar cálculos iterativos hasta que la solución converja. Este sistema presenta una serie de fuentes de error relativos al satélite, a la propagación de la onda y al receptor.

Los errores relativos al satélite pueden ser: debidos al reloj o debidos a errores en los parámetros orbitales. Los errores relativos a la propagación de la señal pueden ser: debidos a la velocidad de propagación de la señal, a la refracción ionosférica o a la refracción troposférica [29], [73].

En la tabla 2.1 se pueden apreciar algunos errores producidos por el retraso en la velocidad propagación.

Fuente de error	Magnitud (cm)
aire seco	250
vapor de agua	45
hidrometeoros	1,5

Tabla 2.1 Retrasos en la propagación de la señal GPS debidos a diferentes componentes atmosféricos [29].

Otro sistema de posicionamiento, empleado en navegación, es el Loran-C, sistema terrestre que consta de grupos de transmisores (llamados cadenas) que opera a una frecuencia de 100 KHz. El receptor mide la diferencia de tiempo entre la recepción de una señal desde la estación principal y desde dos estaciones secundarias (TD). El navegante determina su posición dibujando estas diferencias de tiempo frente a una cuadrícula impresa en una carta de navegación. Cada valor TD es medido con una precisión de alrededor de 100 ns. En la actualidad este sistema se está mejorando introduciendo la comunicación por satélite [62].

Por último, la evolución de los sistemas de comunicaciones móviles y el desarrollo de las redes celulares telefónicas han impulsado que el servicio de localización para estos sistemas sea un objetivo de especial interés. Este tipo de redes utilizan diferentes técnicas, entre ellas la de medir el tiempo de llegada de una señal transmitida por un terminal móvil a diferentes estaciones base.

Ángulo de recepción de la onda

Esta técnica utiliza antenas multiarray para estimar la dirección de recepción de la señal. De este modo, la información que se obtiene localiza al móvil a lo largo de la recta que le une con la estación base. Para ello son necesarias, como mínimo, dos estimaciones (de dos estaciones en posiciones diferentes) para localizar el dispositivo, aunque se suelen usar más (si están disponibles) para mejorar la precisión de localización.

Para realizar una estimación lo más precisa posible, se utilizan arrays específicos de orientación electrónica con haces adecuados para minimizar el error en la determinación del ángulo de llegada [18].

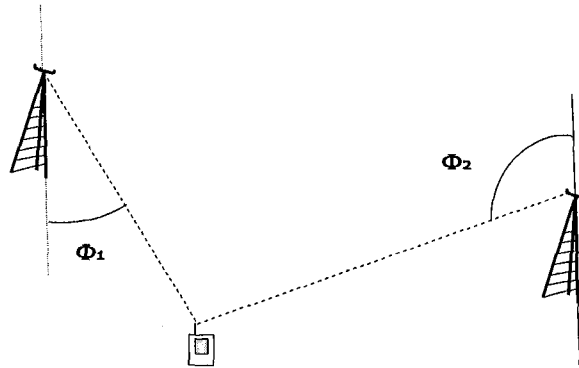


Figura 2.4 Determinación de la posición con el ángulo de llegada.

Aunque este tipo de técnicas parece muy interesante, presentan algunos inconvenientes, como, por ejemplo, no disponer de la capacidad de resolver la posición en presencia de multitrayectos (cuando no hay línea de visión directa, la señal que llega a la antena multiarray es fruto de una reflexión y, por tanto, el ángulo de llegada es distinto del buscado). Por otro lado, leves movimientos en las antenas debidos a viento o tormenta pueden producir errores considerables, ya que la estimación se basa en los ángulos absolutos existentes respecto a la antena.

Diferencia en el tiempo de llegada

Esta técnica está basada en la estimación de la diferencia en el tiempo de llegada de la señal desde la fuente hasta múltiples receptores. Para el cálculo de esta medida se toman muestras de la señal recibida en cada uno de los receptores en periodos de tiempo sincronizados. Tras este muestreo se calcula la correlación de las señales dos a dos. El pico de la correlación cruzada informa sobre la diferencia de tiempo en la llegada de la señal para en cada uno de los pares de receptores estudiados.

Cada diferencia de tiempo estimada define una hipérbola entre los dos receptores en la cual el emisor puede situarse. Si este procedimiento se realiza de nuevo con otro receptor en combinación con cualquiera de los anteriores, se define otra hipérbola. La intersección de las dos hipérbolas es la posición estimada de la fuente emisora.

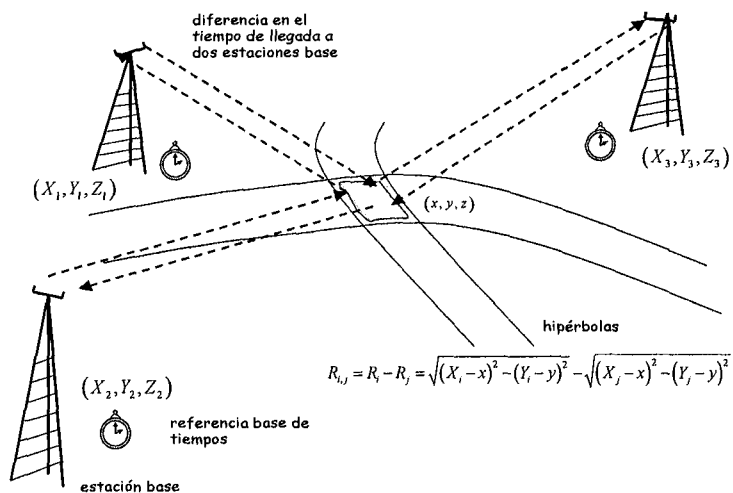


Figura 2.5 Sistema hiperbólico de localización.

La estimación hiperbólica se realiza en dos etapas [84]. La primera se encarga de la estimación de las diferencias de tiempos existentes o TDOAs (time difference of arrival). En la segunda etapa, los TDOAs estimados son introducidos en un sistema de ecuaciones no lineales de tipo hiperbólico. La solución de este sistema de ecuaciones dará la posición del emisor.

La medida del TDOA de la señal puede ser estimada, bien restando los tiempos de llegada a dos receptores o bien utilizar técnicas de correlaciones cruzadas con las señales recibidas [77]. Generalmente se utiliza el segundo método, debido a que para implantar el primero se necesita una referencia de tiempo entre fuente y las estaciones receptoras.

Se plantean una serie de ecuaciones hiperbólicas del tipo 2.5.

$$R_{i,1} = R_i - R_1 = \sqrt{(X_i - x)^2 - (Y_i - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 - (Y_1 - y)^2} \quad (2.5)$$

Para la resolución del sistema de ecuaciones hiperbólicos se emplean técnicas de linealización con series de Taylor [28].

2.5 Tratamiento multifrecuencial en los sistemas de posicionamiento global

La clave del funcionamiento del sistema GPS es determinar el tiempo que tarda una señal de radio transmitida desde un satélite al receptor que pretende determinar la posición. La velocidad de la señal que se toma para, conocido el tiempo, determinar la distancia al satélite emisor, es la velocidad de la onda electromagnética en el vacío $3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

Conocidas las distancias a cada satélite (figura 2.6) se resuelven los sistemas de ecuaciones planteados en 2.3 y 2.4. Uno de los problemas de este sistema es el de conocer con exactitud cuando se emitió la señal desde el satélite [6]. Para ello se necesita una referencia horaria lo más exacta posible (los satélites cuentan con relojes atómicos sobre los que se sincronizan los receptores) y poder generar en el mismo instante de tiempo en el emisor y en el receptor una serie de tramas con código con las que poder comparar el retraso de la señal enviada por el satélite (figura 2.7).

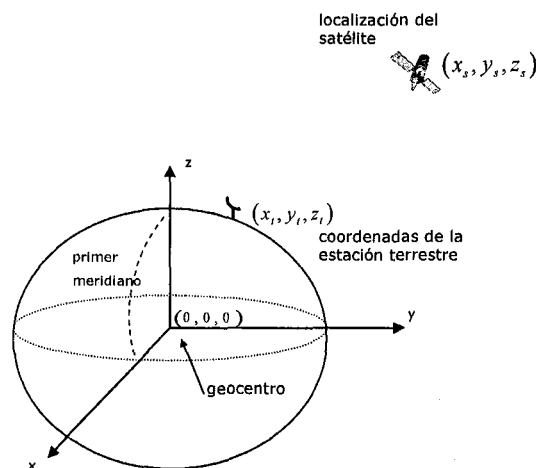


Figura 2.6 Sistema de coordenadas GPS.

El carácter militar del sistema ha condicionado su desarrollo de manera que los rangos de actuación y precisión de las aplicaciones no militares se ven recortadas en relación a las verdaderas posibilidades del sistema, cuya precisión alcanza un error de unos pocos centímetros frente a los 10 metros que puede ofrecer un receptor comercial.

Cada satélite emite dos frecuencias distintas coherentes entre sí:

- $L1=10.23 \times 154=1575.42$ MHz
- $L2=10.23 \times 128=1227.6$ MHz

La razón de utilizar dos frecuencias es que, como se ha visto anteriormente, una de las principales causas de error (y la utilizada para implementar la disponibilidad selectiva) es la refracción provocada por la ionosfera y la troposfera [14], [8]. Las diferencias de tiempo son variables y poco previsibles, y pueden ser tan costosas en distancia como para provocar errores de hasta 100 metros (con unos valores medios de 20-30 metros de día y 3-6 metros de noche).

Estas derivas temporales pueden estimarse utilizando dos frecuencias distintas con las que se comparan los resultados obtenidos en cada una de ellas.

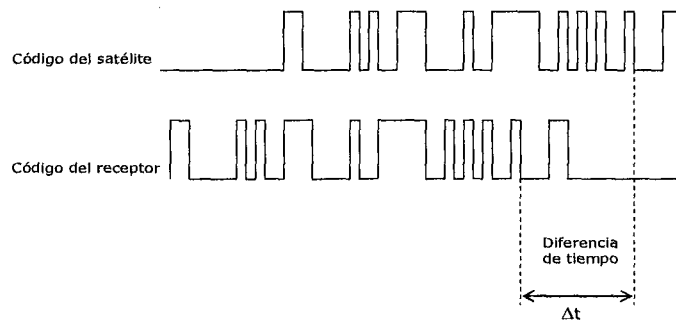


Figura 2.7 Código de tiempo de la señal GPS [73].

Se ha visto que la influencia de esa parte de la propagación se puede modelar en relaciones funcionales del tipo expresado en 2.6 [108].

$$R = R_{medida} - \frac{A}{f^2} \quad (2.6)$$

Donde R es la distancia real y R_{medida} es la que se mide con la frecuencia f_1 . Eso es debido a que el índice de refracción de un plasma (como se puede considerar a la ionosfera) es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia.

Como tenemos dos frecuencias disponibles y el coeficiente A es esencialmente parte de la geometría y de las condiciones de la propagación en la ionosfera, podemos resolver el sistema:

$$R = R_{medida1} - \frac{A}{f_1^2} \quad (2.7)$$

$$R = R_{medida2} - \frac{A}{f_2^2} \quad (2.8)$$

La distancia real también se obtiene utilizando la siguiente expresión:

$$R = \frac{R_{medida1} f_1^2 - R_{medida2} f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.9)$$

De esta manera las aplicaciones autorizadas gozan de una mayor resolución por contar con dos frecuencias para corregir los errores de propagación atmosférica.

Los planes de modernización del sistema prevén una tercera frecuencia de trabajo centrada en 1176.45 MHz. De este modo se podrán obtener tres mediciones de la recepción de cada una de ellas y plantear un sistema de corrección basado en un modelo con tres frecuencias [57].

2.6 Estudio de la ionosfera mediante la utilización de señales GPS

La atmósfera se encuentra inundada de señales de 1.6 y 1.2 GHz (L1 y L2), transmitidas por los 24 satélites GPS. Las señales de de estos satélites pueden ser observadas simultáneamente con precisión milimétrica por cualquier receptor terrestre. Como ya se ha descrito anteriormente, a lo largo de su trayectoria y se debido a la atmósfera se producen retardos en las señales.

El propósito de utilizar la información de las señales GPS es el de estudiar estos retardos no como errores, sino como información atmosférica (fig. 2.8). La utilización de las dos frecuencias utilizadas por los emisores GPS está en el origen de un sistema de estimación de los parámetros electrónicos que caracterizan a la ionosfera [109].

La presencia de la ionosfera en los enlaces satelitales produce una interacción que depende de la densidad electrónica existente [58]. Dicho efecto es fuertemente dependiente de la frecuencia de la señal utilizada (la ionosfera es un medio dispersivo). Como consecuencia, la velocidad de propagación de las señales se verá modificada en función de la frecuencia y del estado de la ionosfera representado por la densidad electrónica.

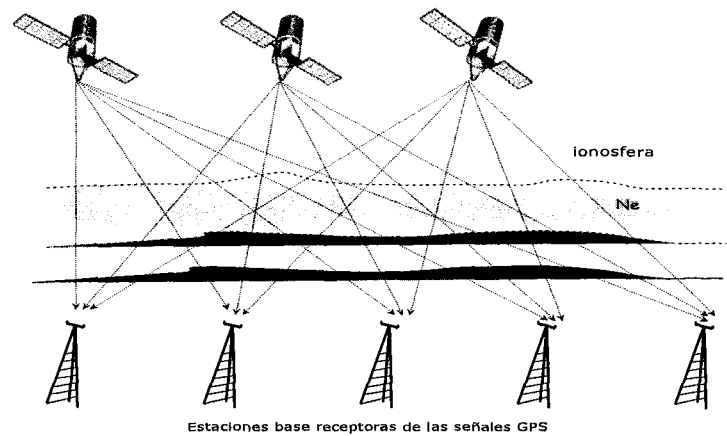


Figura 2.8 Red de satélites utilizados para obtener información sobre el estado de las capas atmosféricas que interaccionan con las señales GPS.

El índice de refracción será diferente si tomamos la fase de la señal portadora o bien la fase del grupo. Las relaciones entre ellos y la frecuencia se representan en las ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12 [56].

$$n_{gr} = n_{ph} + f \frac{dn_{ph}}{df} \quad (2.10)$$

$$n_{ph} = 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad (2.11)$$

$$n_{gr} = 1 - \frac{c_2}{f^2} \quad (2.12)$$

Donde c_2 es un valor que depende de la densidad electrónica y que se expresa como $c_2 = k \cdot N_e$, $k = -40.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$.

Caracterización de la ionosfera: ionosondas

Hasta la fecha la ionosonda ha sido uno de los instrumentos más importantes con la que obtener datos acerca de la distribución de la densidad electrónica en la ionosfera. Los fundamentos de este dispositivo tienen como base teórica el hecho de que las señales por debajo de los 20MHz son reflejadas por las diferentes capas inosféricas.

El proceso consiste en la emisión y recepción de señales de 0.1MHz a 30MHz en la dirección vertical. A continuación se mide el tiempo de cada una de las señales tarda en regresar en su reflexión a lo largo de las diferentes capas. En este proceso hay una relación entre frecuencia crítica f_c , para la cual la señal deja de ser reflejada) y la densidad electrónica en la ionosfera [36] que está representada en la ecuación 2.13.

$$f_c^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e} \cdot N_{\max} = 80.6 \cdot N_{\max} \quad (2.13)$$

Donde e es la carga del electrón, m_e la masa de un electrón y ϵ_0 la permitividad en el vacío. La densidad electrónica (N_{\max}) es expresada en electrones por metro cúbico y la frecuencia crítica en Hertzios.

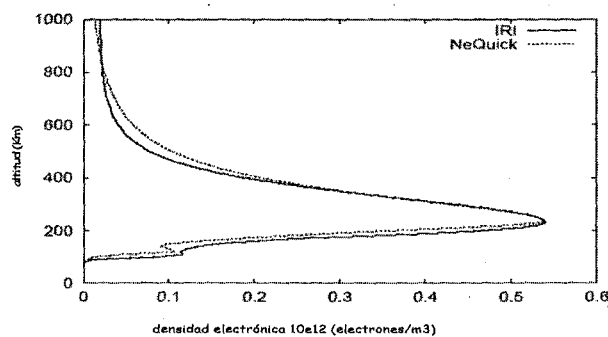


Figura 2.9 Ejemplo de perfil ionosférica obtenido con dos modelos que utilizan los datos obtenidos por los ionogramas [55].

Con el tiempo obtenido para la frecuencia crítica es posible obtener la altura aparente de la capa ionizada (altura virtual), definida como:

$$h' = \frac{c\tau}{2} \quad (2.14)$$

Esta altura virtual se utiliza en los denominados ionogramas, registros de datos en donde se contrastan dichas alturas con las frecuencias críticas (figura 2.9).

Con los ionogramas y la relación 2.14 es posible obtener las densidades electrónicas en las diferentes capas. El alcance de los datos obtenidos depende de diferentes factores: del equipo de medición, del método de calibración y de la obtención de los ionogramas [78].

2.7 Comportamiento de los tejidos biológicos en su interacción con las ondas electromagnéticas

Las medidas de las características eléctricas del tejido biológico adquieren cada día más interés en el área de la medicina y la biología. El desarrollo de esta línea de investigación y sus aplicaciones clínicas tiene como elemento clave el conocimiento de las propiedades eléctricas, dieléctricas o magnéticas que los diferentes tejidos poseen (tanto en condiciones patológicas como en condiciones normales). Este análisis ayuda a comprender la relación de dichas propiedades con los constituyentes del tejido y con los procesos físicos que en él concurren.

El modelado de la interacción entre el tejido biológico y la onda se está orientando hacia el estudio del efecto que las ondas electromagnéticas tienen sobre los tejidos biológicos y hacia el diagnóstico médico: si conocemos las propiedades eléctricas de los tejidos sanos y las comparamos con las características de tejidos anómalos, es posible diagnosticar la aparición de cualquier patología.

Las primeras contribuciones en esta área que mostraron que el tejido era conductor y que su resistencia varía con la frecuencia data de fines del siglo XIX. Estudios posteriores proporcionaron las bases para el estudio de la impedancia del tejido (definida como bioimpedancia) y confirmaron su dependencia con la frecuencia [90], [37]. Formalmente, los estudios de las propiedades eléctricas de materiales biológicos, comenzaron a desarrollarse a mediados del siglo XX cuando los biofísicos aplicaron la

teoría de mezcla Maxwell-Frick a estudios sobre dieléctricos heterogéneos. A partir de entonces, varios autores [32], [31], [96], [22] han presentado resultados sobre estudios de propiedades eléctricas de tejidos biológicos demostrando que la membrana celular limita el paso de la corriente de baja frecuencia a través de la célula, pero permite el paso de la corriente de alta frecuencia, esto hace posible manifestar el aspecto capacitivo de la membrana implicado en los mecanismos de relajación al nivel de la interfase membrana electrolito. En este aspecto se ha dado un paso fundamental hacia el desarrollo de los estudios por bioimpedancia eléctrica. Hay estudios que analizan los cambios que se presentan en tejidos biológicos en el intervalo de frecuencia comprendido entre 10 KHz y 10 MHz [107].

Los cambios histológicos y citológicos en tejido canceroso, provocan modificaciones en el contenido de agua celular, electrolitos y propiedades de la membrana celular, lo cual a su vez provoca variaciones en las propiedades eléctricas de dicho tejido, permitiendo la posibilidad de identificar lesiones cancerosas. Esta información se puede usar para calcular el factor de pérdida dieléctrica para poder distinguir entre un tejido sano y uno canceroso.

La conductividad de los órganos del cuerpo es un parámetro de gran importancia al observar el posible efecto de las corrientes inducidas a que se vean sometidos. En 1996, el Departamento de Física del King's College de Londres, Inglaterra, publicó un estudio sobre la determinación de las propiedades dieléctricas de los tejidos biológicos [32]. El objetivo del trabajo fue agrupar las mediciones hechas durante las últimas cinco décadas para ser utilizadas en la elaboración de un modelo de curva de conductividad y de permitividad en función de la frecuencia, para cada órgano, en diferentes animales; de forma tal que permitiera extrapolar a valores que no habían sido medidos. Se realizaron experimentos para medir las conductividades y permitividades en órganos diferentes, a distintas frecuencias y se compararon los resultados con las predicciones de los modelos teóricos. Los resultados del estudio muestran los datos experimentales de conductividades y permitividades en tablas y gráficos para 45 órganos.

Existe un interés en el modelado y la simulación de la interacción con el material biológico en rangos que van desde las denominadas radiofrecuencias hasta las microondas; este hecho se corrobora en sendos trabajos de investigación [99], [100], [94] y en la organización de

diferentes encuentros y congresos (BioMed, 2005), (EMF, 2002). Existe, además, un Comité Internacional para la Promoción de la Investigación en Bioimpedancia (ICPRBI), el cual ha impulsado la realización de diferentes Conferencias Internacionales sobre Bioimpedancia Eléctrica entre 1969 (New York) y 2001 (Oslo).

Este interés se traslada incluso a organizaciones internacionales como la Organización Mundial de la Salud que pretende dar respuesta a la preocupación pública por los efectos sobre la salud de la exposición a campos electromagnéticos (CEM). La Organización Mundial de la Salud (OMS) creó en 1996 el Proyecto Internacional CEM para evaluar las pruebas científicas de los posibles efectos sobre la salud de los CEM en el intervalo de frecuencia de 0 a 300 GHz. El Proyecto CEM fomenta las investigaciones dirigidas a rellenar importantes lagunas de conocimiento y a facilitar el desarrollo de normas aceptables internacionalmente que limiten la exposición a los campos electromagnéticos.

Diferentes técnicas utilizadas en la medición de los parámetros eléctricos de los tejidos son utilizadas aprovechando los fenómenos producidos en la interacción onda-medio [13]. Hay métodos de contacto basados en electrodos a los que se aplica un campo eléctrico [44], [87], métodos sin contacto que utilizan la inducción magnética con el objeto de generar corrientes [46], [102], técnicas que utilizan la respuesta ante la inducción electromagnética [111] e incluso la utilización de microondas [61] en el estudio del edema cerebral.

La medición de los parámetros eléctricos que caracterizan los tejidos biológicos permite el desarrollo de aproximaciones computacionales que modelan el comportamiento de interacción en este tipo de entornos [88]. La complejidad de cualquier situación planteada se evalúa utilizando herramientas de tratamiento numérico que cuantifican los efectos y las interacciones existentes [101], [113]. En ellas, el medio toma formas cuyos modelos teóricos (modelos de Debye y Cole-Cole) [49], [33] facilitan la aproximación computacional o las interpretaciones de resultados experimentales.

En la figura 2.10 se muestra la utilización de microondas en procesos de detección de tumores que inducen reflexiones de las señales emitidas desde varios emisores situados en diferentes puntos a lo largo de la zona a reconocer.

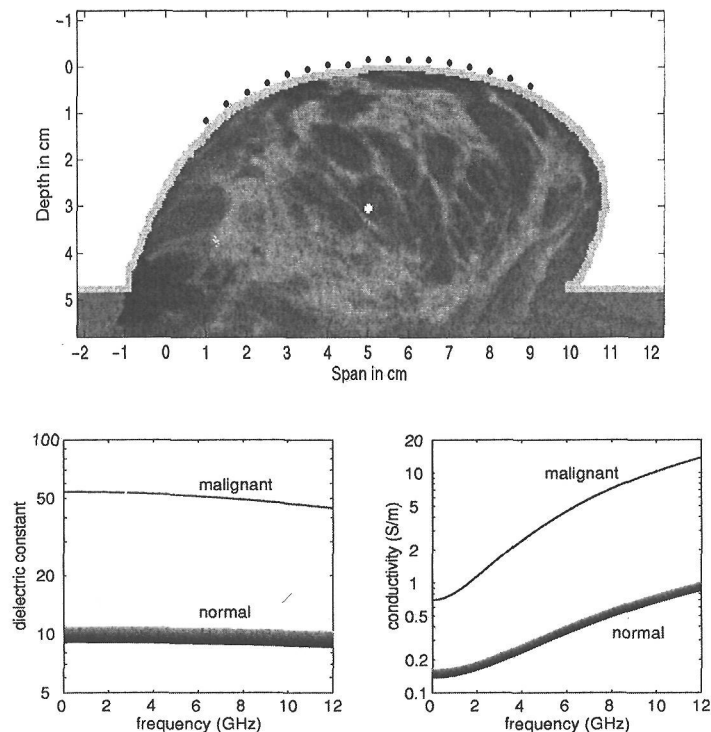


Figura 2.10 Modelo para la detección de tumores en mamografías mediante el análisis de la energía reflejada en la interacción onda-tejido biológico-tumor [114].

La utilización de la radiación electromagnética presenta ventajas sobre otro tipo de técnicas (rayos X, ultrasonidos, resonancia magnética) utilizadas en el mismo tipo de aplicaciones. Las microondas no son radiaciones ionizantes como los rayos X y su utilización es más precisa que los ultrasonidos y menos costosa que la resonancia magnética [114]. Los modelos utilizados se basan en simulaciones por computador basadas en el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD).

Mediante este método se estudia la interacción onda-medio (tejido biológico y tumor) y se cuantifica el valor de la energía reflejada en este proceso (figura 2.11).

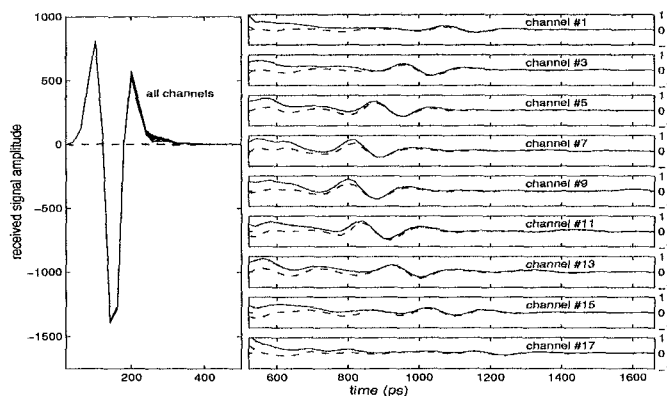


Figura 2.11 Simulación FDTD de la energía reflejada por un tumor que es captada por un array de sensores [114].

2.8 Conclusiones

La revisión del estado del arte ha mostrado diferentes escenarios donde los fenómenos de interacción onda-medio son aprovechados para obtener información, bien del propio medio, bien de las condiciones del enlace emisor-receptor. La dependencia con la frecuencia de trabajo también han sido expuestas a través de su utilización en sendas aplicaciones.

Tras esta revisión se observa que el rango de frecuencias utilizado depende del ámbito de aplicación y que, además, se requiere más de una frecuencia para alcanzar cotas de precisión adecuadas. La conclusión inicial acerca de lo expuesto introduce una serie de rasgos comunes a todas las aplicaciones y líneas de investigación revisadas.

Las variables electromagnéticas (Ψ : amplitud, fase, tiempo...) medidas en el receptor caracterizan a las funciones y tienen mayor o menor protagonismo en unos u otros casos. De forma general, la estructura funcional está basada en el valor de dichas magnitudes construyéndose funciones del tipo $\Phi = f(\Psi)$. La obtención del tiempo de llegada o de la amplitud recibida son dos ejemplos de Ψ . La distancia del enlace (en aplicaciones de posicionamiento) o el volumen de agua en una tormenta

de lluvia (en radares meteorológicos) corresponde a sendos ejemplos de Φ para la función dada.

Cuando la aplicación necesita corregir errores o alcanzar mayores cotas de precisión se toman diferentes valores de la función mediante los cuales obtener información del tipo $\Delta f_{ij} = f(\Psi_i) - f(\Psi_j)$. El caso de la corrección de la distancia obtenida mediante la medición del tiempo de llegada para dos frecuencias de trabajo muestra esta técnica.

Sin embargo, puede concluirse la ausencia bibliográfica de métodos y sistemas orientados a sacar provecho de las diferencias del tipo $\Psi_i - \Psi_j$ con las que estimar el valor de la variable Φ desarrollando funciones $\Phi = g(\Psi_i - \Psi_j) = g(\Delta\Psi_{ij})$. Estas diferencias existen y se ponen de manifiesto cuando se utilizan las variables electromagnéticas que las provocan o los medios que las inducen. El hecho de utilizar diferentes frecuencias de trabajo para el mismo escenario o la existencia de un medio dispersivo ocasionaría este tipo de posibilidades. En este caso, diferencias como el tiempo de llegada $\Delta\Psi = \Delta t$ o las diferencias en las amplitudes $\Delta\Psi = \Delta|E_i|$ recibidas son dos posibles aplicaciones potenciales con las que plantear funciones del tipo $\Phi = g(\Delta\Psi_{ij})$.

Los casos abordados confirman esta posibilidad tanto en la utilización de la variable electromagnética que origina esta diferencia (la frecuencia) como en el tipo de medio que la propaga.

Capítulo 3

Formulación del problema y propuesta de resolución

Y es que la teoría del campo electromagnético que surgió durante la segunda mitad del siglo XIX fue el resultado de una cultura mestiza tecnocientífica. Ciencia y tecnología avanzaban a la vez, y ambas dieron a luz una síntesis teórica y operacional sin la cual el mundo del siglo XX habría sido muy diferente.

J. M. Sánchez Ron

3.1 Formulación del problema

Como conclusión a la revisión de las disciplinas analizadas en el estado del arte se observa que la variable medida en el receptor es, de forma generalizada, función de los parámetros que representan al medio M y de la onda electromagnética E identificada por su frecuencia de trabajo,

$$\Psi = \Psi(E, M) \quad (3.1)$$

En la relación anterior Ψ representa la función obtenida en el receptor que puede representar el tiempo de llegada t , la velocidad de propagación v_p , la potencia recibida P_r o cualquier otro parámetro de la onda. A su vez, el medio se caracteriza por un conjunto de parámetros

(p_1, p_2, \dots, p_n) y la propia onda lo está por su frecuencia f , amplitud A y fase Φ .

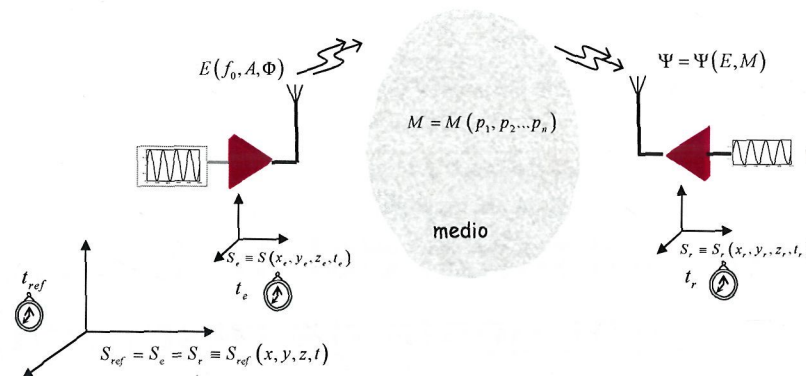


Figura 3.1 Tratamiento convencional de la onda electromagnética. Las aplicaciones necesitan sincronizar y/o calibrar los sistemas de referencia (tiempo-espacio).

Las aplicaciones en las que el medio interviene de forma directa (bien como elemento a analizar o bien como factor que introduce interacciones que deben ser consideradas) buscan los mecanismos y las magnitudes que optimizan el rendimiento.

Cuando se trata de estudiar el medio se utiliza el mecanismo de interacción que permita obtener la máxima información, cuando el medio es un elemento que, si bien interviene, no es considerado en el desarrollo de la aplicación, los valores de las magnitudes tratan de minimizar dicha interacción. El radar de subsuelo y el sistema de posicionamiento global GPS son, respectivamente, un ejemplo de cada uno de los dos casos planteados.

El tratamiento convencional de la onda electromagnética (figura 3.1) utiliza sistemas de referencias (normalmente posicionales y temporales, $S_{ref} = S_e = S_r$) que son calibrados y/o sincronizados como paso previo al establecimiento de la transmisión con la que desarrollar la aplicación concreta. Así, en los sistemas de posicionamiento GPS la posición de los satélites y la sincronización de los relojes es condición necesaria para poder abordar la tarea de determinar la posición de los dispositivos receptores. Para el caso de radares en los que el emisor y el receptor no

están situados en el mismo dispositivo ocurre algo parecido. En cualquier caso, los sistemas de referencia de todos los dispositivos deben estar relacionados para, de ese modo, poder establecer aquellos valores iniciales (tiempo, distancia) que el receptor debe conocer para analizar la información recibida. Una vez establecida la relación necesaria entre sistemas de referencia se utiliza una frecuencia de trabajo mediante la cual se identifica la información en el receptor. La calibración o sincronización del sistema deberá ser gestionada y mantenida en todo momento. La creación y mantenimiento de todas estas referencias tiene un coste que se debe asumir en su implantación.

Frente a la medida convencional de la señal tomada a una determinada frecuencia de trabajo (f_0) y una base de tiempo común se propone un modelo de medición diferencial para varias frecuencias (figura 3.2). Las magnitudes medidas en el receptor (tiempo de llegada, amplitud de la señal, etc.) son relativas (se obtiene la diferencia entre ellas). Este hecho nos permitirá trabajar con referencias temporales independientes de la base de tiempo común y, en determinados escenarios, poderlo aplicar a los sistemas de referencia posicional.

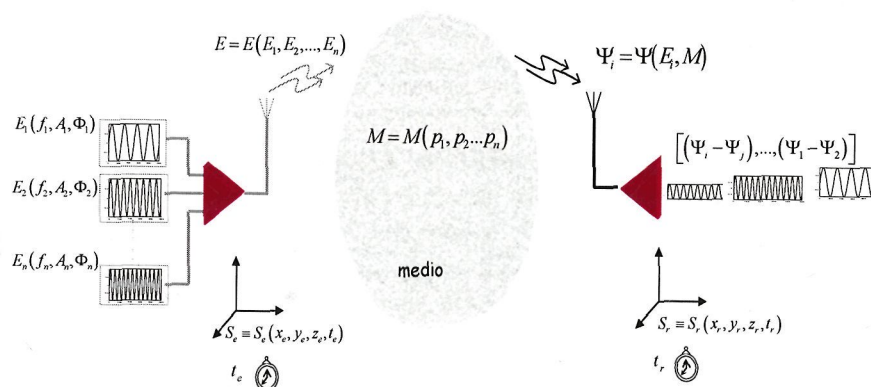


Figura 3.2 Método de tratamiento multifrecuencial. Las medidas diferenciales en el receptor incorporan información con la que calibrar y/o sincronizar los dispositivos. Como consecuencia, la gestión del sistema de referencia tiempo-espacio de la aplicación se simplifica.

El principal argumento sobre el que se sustenta el modelo de tratamiento multifrecuencial es el siguiente: si la interacción onda-medio

56 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

depende de la frecuencia y del medio, diferentes frecuencias inducirán diferentes medidas en el receptor para el mismo medio y el mismo enlace radioeléctrico. La hipótesis de trabajo propone utilizar las diferencias medidas en el receptor para estimar los parámetros del modelo que representa al medio analizado. Como se ha comentado, este tipo de tratamiento de la señal introduce una serie de ventajas operativas sobre el tratamiento convencional: lograr cierta independencia de las necesidades que los sistemas de referencia posicional y temporal. Por otra parte, el tratamiento con diferentes frecuencias permitirá obtener información de la interacción con el medio útil en sistemas que lo analizan y parametrizan. Además, el hecho de medir diferencias compensaría interacciones no deseadas como interferencias o ruidos comunes a todas las frecuencias de trabajo.

Para explicar cómo se llegaría a esta independencia en los sistemas de referencia partimos de un sistema en el que se miden los tiempos de llegada de la señal a un receptor. Si el sistema está compuesto por diferentes emisores y receptores es necesario mantener, en todos ellos, la misma referencia temporal para poder estimar de ese modo el tiempo de llegada. Un emisor y un receptor sincronizados permiten medir el tiempo que transcurre desde la emisión a la recepción de la señal (figura 3.3). Con ese dato podremos determinar la distancia d .

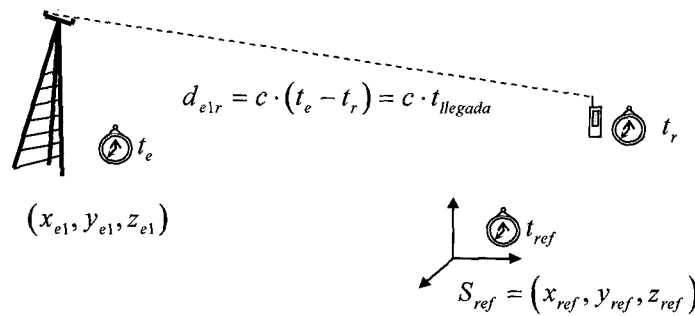


Figura 3.3 Determinación de la distancia mediante el tiempo de llegada. Sistema convencional basado en la sincronización de dispositivos.

Para el caso de nuestro sistema de tratamiento multifrecuencial la sincronización no es necesaria puesto que la referencia temporal está embebida en los retrasos relativos entre las señales de diferente

frecuencia. Si consideramos que la interacción onda medio provoca retrasos en la propagación de la señal y que ésta depende de la frecuencia de trabajo, las velocidades de propagación son diferentes para cada frecuencia. En este escenario, si conocemos la relación de velocidad para cada una de ellas, bastará con medir los retrasos en el receptor para estimar la distancia que ha provocado dicho desfase.

En la figura 3.4 se muestra un ejemplo para dos frecuencias en un escenario donde las velocidades de propagación dependen de la frecuencia en relaciones del tipo $v_{pi} = k_{pi} \cdot c$, siendo v_{pi} la velocidad de propagación para la frecuencia i .

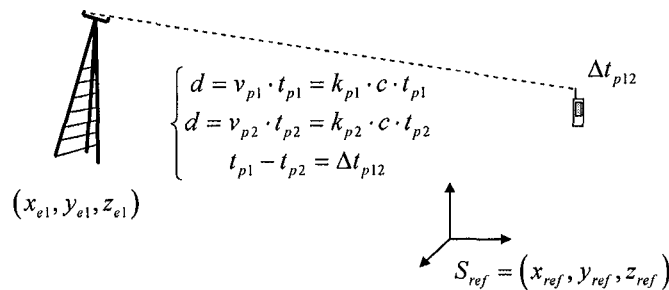


Figura 3.4 Medición de la distancia mediante el retraso de dos señales de diferente frecuencia con diferentes velocidades de propagación. Método multifrecuencial.

En estas condiciones la distancia se estimaría planteando el sistema de ecuaciones 3.2. Se tendría un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas (d, t_{p1}, t_{p2}) donde se conoce k_{p1}, k_{p2} . La medición en el receptor del retraso relativo Δt_{p12} permitirá obtener tanto la distancia de la emisión como los valores de cada uno de los tiempos empleados para cada una de las señales.

$$\begin{cases} d = v_{p1} \cdot t_{p1} = k_{p1} \cdot c \cdot t_{p1} \\ d = v_{p2} \cdot t_{p2} = k_{p2} \cdot c \cdot t_{p2} \\ t_{p1} - t_{p2} = \Delta t_{p12} \end{cases} \quad (3.2)$$

Este tipo de medición permitiría, en entornos locales, eliminar también la referencia posicional debido al hecho de que con la medición relativa, y en escenarios acotados, el tiempo y la distancia se integran en la

propia medición relativa. Es la interacción con el medio la que permitirá extraer de forma indirecta la información que los sistemas de referencia ofrecen en las aplicaciones convencionales.

El método multifrecuencial es complementario a la aplicación mostrada en la figura 3.4 dado que, en el caso que se conozca la distancia d entre el emisor y el receptor, podremos determinar las velocidades de propagación estimando de ese modo los parámetros del medio que atraviesan (k_{p1}, k_{p2}) . Este caso se podrá emplear en aplicaciones en las que se pretenda determinar un medio no conocido.

Se propone, por tanto, utilizar las diferencias de comportamiento (medidas en el receptor) para diferentes frecuencias en dos escenarios complementarios:

- Conocida la interacción onda-medio, podremos estimar la distancia del enlace.
- Conocida la distancia del enlace, podremos estimar el tipo de interacción onda-medio y como consecuencia llegar a analizar el medio.

En ambos casos el sistema de referencia se simplifica mediante la posibilidad de utilizar referencias con bases de tiempo independientes.

Si Ψ es la variable física que representa la interacción de la onda con el medio que atraviesa y $\Psi = \Psi(E, M)$ es la relación que simboliza dicha interacción como una función que depende de la onda electromagnética (representada por la frecuencia o frecuencias utilizadas) y de la composición del propio medio (caracterizado por un conjunto de parámetros), los enlaces a diferentes frecuencias y las mediciones de las diferencias de comportamiento en el receptor darían el siguiente tipo de información:

$$\begin{aligned} \Psi_i - \Psi_j &= \Psi_i(E_i, M) - \Psi_j(E_j, M) \\ \varphi_{ij} &= \varphi_{ij}(\Delta\Psi_{ij}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

φ_{ij} es el dato obtenido en el receptor (medición relativa del desfase, diferencia de amplitud obtenida, o retraso de una señal en relación al resto), Ψ es la variable considerada (tiempo, velocidad, amplitud).

Una vez obtenidos los valores de estas diferencias se plantean, a continuación, sistemas de ecuaciones con los que estimar los parámetros no conocidos del medio M . Si incluimos la distancia como un parámetro más dentro de los parámetros que caracterizan el medio en el momento de la transmisión podremos unificar los dos tipos de aplicaciones complementarias en una sola.

Si el medio, como hemos dicho, está representado por n parámetros $M = M(p_1, p_2 \dots p_n)$ se precisan $n+1$ señales con las que establecer un sistema de n ecuaciones con n incógnitas. En 3.4 se muestra un ejemplo de utilización midiendo la diferencia de tiempo en el receptor,

$$\begin{aligned} \varphi_{ij} &= \Psi_i(t_i, p_1, p_2 \dots p_n) - \Psi_j(t_j, p_1, p_2 \dots p_n) \\ \text{con } [i = 1 \vee 2 \vee \dots \vee (n+1)] \wedge [j = 1, 2, \dots, (n+1)] \end{aligned} \quad (3.4)$$

Las diferencias $\Psi_i - \Psi_j$ medidas en el receptor pueden ser las diferencias de velocidad de propagación, tiempo de llegada, amplitud, polarización, ángulo de recepción o cualquier variable que represente la interacción de la onda electromagnética con el medio atravesado. El objetivo es obtener en el receptor las diferencias de comportamiento y, con ese dato, completar los parámetros no conocidos de la función de transferencia que expresa la interacción onda-medio analizado. La función de transferencia describe el problema de interacción onda-medio y contiene, por tanto, los parámetros que deberán ser estimados.

Los parámetros que caracterizan el modelo propagador de la función de transferencia $(p_1, p_2 \dots p_n)$ pueden ser, desde elementos constitutivos del medio (conductividad σ , permitividad μ , etc.) hasta valores geométricos del entorno (distancias, dimensiones de componentes, etc.).

El modelo que representa la interacción onda-medio determina los parámetros que deben ser estimados. El propio modelo inducirá el tipo de magnitud diferencial que puede utilizarse puesto que, en su utilización, el hecho que marca las diferencias de comportamiento para cada frecuencia está ya predefinido.

La formulación del problema y la solución propuesta son, en realidad, un conjunto de instancias que acotan las posibilidades de la hipótesis planteada y que utilizan el tratamiento multifrecuencial diferencial como mecanismo de tratamiento de la señal. Este tipo de tratamiento de la

señal crea un nexo común a todos los casos y representa la manera de desarrollar la hipótesis de trabajo.

Hasta ahora, la propuesta de tratamiento multifrecuencial ofrece una descripción general del problema a resolver. La formulación y solución a aquellos problemas o grupos de problemas susceptibles de ser resueltos con el tratamiento de medición diferencial será el objetivo planteado en adelante.

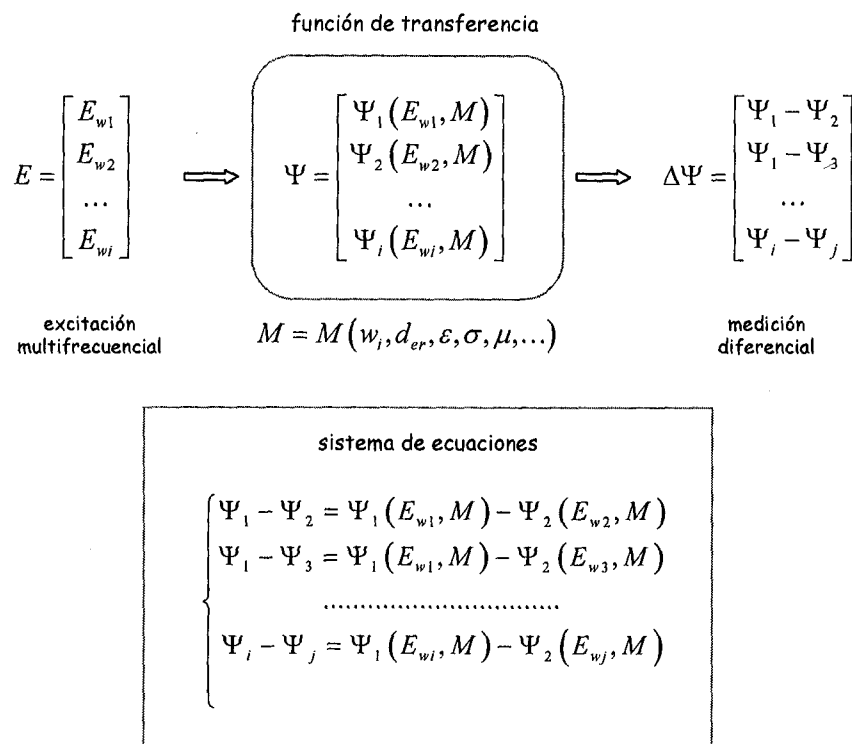


Figura 3.5 Tratamiento multifrecuencial diferencial

Como ya se ha dicho, la identificación de instancias del modelo general presenta dos aspectos comunes: el tipo de interacción que la frecuencia induce en la relación onda-medio y el tratamiento en diferencias de las señales multifrecuenciales en el receptor, ambos serán tratados a continuación.

Tomando la teoría general del electromagnetismo como referencia [17], la propagación de una onda plana en un medio genérico se modela mediante dos parámetros (α, β) que representan la interacción producida entre la onda y los parámetros electromagnéticos $(\varepsilon, \mu, \sigma)$ del medio atravesado (ecuación 3.5).

$$\begin{cases} \alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1 \right]} \\ \beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right]} \end{cases} \quad (3.5)$$

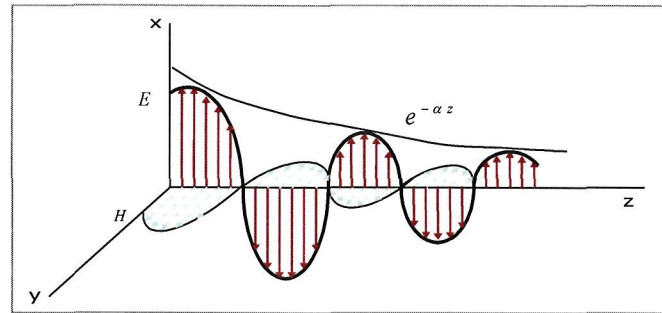


Figura 3.6 Interacción de la onda plana con un medio genérico

Con α se establece la atenuación y con β se determina la velocidad de la onda en el medio en el cual se está propagando, siendo $\beta = \omega/v$, donde v es la velocidad de fase de la onda electromagnética. Según esto la velocidad de propagación es la siguiente:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right]}} \quad (3.6)$$

Se pueden establecer, por tanto, las siguientes relaciones funcionales:

$$v = v(\omega, \varepsilon, \mu, \sigma) \quad (3.7)$$

$$\delta = \delta(\omega, \varepsilon, \mu, \sigma) \quad (3.8)$$

En donde tanto la velocidad de propagación (v), como el grado de penetración (δ) son función de la frecuencia (ω) y de los parámetros electromagnéticos que representan el medio: que en este caso son la permitividad (ε), la permeabilidad (μ) y la conductividad (σ).

A partir de las ecuaciones 3.4 y 3.5 se pueden representar la dependencia de la velocidad de propagación y del grado de penetración de la onda con la frecuencia de la emisión (figuras 3.7 y 3.8). Se toman valores que corresponden con frecuencias de trabajo habituales para los radares utilizados en teledetección [86].

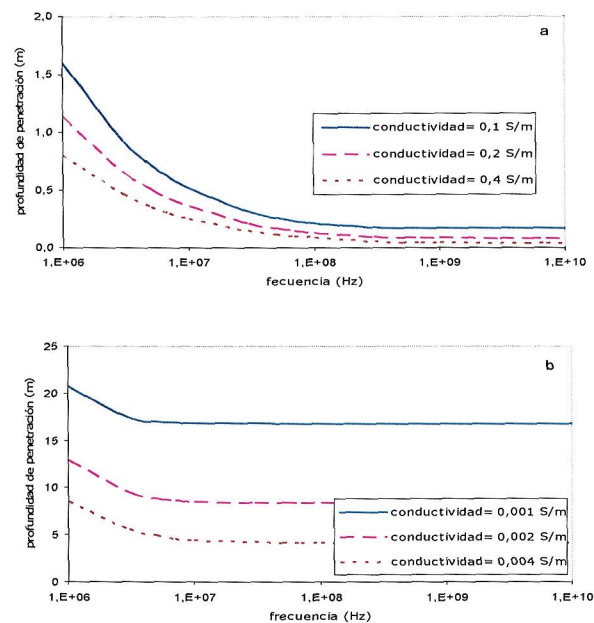


Figura 3.7 Curvas patrón que representan los valores de la profundidad de penetración a) medios de conductividad media. b) medios de conductividad baja.

Se consideran dos grupos de materiales que representan valores medios y bajos de la conductividad. En las diferentes gráficas se observa la relación entre la capacidad de penetración y la velocidad de propagación en función de la conductividad del medio (la permitividad permanece

constante). Este análisis se completa con un conjunto de gráficas (Anexo III) en las que se consideran diferentes tipos de materiales, rangos de frecuencias y valores de la permitividad y conductividad.

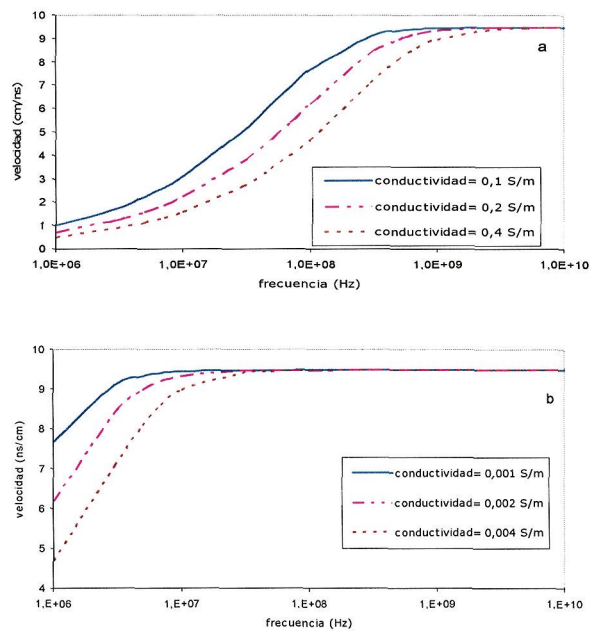


Figura 3.8 Variación de la velocidad con la frecuencia. a) medios de conductividad media. b) medios de conductividad baja.

Se muestra, por tanto, la existencia de rangos de frecuencias en los que, dependiendo del tipo de material, hay comportamientos diferenciales que dependen de la frecuencia de trabajo.

Siguiendo las relaciones anteriores, la aplicación del método multifrecuencial introduce funciones de transferencia que expresan la relación existente entre las señales emitidas y las mediciones diferenciales en el receptor.

En una primera aproximación al proceso de plantear las instancias adecuadas se tratan dos problemas donde se representa la relación existente entre la emisión de señales multifrecuenciales y la medición diferencial de las mismas en el receptor.

- En el primero se presenta un modelo de interacción onda-medio basada en parámetros electromagnéticos pero en el que se desconocen los valores de uno o varios de ellos (figura 3.9). Parámetros como la permitividad, la conductividad o la impedancia podrán ser estimados utilizando la medición de las diferencias en el receptor. Este tipo de planteamiento estaría relacionado con aplicaciones de teledetección y determinación de las propiedades de diferentes tipos de medios.
- En el segundo se conoce tanto el modelo de comportamiento como los valores de los parámetros electromagnéticos que representan la interacción onda-medio, sin embargo se plantea obtener otro tipo de información relacionada con el proceso de emisión, interacción y recepción de la señal. Información como la determinación de la distancia entre el emisor y el receptor de las señales (figura 3.10) puede ser un caso representativo. La resolución de este tipo de problema utilizando mediciones diferenciales tendría interés en los sistemas de localización o determinación de la posición.

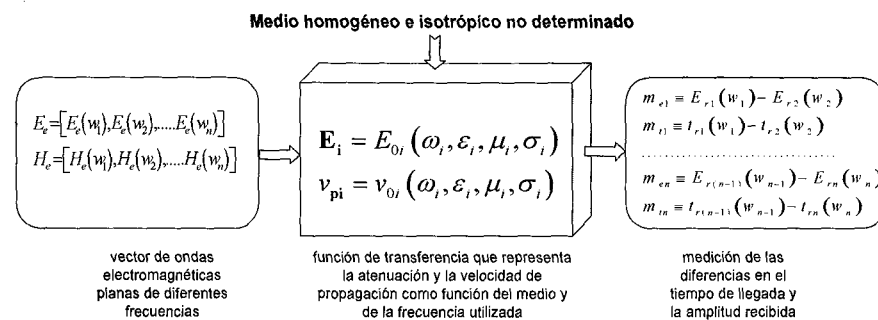


Figura 3.9 Aplicación del método multifrecuencial en problemas de determinación de los parámetros constitutivos del medio.

Ambos grupos de problemas representan dos particularizaciones del modelo de tratamiento multifrecuencial diferencial que podrán ser analizados y resueltos de forma independiente a lo largo del trabajo. De igual modo que ocurre en el análisis del fenómeno electromagnético, el

método de tratamiento multifrecuencial lo estudiamos desde entornos más sencillos (entornos homogéneos, isotrópicos, ondas planas, análisis en una dimensión, etc.) hacia aplicaciones más realistas en donde determinar las posibilidades y limitaciones de su utilización.

Así pues, de aplicaciones en medios simples que utilizan los modelos convencionales de propagación de ondas se pasará a aplicaciones de propagación en medios más complejos donde la influencia de la atmósfera, ionosfera o corteza terrestre determina las condiciones de la propagación de las señales.

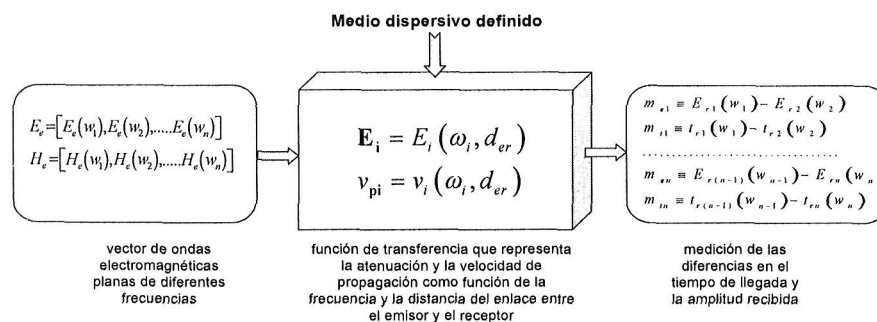


Figura 3.10 Aplicación del método multifrecuencial en problemas de determinación de la distancia entre el emisor y el receptor.

Se formulan casos en los que, además de presentar un comportamiento dependiente de la frecuencia se adecuen a alguna de las dos aproximaciones propuestas ajustándose de ese modo a lo establecido en la hipótesis.

3.2 Propuesta de resolución

La propuesta de solución girará en torno a dos casos prácticos.

- En el primero se plantea el estudio de un medio genérico y la determinación de los parámetros electromagnéticos que lo caracterizan (permitividad, conductividad). Se toma un medio natural dispersivo (las primeras capas de un subsuelo agrícola) y se propone el método de tratamiento multifrecuencial diferencial

con el objetivo de determinar la permitividad efectiva y el espesor de la capa superficial de dicho suelo.

- En el segundo se parte de un medio dispersivo en el que se conocen tanto su modelo de comportamiento como los parámetros que lo caracterizan. Con esta información se determina la distancia entre el emisor y el receptor de la señal multifrecuencial que interaccione con dicho medio.

Caso de estudio 1: caracterización del medio

Según el modelo de interacción onda-medio visto, señales de diferentes frecuencias tienen diferentes velocidades de propagación y diferentes grados de atenuación. Si se miden dichas diferencias en la recepción, entonces se podrán plantear sistemas de ecuaciones de la forma,

$$\begin{cases} \forall w_i, w_j \in [w_1, w_2] \\ v_i - v_j = v_i(\omega_i, \varepsilon_i, \mu_i, \sigma_i) - v_j(\omega_j, \varepsilon_j, \mu_j, \sigma_j) \\ \delta_i - \delta_j = \delta_i(\omega_i, \varepsilon_i, \mu_i, \sigma_i) - \delta_j(\omega_j, \varepsilon_j, \mu_j, \sigma_j) \end{cases} \quad (3.9)$$

Las diferencias de velocidad en el receptor se pueden obtener midiendo las diferencias en los tiempos de llegada. Para obtener las diferencias en el grado de penetración se realizan mediciones de diferencias en la intensidad de campo. Con todo ello las ecuaciones propuestas en (3.9) se convierten en el receptor en mediciones del tipo (3.10)

$$\begin{cases} \forall w_i, w_j \in [w_1, w_2] \\ t_i - t_j = \frac{d_{er}}{v(\omega_i, \varepsilon_i, \mu_i, \sigma_i)} - \frac{d_{er}}{v(\omega_j, \varepsilon_j, \mu_j, \sigma_j)} \\ |E_i| - |E_j| = E_{oi}(\omega_i, \varepsilon_i, \mu_i, \sigma_i) - E_{oj}(\omega_j, \varepsilon_j, \mu_j, \sigma_j) \end{cases} \quad (3.10)$$

En donde $t_i - t_j$ es la diferencia en el tiempo de llegada entre las ondas de frecuencias i, j . $|E_i| - |E_j|$ es la diferencia en la amplitud de las señales de frecuencia i, j y d_{er} es la distancia emisor-receptor. Las ecuaciones que miden las diferencias en la intensidad de campo se formulan atendiendo a la atenuación de la amplitud que sufre una señal en un medio dado. En el caso de que en el receptor podamos obtener las diferencias en los tiempos de llegada ($t_i - t_j$) y en las amplitudes ($|E_i| - |E_j|$) se podrán plantear sistemas de ecuaciones cuyas incógnitas pueden ser los

parámetros electromagnéticos que caracterizan el medio $(\sigma, \varepsilon, \mu)$ o la distancia del enlace (d_{er}) .

$$\forall \omega_i, \omega_j \in [\omega_1, \omega_2] \left\{ \begin{array}{l} t_i - t_j = d_{er} (\beta_i - \beta_j) \\ |E_i| - |E_j| = E_{oi} e^{-\alpha_i d_{er}} - E_{oj} e^{-\alpha_j d_{er}} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

$$\text{con } \left\{ \begin{array}{l} \beta_k = \omega_k \sqrt{\frac{\mu_k \varepsilon_k}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_k}{\omega_k \varepsilon_k} \right)^2} + 1 \right]} \\ \alpha_k = \omega_k \sqrt{\frac{\mu_k \varepsilon_k}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_k}{\omega_k \varepsilon_k} \right)^2} - 1 \right]} \end{array} \right\} \forall [\omega_1, \omega_2]$$

Por otra parte los parámetros electromagnéticos también pueden ser dependientes de la frecuencia dando lugar a un planteamiento más general (3.12).

$$\left\{ \begin{array}{l} t_i - t_j = d_{er} (\beta_i - \beta_j) \\ |E_i| - |E_j| = E_{oi} e^{-\alpha_i d_{er}} - E_{oj} e^{-\alpha_j d_{er}} \end{array} \right\} \forall \omega_i, \omega_j \in [\omega_1, \omega_2] \quad (3.12)$$

con

$$\beta_k = \omega_k \sqrt{\frac{\mu(\omega_k, c_{\mu 1} \dots c_{\mu n}) \varepsilon(\omega_k, c_{\varepsilon 1} \dots c_{\varepsilon n})}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma(\omega_k, c_{\sigma 1} \dots c_{\sigma n})}{\omega_k \varepsilon(\omega_k, c_{\varepsilon 1} \dots c_{\varepsilon n})} \right)^2} + 1 \right]}$$

$$\alpha_k = \omega_k \sqrt{\frac{\mu(\omega_k, c_{\mu 1} \dots c_{\mu n}) \varepsilon(\omega_k, c_{\varepsilon 1} \dots c_{\varepsilon n})}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma(\omega_k, c_{\sigma 1} \dots c_{\sigma n})}{\omega_k \varepsilon(\omega_k, c_{\varepsilon 1} \dots c_{\varepsilon n})} \right)^2} - 1 \right]}$$

Sin embargo, se puede establecer todo un conjunto de condiciones de partida que dependen, en cada caso, del conocimiento del medio en estudio. Así, podemos hablar de medios conductores (con $\sigma \gg \omega \varepsilon$, $\varepsilon = \varepsilon_0$, $\mu = \mu_r \mu_0$), medios dieléctricos (con $\sigma \ll \omega \varepsilon$, $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$, $\mu = \mu_r \mu_0$), o medios que se aproximan al espacio libre (con $\sigma = 0$, $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$, $\mu = \mu_r \mu_0$). En consecuencia, el abanico de posibilidades se amplía y además se simplifica cuando se pueden

establecer condiciones de partida preestablecidas. El objetivo es el de llegar a un sistema con el mismo número de ecuaciones que de incógnitas o superior. Los parámetros que caracterizan el medio pueden estar representados por relaciones teóricas o experimentales que dependen, a su vez, de la propia frecuencia de trabajo en relaciones del tipo $\varepsilon_k = \varepsilon(\omega_k, c_{\varepsilon 1}, \dots, c_{\varepsilon n}) \forall k \in (\omega_1, \omega_2)$, en donde el parámetro que caracteriza el medio, en este caso ε , es función de la frecuencia ω_k y de las constantes $c_{\varepsilon 1}, \dots, c_{\varepsilon n}$ dadas para el rango de frecuencias establecido. Como consecuencia, el número de incógnitas vendría dado por las funciones que expresan los parámetros del medio.

En función del número de incógnitas se deberán tomar mayor número de pares de frecuencias con las que medir sus retrasos y sus diferencias de intensidad en el receptor. Como ejemplo supongamos un medio en el que, para el rango de frecuencias estudiado, se establecen las siguientes relaciones:

$$\varepsilon_k = c_{1\varepsilon} \omega_k + c_{2\varepsilon}, \mu_k = \mu_0, \sigma_k = c_{1\sigma} \omega_k + c_{2\sigma} \quad (3.13)$$

En este caso el número de incógnitas a resolver son 4 ($c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}, c_{1\sigma}, c_{2\sigma}$) por lo que se necesitan tres frecuencias con las que realizar las correspondientes mediciones relativas (3.11).

$$\left\{ \begin{array}{l} |E_1| - |E_2| = E_{o1} e^{-\alpha_1 d_{er}} - E_{o2} e^{-\alpha_2 d_{er}} \\ \Delta T_{12} = d_{er} (\beta_1 - \beta_2) \end{array} \right\}$$

con

$$\beta_i = \omega_i \sqrt{\frac{\mu_0 (c_{1\varepsilon} \omega_i + c_{2\varepsilon})}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{c_{1\sigma} \omega_i + c_{2\sigma}}{\omega_i (c_{1\varepsilon} \omega_i + c_{2\varepsilon})} \right)^2} + 1 \right]} \quad (3.14)$$

$$\alpha_i = \omega_i \sqrt{\frac{\mu_0 (c_{1\varepsilon} \omega_i + c_{2\varepsilon})}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{c_{1\sigma} \omega_i + c_{2\sigma}}{\omega_i (c_{1\varepsilon} \omega_i + c_{2\varepsilon})} \right)^2} - 1 \right]}$$

con $i = 1, 2, 3$ para las frecuencias ω_i ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$)

Si sólo se utilizasen mediciones en el tiempo se precisarían al menos cinco frecuencias, las mismas que necesitaría si sólo trabajase con amplitudes. Para el caso expresado se podrían obtener las diferencias en

los tiempos de llegada y amplitudes $\Delta T_{12}, \Delta T_{13}, \Delta E_{13}$. Como la distancia del enlace d_{er} se conoce se establecen cuatro ecuaciones necesarias para determinar los parámetros del modelo del medio puesto de ejemplo (3.13) cuyas ecuaciones derivan de 3.14.

La aplicabilidad del modelo se puede extender a ámbitos en los que las técnicas empleadas sólo permitan trabajar con un determinado tipo de medición. Es decir, sólo medir diferencias de tiempo o sólo medir diferencias en las amplitudes. En este caso el rango de frecuencias necesario aumentaría. Si tomamos las diferencias en el tiempo se tiene la expresión 3.15.

$$\begin{aligned}\Delta T_{12} &= d_{er}(\beta_1 - \beta_2) \\ \Delta T_{13} &= d_{er}(\beta_1 - \beta_3) \\ \Delta T_{14} &= d_{er}(\beta_1 - \beta_4) \\ \Delta T_{15} &= d_{er}(\beta_1 - \beta_5)\end{aligned}\quad (3.15)$$

con

$$\beta_i = \omega_i \sqrt{\frac{\mu_0 (c_{1\varepsilon} \omega_i + c_{2\varepsilon})}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{c_{1\sigma} \omega_i + c_{2\sigma}}{\omega_i (c_{1\varepsilon} \omega_i + c_{2\varepsilon})} \right)^2} + 1 \right]}$$

con $i = 1, 2, 3, 4, 5$

De forma simétrica si sólo se utilizasen diferencias en las amplitudes se llegaría a la expresión 3.16.

El modelo de interacción que defina la función de transferencia puede ser genérico, aplicable a un amplio rango de frecuencias y medios (Debye, Rayleigh, Cole-Cole), pero también puede ser un modelo específico que represente el escenario y las condiciones de la aplicación. Ejemplos de este último tipo los tenemos en la lluvia y su modelo de gotas de agua, la ionosfera y su modelo dispersivo o los tejidos biológicos con modelos basados en impedancia electromagnética.

Con estos antecedentes, la función de transferencia puede tomar dos puntos de partida. Podemos encontrarnos un escenario en el que se pretende determinar las condiciones o composición de un medio cuyo modelo de comportamiento frente a las frecuencias utilizadas se conoce

o bien escenarios para los que no se ha establecido ningún modelo de comportamiento propio. Para el primer escenario la utilización del sistema de ecuaciones visto que lo resuelva es directa. Para el segundo, el medio deberá, o bien ligarse a un modelo de comportamiento genérico, o bien generar el modelo propio, sobre el que determinar las relaciones funcionales de los parámetros electromagnéticos con las frecuencias de trabajo.

$$\begin{aligned}
 |E_1| - |E_2| &= E_{o1} e^{-\alpha_1 d_{er}} - E_{o2} e^{-\alpha_2 d_{er}} \\
 |E_1| - |E_3| &= E_{o1} e^{-\alpha_1 d_{er}} - E_{o3} e^{-\alpha_3 d_{er}} \\
 |E_1| - |E_4| &= E_{o1} e^{-\alpha_1 d_{er}} - E_{o2} e^{-\alpha_4 d_{er}} \\
 |E_1| - |E_5| &= E_{o1} e^{-\alpha_1 d_{er}} - E_{o3} e^{-\alpha_5 d_{er}}
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

con

$$\alpha_i = \omega_i \sqrt{\frac{\mu_0 (c_{1\varepsilon} \omega_i + c_{2\varepsilon})}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{c_{1\sigma} \omega_i + c_{2\sigma}}{\omega_i (c_{1\varepsilon} \omega_i + c_{2\varepsilon})} \right)^2} - 1 \right]}$$

con $i = 1, 2, 3, 4, 5$

En cualquier caso, sea el medio que sea, la función de transferencia que modela el comportamiento con el que plantear el sistema de ecuaciones adecuado se toma de los modelos definidos o se genera en último caso de forma explícita. Unas veces será un modelo particularizado al medio y otras será un modelo de comportamiento genérico.

A continuación se mostrará, mediante un caso práctico, la formulación y resolución de un problema en el que se estima uno de los parámetros no conocidos de la función de transferencia que representa la interacción onda-medio.

Se parte de un medio simple (terreno agrícola) cuya permitividad efectiva depende de la frecuencia. En el laboratorio se ha establecido su valor para dos frecuencias de referencia [76]. Para este tipo de material, en el rango de las microondas, se establece una relación del tipo:

$$\varepsilon_{ef} = k_1 w + k_2 \tag{3.17}$$

El medio, cuyo modelo de comportamiento se conoce mediante la expresión 3.17, forma una primera capa en un terreno en el que se desea realizar una prospección con ondas electromagnéticas.

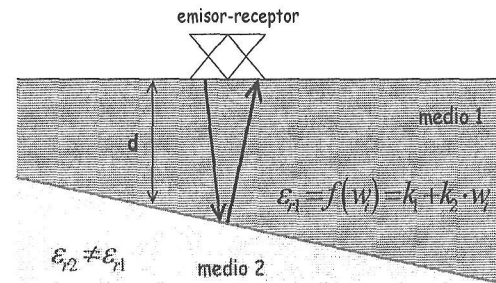


Figura 3.11 Determinación del grosor de la capa superficial en una aplicación basada en el radar de subsuelo.

El objetivo es estimar la permitividad efectiva y el grosor de este material que forma la primera capa del suelo objeto de estudio. La capa inferior a dicha capa posee propiedades electromagnéticas diferentes del material superficial tales que se produce la reflexión de la señal cuando ésta incide sobre ella (figura 3.11). Se desea estimar tanto la permitividad efectiva ϵ_{er} como la distancia de reflexión con el otro medio.

Por cada frecuencia de trabajo utilizada se introduce una nueva variable definida como el tiempo de llegada de la señal. Para plantear el sistema de ecuaciones es necesario, por tanto, cuatro frecuencias de trabajo.

Con ello se tienen cuatro ecuaciones del tipo:

$$d_{er} = \frac{c \cdot t}{\sqrt{k_1 + k_2 \cdot f}} \quad (3.18)$$

y tres ecuaciones del tipo

$$t_i - t_j = \Delta T_{ij} \quad (3.19)$$

Se tiene un sistema de siete ecuaciones con siete incógnitas ($t_1, t_2, t_3, t_4, k_1, k_2, d_{er}$). La información obtenida de la simulación serían los valores medidos de las diferencias de tiempo ($\Delta T_{12}, \Delta T_{13}, \Delta T_{14}$). Resaltar

72 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

que la simulación, en este nivel, sustituye a las mediciones realizadas en el laboratorio.

Tras realizar la simulación para una distancia de 50 cm se obtienen los valores dados en 3.20.

$$\begin{aligned}t_1 - t_2 &= \Delta T_{12} = 0.4718 \\t_1 - t_3 &= \Delta T_{13} = 0.9867 \\t_1 - t_4 &= \Delta T_{14} = 1.5594\end{aligned}\tag{3.20}$$

A continuación se plantea el sistema de ecuaciones 3.21.

$$\begin{aligned}d_{er} &= \frac{c \cdot t_1}{\sqrt{k_1 + k_2 \cdot \omega_1}} \\d_{er} &= \frac{c \cdot t_2}{\sqrt{k_1 + k_2 \cdot \omega_2}} \\d_{er} &= \frac{c \cdot t_3}{\sqrt{k_1 + k_2 \cdot \omega_3}} \\d_{er} &= \frac{c \cdot t_4}{\sqrt{k_1 + k_2 \cdot \omega_4}} \\t_1 - t_2 &= 0.4718 \\t_1 - t_3 &= 0.9867 \\t_1 - t_4 &= 1.5594\end{aligned}\tag{3.21}$$

El cual se procede a resolver utilizando métodos de resolución numérica utilizados en los sistemas de ecuaciones no lineales. De las diferentes alternativas, el método del descenso más rápido logra aproximaciones iniciales suficientemente exactas. El método del descenso más rápido determina un mínimo local para una función de varias variables de la forma $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. La conexión entre la minimización de una función de \mathbb{R}^n a \mathbb{R} y la solución de un sistema de ecuaciones no lineales se debe al hecho de que un sistema de la forma presentada en 3.22.

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0, \\
 f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0, \\
 &\vdots \\
 f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

Tiene una solución en $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)'$ justo cuando la función g definida en (3.23).

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n [f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)]^2
 \tag{3.23}$$

tiene el valor mínimo cero.

El método del descenso más rápido para encontrar un mínimo local de una función arbitraria $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ puede describirse de forma intuitiva así [7]:

- Evaluar g en una aproximación inicial $x^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})'$.
- Determinar una dirección de $x^{(0)}$ que origine una disminución del valor de g .
- Desplazar una cantidad apropiada hacia esta dirección y llamar a este nuevo vector $x^{(1)}$.
- Repetir los pasos 1 a 3 reemplazando $x^{(0)}$ por $x^{(1)}$.

La dirección de la máxima disminución del valor de g en x es la dirección dada por el gradiente $(-\nabla g(x))$ [6]. Como la finalidad es reducir $g(x)$ a su valor mínimo cero, una elección apropiada de $x^{(1)}$ será:

$$x^{(1)} = x^{(0)} - \alpha \nabla g(x^{(0)})
 \tag{3.24}$$

El problema se reduce así a escoger α tal que $g(x^{(1)})$ sea significativamente menor que $g(x^{(0)})$.

Para el sistema de ecuaciones del ejemplo (3.21) las funciones que componen g son:

$$\begin{aligned}
 f_1(t_1, t_2, t_3, t_4, k_1, k_2, d_{er}) &= \frac{c \cdot t_1}{\sqrt{k_1 + k_2 \cdot \omega_1}} - d_{er} \\
 f_2(t_1, t_2, t_3, t_4, k_1, k_2, d_{er}) &= \frac{c \cdot t_2}{\sqrt{k_1 + k_2 \cdot \omega_2}} - d_{er} \\
 f_3(t_1, t_2, t_3, t_4, k_1, k_2, d_{er}) &= \frac{c \cdot t_3}{\sqrt{k_1 + k_2 \cdot \omega_3}} - d_{er} \\
 f_4(t_1, t_2, t_3, t_4, k_1, k_2, d_{er}) &= \frac{c \cdot t_4}{\sqrt{k_1 + k_2 \cdot \omega_4}} - d_{er} \quad (3.25) \\
 f_4(t_1, t_2, t_3, t_4, k_1, k_2, d_{er}) &= t_1 - t_2 - 0.4718 \\
 f_5(t_1, t_2, t_3, t_4, k_1, k_2, d_{er}) &= t_1 - t_3 - 0.9867 \\
 f_6(t_1, t_2, t_3, t_4, k_1, k_2, d_{er}) &= t_1 - t_4 - 1.5594
 \end{aligned}$$

con

$$g(t_1, t_2, t_3, t_4, k_1, k_2, d_{er}) = \sum_{i=1}^6 [f_i(t_1, t_2, t_3, t_4, k_1, k_2, d_{er})]^2 \quad (3.26)$$

El gradiente de la función $g(x)$ en $x = (t_1, t_2, t_3, t_4, k_1, k_2, d_{er})$ es

$\nabla g = \left(\frac{\partial g}{\partial t_1}, \frac{\partial g}{\partial t_2}, \frac{\partial g}{\partial t_3}, \frac{\partial g}{\partial t_4}, \frac{\partial g}{\partial k_1}, \frac{\partial g}{\partial k_2}, \frac{\partial g}{\partial d_{er}} \right)'$ que para la función 3.26 se corresponde con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 \nabla g(t_1, t_2, t_3, t_4, k_1, k_2, d_{er}) &= \left(2f_1 \frac{\partial f_1}{\partial t_1} + 2f_2 \frac{\partial f_2}{\partial t_1} + \dots + 2f_6 \frac{\partial f_6}{\partial t_1}, \right. \\
 &\quad 2f_1 \frac{\partial f_1}{\partial t_2} + 2f_2 \frac{\partial f_2}{\partial t_2} + \dots + 2f_6 \frac{\partial f_6}{\partial t_2}, \\
 &\quad \dots, \\
 &\quad \left. 2f_1 \frac{\partial f_1}{\partial d_{er}} + 2f_2 \frac{\partial f_2}{\partial d_{er}} + \dots + 2f_6 \frac{\partial f_6}{\partial d_{er}} \right) \quad (3.27)
 \end{aligned}$$

Los resultados obtenidos para diferentes distancias en el medio dado se presentan en la figura 3.12.

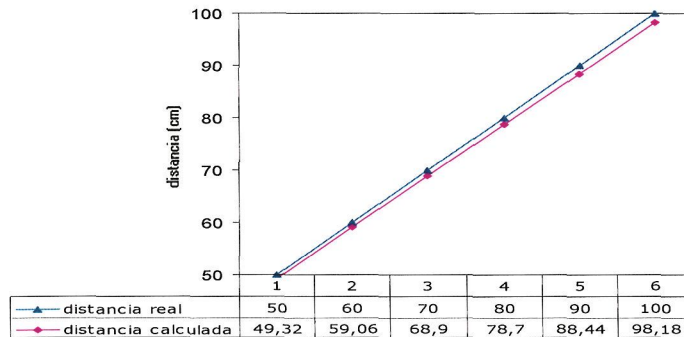


Figura 3.12 Resultados de la determinación de la distancia del enlace

Se han analizado 6 distancias para un enlace en un medio cuya interacción con la onda electromagnética sigue el modelo específico dado en 3.17. A partir del tipo de comportamiento expresado se ha calculado el sistema de ecuaciones para cada distancia. En 3.12a se presentan los resultados obtenidos en la resolución de 3.5 con los valores de la distancia estimada frente a la distancia real. De igual modo se obtienen los parámetros del medio (k_1, k_2) en 3.13 que si bien se conocen de forma teórica también han sido introducidos como variables del sistema de ecuaciones.

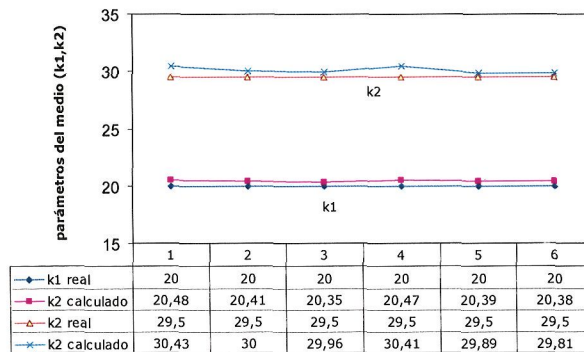


Figura 3.13 Resultados de la estimación de los parámetros del medio

En la figura 3.14 se muestran los valores efectivos de la permitividad teórica y la permitividad resultante después de resolver el sistema de ecuaciones.

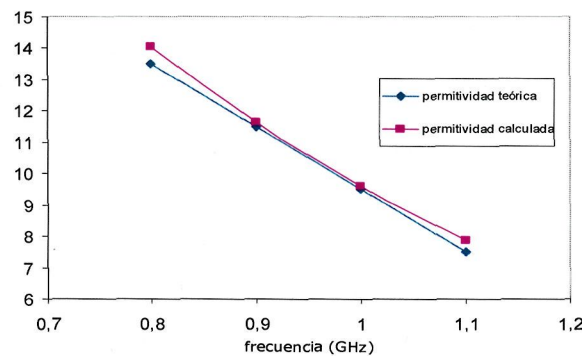


Figura 3.14 Resultados del cálculo de la permitividad efectiva del medio

Caso de estudio 2: sistemas de posicionamiento

Supongamos un medio cuyos parámetros electromagnéticos y su relación con la frecuencia es conocida. Si planteamos el tratamiento multifrecuencial diferencial podremos determinar cualquier otro tipo de información relacionada con el proceso de emisión, interacción y recepción de la señal en el medio dado.

Tomando el sistema de ecuaciones adaptado al medio podremos calcular la distancia del enlace (d_{er}). Este dato es fundamental para aplicaciones que pretendan determinar la posición de cualquier receptor dentro de un sistema de posicionamiento. Si conocemos la distancia a tres puntos de referencia (d_{e1}, d_{e2}, d_{e3}) obtendremos la posición del receptor (u_x, u_y, u_z) mediante la resolución del sistema de ecuaciones,

$$\begin{aligned} (x_1 - u_x)^2 + (y_1 - u_y)^2 + (z_1 - u_z)^2 &= d_{e1}^2 \\ (x_2 - u_x)^2 + (y_2 - u_y)^2 + (z_2 - u_z)^2 &= d_{e2}^2 \\ (x_3 - u_x)^2 + (y_3 - u_y)^2 + (z_3 - u_z)^2 &= d_{e3}^2 \end{aligned} \quad (3.28)$$

En este caso la distancia del enlace quedará determinada por la medición relativa de tiempos para un par de frecuencias. Se parte del

comportamiento conocido del medio ante un rango de frecuencias determinado.

El sistema de ecuaciones que se plantea es el definido en 3.29.

$$\Delta T_{12} = d_{er}(\beta_1 - \beta_2)$$

con

$$\beta_k = \omega_k \sqrt{\frac{\mu_k \epsilon_k}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_k}{\omega_k \epsilon_k} \right)^2} + 1 \right]} \quad (3.29)$$

con $k = 1, 2$

Además del modelo genérico presentado existen otro tipo de medios que, por su composición o importancia, poseen un modelo particularizado con el que analizar el comportamiento dispersivo de la interacción onda-medio. La ionosfera, el océano o la atmósfera cuentan con modelos propios para determinados rangos de frecuencias.

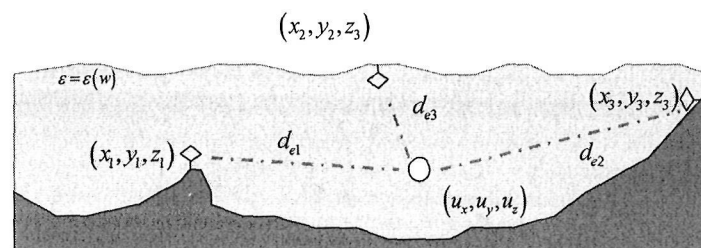


Figura 3.15 Posicionamiento en medio dispersivo

Como conclusión a este tipo de aplicaciones, el escenario sobre el que se pretenda obtener la distancia del enlace deberá estar representado por un modelo de comportamiento que dependa de la frecuencia y de los parámetros del medio. La dispersión provocará retrasos entre las diferentes señales. Si se miden dichos retrasos se podrán estimar las distancias que los han provocado.

78 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

Los modelos teóricos que representan el comportamiento de la interacción onda-medio son aproximaciones y simplificaciones a la realidad del fenómeno. Si bien se conoce el tipo de comportamiento en determinados rangos de frecuencia y medios (Debye, Rayleigh, Cole-Cole) la determinación exacta para todas las frecuencias y medios en un rango dado no está disponible por el hecho de que el análisis no se individualiza a tal nivel. Este tipo de estudio particularizado se realiza en rangos y medios acotados que luego serán llevados a expresiones válidas para las condiciones del estudio. Para estos últimos se obtienen modelos parametrizados que contemplan la singularidad del medio y las condiciones de contorno adecuados.

La aplicabilidad del sistema de ecuaciones depende, en primer lugar, del conocimiento del comportamiento del medio (representado por un modelo parametrizado) a las frecuencias de trabajo y en segundo lugar de la existencia de los fenómenos de dispersión en un grado que haga posible la medición de diferencias temporales con las que abordar la solución del sistema de ecuaciones planteado. Como ejemplo que ilustre las posibilidades del método tomamos un medio dispersivo cuyo principal característica es su fuerte dependencia con la frecuencia de trabajo.

Los modelos de medios dispersivos son variados y representan diferentes tipos materiales. La expresión 3.30 se tiene la permitividad de un medio dispersivo genérico según la formulación de Debye. En la 3.31 la permitividad de un plasma no magnetizado.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0} + \frac{\chi_1}{1 + j\omega t_0} \quad (3.30)$$

Siendo χ_1 la susceptibilidad y t_0 el tiempo de relajación.

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega(j\nu_c - \omega)} \quad (3.31)$$

Donde ω_p representa la frecuencia de plasma y ν_c la frecuencia de colisión de los electrones. Para la determinación de distancias en este tipo de medios y si se van a tomar medidas de diferencias en los tiempos de propagación se tomará la parte real de la permitividad del modelo de

medio en estudio. Si se toma el modelo de Debye se obtiene el sistema de ecuaciones dado en la expresión 3.15.

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{12} &= d_{er}(\beta_1 - \beta_2) \\
 \Delta T_{13} &= d_{er}(\beta_1 - \beta_3) \\
 &\dots\dots\dots \\
 \Delta T_{1i} &= d_{er}(\beta_1 - \beta_i)
 \end{aligned}
 \tag{3.32}$$

con

$$\beta_k = \omega_k \sqrt{\frac{\mu_0 \left(\varepsilon_r + \frac{\chi}{1 - w^2 t_0} \right)}{2} \left[1 + \frac{\sigma}{\omega_k \left(\varepsilon_r + \frac{\chi}{1 - w^2 t_0} \right)} \right]^2 + 1}$$

$k = 1, 2, \dots, i$

Aquí se pueden considerar como incógnitas la distancia del enlace (d_{er}), la permitividad relativa (ε_r), la conductividad del medio (σ) o cualquier otro parámetro expresado en el modelo de comportamiento. Para tres incógnitas se precisan cuatro frecuencias con las que medir las tres diferencias temporales necesarias. Para una incógnita (d_{er}) sólo se precisarían dos frecuencias de trabajo.

Además de estos modelos genéricos existen otro tipo de medios que, por su composición, poseen una función particularizada con la que analizar su comportamiento frente a las ondas electromagnéticas. El comportamiento del agua marina en la región de las microondas es un caso de estudio que cumple con estas premisas. Para regiones inferiores al UHF el agua de mar se comporta como conductor, es a partir de esta región de las microondas cuando la interacción onda electromagnética con el agua de mar sigue las premisas de un dieléctrico con pérdidas.

La relación entre la conductividad, permitividad y frecuencia es la siguiente:

$$\frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon} = \frac{9 \cdot 10^8}{f (MHz)}
 \tag{3.33}$$

Conocida la relación de dependencia de la permitividad con la frecuencia podemos plantear el sistema de ecuaciones 3.34.

$$d_{er} = \frac{c \cdot t_1}{\sqrt{k \cdot \omega_1}}$$

$$d_{er} = \frac{c \cdot t_2}{\sqrt{k \cdot \omega_2}}$$

$$d_{er} = \frac{c \cdot t_3}{\sqrt{k \cdot \omega_3}} \quad (3.34)$$

$$t_1 - t_2 = \Delta T_{12}$$

$$t_1 - t_3 = \Delta T_{13}$$

Para poder resolver el sistema de ecuaciones se deben obtener las diferencias ΔT_{12} y ΔT_{13} en el receptor. Se toma para ello los datos de la conductividad eléctrica que para este rango y medio son de $4 \Omega^{-1} m^{-1}$, según la especificación ITU254. Con este dato las diferencias en el receptor pueden calculadas y, de este modo, solucionar el sistema de ecuaciones de igual modo que en el caso de estudio 1. Una vez determinadas las distancias a las referencias correspondientes se podrán establecer la posición del receptor mediante la resolución del sistema planteado en 3.28.

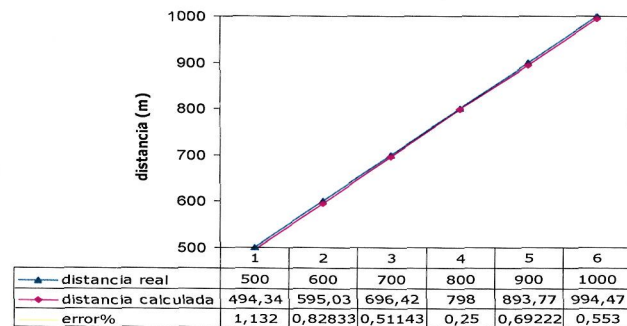


Figura 3.16 Resultados de la determinación de la distancia del enlace.

Cada una de las distancias al receptor introducirá un error que depende tanto de la exactitud del modelo del medio como de la medición de las diferencias en el receptor. Para este caso se ha realizado sendos estudios sobre la sensibilidad del sistema de ecuaciones frente a errores producidos tanto en la estimación del medio como en la medición de las

diferencias en el receptor. Las figuras 3.16 y 3.17 muestran los resultados obtenidos.

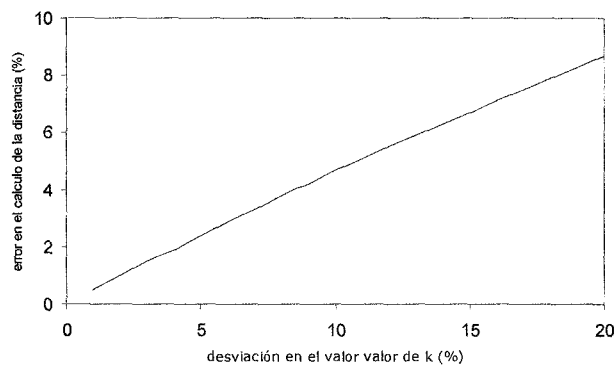


Figura 3.17 Error en la determinación de la distancia ante desviaciones en la estimación del medio.

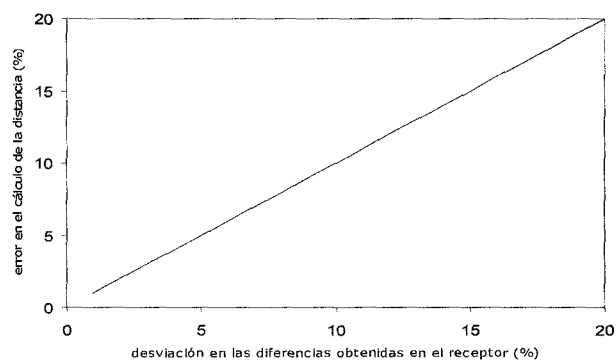


Figura 3.18 Error en la determinación la distancia ante desviaciones en la medición de las diferencias en el receptor.

Como se observa en la gráfica de la figura 3.18, la prop el error en la medición temporal y su propagación a la determinación de la distancia es directa. Si a esto añadimos que el orden de magnitud de la velocidad de propagación se conoce podremos acotar los niveles de precisión teóricos en función de las diferencias en el receptor de la magnitud de la distancia calculada. Suponemos para ello que se tienen dos señales, cuyas velocidades de propagación son las expresadas en 3.35, en un

sistema de posicionamiento cuyos límites están establecidos para la distancia d_{er} .

$$v_{p1} = \frac{c}{k_1} \quad (3.35)$$

$$v_{p2} = \frac{c}{k_2}$$

La relación que existe entre las diferencias obtenidas en el receptor y las diferencias en la velocidad de propagación es la de la expresión 3.36. A partir de esta relación se muestran, en la figura 3.19, un conjunto de curvas con las diferencias obtenidas en el receptor en función del nivel de dispersión del medio (expresado en las diferencias de velocidad de propagación) y de la distancia del enlace.

$$t_1 - t_2 = (k_1 - k_2) \frac{d_{er}}{c} \quad (3.36)$$

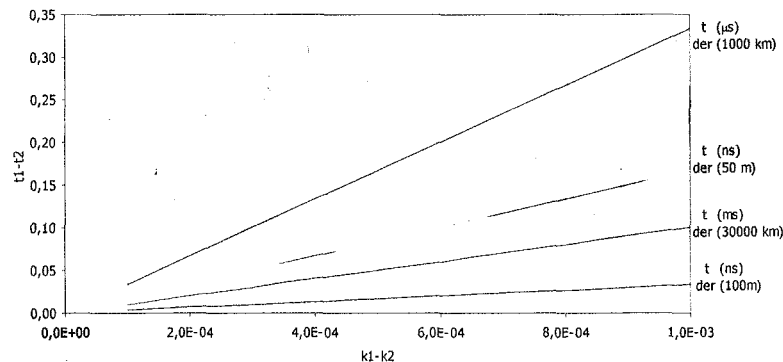


Figura 3.19 Diferencias de tiempo en el receptor en función de las velocidades y la distancia medida

Con este estudio se establecen una serie de requerimientos del método el cual es sensible al orden de magnitud de las diferencias obtenidas en el receptor y a las distancias del sistema de posicionamiento. Es necesario que se manifiesten fenómenos de dispersión y que estos sean captados como tales en el receptor. Dependiendo de la magnitud de la diferencia y de la distancia se podrán establecer los límites teóricos de la precisión.

3.3 Conclusiones

Del estudio teórico realizado en cada uno de los dos casos tratados se obtienen sendas conclusiones:

- Dado un medio M y un rango de frecuencias para el cual existe un modelo parametrizado que representa los mecanismos de interacción onda-medio. Si dicha interacción es función de la frecuencia de la señal y se establecen enlaces multifrecuenciales se obtendrán diferencias en la recepción de cada frecuencia. Dichas diferencias dependen del medio y podrán ser utilizadas como información con la que calcular aquellos parámetros no conocidos del modelo que representa la propia interacción onda-medio.
- Dado un medio M dispersivo cuyo modelo de interacción con las ondas electromagnéticas que lo atraviesan se conoce entonces podremos determinar la distancia del enlace emisor-receptor (d_{er}) utilizando el tratamiento multifrecuencial diferencial.

Una vez realizado el análisis teórico, con el que se obtienen las primeras conclusiones sobre las posibilidades del método, es necesario profundizar en su estudio y acercarnos a niveles más realistas. Si para justificar la medición multifrecuencial diferencial, hemos utilizado modelos generales que nos proporcionaban el resultado final de la interacción onda-medio, para aproximarnos a los fenómenos producidos durante dicha interacción e introducir los aspectos específicos de las aplicaciones, debemos estudiar los fenómenos en el momento en que se producen y analizar cómo evoluciona según las condiciones del entorno. La herramienta con la que se realiza este tipo de estudio es la formulación y resolución de las ecuaciones de Maxwell. Cada escenario introducirá sus propias condiciones de contorno y sus propios requerimientos.

La dificultad en la resolución de las ecuaciones obliga, en muchos casos, a buscar simplificaciones que faciliten la resolución de un problema dado. Sin embargo, gracias a la aparición de las técnicas basadas en computación se han introducido nuevas posibilidades y métodos de trabajo con los que analizar el problema electromagnético. En general existen métodos muy potentes que solucionan el problema basándose en un análisis completo del comportamiento de la señal. Con el tratamiento numérico se permitirá obtener información de los parámetros de una

84 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

onda electromagnética que se propaga en un medio físico, tanto en el tiempo como en el espacio.

La utilización del computador como herramienta y el tratamiento numérico como método trazan la línea a seguir en la solución al problema propuesto. Si a estas premisas le incorporamos la del diseño y realización de una herramienta de simulación adaptada tendremos todos los elementos con los que abordar la siguiente etapa.

La simulación de la propagación de ondas electromagnéticas y su interacción con el medio que atraviesa nos proporcionará un escenario sobre el que abordar el problema del tratamiento multifrecuencial diferencial. Los modelos de representación del medio pueden contrastarse y los valores de los parámetros que los completan podrán calcularse utilizando técnicas de simulación con las condiciones de contorno adecuadas. Todo ello nos permitirá profundizar en el método y nos servirá como fuente de información para el diseño de prototipos experimentales.

Como consecuencia, se define un método de trabajo común a cualquier aplicación estudiada mediante la medición diferencial de señales multifrecuenciales en el receptor. Este método establece tres partes diferenciadas:

- Inicialmente se constituyen las condiciones de contorno e iniciales de cada simulación. El modelo que representa la interacción con el medio deberá determinarse en función del conocimiento que se tenga sobre el escenario en estudio.
- De igual modo que la preparación del modelo de interacción, la técnica de resolución utilizada en la simulación debe ser configurada. Mediante los algoritmos de cálculo numérico adecuados obtendremos la información cuantificada de las diferencias que obtendríamos en el receptor.
- Finalmente, los datos obtenidos son introducidos en los sistemas de ecuaciones mediante los cuales se pretende obtener los parámetros del modelo no conocidos. Su resolución y posterior análisis se utilizarán para extraer las conclusiones que corresponden a la aplicación en estudio.

El método de trabajo con el que abordaremos la siguiente fase tendrá a la simulación por computador como herramienta clave en la adquisición

Capítulo 3. Formulación del problema y propuesta de resolución 85

de información y de nuevas conclusiones relacionadas con la hipótesis de partida.

En el siguiente capítulo se establecen los requerimientos, se diseña y se implementa un entorno de simulación adaptado al problema en estudio.

Capítulo 4

Simulación del proceso de interacción onda-medio

Entre el experimento directo, que tantos coscorriones le costó a Newton – sin mencionar a Curie – y el mero boceto de Leonardo, la simulación es al método científico lo que la sogá al caldero, para los profanos.

J. M. García Chamizo

4.1 Introducción

En los capítulos anteriores hemos propuesto el tratamiento multifrecuencial como una herramienta con la que obtener información acerca de determinados parámetros no conocidos del medio. El análisis previo ha tomado la teoría general del electromagnetismo en la cual existen modelos de comportamiento preestablecidos. A través de ellos se han analizado los procesos y mecanismos producidos en la interacción onda-medio y se han obtenido las primeras conclusiones acerca del alcance de la hipótesis de trabajo planteada. Dar un paso más en la resolución del problema supone analizar todo lo que sucede durante el proceso de interacción onda-medio.

Si hasta ahora los modelos teóricos nos ofrecían el resultado final para determinados escenarios y condiciones ideales, con el análisis de los

fenómenos que acontecen en el momento en que la señal se propaga podremos acercarnos más a la realidad y ampliar el número de escenarios y condiciones de estudio. Este incremento de la complejidad en el cálculo establece la necesidad de contar con los métodos y herramientas de trabajo adecuados al nivel establecido. Los métodos de tratamiento numérico y la utilización de herramientas de simulación por computador adaptadas al problema cumplen con dicho requerimiento. Tanto la utilización del cálculo numérico en la resolución de los problemas del electromagnetismo como el diseño y realización de una herramienta de simulación adecuada se tratan con detalle en los anexos I y II de este documento.

La utilización de la herramienta de simulación diseñada con estos requerimientos permite una visualización dinámica y una interactividad del usuario con el modelo dinámico. Esto dotará a la simulación de mecanismos potentes para que el usuario pueda contestar preguntas, entre otras, del tipo ¿qué pasaría si...? o ¿se podría conseguir que...?

Con más frecuencia de lo que en un principio podemos pensar, las ideas en la arena científica surgen de situaciones concretas y visuales. Nuestra percepción de la realidad es esencialmente visual y no es de extrañar que este soporte esté tan enraizado en nuestra forma de trabajo. A menudo hacemos uso de tratamientos simbólicos, diagrama visuales y otras formas de procesos imaginativos mediante los cuales tratamos de adquirir una intuición de lo que en su aspecto más formal tiene un contenido mucho más abstracto [19].

En relación al tratamiento que cuantifica la interacción onda-medio, los métodos basados en diferencias en el dominio del tiempo (FDTD) nos ofrecen un conjunto de procedimientos con los que resolver los valores del campo eléctrico y magnético en el tiempo y en el espacio [69]. La resolución de las ecuaciones de Maxwell utilizando los algoritmos FDTD relacionan tanto los parámetros del medio atravesado como los valores que caracterizan la onda electromagnética [101]. Por otra parte, su carácter de aproximación numérica ofrece las bases necesarias para el desarrollo de las simulaciones por computador con las que analizar todo lo relacionado con el comportamiento onda-medio.

En cuanto a la herramienta de simulación, además de adaptarse a los requerimientos y especificaciones del problema a resolver se han considerado criterios definidos por la corriente metodológica denominada

Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS) [39]. Esta corriente introduce aspectos sociales en el desarrollo científico-tecnológico. Una de las manifestaciones de este enfoque es el de procurar el acercamiento del conocimiento a la sociedad, la cual, a su vez, influye en la propia producción científica [34].

Dentro de este escenario, los diferentes núcleos de simulación que se han diseñado cuentan con facilidades de divulgación, interacción y modificación de los problemas tratados. No sólo se cubren necesidades de información sino que se facilita su utilización y desarrollo.

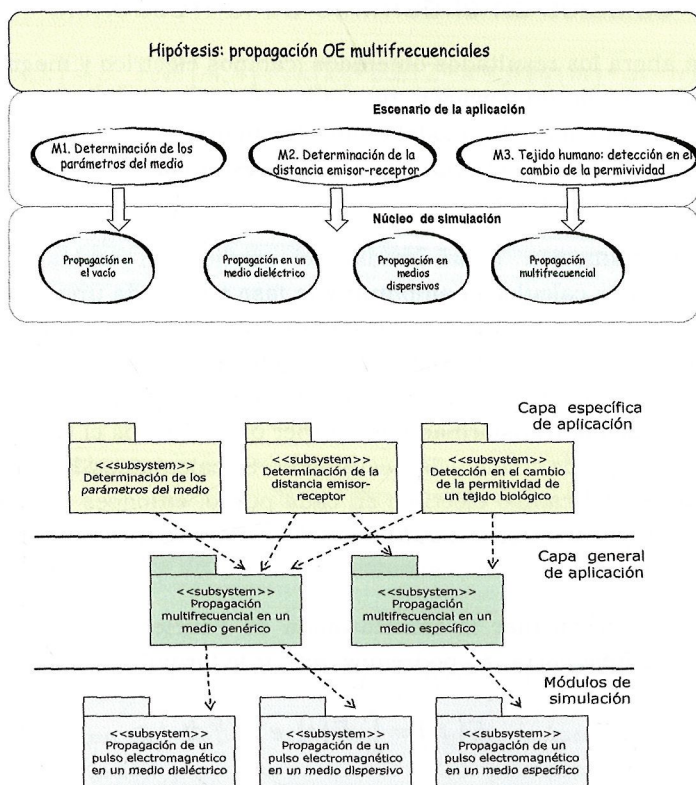


Figura 4.1 Plataforma de simulación del modelo multifrecuencial. El diseño del entorno de simulación se organiza en una arquitectura de capas. Cada capa puede ser ampliada con nuevos subsistemas que extenderán los servicios a las capas superiores. La capa específica de aplicación puede reutilizar los componentes de las capas inferiores

La simulación del modelo de tratamiento multifrecuencial está dividida en núcleos adaptados a cada problema o escenario propuesto (figura 4.1). Las aplicaciones provienen de diferentes áreas de conocimiento, lo que las une es la utilización de la interacción del medio analizado con ondas electromagnéticas multifrecuenciales. Los criterios utilizados en la selección de las aplicaciones con las que simular y analizar el modelo teórico han sido tratados en el estado del arte, el cual se ha orientado a disciplinas en las que la utilización de diferentes frecuencias es necesaria en la resolución de los problemas planteados.

3.2 Cálculos en el dominio de la frecuencia

Hasta ahora los resultados obtenidos (campos eléctrico y magnético) han considerado la propagación de pulsos electromagnéticos a través de diferentes medios. El modelo multifrecuencial impone el cálculo de dichos campos en cada punto del medio estudiado ante la irradiación a diferentes frecuencias.

Una aproximación sería irradiar el medio con ondas a distintas frecuencias y calcular la amplitud y la fase para cada una de ellas. Esta solución supone repetir el proceso para cada frecuencia. Además de esta posibilidad, la teoría de sistemas nos ofrece otra alternativa: podemos obtener la respuesta en frecuencia utilizando un impulso como fuente. Si utilizamos la transformada de Fourier obtendremos el valor del campo para el rango de frecuencias estudiado. Si calculamos la transformada de Fourier del campo eléctrico en cada punto, entonces conoceremos la amplitud y fase que resultaría de la iluminación equivalente a una fuente senoidal.

Si queremos calcular la transformada de Fourier del campo eléctrico $E(t)$ a la frecuencia f_1 , podremos aplicar la fórmula,

$$E(f_1) = \int_0^t E(t) \cdot e^{-j2\pi f_1 t} dt \quad (4.1)$$

Reescribiéndola en diferencias finitas queda,

$$E(f_1) = \sum_{n=0}^T E(n \cdot \Delta t) \cdot e^{-j2\pi f_1 (n \cdot \Delta t)} \quad (4.2)$$

Donde T es el número de iteraciones, Δt es el tiempo de muestreo y $t = T \cdot \Delta t$. La ecuación anterior se puede dividir en la parte real e imaginaria,

$$E(f_1) = \sum_{n=0}^T E(n \cdot \Delta t) \cdot \cos(2\pi f_1 \cdot n \cdot \Delta t) - j \sum_{n=0}^T E(n \cdot \Delta t) \cdot \sin(2\pi f_1 \cdot n \cdot \Delta t) \quad (4.3)$$

que puede ser llevado a una implementación en el computador con el siguiente algoritmo,

$$\begin{aligned} p_real[m,k] &= p_real[m,k] + ex[k] * \cos(2 * \pi * freq(m) * dt * n) \\ p_img[m,k] &= p_img[m,k] + ex[k] * \sin(2 * \pi * freq(m) * dt * n) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Para cada punto k de la región de interés se requieren dos buffers para cada frecuencia estudiada. La amplitud y fase a la frecuencia f_m serán,

$$\begin{aligned} amp[m,k] &= \text{sqrt}(\text{pow}(p_real[m,k], 2) + \text{pow}(p_img[m,k], 2)) \\ phase[m,k] &= \text{atan2}(p_img[m,k], p_real[m,k]) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Tanto la amplitud como la fase están asociadas a cada celda y frecuencia objeto de estudio. La utilización de señales de diferentes frecuencias y el cálculo de la transformada de Fourier para las frecuencias objeto de análisis serán utilizados de forma complementaria en las simulaciones a realizar.

4.3 Núcleo de simulación adaptado

La hipótesis origen del trabajo toma la frecuencia como parámetro a estudiar en la relación propagación-medio físico. Las alternativas y las propuestas generadas han dado origen a un conjunto de casos que pretenden dar aplicabilidad al hecho que ha fundamentado este trabajo: diferentes frecuencias implican diferentes grados de interacción. La figura 4.1 muestra tres posibilidades ($M1$, $M2$ y $M3$) que, por supuesto, no son las únicas aunque sí son una consecuencia directa de este planteamiento.

Con anterioridad se ha establecido que estos escenarios, con su formulación correspondiente, necesitan una serie de núcleos de simulación adaptados sobre los que realizar las correspondientes simulaciones. También se ha señalado que estas simulaciones tendrán un carácter abierto y serán accesibles a aquellos interesados en el conocimiento y la experimentación del fenómeno. El usuario podrá configurar, modificar y ampliar las simulaciones.

Bajo estas premisas y con la filosofía del diseño de los diferentes núcleos de simulación proponemos dos líneas de actuación. En la primera se tratará el aspecto más teórico de la plataforma de simulación, aquí se realizan un conjunto de simulaciones orientadas a los diferentes campos de aplicación detectados. Su desarrollo se divide en las siguientes tareas:

- Concebir un núcleo de simulación que siga las premisas del modelo multifrecuencial. Sistema establecido en la capa general de aplicación y los módulos de simulación (figura 4.1). Este núcleo estará dividido en diferentes escenarios, con el objetivo de servir de plataforma a las aplicaciones potenciales, ofrecerá facilidades para su ampliación, modificación y utilización.
- Realizar las simulaciones de los escenarios propuestos y analizar posibles aplicaciones para cada uno de ellos.
- Establecer el contexto del campo de aplicación propuesto y su relación con el núcleo de simulación.

A continuación, tanto el núcleo de simulación como las aplicaciones que lo utilizan se introducirán en una plataforma común mediante la cual experimentar y poder ampliar sus funcionalidades. Las tareas a realizar en este caso son:

- Integrar el núcleo de simulación en una plataforma común.
- Enumerar los servicios que proporciona dicho núcleo (tanto al resto de núcleos como a los usuarios del mismo) así como su configuración, mantenimiento y ampliación.
- Realizar las relaciones e interacciones definidas en el punto anterior.

- Incluir ejemplos y modos de utilización orientados al análisis y divulgación del fenómeno estudiado desde la perspectiva de un entorno servidor.

El objetivo de este capítulo es el de abordar en profundidad la primera parte, dotando de ese modo al simulador de la plataforma de desarrollo necesaria para abordar la tarea de integración general del núcleo con las aplicaciones que derivan del método de tratamiento multifrecuencial.

Implementación del núcleo de simulación

Basados en técnicas numéricas, el núcleo de simulación se divide en módulos individuales que contienen un modelo definido por el algoritmo que representa la solución a las ecuaciones diferenciales planteadas para cada caso.

Hasta llegar al algoritmo final se ha formulado el problema con las condiciones iniciales y frontera adecuadas, se han realizado transformaciones y simplificaciones con el objetivo de adecuar el modelo al tratamiento numérico y finalmente se ha propuesto un algoritmo válido para un entorno de computación. El proceso descrito introduce, como si de un instrumento de medición se tratara, errores inherentes al método y a las simplificaciones utilizadas. Estas soluciones deberán modificarse como consecuencia de la evolución de los métodos matemáticos, lo cual hace que los algoritmos numéricos tengan un carácter dinámico y estén sujetos a continuas modificaciones y mejoras. Con los criterios de diseño propuestos, este proceso cambiante no supondrá ninguna dificultad; más bien serán acicates para ensayar nuevas propuestas de mejora.

Si para cada núcleo el modelo es función del problema, la representación y el control de las simulaciones ofrecen servicios y manejos similares. Iniciar la simulación o ver la señal en la pantalla en un determinado momento se producirá siempre, al margen del tipo de núcleo utilizado. Podrán existir ligeras variaciones propias del experimento pero existirá un amplio abanico de utilidades y funciones comunes.

Propagación de una OE plana en el vacío

A modo de iniciación al fenómeno electromagnético se propone la visualización de la propagación de una OE plana en el vacío [8]. Si bien en este caso no hay interacción señal-medio físico es interesante para

comprender la formación y propagación de una OE. Las posibilidades de interacción con la simulación son las propias de visualización, control del proceso y elección del parámetro frecuencia de la señal. El algoritmo que resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales 4.6 y 4.7,

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0} \nabla \times H \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times E \quad (4.7)$$

es el siguiente:

$$ex[k] = ex[k] + 0.5 * (hy[k-1] - hy[k]) \quad (4.8)$$

$$hy[k] = hy[k] + 0.5 * (ex[k] - ex[k+1]) \quad (4.9)$$

Propagación en un medio dieléctrico simple

En este caso partimos de un medio físico del que conocemos su constante dieléctrica relativa ϵ_r , independiente de la frecuencia. En las figura 4.2a y 4.2b se puede observar la propagación de dos pulsos cuyo punto de partida coincide en el tiempo y en el espacio. Como se observa, mientras las señales se propagan en el vacío la velocidad de propagación permanece constante (4.2a). Cuando ambas señales penetran en el medio, la señal que atraviesa el medio con permitividad menor adelanta a la señal que atraviesa el medio con cuya permitividad es mayor (4.2b).

Aquí el sistema de ecuaciones es el siguiente:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0} \nabla \times H \quad (4.10a)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times E \quad (4.11a)$$

Si realizamos la transformación del cambio de variable $\bar{E} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E$, el sistema de ecuaciones que queda es el siguiente,

$$\frac{\partial \bar{E}_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_r \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (4.10b)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{\partial \bar{E}_x}{\partial z} \quad (4.11b)$$

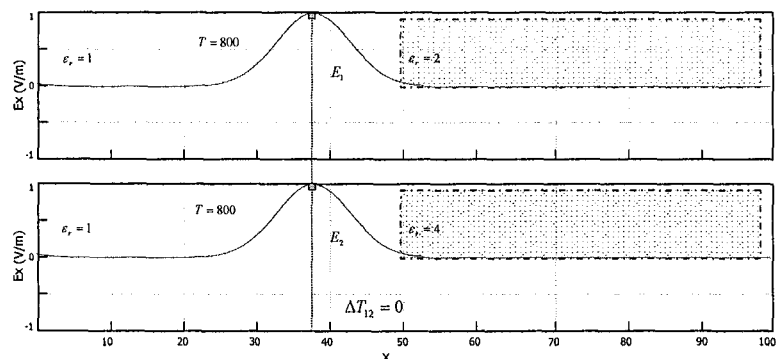


Figura 4.2a Propagación de dos pulsos electromagnéticos unitarios antes de su entrada en el medio dieléctrico.

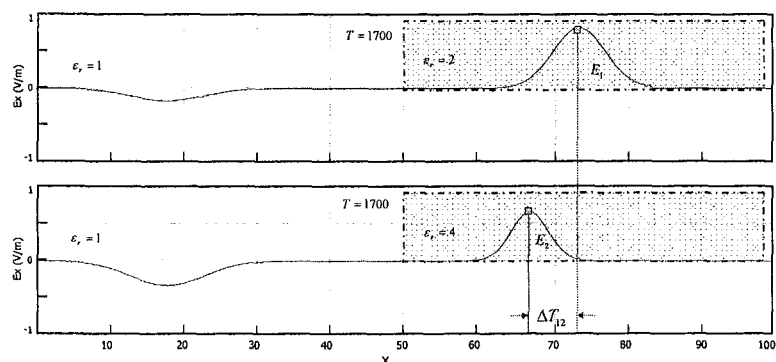


Figura 4.2b Propagación de dos pulsos tras penetrar, respectivamente, en diferentes medios dieléctricos.

Con este sistema de ecuaciones podremos llegar mediante aproximación en diferencias finitas a

$$\frac{E_x^{n+1/2}(k) - E_x^{n-1/2}(k)}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon_r \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{H_y^n(k+1/2) - H_y^n(k-1/2)}{\Delta x} \quad (4.12)$$

$$\frac{H_y^{n+1}(k+1/2) - H_y^n(k+1/2)}{\Delta t} = -\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{E_x^{n+1/2}(k+1) - E_x^{n-1/2}(k)}{\Delta x} \quad (4.13)$$

Una vez se determina el tamaño de celda Δx , el incremento de tiempo puede ser

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{2 \cdot c_0} \quad (4.14)$$

con c_0 como la velocidad de la luz en el vacío. De este modo se cumple

$$\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{\Delta t}{\Delta x} = c_0 \cdot \frac{\Delta x / 2 \cdot c_0}{\Delta x} = \frac{1}{2} \quad (4.15)$$

y se obtienen las ecuaciones

$$\overline{E}_x^{n+1/2}(k) = \overline{E}_x^{n-1/2}(k) + \frac{1/2}{\epsilon_r} [H_y^n(k+1/2) - H_y^n(k-1/2)] \quad (4.16)$$

$$H_y^{n+1}(k+1/2) = H_y^n(k+1/2) - \frac{1}{2} [\overline{E}_x^{n+1/2}(k+1) - \overline{E}_x^{n+1/2}(k)] \quad (4.17)$$

Con las que se obtienen las ecuaciones que proporcionan el modelo a introducir en el núcleo de simulación,

$$ex[k] = ex[k] + cb[k] * (hy[k-1] - hy[k]) \quad (4.18)$$

$$hy[k] = hy[k] + 0.5 * (ex[k] - ex[k+1]) \quad (4.19)$$

$$\text{donde } cb[k] = \frac{0.5}{\varepsilon_{ef}}$$

En esta simulación se establece una relación numérica entre la distancia del enlace y la permitividad relativa del medio atravesado. Utilizando las diferencias en los tiempos de llegada y conocida la distancia del enlace podremos determinar la permitividad relativa del medio a la frecuencia estudiada. La velocidad aumenta con la frecuencia, en [35] se presenta una recopilación de los resultados obtenidos por diferentes autores clasificando los medios en cuatro grandes grupos en función de su comportamiento frente a un campo electromagnético. En esta clasificación se observa que muchos materiales presentan una fuerte dependencia frecuencial para frecuencias inferiores a 10^8 MHz, disminuyendo al aumentar la frecuencia.

Existen diferentes campos de aplicación en los que la determinación de la permitividad efectiva del medio es un dato necesario para detectar o analizar materiales, objetos o características de medios no conocidos (radares de subsuelo o atmosféricos, análisis de materiales, detección de objetos). Hay, por lo tanto, ensayos de laboratorio en los que los diferentes materiales en estudio son analizados con el objeto de establecer modelos de comportamiento en la interacción onda-medio.

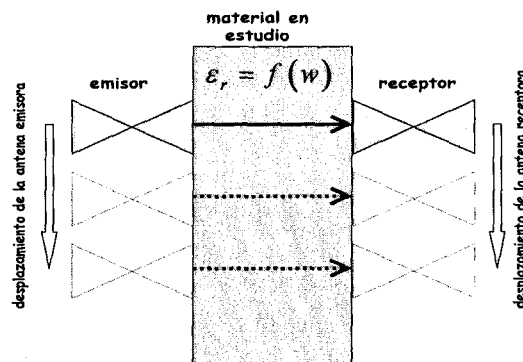


Figura 4.3 Determinación de la permitividad de una probeta mediante la emisión de ondas electromagnéticas que atraviesan el material en estudio

Para este tipo de análisis, la utilización de señales multifrecuenciales puede emplearse en la determinación de modelos de comportamiento de los materiales en su relación con las ondas electromagnéticas. Estos modelos podrían utilizarse en aquellos estudios de campo en los que los materiales analizados estén presentes a través de una muestra de material. Esta muestra ha de tener el tamaño adecuado para que los efectos de contorno no impidan observar las reflexiones que interesan.

Con estas consideraciones el tratamiento multifrecuencial podrá ser útil cuando se esté ante un material cuyo modelo de comportamiento ante diferentes frecuencias sea conocido y se proceda a un estudio de subsuelo en el que se pretenda detectar objetos o cambios estratigráficos (figura 4.4).

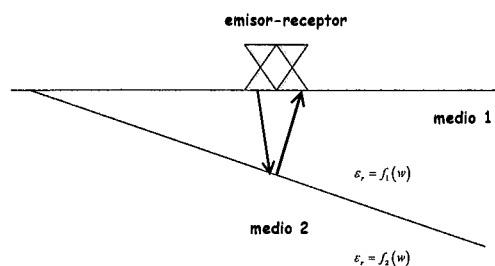


Figura 4.4 Procedimiento para determinar el cambio de material estratigráfico.

La figura 4.4 muestra la traza de un registro cuando se trabaja con dos señales a diferente frecuencia. Como el medio (previamente analizado en el laboratorio) presenta un comportamiento dependiente de la frecuencia con $\epsilon_{ef} = f(w) \quad \forall w \in [w_1, w_2]$ se obtienen registros desplazados en el tiempo dado que las señales se propagan a diferentes velocidades.

Si obtenemos las diferencias en el tiempo de dichas señales podremos determinar la distancia a la que se encuentra el medio reflector, que en el caso de la figura 4.5 se trataría de una capa de un medio diferente al medio conocido y para el de la figura 4.6 la existencia de un objeto reflector.

De los datos obtenidos en la simulación se extraen las curvas patrón con la que podremos estimar profundidades a las que se encuentran objetos o materiales reflectores.

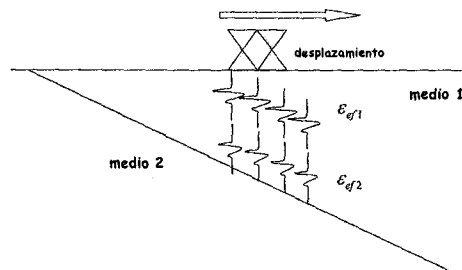


Figura 4.5 Esquema del registro obtenido en un medio en el que existe un reflector y un medio con permitividad efectiva que depende de la frecuencia.

Como se indicó en la formulación de la hipótesis, la medición relativa en el tiempo de llegada de los pulsos multifrecuenciales proporciona una ventaja en relación a otro tipo de mediciones de tiempos en los que es necesario sincronizar o determinar el origen de tiempos para cada ensayo. En el modelo multifrecuencial la referencia la marca la llegada de la señal que se propaga a mayor velocidad, a partir de ese momento el desfase temporal es el dato necesario que se utilizará como entrada al modelo.

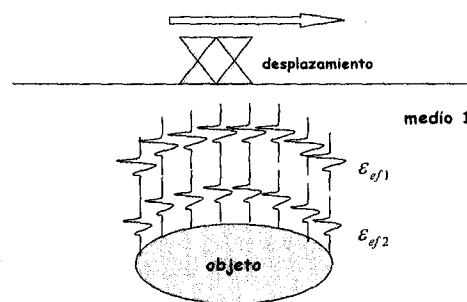


Figura 4.6 Esquema del registro obtenido en un medio en el que existe un objeto reflector y un medio con permitividad efectiva que depende de la frecuencia.

100 *Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio*

Como ejemplo de utilidad del modelo multifrecuencial en ensayos de laboratorio se toman los datos obtenidos en la determinación de la permitividad efectiva de un suelo agrícola. Los datos están tomados mediante ensayos de laboratorio que han utilizado el método de determinación de los coeficientes de reflexión. Este método proporciona la permitividad efectiva a partir de los coeficientes de reflexión, que se obtienen comparando la amplitud registrada en la reflexión en la superficie del medio con la reflexión total (reflexión en un metal). La velocidad de propagación se obtiene a partir de la permitividad determinada. Se han realizado varios ensayos para el estudio de un suelo muy saturado utilizando antenas de 1 GHz y de 900 MHz, variando la distancia entre la antena y la superficie del suelo. Con la misma ganancia y el mismo rango se han registrado las reflexiones en una placa metálica, manteniendo la misma separación que en el caso anterior.

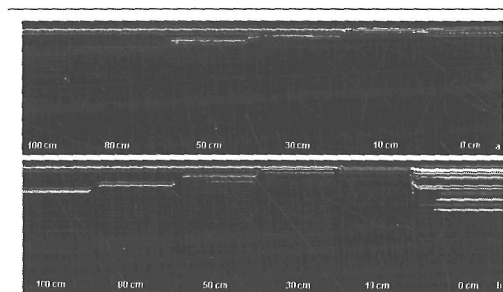


Figura 4.7 Radargramas obtenidos con 900 MHz para la reflexión en: a) superficie de un suelo arcilloso húmedo; b) superficie metálica. Rango del registro: 30 ns. Ganancia constante para todo el rango de 12 dB [76]

En la figura 4.7 se muestran dos de los registros obtenidos en cada uno de los casos: la superficie del suelo como reflector (parte superior) y el metal como reflector (parte inferior).

En el caso de la reflexión en el metal se puede ver que la amplitud registrada es mayor. El análisis de las amplitudes de reflexión para los casos estudiados (3 para cada antena) proporciona valores de la permitividad de 11.5 para la antena de 900 MHz. Para la antena de 1 GHz el resultado obtenido es de 9.4. En la figura 4.8 se muestran dos trazas, obtenidas a 100 cm de distancia con la antena de 900 MHz. Se

puede ver que la amplitud debida a la reflexión en el metal es mayor que la amplitud ocasionada por la reflexión en el suelo.

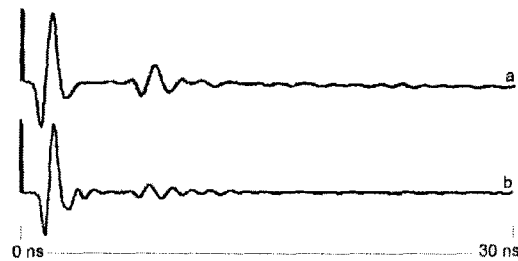


Figura 4.8 Trazas para la reflexión en la superficie del suelo (a) y para la reflexión en la superficie metálica (b). La separación entre estas superficies y la antena es de 1 m. El rango del registro son 30 ns [76].

El objetivo de tomar resultados obtenidos en trabajos experimentales con otro tipo de técnica es el de utilizarlos para comparar su metodología con la propuesta del análisis multifrecuencial (figura 4.2). Asumimos que los datos obtenidos serían los que caracterizan el suelo agrícola en el rango de frecuencias analizado y que la dependencia frecuencial del material entre la frecuencia máxima y mínima es lineal y conocida. Según esto el modelo de dependencia con la frecuencia es el mismo que el analizado en el capítulo 3. Se establece la permitividad como $\varepsilon_f = k_1 f + k_2 \forall f \in [f_1, f_2]$ con $f_1 = 900 \text{ MHz}$ y $f_2 = 1000 \text{ MHz}$. Con los datos del laboratorio $\varepsilon_{f1} = 11.5$ y $\varepsilon_{f2} = 9.5$ los tiempos de reflexión de las frecuencias extremo son conocidas a priori, por lo que nos servirán como referente para comparar los resultados obtenidos en el modelo multifrecuencial. La entrada al modelo multifrecuencial es la relación del tipo 3.17 ya tratada en el capítulo 3. Por lo que para establecer el sistema de ecuaciones,

$$\frac{c}{\sqrt{k_1 f_i + k_2}} \cdot t_i = d \quad (4.20)$$

$$t_i - t_j = \Delta T_{ij} \quad (4.21)$$

En el sistema de ecuaciones se conocen las frecuencias (f_i) y los parámetros del medio (k_1, k_2). En este caso las diferencias en el tiempo ΔT_{ij} se miden en el simulador, el cual representa en espacio-tiempo la propagación de la OE para el medio dado.

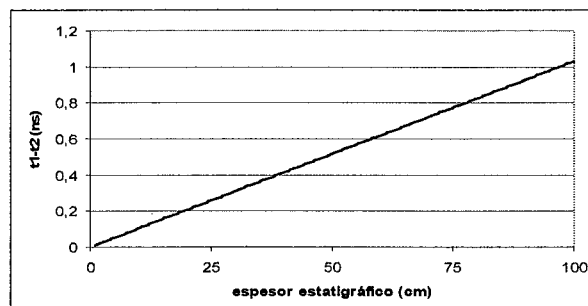


Figura 4.9 Espesor estratigráfico en función de la diferencia de tiempos medida en el receptor.

En la gráfica de la figura 4.9 se representan diferentes valores de la distancia obtenida en función de la diferencia de tiempos. Se establece por tanto una relación entre la diferencia de tiempos medida en el receptor con el espesor de la capa de un medio cuyo modelo de comportamiento es función de la frecuencia.

Propagación en un medio dieléctrico con atenuación

El caso anterior toma un medio dieléctrico simple en el que no hay atenuación. En general, el medio siempre atenúa la onda en su propagación. Este nuevo elemento lo introducimos en el sistema de ecuaciones siguiendo el mismo proceso que en casos anteriores. Las ecuaciones de Maxwell que modelan un medio dieléctrico con atenuación son las siguientes,

$$\varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} = \nabla \times H - J \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times E \quad (4.23)$$

en el que J representa la densidad de corriente para un medio con pérdidas relacionadas con la conductividad σ . En este caso $J = \sigma \cdot E$, si lo introducimos en la ecuación 4.22,

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \nabla \times H - \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} E \quad (4.24)$$

Si las reescribimos en una dimensión se tiene,

$$\frac{\partial \bar{E}_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_r \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \mu_0} \bar{E}_x \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{\partial \bar{E}_x}{\partial z} \quad (4.26)$$

Utilizando el método de las diferencias finitas se obtiene, para la primera ecuación,

$$\frac{\bar{E}_x^{n+1/2}(k) - \bar{E}_x^{n-1/2}(k)}{\Delta t} = \frac{1}{\varepsilon_r \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{H_y^n(k+1/2) - H_y^n(k-1/2)}{\Delta x} - \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \frac{\bar{E}_x^{n+1/2}(k) + \bar{E}_x^{n-1/2}(k)}{2} \quad (4.27)$$

considerando $\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{\Delta t}{\Delta x} = c_0 \cdot \frac{\Delta x / 2 \cdot c_0}{\Delta x} = \frac{1}{2}$ se llega a

$$E_x^{n+1/2}(k) = \left(\frac{1 - \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2 \varepsilon_r \varepsilon_0}}{1 + \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2 \varepsilon_r \varepsilon_0}} \right) E_x^{n-1/2}(k) - \frac{1/2}{\varepsilon_r \left(1 + \frac{\Delta t \cdot \sigma}{2 \varepsilon_r \varepsilon_0} \right)} \left[H_y^n(k+1/2) - H_y^n(k-1/2) \right] \quad (4.28)$$

de aquí obtendremos las ecuaciones computacionales:

$$ex[k]=cb[k]*ex[k]+cb[k]*(hy[k-1]-hy[k]) \quad (4.29)$$

$$hy[k]=hy[k]+0.5*(ex[k]-ex[k+1]) \quad (4.30)$$

donde,

$$cb[k]=\frac{0.5}{\varepsilon_r*(1+eaf)} \quad (4.31)$$

$$ca[k]=\frac{1.-eaf}{1.+eaf} \quad (4.32)$$

$$eaf=\frac{\Delta t*\sigma}{2*\varepsilon_r*\varepsilon_0} \quad (4.33)$$

Con este núcleo de simulación se obtiene una relación entre la velocidad de propagación de la onda electromagnética y su atenuación con los parámetros constitutivos del medio (permitividad y conductividad). La dependencia con la frecuencia la podremos obtener asociando dichos resultados con las constantes de atenuación (α) y de fase (β). Conocidas las frecuencias de las señales y obteniendo las diferencias temporales y de amplitud en la llegada al receptor podremos caracterizar el medio atravesado y determinar la distancia a la que se encuentra el receptor.

Este método podrá ser de utilidad en aplicaciones en las que tanto el medio atravesado como las distancias que hay entre el emisor y el receptor son desconocidos. Como hemos visto anteriormente, el estudio de la relación de la velocidad de propagación con la permitividad dieléctrica del material atravesado y su extrapolación a funciones y análisis numérico es de especial interés en aplicaciones basadas en los radares de subsuelo.

La simulación de un medio dieléctrico simple con pérdidas completa el estudio anterior en donde la simulación no consideraba las pérdidas introducidas por la conductividad del medio.

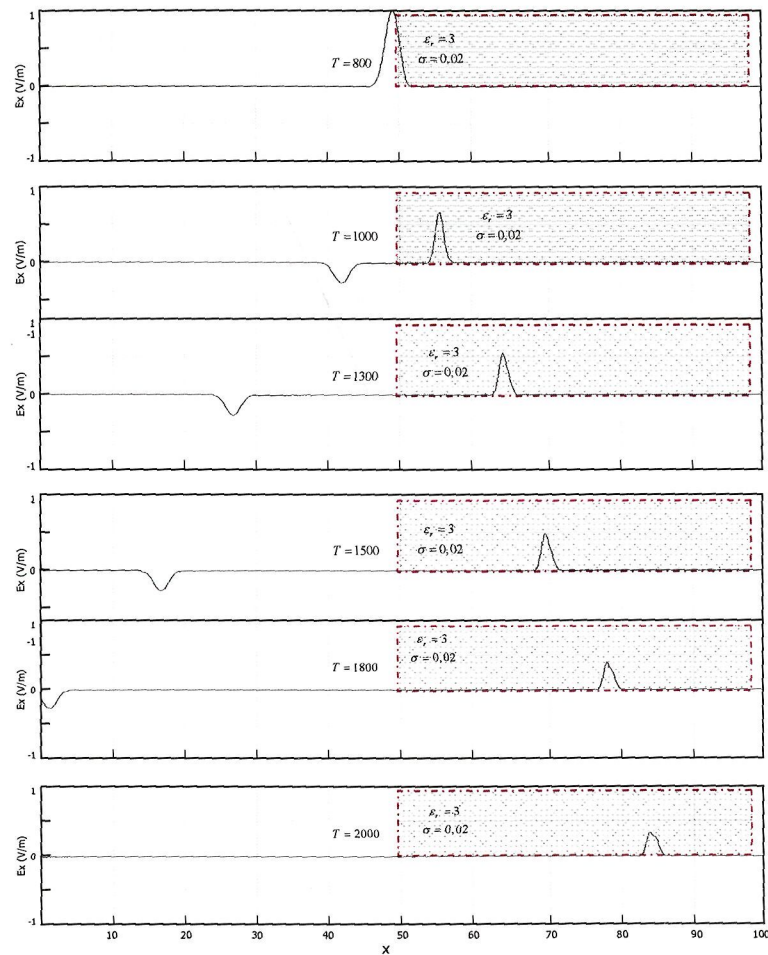


Figura 4.10 Simulación de la propagación de un pulso electromagnético unitario tras atravesar un medio dieléctrico con atenuación. Se han tomado diferentes instantes para observar su evolución en el tiempo. El pulso representa la amplitud del campo eléctrico E_x en V/m

La figura 4.11 muestra la evolución de la atenuación de la señal para un medio con diferentes valores de la conductividad. La figura 4.12 muestra la evolución de la velocidad de propagación para un medio con diferente

permitividad dieléctrica. En ambos casos se han tomado instantáneas de diferentes instantes que se han plasmado en una sola gráfica.

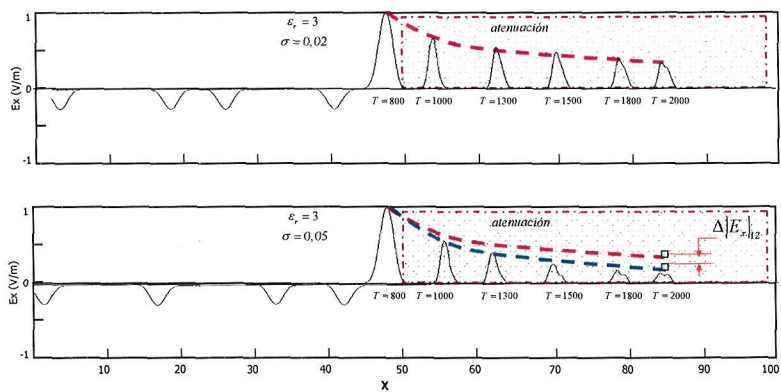


Figura 4.11 Simulación de dos pulsos que atraviesan, respectivamente, dos medios con diferentes valores de la conductividad. El valor de la constante dieléctrica es el mismo. Se observa cómo la señal que atraviesa el medio con conductividad más alta sufre una atenuación mayor. La velocidad de propagación en ambos medios es la misma

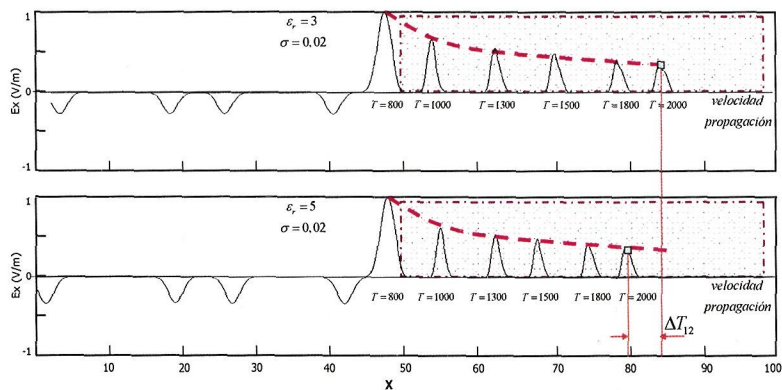


Figura 4.12 Simulación de dos pulsos que atraviesan, respectivamente, dos medios con diferentes valores de la constante dieléctrica. La conductividad es la misma. Se observa cómo la señal que se enfrenta al medio con mayor constante dieléctrica se retrasa en relación a la otra. Las pérdidas en la amplitud son equivalentes en ambos.

En determinados experimentos realizados por los radares de subsuelo se miden las discontinuidades (cambios de material) mediante las cuales determinar la distribución estratigráfica del subsuelo. Estas discontinuidades son cambios bruscos de los parámetros electromagnéticos, es decir, de la conductividad, la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética. La información con la que se trabaja son los radargramas (capítulo 2). La información que estos radargramas aportan es variada, pero principalmente se trabaja con tiempos de llegada. El tipo de estudio de subsuelo más básico consiste en determinar velocidades de propagación promedio y, junto con los tiempos de propagación registrados para cada evento, localizar la discontinuidad en la que se ha producido la reflexión, determinando tanto su situación horizontal como la profundidad a la se encuentra. La profundidad que se puede alcanzar depende tanto de las condiciones de medio analizado como del equipo utilizado.

Los radargramas pueden aportar información si analizamos las amplitudes de los distintos eventos. La información viene dada en tiempos dobles de propagación (reflexión). Para poder analizar la información es necesario conocer la velocidad de propagación promedio o la permitividad efectiva del medio. Existen diferentes técnicas para conocer velocidades o permitividades (el modelo multifrecuencial aporta un nuevo procedimiento con el que poder estimar el dato buscado).

A continuación se revisan diferentes técnicas empleadas, finalmente, se propondrá el empleo de señales multifrecuenciales según el modelo y la simulación realizada en este apartado. Por último se extraerán las conclusiones sobre los datos obtenidos y la aplicabilidad del método.

Las técnicas empleadas en la determinación de velocidades de propagación o de permitividades en el análisis del subsuelo son variadas. El empleo de valores tabulados, la utilización de modelos geotécnicos, la información estratigráfica mediante sondeos, los ensayos de laboratorio midiendo los tiempos de propagación o el estudio de los coeficientes de reflexión son algunos de los métodos más utilizados.

Para todas estas técnicas la frecuencia de trabajo supone un aspecto muy importante dado que la permitividad depende de la frecuencia de la onda que se propaga.

Si tomamos como referencia el núcleo de simulación 2 en el que se determinaba el desfase entre ondas multifrecuenciales y le añadimos a

108 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

esta medición la diferencia en las amplitudes de esas mismas señales podremos aumentar la potencialidad del modelo y obtener mayores prestaciones en la determinación de los parámetros que constituyen el medio (capítulo 2).

En este caso nos encontramos con un medio dieléctrico con atenuación. La propagación de una onda electromagnética plana en este tipo de medios está caracterizada por la constante de propagación cuyos términos representan la atenuación y el desfase que se relacionan con la permitividad, permeabilidad y conductividad del medio (capítulo 3, pg. 55). Si asumimos dicho modelo como punto de entrada al modelo multifrecuencial podremos proponer un conjunto de ecuaciones en las que las incógnitas serían los parámetros del medio (permitividad y conductividad) y la distancia del material reflector. Mediante su resolución se determina la velocidad de propagación en el medio. Hacer notar que si bien los parámetros del medio no se conocen, sí que se asume que tiene un comportamiento preestablecido según el modelo de comportamiento de la onda plana que lo atraviesa.

Para iniciar el análisis numérico utilizaremos la atenuación que presentan las OE en agua de mar y en un terreno arcilloso tomadas en el rango de frecuencias que va desde 100 MHz a 1 GHz. Las dos frecuencias consideradas son representativas de las empleadas normalmente en los estudios con georradar, pudiendo considerarlas como valores extremos.

- Para el agua de mar la conductividad puede presentar un valor de $\sigma = 4 S/m$ [72] y la permitividad dieléctrica relativa $\epsilon_r = 81$ [63]. Se puede considerar, además que $\mu_r \approx 1$. Con estos parámetros el factor de pérdida $P = \sigma / \omega \epsilon$ es igual a 8.88 si la frecuencia es de 100 MHz y de 0.888 para 1GHz. Las dos frecuencias consideradas son representativas de las empleadas normalmente en los estudios con georradar.
- Para las arcillas secas pueden considerarse los siguientes valores, $\sigma = 0.01 S/m$, $\epsilon_r = 3$ y $\mu_r \approx 1$ [86]. En este caso el factor de pérdidas es $P = 0.6$ para 100MHz y $P = 0.06$ para 1GHz. Si el terreno arcilloso presenta un grado importante de humedad, los parámetros del medio varían sustancialmente, aumentando la permitividad dieléctrica relativa y la conductividad $\sigma = 1 S/m$, $\epsilon_r = 15$ y $\mu_r \approx 1$ [12]. En este caso el factor de pérdidas es $P = 0.4796$ para 100MHz y $P = 0.4796$.

De igual modo que en núcleo de simulación anterior se puede establecer diferentes sistemas de ecuaciones que dependen del tipo de medición realizado. Si sólo se obtienen las diferencias de velocidad se puede plantear de igual forma que en (3.9) utilizando las amplitudes,

$$d = \frac{1}{\alpha_i} \quad (4.34)$$

$$\alpha_i - \alpha_j = \Delta A_{ij} \quad (4.35)$$

Para el caso en el que se obtengan tanto diferencias en el tiempo como en amplitudes el sistema de ecuaciones combinará (3.9) y (3.10) en un sistema del tipo,

$$\frac{c}{\sqrt{\epsilon_{ri}}} \cdot t_i = d \quad (4.36)$$

$$t_i - t_j = \Delta T_{ij} \quad (4.37)$$

$$d = \frac{1}{\alpha_i} \quad (4.38)$$

$$\alpha_i - \alpha_j = \Delta A_{ij} \quad (4.39)$$

Con los datos experimentales y considerando un medio genérico cuyos parámetros son la permitividad efectiva y el factor de pérdidas (ambos función de la frecuencia utilizada) podremos realizar la simulación de la propagación de un pulso electromagnético y obtener las medidas diferenciales con las que abordar el sistema de ecuaciones planteado.

Atenuación de la onda electromagnética por la lluvia

Además de medios genéricos, existen escenarios en los que las características de la materia permiten trabajar con modelos específicos para el medio analizado. Es el caso de los radares meteorológicos en la caracterización de la lluvia, la cual introduce una atenuación que es función de la frecuencia de la señal y de la tasa de lluvia medida en

milímetros por hora [67]. En la figura 4.13 se muestra el modelo de atenuación.

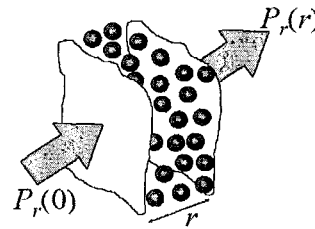


Figura 4.13 Modelo de atenuación de la OE por la lluvia [67].

Si la densidad y forma de las gotas de lluvia en una región dada es constante, entonces la señal en el receptor P_r disminuye de forma exponencial con la distancia r a través de la lluvia con la expresión,

$$P_r(r) = P_r(0) e^{-\alpha r} \quad (4.40)$$

Donde α es la constante de atenuación. Expresándolo como una pérdida de propagación en decibelios quedaría

$$L = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = 4.343 \alpha r \quad (4.41)$$

Es usual utilizar la atenuación medida en decibelios por metro

$$\gamma = \frac{L}{r} = 4.343 \alpha \quad (4.42)$$

El valor de α depende de las características de la lluvia

$$\alpha = \int_{D=0}^{\infty} N(D) \cdot C(D) dD \quad (4.43)$$

Siendo $N(D)$ el número de gotas de diámetro D por metro de camino de la OE y $C(D)$ la atenuación efectiva (decibelios por metro) que depende de la frecuencia de la señal.

Esta formulación es útil cuando se evalúa la atenuación para trayectorias en las que el tamaño de la distribución $N(D)$ no es constante. Si tomamos el valor de la atenuación específica en un punto dado de la trayectoria, $\gamma(r)$ e integramos sobre el camino de longitud r_r para calcular la pérdida total en esta trayectoria tendremos,

$$L = \int_0^{r_r} \gamma(r) dr \quad (4.44)$$

Una forma de resolver la ecuación anterior es tomar una distribución de gotas de un tamaño dado e integrar el resultado. Tamaños grandes son menos probables que pequeños. Una distribución empleada es la distribución exponencial [68]:

$$N(D) = N_0 e^{-\frac{D}{D_m}} \quad (4.45)$$

Donde N_0 y D_m son parámetros, con D_m dependiendo de R , que es la tasa de lluvia medida en tierra en milímetros por hora. Algunos valores útiles con

$$\begin{aligned} N_0 &= 8 \cdot 10^3 \text{ m}^{-2} \text{ mm}^{-1} \\ D_m &= 0.122 R^{0.21} \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.46)$$

La atenuación $C(D)$ puede ser calculada de forma teórica mediante el análisis de la atenuación debida a una gota de forma esférica iluminada por una OE. Es aquí donde la dependencia con la frecuencia es fundamental.

Para las frecuencias más bajas (1 GHz) donde el tamaño de las gotas es pequeño comparado con la longitud de onda incidente la atenuación es originada por el mecanismo de absorción. En esta región la dependencia con la frecuencia sigue la aproximación de Rayleigh (figura 4.9)

$$C(D) = \frac{D^3}{\lambda} \quad (4.47)$$

A frecuencias más altas (figura 4.9) la atenuación se incrementa de forma más suave hasta la zona denominada límite óptico. A estas frecuencias la atenuación es debida fundamentalmente a mecanismos de dispersión. De forma general el valor de $C(D)$ se calcula utilizando la teoría de dispersión de Mie (figura 4.14) que deberá ser aplicada para tratar situaciones donde la longitud de onda es de tamaño similar a las gotas de agua donde se manifiestan fenómenos de resonancia.

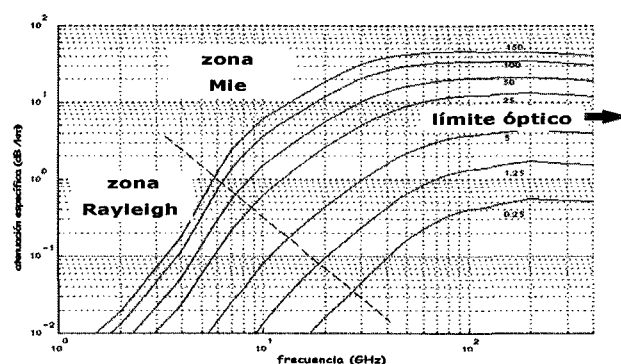


Figura 4.14 Atenuación específica. Curvas con tasa de lluvia R medida en mm/h [52].

En principio la ecuación (4.1) puede ser resuelta directamente y ser utilizada para evaluar la atenuación total en (4.2). De forma usual se utiliza un modelo empírico en el que γ depende e R [52].

El modelo utilizado es el siguiente

$$\gamma = aR^b \quad (4.48)$$

con a y b dependientes de la frecuencia y de la temperatura y γ expresada en $dB\ mm^{-1}$. La tabla 4.1 presenta valores para a y b a varias frecuencias y una polarización horizontal.

Frecuencia (GHz)	a	b
1	0.0000378	0.912
10	0.0101	1.276
20	0.0751	1.099
30	0.187	1.021
40	0.350	0.939

Tabla 4.1 Valores de los parámetros del modelo de atenuación por lluvia.

Visto el modelo de atenuación y con los datos empíricos introducimos los datos al modelo de tratamiento multifrecuencial en el que, como salida, obtendremos valores de los niveles de atenuación en función de las diferencias de amplitud obtenidas con mediciones entre un emisor-receptor con distancia de enlace conocida.

El sistema de ecuaciones propuesto sería el siguiente:

$$\begin{aligned}
 |E_i| - |E_j| &= E_{o1}e^{-\alpha_i d_i} - E_{o2}e^{-\alpha_j d_j} \\
 \alpha_i &= k\omega_i \\
 \alpha_j &= k\omega_j \\
 \alpha_i - \alpha_j &= \Delta_{\alpha ij}
 \end{aligned}
 \tag{4.49}$$

En las gráficas de las figuras 4.15 y 4.16 se muestran los valores calculados para diferentes valores relativos medidos en el receptor.

Las frecuencias y los modelos utilizados son los obtenidos en la tabla 4.1.

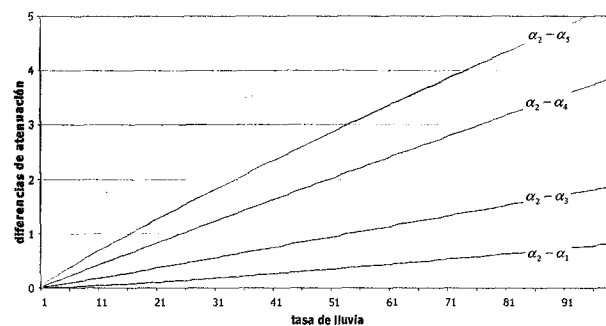


Figura 4.15 Tasa de lluvia en función de las diferencias de atenuación en el receptor. Se toman los parámetros del modelo de atenuación por lluvia.

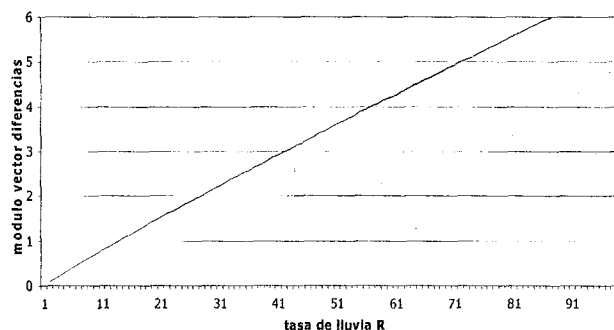


Figura 4.16 Tasa de lluvia en función del vector de diferencias de atenuación medidas en el receptor.

Propagación en medios dispersivos

Es en este tipo de entornos cuando la frecuencia de la OE toma mayor protagonismo. Los medios dispersivos corresponden a ambientes en los que los parámetros constantes relativos al medio (constante dieléctrica, permitividad o conductividad) se hacen dependientes de la frecuencia. En consecuencia, mecanismos como la velocidad de propagación o la atenuación de la señal dependen de dicho valor. A continuación se propone una formulación basada en el método FDTD para medios dispersivos.

En primer lugar el medio deberá estar representado por un modelo caracterizado por su dependencia con la frecuencia. Los modelos que representan este tipo de entornos tienen la siguiente forma,

$$\varepsilon_r^*(\omega) = \varepsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0} + \frac{\chi_1}{1 + j\omega t_0} \quad (4.50)$$

$$\varepsilon_r^*(\omega) = \varepsilon_r + \frac{\varepsilon_1}{1 + j2\delta_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2} \quad (4.51)$$

$$\varepsilon_r^*(\omega) = \varepsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0} + \varepsilon_1 \frac{\omega_0}{(\omega_0^2 + \alpha^2) + j2\alpha\omega + \omega^2} \quad (4.52)$$

Estas ecuaciones representan, respectivamente, las formulaciones para medios dependientes de la frecuencia de Debye, de Lorentz y un modelo que representa el comportamiento del tejido humano ante la iluminación de ondas electromagnéticas [100].

Tomando como referencia el modelo de Debye y las ecuaciones de Maxwell que utilizan la densidad de flujo (D) como

$$D(\omega) = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r^*(\omega) \cdot E(\omega) \quad (4.53)$$

se llega al sistema de ecuaciones siguiente,

$$\frac{\partial \bar{E}_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon_r \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (4.54)$$

$$\bar{D}(\omega) = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r^*(\omega) \cdot \bar{E}(\omega) \quad (4.55)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{\partial \bar{E}_x}{\partial z} \quad (4.56)$$

con

$$\bar{E} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E \quad (4.57)$$

$$\bar{D} = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} D \quad (4.58)$$

Con la formulación dada debemos transformar la ecuación que representa el medio en el dominio de la frecuencia a una ecuación que lo haga en el dominio del tiempo. Tomando el medio de Debye la densidad de flujo quedaría como

$$D(\omega) = \epsilon_r E(\omega) + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} E(\omega) + \frac{\chi_1}{1 + j\omega t_0} E(\omega) \quad (4.59)$$

El primer término se puede transformar al dominio temporal de forma directa dado que sólo es un producto. Para el segundo y tercero la transformada de Fourier nos ofrece las herramientas necesarias para realizar la transformación deseada.

$$D(t) = \epsilon_r E(t) + \frac{\sigma}{\epsilon_0} \int_0^t E(t') \cdot dt' + \frac{\chi_1}{t_0} \int_0^t e^{-(t'-t)/t_0} E(t') \cdot dt' \quad (4.60)$$

Si tomamos las integrales como sumatorias con incrementos temporales con $t = n \cdot \Delta t$

$$D^n = \epsilon_r \cdot E^n + \frac{\sigma \cdot \Delta t}{\epsilon_0} \sum_{i=0}^n E^i + \chi_1 \cdot \frac{\Delta t}{t_0} \sum_{i=0}^n e^{-\Delta t(n-i)/t_0} E^i \quad (4.61)$$

Para determinar el valor de D^n debemos conocer el de E^n , el cual también se necesita para determinar el valor de las sumatorias. Debemos separar el dicho valor de cada una de la sumatorias.

$$D^n = \epsilon_r \cdot E^n + \frac{\sigma \cdot \Delta t}{\epsilon_0} E^n + \frac{\sigma \cdot \Delta t}{\epsilon_0} \sum_{i=0}^{n-1} E^i + S^n \quad (4.62)$$

siendo

$$I^n = \frac{\sigma \cdot \Delta t}{\epsilon_0} \sum_{i=0}^n E^i \quad (4.63)$$

$$S^n = \chi_1 \cdot \frac{\Delta t}{t_0} \sum_{i=0}^n e^{-\Delta t(n-i)/t_0} E^i \quad (4.64)$$

Si separamos el término E^n de las sumatorias se tiene

$$I^n = \frac{\sigma \cdot \Delta t}{\epsilon_0} E^n + I^{n-1} \quad (4.65)$$

$$S^n = \chi_1 \cdot \frac{\Delta t}{t_0} E^n + e^{-\Delta t/t_0} S^{n-1} \quad (4.66)$$

Con lo que la densidad de flujo quedaría de la siguiente forma,

$$D^n = \epsilon_r \cdot E^n + \left[\frac{\sigma \cdot \Delta t}{\epsilon_0} E^n + I^{n-1} \right] \frac{\sigma \cdot \Delta t}{\epsilon_0} E^n + \left[\chi_1 \cdot \frac{\Delta t}{t_0} E^n + e^{-\Delta t/t_0} S^{n-1} \right] \quad (4.67)$$

Si despejamos E^n

$$E^n = \frac{D^n - I^{n-1} - e^{-\Delta t/t_0} S^{n-1}}{\epsilon_r + \frac{\sigma \cdot \Delta t}{\epsilon_0} + \chi_1 \cdot \frac{\Delta t}{t_0}} \quad (4.68)$$

$$I^n = I^{n-1} + \frac{\sigma \cdot \Delta t}{\epsilon_0} E^n \quad (4.69)$$

$$S^n = e^{-\Delta t/t_0} S^{n-1} + \chi_1 \cdot \frac{\Delta t}{t_0} E^n \quad (4.70)$$

La formulación representada nos lleva a los algoritmos:

$$dx[k]=dx[k]-0.5*(hy[k-1]-hy[k]) \quad (4.71)$$

$$ex[k]=gax[k]*(dx[k]-ix[k]-del_exp*sx[k]) \quad (4.72)$$

$$ix[k]=ix[k]+gbx[k]*ex[k] \quad (4.73)$$

$$sx[k]=del_exp*sx[k]+gcx[k]*ex[k] \quad (4.74)$$

$$hy[k]=hy[k]+0.5*(ex[k]-ex[k+1]) \quad (4.75)$$

$$gax[k]=1/(epsr+(sigma*dt/epsz)+(chil*dt/t0)) \quad (4.76)$$

$$gbx[k]=sigma*dt/epsz \quad (4.77)$$

$$gbc[k]=chil*dt/t0 \quad (4.78)$$

En este módulo de simulación, el modelo que representa el medio tiene forma compleja y una fuerte dependencia con la frecuencia. Hay diferentes modelos teóricos que representan este comportamiento (4.50, 4.51 y 4.52). En este caso, la caracterización del medio es más compleja y con mayor número de parámetros. El método de trabajo, sin embargo, es el mismo que en casos anteriores. La complejidad se traslada al algoritmo numérico que representa las condiciones y el escenario de trabajo. Las aplicaciones del análisis numérico en medios dispersivos abarcan desde las que ya hemos tratado en los casos anteriores hasta el tratamiento de entornos en los que la dispersión es uno de los mecanismos más acusados. Así, radares meteorológicos que detectan y caracterizan fenómenos en los que el agua esté presente, radares que miden la humedad de los suelos, sistemas que analizan el comportamiento de la ionosfera e incluso estudios sobre tejidos biológicos formarían parte de este abanico de posibilidades. Veremos dos casos de medios dispersivos con el objetivo de analizar dos posibilidades: el del estudio de la ionosfera y el del estudio de los tejidos biológicos.

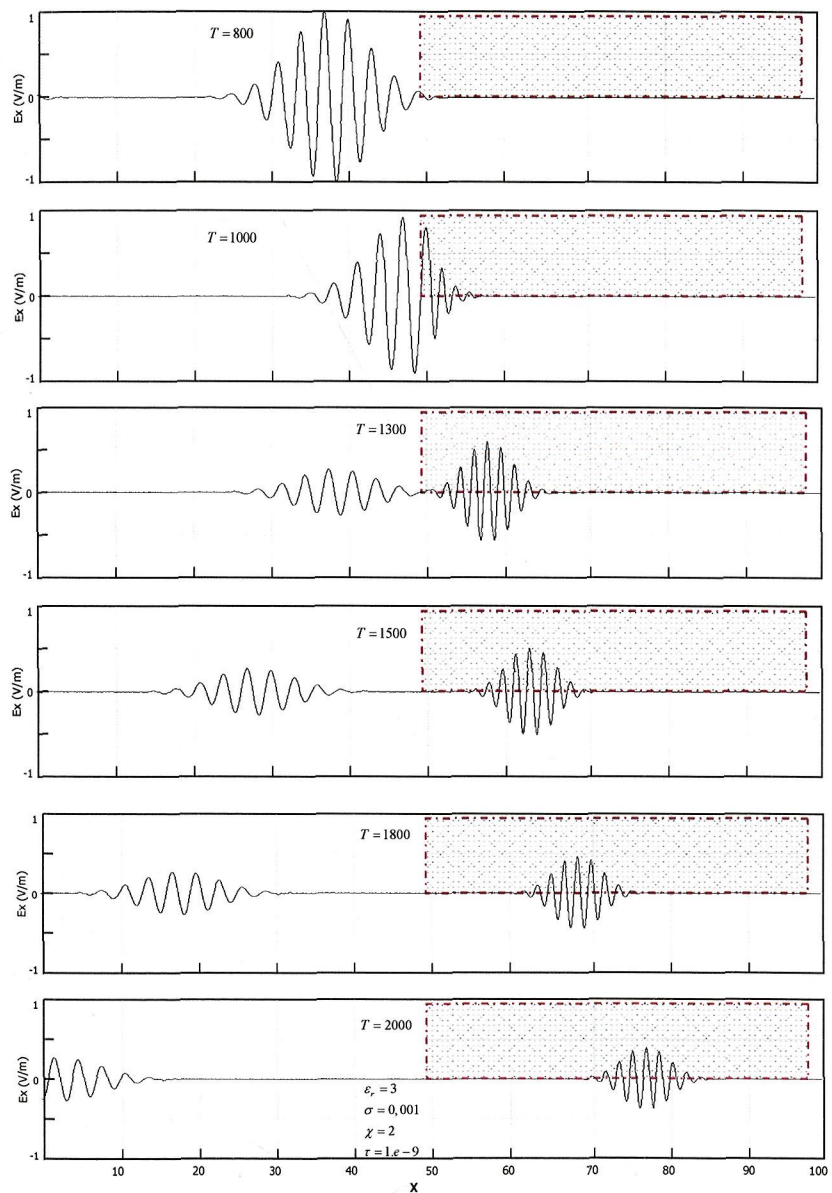


Figura 4.17 Simulación de la propagación de un pulso electromagnético tras atravesar un medio dispersivo (Debye). Los valores tomados para el medio son $\epsilon = 3$, $\sigma = 0.001$, $\chi = 2$, $t_0 = 1e-9$.

Estudio de la ionosfera

La composición y estado de la ionosfera provoca que la dispersión sea el fenómeno más acusado en su interacción con la onda electromagnética. Esto produce retrasos que depende de la frecuencia utilizada y de la densidad electrónica de la capa que forma la ionosfera.

$$n_{gr} = c - \frac{e}{f^2} \quad (4.79)$$

Se establece por tanto una relación entre la velocidad de propagación v_p , medio analizado M y la frecuencia f de trabajo del tipo $v_p = v(f, M)$.

En la actualidad la red de satélites GPS (con cobertura global) más la utilización de dos frecuencias diferentes hace posible el estudio de la densidad electrónica en tiempo real produciendo mapas de su estado en función de la zona y de la franja horaria .

Se plantea un sistema de ecuaciones en el que las incógnitas son (n_1, n_2, e) . Mediante su resolución se podrá estimar el parámetro que representa el estado electrónico de la ionosfera. La figura 4.18 representa dicho valor en función de la diferencia de tiempos en la recepción de las dos frecuencias utilizadas.

$$n_1 = c - \frac{e}{f_1^2} \quad (4.80)$$

$$n_2 = c - \frac{e}{f_2^2} \quad (4.81)$$

$$\frac{d}{n_1} - \frac{d}{n_2} = t_1 - t_2 = \Delta T_{12} \quad (4.82)$$

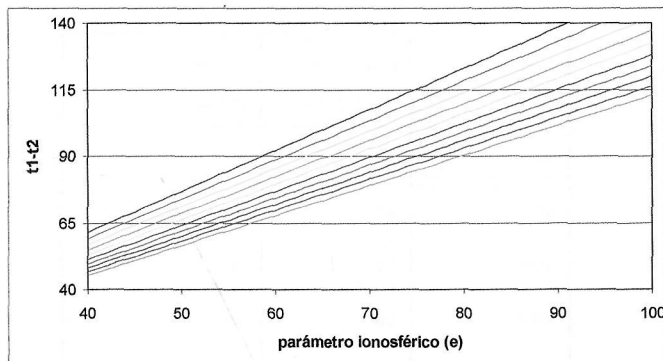


Figura 4.18 Parámetro ionosférico en función de la diferencia en el tiempo de llegada de señales multifrecuenciales.

Tejidos biológicos

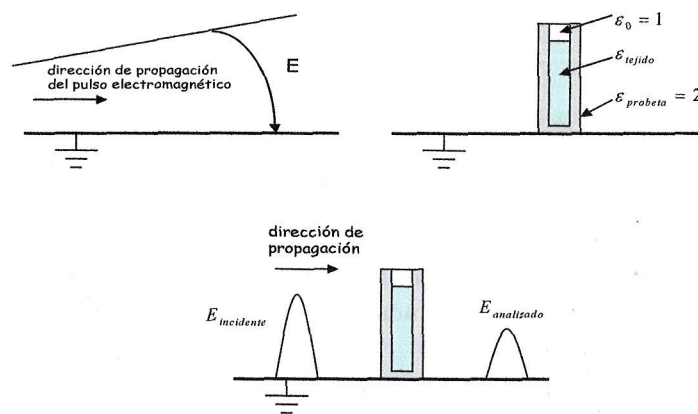
En el estado del arte se ha visto que los efectos de la radiación electromagnética están siendo analizados, de forma extensiva, con el objeto de obtener modelos que puedan utilizarse tanto en aplicaciones de prevención como aplicaciones terapéuticas. La tabla 4.1 representa la constante dieléctrica y la conductividad del músculo a diferentes frecuencias [98].

El objetivo principal de caracterizar eléctricamente un tejido biológico radica en el hecho de conocer su comportamiento desde el punto de vista eléctrico. Estas propiedades y sus componentes tienen especial interés en:

- Estudiar el efecto de las ondas electromagnéticas de alta frecuencia usadas en radar y técnicas de comunicación sobre los tejidos biológicos [49].
- Diagnóstico médico: Conociendo las propiedades eléctricas de los tejidos sanos y comparándolas con las características de tejidos anómalos, es posible diagnosticar tempranamente la aparición de cualquier patología o enfermedad [95].

122 *Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio*

Frecuencia (MHz)	Constante dieléctrica	Conductividad (S/m)
10	160	.625
40	97	.693
100	72	.89
200	56	1.28
300	54	1.37
433	53	1.43
915	51	1.60

Tabla 4.2 Constante dieléctrica y conductividad de algunos materiales biológicos.**Figura 4.19** Geometría de la simulación sobre tejido biológico.

Confirmada la dependencia con la frecuencia sólo falta obtener un modelo de comportamiento que sirva de entrada al modelo

multifrecuencial. En la simulación realizada se analiza dicho comportamiento tomando el modelo de dispersión de Debye como referente en el estudio del comportamiento del músculo (se toman, como referencia, los datos de la tabla 4.2 y 4.3). Para caracterizar la respuesta de un sistema biológico a un pulso electromagnético se debe conocer el valor del campo en el interior y alrededores, así como su conversión en energía mecánica o térmica. La simulación de la evolución de campos electromagnéticos aplicados a este propósito ofrece herramientas computacionales que utilizan métodos numéricos (p.e. el método de las diferencias finitas) con los que evaluar los resultados obtenidos.

material	ϵ_{∞}	ϵ_{s1}	τ_1 (s)
Plástico	2.0	-	-
Agua	4.9	80.1	10.0e-12
Agua ionizada	4.9	80.1	10.0e-12
Sangre	7.0	4007.0	6.0e-08
Hueso (cancellous)	2.5	97.5	6.0e-08
Hueso (cortical)	2.5	37.5	6.0e-08

Tabla 4.3 Parámetros de Debye para los materiales utilizados en la simulación [32].

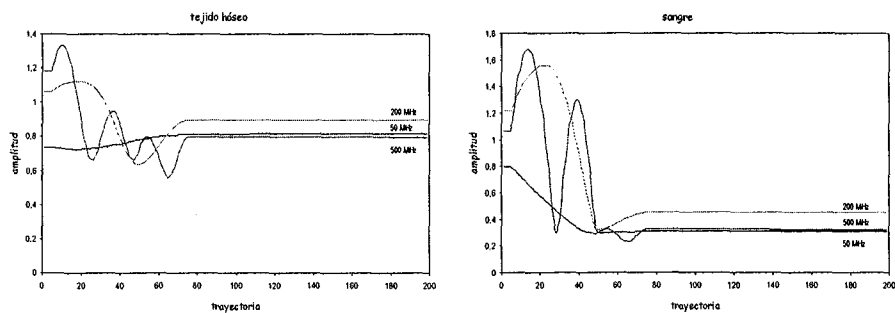


Figura 4.20 Simulación de un pulso electromagnético que atraviesa diferentes materiales. Análisis del comportamiento a diferentes frecuencias.

124 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

Se han tomado tres frecuencias de referencia y se han obtenido los valores del campo (amplitud y fase) a lo largo de la trayectoria del campo eléctrico desde su origen hasta su posterior penetración y transmisión en diferentes materiales.

La finalidad de esta simulación es el de valorar la capacidad del modelo de tratamiento multifrecuencial en la determinación de los parámetros que caracterizan el medio atravesado por el pulso. Es decir, intentaremos responder al siguiente interrogante: ¿podremos estimar los parámetros del medio atravesado utilizando mediciones a diferentes frecuencias?

En la figura 4.20 se muestra una comparativa entre los resultados obtenidos para diferentes tipos de materiales con comportamiento dispersivo representado por el modelo de Debye:

$$\varepsilon_r^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_{s1} - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau_1} + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0} \quad (4.83)$$

Se observan las diferencias existentes entre ellos para los valores de las frecuencias analizados. Un análisis de este comportamiento a diferentes frecuencias podría, por tanto, dar información acerca del medio analizado.

Nuestro estudio pretende ir más lejos y planteamos un nuevo interrogante ¿podríamos diferenciar un tejido sano de uno patológico? Existen trabajos en los que tanto el factor de disipación dieléctrica de un tejido mamario sano como el de uno cancerígeno ha sido analizado con objeto de poder diferenciarlos (23). Los resultados han evidenciado el comportamiento diferencial en función de la frecuencia de trabajo, todo esto introduce expectativas para la utilización del análisis multifrecuencial en este tipo de aplicaciones.

4.4 Utilización del núcleo de simulación

En la figura 4.1 se expuso el diseño funcional de la plataforma de simulación creada en el apartado anterior mediante el desarrollo de módulos que pueden ser ampliados o modificados. Esta plataforma, a modo de núcleo de simulación genérico, provee de las herramientas necesarias mediante las cuales las aplicaciones diseñan un escenario

más próximo a la realidad. Como ejemplo de utilización se han diseñado tres aplicaciones potenciales donde la utilización del método de tratamiento diferencial provee nuevas posibilidades de estudio y análisis. Cada una de ellas utilizará alguno de los módulos construidos dentro del núcleo de simulación creado. Estas tres aplicaciones son:

- Determinación de los parámetros de un medio dispersivo
- Cálculo de la distancia en un sistema de posicionamiento
- Detección de la variación de la permitividad dieléctrica en una muestra de tejido biológico.

Son tres ejemplos que toman el núcleo de simulación como soporte para construir una simulación más realista. Los resultados servirán no sólo para la aplicación concreta sino también como información para el enriquecimiento del propio núcleo de simulación, el cual debe ampliarse con nuevos módulos que incrementen su funcionalidad. Lógicamente los casos tratados no son los únicos posibles aunque cubren el campo de aplicación del método.

M1. Determinación de los parámetros de un medio dispersivo

Con la simulación de la propagación de un pulso electromagnético en un medio dispersivo (Debye), realizada en el apartado anterior, se tiene el soporte necesario con el que analizar este tipo de medios y con el que estudiar la hipótesis de trabajo. Existen, además de este modelo, otras representaciones de modelos dispersivos (4.50, 4.51, 4.52) que intentan acercarse al comportamiento de la señal en todo tipo de escenarios. A estos modelos genéricos se suman modelos empíricos que se obtienen cuando la aplicación y medio analizado son tratados de manera específica.

Hay, por tanto, un abanico de posibilidades que se utilizan en función del escenario (medio analizado). Con las directrices establecidas por el simulador se facilita la incorporación de nuevos modelos en el propio núcleo de simulación (Anexo II). Como consecuencia, todo lo realizado para el modelo dispersivo de Debye es equivalente para cualquier otro modelo de comportamiento. Sólo habría que modificar el módulo que lo implementa. Tras estas consideraciones iniciales la hipótesis será estudiada para el tipo de medio ya definido y en rangos de frecuencias en los que se manifiestan los fenómenos dispersivos. Los parámetros que

lo caracterizan $(\varepsilon_r, \sigma, \chi, t_0)$ serán los valores a determinar en un escenario de simulación indicado en la figura 4.21. En un medio dispersivo la frecuencia induce comportamientos diferentes en la propagación del pulso electromagnético. La velocidad de propagación y la atenuación son las magnitudes mediante las que observamos este comportamiento. El método de tratamiento multifrecuencial plantea funciones del tipo $g = g(\Delta x_r)$ que en este caso vienen dadas por las diferencias de tiempo en el receptor (Δt_{ij}) y/o de amplitud (ΔA_{ij}) [118]. El medio que queremos estudiar es,

$$\varepsilon_{Debye}(\omega) = \varepsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0} + \frac{\chi_1}{1 + j\omega t_0} \quad (4.84)$$

Este medio está representado por 4 parámetros a determinar $(\varepsilon_r, \sigma, \chi, t_0)$. Se establece una equivalencia entre la ecuación 4.84 y la formulación que relaciona la permitividad compleja (ecuación 4.85), la atenuación (ecuación 4.86) y la velocidad de propagación (ecuación 4.87) para un medio genérico.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_e + \frac{\sigma_e}{j\omega\varepsilon_0} \quad (4.85)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon_0\varepsilon_e}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_e}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_e}\right)^2} - 1 \right]} \quad (4.86)$$

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\varepsilon_0\varepsilon_e}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_e}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_e}\right)^2} + 1 \right]}} \quad (4.87)$$

A partir del modelo de Debye vamos a determinar la permitividad y la conductividad efectiva como funciones de la frecuencia de trabajo, es decir, vamos a establecer la equivalencia entre 4.84 y 4.85 y, como consecuencia, el enlace con 4.86 y 4.87 que nos permitirán plantear el sistema de ecuaciones previsto. Esta relación se muestra en 4.88 y 4.89.

$$\epsilon_e = \epsilon_r + \frac{\chi_1}{1 + (\omega t_0)^2} \quad (4.88)$$

$$\sigma_e = \sigma + \frac{\omega^2 \epsilon_0 t_0 \chi_1}{1 + (\omega t_0)^2} \quad (4.89)$$

Si mediante la medición diferencial se pueden establecer la ϵ_e y la σ_e para 4 frecuencias de trabajo, los valores $(\epsilon_r, \sigma, \chi_1, t_0)$ del medio dispersivo podrán ser estimados mediante las relaciones anteriores. Se toma un medio cuyos parámetros para el rango de frecuencias 10 a 1000 MHz son $\epsilon_r = 2, \sigma = 0.01, \chi_1 = 2, t_0 = 1e-9$ (figura 4.21). La geometría de la simulación es conocida, por lo que el espesor del medio es un dato conocido. Las frecuencias utilizadas y los valores efectivos de los parámetros se muestran en la tabla 4.4.

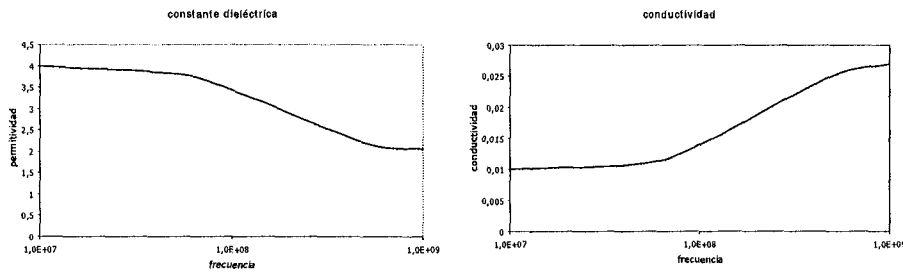


Figura 4.21 Constante dieléctrica y conductividad como función de la frecuencia en un medio dispersivo cuyos parámetros son $\epsilon_r = 2, \sigma = 0.01, \chi_1 = 2, t_0 = 1e-9$.

frecuencia (MHz)	ϵ_e	σ_e
10	3,992	0,01
50	3,820	0,011
100	3,433	0,014
500	2,183	0,025
1000	2,049	0,027

Tabla 4.4 Valores efectivos de la constante dieléctrica para cada una de las frecuencias utilizadas.

128 *Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio*

La simulación toma las diferencias de velocidad en el medio que se manifiestan mediante el retraso entre las señales. El factor de pérdidas del medio podrá estimarse midiendo las diferencias en la amplitud en el receptor.

Las frecuencias más altas se atenuarán más rápidamente, a la vez su constante dieléctrica será menor y como consecuencia su velocidad en el medio será mayor (figura 4.21).

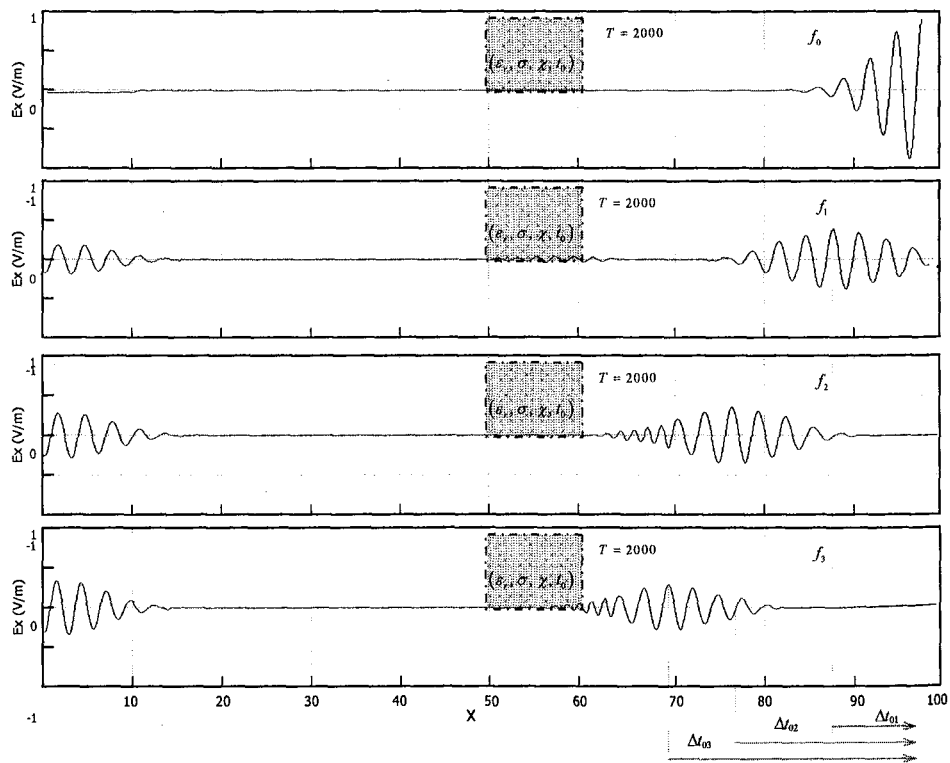


Figura 4.22 Evolución de los pulsos de diferente frecuencia en el medio dispersivo analizado. Se observa tanto el retraso de las señales como la diferencia en la atenuación como consecuencia de la interacción con el medio. Los retrasos producidos se cuantifican tomando como referencia la frecuencia (f).

Dado que en la geometría de la simulación conocemos el espesor del medio (figura 4.22), el tiempo de llegada será $t_r = t_{e1} + t_{md} + t_{e2}$, siendo t_{e1}

y t_{e2} los tiempos de transmisión fuera de la probeta y t_{md} el tiempo que tarda la señal en atravesarla. Utilizando mediciones diferenciales el sistema de referencia espacial no influye en la simulación, dado que la propagación de la señal fuera de la probeta es la misma para cualquier frecuencia. Si consideramos que las señales son enviadas de forma simultánea, tampoco necesitamos establecer ningún sistema de referencia temporal. Se cumple, por tanto, una de las ventajas de utilizar el tratamiento diferencial.

Las condiciones de la simulación permiten obtener diferencias en la velocidad y amplitud tomando como referencia la propagación del pulso electromagnético en el vacío.

Los valores de las diferencias de tiempo son,

$$\Delta t_{01} = 3,33 \text{ ns} \quad \text{para } f_1 = 10 \text{ MHz}$$

$$\Delta t_{02} = 2,66 \text{ ns} \quad \text{para } f_2 = 100 \text{ MHz}$$

$$\Delta t_{03} = 1,33 \text{ ns} \quad \text{para } f_3 = 1000 \text{ MHz}$$

Se ha tomado como señal de referencia (f_0) los datos obtenidos para un pulso que atraviesa el escenario para cuya frecuencia de trabajo la velocidad de propagación no se ve afectada por el medio o bien es conocida, en este caso se toma c_0 . Una vez introducido el rango de frecuencias para el cual el medio introduce los mecanismos de dispersión se obtienen los valores diferenciales con los que se determina sus parámetros efectivos. Las mediciones relativas se introducen en un sistema de ecuaciones mediante el cual determinar la velocidad de propagación y la atenuación para cada frecuencia. En el sistema de ecuaciones mostrado en 4.90 se determina la velocidad de propagación para cada frecuencia.

$$\Delta t_{0i} = \frac{d}{c_0} - \frac{d}{v_{pi}} \quad (4.90)$$

con $i = 1, 2, 3$

Siendo d el espesor de la probeta, c_0 la velocidad de propagación en el vacío y v_{pi} la velocidad de propagación de la señal a la frecuencia i dada.

Con las velocidades de propagación se podrán estimar los parámetros efectivos del medio. Utilizando las ecuaciones 4.88 y 4.89 se determinan los parámetros del medio $(\varepsilon_r, \sigma, \chi, t_0)$ buscados.

M2. Determinación de distancias para un sistema de posicionamiento

Los sistemas de posicionamiento precisan determinar la distancia entre el objeto y las referencias con las que posicionarse. Si el medio por el que las OE se transmiten presenta un modelo de comportamiento dependiente de la frecuencia podremos aplicar el modelo de tratamiento multifrecuencial con el objeto de determinar las distancias a las referencias marcadas.

Si que la velocidad de propagación de la onda electromagnética no es constante, sino que depende de la frecuencia de la señal y del medio a través del cual se propaga, podemos establecer una relación entre las velocidades de transmisión, las frecuencias del enlace de la onda electromagnética y las características del medio. Esta relación se podría utilizar para el cálculo de distancias entre emisor y receptor.

Si partimos de una relación del tipo $v_i = g(f_i, k_1, \dots, k_j)$, donde la velocidad es función de la frecuencia y de factores que dependen del medio (k_1, \dots, k_j) , se puede plantear el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} v_1 \cdot t_1 &= d \\ &\dots\dots\dots \\ v_n \cdot t_n &= d \end{aligned} \quad (4.91)$$

Midiendo las diferencias de tiempo en la llegada de las ondas (c_i) , se obtienen n-1 ecuaciones:

$$\begin{aligned} t_1 - t_2 &= c_1 \\ &\dots\dots\dots \\ t_1 - t_n &= c_{n-1} \end{aligned} \quad (4.92)$$

Conocida la relación velocidades-frecuencias, podemos concluir que:

$$\begin{aligned}
 v_1 &= g(f_1, k_1, \dots, k_j) \\
 &\dots\dots\dots \\
 v_n &= g(f_n, k_1, \dots, k_j)
 \end{aligned}
 \tag{4.93}$$

Así pues, el sistema de ecuaciones tiene como incógnitas la distancia del enlace d , las n velocidades de propagación, los n tiempos en valor absoluto y las constantes que representan al medio en el momento del enlace. Se plantea, pues, un sistema de $3n - 1$ ecuaciones con $2n + 1 + j$ incógnitas, con lo que se deduce que $n = j + 2$ [26].

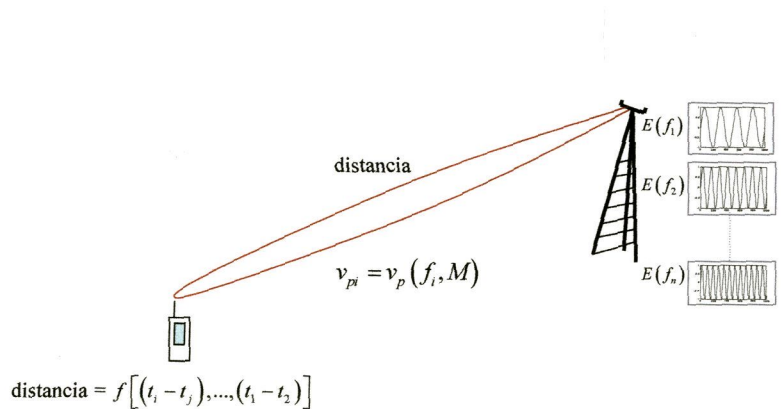


Figura 4.23 Escenario de simulación para un sistema de posicionamiento local. Mediante la determinación de la distancia a antenas fijas podremos crear sistemas de posicionamiento en entornos acotados.

Como se ha visto, el sistema de ecuaciones resultante depende principalmente del modelo que caracteriza al medio en su interacción con la propagación de la onda electromagnética. En la simulación se han estudiado diferentes modelos en los que se representa la relación existente entre la frecuencia y la velocidad de propagación. Para ello se toma un escenario acotado representado por un medio en el que se conoce su comportamiento a diferentes frecuencias (figura 4.23). En este caso, la distancia viene determinada por las diferencias de tiempo medidas en el receptor.

La aplicabilidad del método depende de los fenómenos de dispersión necesarios con los que medir las diferencias en el receptor. Dentro de la teoría general del electromagnetismo la permitividad efectiva del medio

es un parámetro con el que establecer el retraso en la velocidad de propagación a través de dicho medio. Los fenómenos de dispersión introducen retrasos que dependen de la frecuencia.

En este escenario, lo interesante es determinar los valores a partir de los cuales el método podría obtener las diferencias con las que estimar la distancia al emisor. Además del medio, la magnitud de la distancia a calcular también influye en la valoración de los límites y órdenes de magnitud de las diferencias.

La gráfica 4.24 muestra las diferencias obtenidas en función de la distancia y de los porcentajes de variación de la permitividad efectiva para dos frecuencias que presentan diferentes velocidades de propagación.

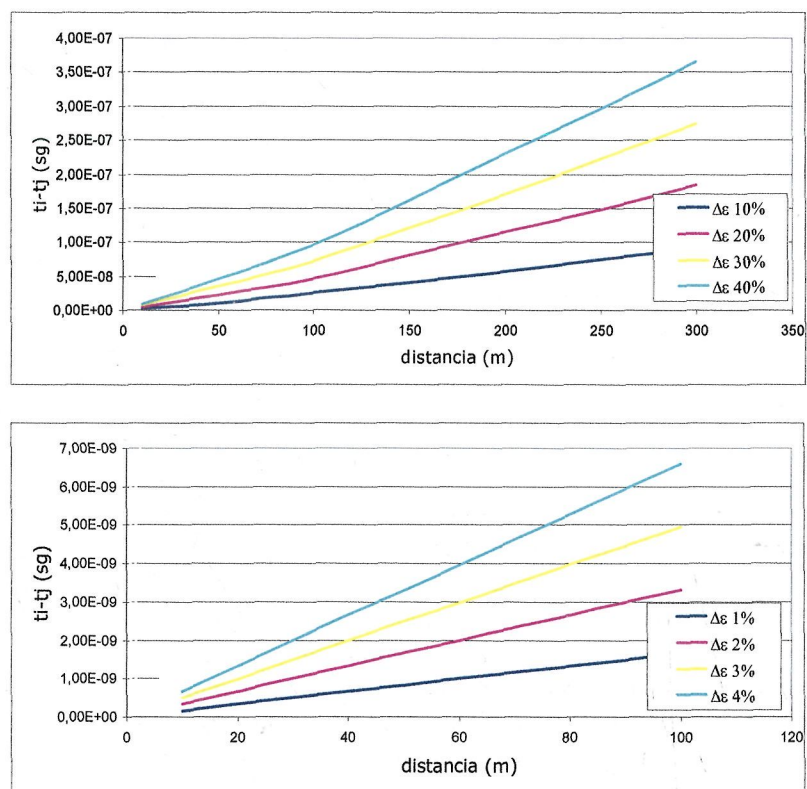


Figura 4.24 Diferencias obtenidas en el receptor en función de la variación de la permitividad efectiva y de la distancia al emisor.

Dado que el método de tratamiento multifrecuencial utiliza modelos de comportamiento que representan la interacción onda medio, es necesario analizar los errores producidos en la determinación de la distancia ante las desviaciones que el propio modelo introduce. Con los datos obtenidos en el análisis previo se determina el error en la determinación de la distancia en función de la desviación porcentual de la permitividad efectiva real. Para conocer el efecto de este tipo de error se ha elaborado una tabla en la que, como dato de entrada, se tiene la diferencia de tiempo medida y el valor porcentual del fenómeno dispersivo.

La diferencia de tiempo y la diferencia porcentual en la velocidad efectiva dan, como resultado, un valor estimado de la distancia del enlace. A partir de la distancia teórica se puede estimar el error frente a diferentes desviaciones del modelo que representa el fenómeno dispersivo.

Analizamos los resultados vemos que, cuando los fenómenos dispersivos inducen diferencias por debajo del 5% los errores producidos ante desviaciones del modelo (sobre el 1%) provocan errores del 5% en la estimación de la distancia.

Este resultado se mejora cuando los fenómenos dispersivos inducen variaciones de más del 10%, en este caso, la tasa de error disminuye a valores del 0,64% en la estimación de la distancia. La conclusión sobre la aplicabilidad del método pasa, por tanto, por trabajar con modelos donde, tanto las tasas de error, como el valor diferencial del fenómeno dispersivo, sean conocidos y valorados como paso previo a su utilización.

Si utilizamos la permitividad efectiva como $\varepsilon_{ef} = \sqrt{\varepsilon_r}$ la relación lineal entre velocidad y tiempo simplifica la determinación de la distancia a partir del retraso entre dos señales en entornos cuya $\Delta\varepsilon$ se conoce. La tabla 4.5 muestra los valores de las diferencias de tiempo obtenidas ante diferentes valores de $\Delta\varepsilon$ junto con los errores producidos frente a diferentes desviaciones de los valores teóricos. Los valores son unitarios y representan el desfase (ns) por unidad de longitud (cm).

Para determinar la distancia del enlace mediante el desfase producido en la recepción de dos señales es necesario conocer la magnitud de los fenómenos de dispersión ($\Delta\varepsilon_{ef}$) y el valor del retraso ($t_2 - t_1$).

134 *Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio*

$\Delta\epsilon_{ef} \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
retraso (t_2-t_1) \rightarrow	0,03333	0,06667	0,1	0,13333	0,16667	0,2	0,2333	0,26667	0,3
desviación % \downarrow									
1	0,00033	0,00067	0,001	0,00133	0,00167	0,002	0,0023	0,00267	0,003
2	0,00067	0,00133	0,002	0,00267	0,00333	0,004	0,0047	0,00533	0,006
3	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
4	0,00133	0,00267	0,004	0,00533	0,00667	0,008	0,00933	0,01067	0,012
5	0,00167	0,00333	0,005	0,00667	0,00833	0,01	0,01167	0,01333	0,015
6	0,002	0,004	0,006	0,008	0,01	0,012	0,014	0,016	0,018
7	0,00233	0,00467	0,007	0,00933	0,01167	0,014	0,01633	0,01867	0,021
8	0,00267	0,00533	0,008	0,01067	0,01333	0,016	0,01867	0,02133	0,024
9	0,003	0,006	0,009	0,012	0,015	0,018	0,021	0,024	0,027

Tabla 4.5 Tabla patrón para determinar la distancia del enlace en función de la velocidad de propagación y de la diferencia de tiempo medida en el receptor.

Supongamos los valores $\Delta\epsilon = 0,25$ y $(t_2 - t_1) = 20 \mu s$. Mediante la tabla 4.5 se calcula el retraso producido por unidad de longitud (en este caso por cm). Para $\Delta\epsilon = 0,25$ debo tomar los datos de las celdas $\Delta\epsilon = 2$ y $\Delta\epsilon = 5$.

Para $\Delta\epsilon = 0,2$ se obtiene un retraso unitario de 0,00667

Para $\Delta\epsilon = 0,05$ se obtiene un retraso unitario de 0,00167

El retraso por unidad de longitud es 0,00834 ns/cm.

Para 20 μs la distancia se obtiene mediante la relación

$0,00834 \cdot d = 20000$. El resultado es $d = 23999,8 m$.

El cálculo se generaliza si se siguen los pasos:

Determinar el retraso unitario r con la entrada a tabla de $\Delta\epsilon$. Dado un valor $\Delta\epsilon = ab, cd$ el retraso se calcula utilizando la ecuación: $r = 10 \cdot vt(\Delta\epsilon = a) + 1 \cdot vt(\Delta\epsilon = b) + 0,1 \cdot vt(\Delta\epsilon = b) + 0,01 \cdot vt(\Delta\epsilon = b)$ con $vt(\Delta\epsilon = a)$ el valor en la tabla 4.3 para $\Delta\epsilon = a$.

Calcular la distancia mediante la expresión $r \cdot d = (t_2 - t_1)$

Con este planteamiento se simplifica tanto la determinación de la distancia como el cálculo del error producido ante desviaciones tomadas para la $\Delta\epsilon_{ef}$. El error se puede determinar utilizando la tabla 4.3. Como ejemplo consideramos un medio cuya $\Delta\epsilon = 5$. En este caso el desfase es $0,16667 \text{ ns/cm}$. Si se produce una desviación en la estimación del 1%, el error producido es también del 1%. El desfase sería $0,16667 + 0,01 \cdot 0,16667 = 0,16833 \text{ ns/cm}$. Tanto la tabla como los cálculos que de ella derivan parten de un escenario en el que el medio dispersivo es conocido y que, como consecuencia, los retrasos producidos por las diferencias en las velocidades de propagación se pueden determinar para dos frecuencias dadas.

M3. Detección del cambio de la permitividad en muestras de tejido biológico

La utilización de las señales electromagnéticas y el estudio de los tejidos biológicos como medios dispersivos configuran una línea de investigación ya enumerada en el estado del arte. Existen modelos de comportamiento [100] que podemos tomar como referencia en la simulación que realizaremos. En nuestro caso los parámetros y valores que definen la función de transferencia son los representados en la ecuación 4.94 y la tabla 4.6.

$$\epsilon_{\text{tejido}}(\omega) = \epsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0} + \epsilon_1 \frac{\omega_0}{(\omega_0^2 + \alpha^2) + j2\omega\alpha + \omega^2} \quad (4.94)$$

frecuencia (MHz)	constante dieléctrica	conductividad
10	160	0,625
40	97	0,693
100	72	0,89
433	53	1,43
915	51	1,60

Tabla 4.6 Valores de la permitividad y conductividad de muestras de tejido humano en función de la frecuencia [100].

Utilizaremos la tabla 4.6 para determinar los retrasos obtenidos en pulsos electromagnéticos de diferentes frecuencias. A continuación modificaremos el valor de la permitividad del tejido y obtendremos, a su vez, los correspondientes retrasos. Finalmente se compararán los resultados donde podremos estudiar las posibilidades del método de tratamiento multifrecuencial en la detección de anomalías (modificación de los parámetros que representan el medio en relación a los valores establecidos como normales). En la figura 4.25 se muestran los retrasos relativos para las frecuencias de 10 y 100 MHz. Las figura 4.25 y 4.26 muestran los retrasos para modificaciones de la constante dieléctrica del 10 %, 20 y 30% para cada una de las frecuencias de trabajo.

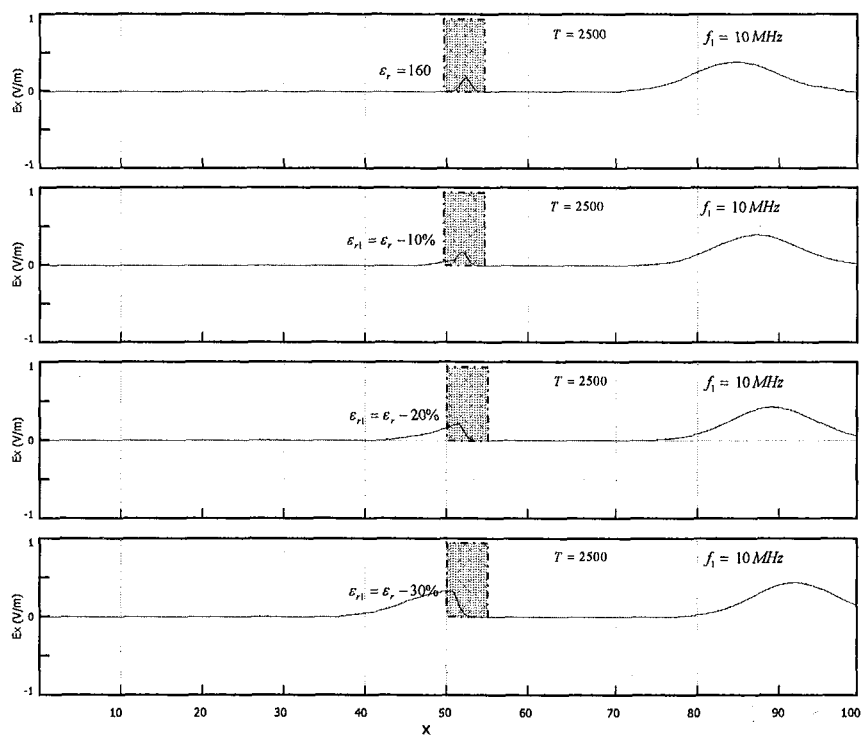


Figura 4.25 Evolución de un pulso electromagnético que atraviesa la muestra de tejido marcada en la gráfica. Se observa la variación de velocidad a medida que la permitividad del medio se modifica. Los parámetros efectivos del medio dependen de la frecuencia utilizada. En este caso la frecuencia de la señal es 10 MHz.

En el caso de que la permitividad del tejido sufra variaciones que afectan por igual a todo el rango de frecuencias, los retrasos relativos serán los mismos que para el caso del tejido tomado como patrón. Sin embargo, si la permitividad varía de forma anómala, es decir, con modificaciones que dependen de la frecuencia, entonces los retrasos relativos sufrirán diferencias observables mediante el método de medición multifrecuencial. Los resultados de la simulación confirman que ante variaciones del medio el retraso entre señales se desplaza en la misma magnitud porcentual. Como consecuencia, es plausible la utilización el método de tratamiento multifrecuencial en aplicaciones que pretendan determinar y comparar los valores de la permitividad o la conductividad con el objetivo de extraer conclusiones acerca del estado del tejido analizado.

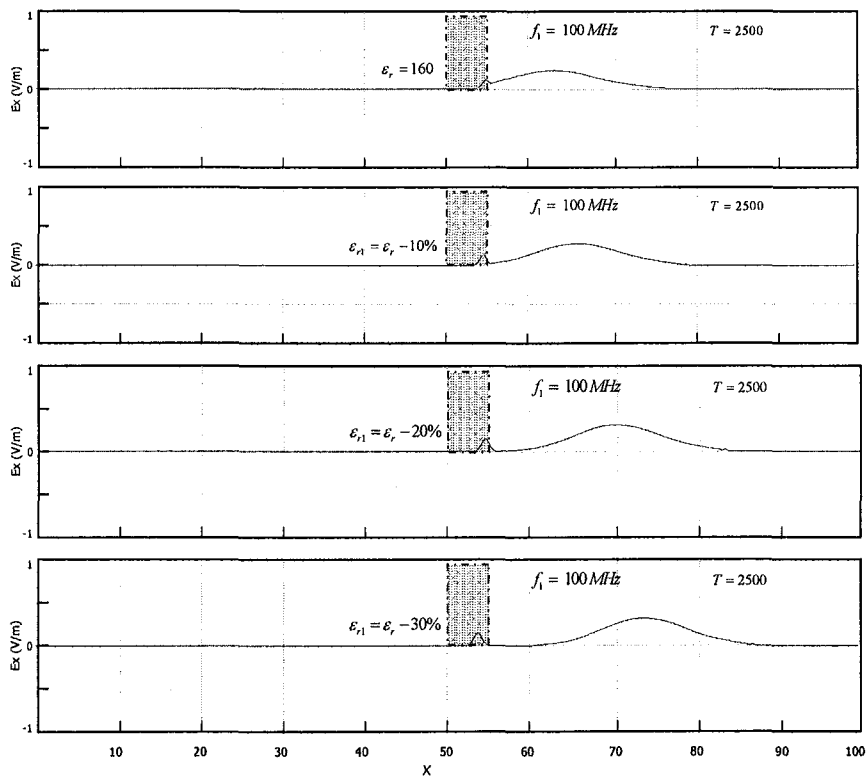


Figura 4.26 Evolución de un pulso electromagnético de 100 MHz que atraviesa la muestra de tejido marcada en la gráfica. Se observa el retraso en relación al pulso de la gráfica anterior y el adelanto del pulso ante variaciones de la permitividad relativa.

Además de considerar aplicaciones en las que la señal atraviese el tejido en estudio, la reflexión de la onda y su propagación también depende de la frecuencia utilizada. Este hecho es útil en el diseño de aplicaciones que midan la señal que se ve reflejada por la existencia de un tumor. Los tumores representan un cambio sustancial del valor de la permitividad y conductividad en relación al del tejido sano [114]. Una microcalcificación provocaría la reflexión de la onda electromagnética a través del tejido como se muestra en la figura 4.27. La región estudiada se divide en una rejilla de puntos mediante la cual poder aplicar la simulación basada en algoritmos FDTD.

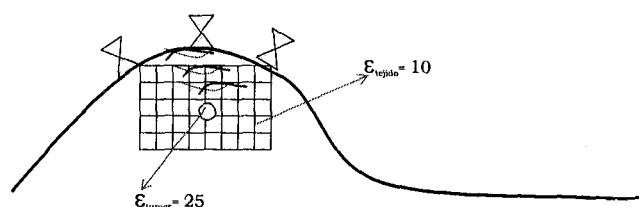


Figura 4.27 Configuración de la emisión-recepción de la energía reflejada por un tumor en una mamografía realizada con microondas.

En la tabla 4.7 se muestran los valores los valores de la permitividad y de la conductividad para estudios realizados a una frecuencia de 6 GHz. [114].

ϵ_{tejido}	σ_{tejido}	ϵ_{tumor}	σ_{tumor}
9,8	0,4 (S/m)	25	7 (S/m)

Tabla 4.7 Valores de la permitividad y conductividad de tejido mamario frente a los valores de un tumor presente en dicha zona [115].

En este tipo de estudios, el tejido presenta un comportamiento dispersivo que depende de la frecuencia. En 4.95 se muestra un modelo empírico [115] a partir del cual se puede determinar los parámetros dependientes de la frecuencia, para este escenario y para el rango de frecuencias que van desde 1 a 3 GHz.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{tejido}}(f) &= 1.71f^{1.13} + \frac{\varepsilon_s - 4}{1 + \left(\frac{f}{25}\right)^2} \\ \sigma_{\text{tejido}}(f) &= 1.35\sigma_{0.1}f^{0.13} + 0.00222f^2 \left[\frac{\varepsilon_s - 4}{1 + \left(\frac{f}{25}\right)^2} \right] \end{aligned} \quad (4.95)$$

Donde f es la frecuencia en GHz y los parámetros $\sigma_{0.1}=0.05$ y $\varepsilon_s=8.5$.

A partir de este modelo se puede construir una tabla con los valores obtenidos para diferentes frecuencias dentro del rango establecido de las microondas. La tabla 4.8 muestra los valores de la permitividad y conductividad del tejido mamario.

frecuencia (GHz)	permitividad relativa	conductividad	$\sigma/(\omega\varepsilon)$
1	6,2	0,077	0,343
1,5	7,1	0,09	0,589
2	8,2	0,11	0,906
2,5	9,3	0,13	1,28
3	10,3	0,16	1,71

Tabla 4.8 Valores de la permitividad y conductividad para el rango de frecuencias dado según el modelo mostrado en 4.95.

Tomando el valor de la permitividad relativa existirá un retraso para las frecuencias más altas cuyo valor dependerá de la distancia del elemento reflector. En este escenario la geometría de los ensayos apuntan a distancias de penetración de 5 cm [115] obteniéndose, por tanto diferencias de tiempo en función de la distancia y de las frecuencias utilizadas. La tabla 4.7 muestra los valores obtenidos para este rango.

frecuencias (GHz)	d=1 cm Δt (ns/cm)
1-1,5	0,011
1-2	0,027
1-2,5	0,045
1-3	0,065

Tabla 4.9 Diferencias obtenidas en función de la distancia y de las frecuencias utilizadas.

4.5 Difusión y acceso al núcleo de simulación

La difusión y la facilidad de acceso al núcleo de simulación son dos objetivos definidos en su diseño. Para ello, la representación del conocimiento orientado a la imagen y la interactividad en cada experimento se perfilan como herramientas con las que alcanzar dichos objetivos. El anexo II introduce alguno de los principales aspectos relacionados con el diseño cuya justificación la enmarca en un contexto de interrelación ciencia, tecnología y sociedad.

Para dotar al sistema de las interfaces adecuadas y permitir su adaptación a diferentes necesidades, el diseño sigue alguna de las principales pautas y notaciones empleados en el Lenguaje Unificado de Modelado [118]. El diseño, por tanto, estará dirigido por los casos de uso, centrado en la arquitectura y realizado de forma iterativa e incremental. Los casos de uso nos ayudan a llevar a cabo el desarrollo iterativo.

Cada iteración se dirige por los casos de uso a través de todos los flujos de trabajo, de los requisitos al diseño y a la prueba, obteniendo de ese modo un incremento. Cada incremento del desarrollo es, por tanto, una realización funcional de un conjunto de casos de uso. Existe una relación entre los casos de uso y la arquitectura puesto que la adecuada selección de los casos de uso permitirá implementar sistemas con arquitecturas estables que pueden utilizarse en ciclos de desarrollo subsiguientes. Además, con los casos de uso también se podrá elaborar la información necesaria para su utilización, mantenimiento o ampliación.

El modelo de casos de uso representa los requisitos funcionales del sistema. Un caso de uso especifica una secuencia de acciones, incluyendo variantes, que el sistema puede llevar a cabo y que producen un resultado observable de valor para un actor concreto [119]. Un actor podrá ser una persona, otros sistemas o cualquier hardware externo que interactúa con el propio sistema. En definitiva, con los casos de uso se podrán capturar los requisitos que sirven de entrada al análisis, diseño, implementación y prueba.

En esta primera iteración se identifican los siguientes casos de uso principales: *realizar simulación básica*, *realizar simulación avanzada* y *ampliación del núcleo de simulación*. Para el caso de uso que modela la realización de simulaciones avanzadas establecemos tres relaciones con otros tantos casos de uso. Hay una relación de generalización con el caso de uso ejecutar simulación y dos relaciones de extensión con los casos de uso añadir nuevo escenario y modificar algoritmos de resolución numéricos.

Las relaciones de extensión indican que una instancia del caso de simulación avanzada puede incluir el comportamiento especificado por los casos de uso añadir nuevo escenario o modificar algoritmos. La relación de generalización indica una secuencia iniciada por el actor que incluye los dos casos de uso relacionados.

El diagrama de uso se muestra en la figura 4.28. A partir de este diagrama se inician los flujos de trabajo con los que analizar, diseñar y desarrollar sucesivas versiones que se irán incrementando conforme a las iteraciones que sobre el sistema se vayan diseñando.

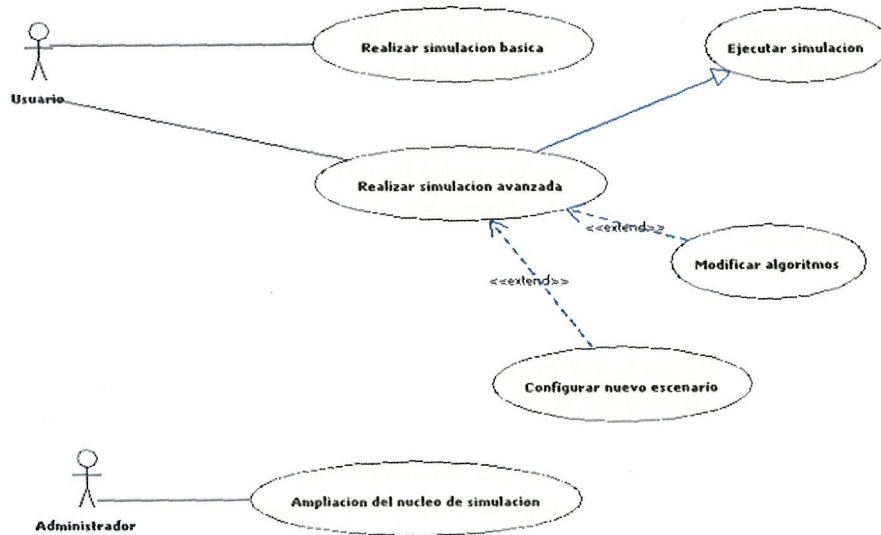


Figura 4.28 Diagrama de casos de uso genérico del simulador

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras

Luego tendría, Pegaso, que haber visitado el Hades, como lo hizo Ulises, para que pudiéramos determinar las características dieléctricas del reino de los muertos ...

En cambio, el desfase cromático de los rayos que nos envía, trae consigo la clave de la distancia y de la naturaleza de la materia que media hasta la fabulosa constelación equina.

5.1 Conclusiones

Se ha trabajado con una hipótesis que nace de la observación del comportamiento de las ondas electromagnéticas a diferentes frecuencias y su interacción con el medio físico. El punto de partida lo fija un hecho constatado en las aplicaciones que utilizan estos fenómenos: diferentes frecuencias provocan diferentes interacciones con el medio. Este hilo conductor ha marcado el planteamiento y posterior desarrollo metodológico.

Mediante el estudio teórico inicial, basado en la teoría general del electromagnetismo, se comprueba que la influencia de la frecuencia en la transmisión de la señal depende del medio que atraviesa. El tipo de medio condiciona la interacción y puede limitar, a su vez, la medición

diferencial. Los fenómenos de interacción son, en ocasiones, casi invariantes para un determinado rango de frecuencias y tipo de medio. En este caso, la obtención de valores diferenciales se dispara a órdenes de magnitud muy restrictivos, con lo que el sistema que pretenda captar esta diferencia debe de diseñarse con este requerimiento. Cualquier otro entorno (en donde sí se puedan obtener de forma más sencilla las diferencias con las que analizar el medio) deberá contar con el análisis previo de los valores y órdenes de magnitud esperados. La conclusión a este estudio inicial confirma, por tanto, la hipótesis planteada y establece una serie de límites al método propuesto.

Tras identificar aquellas aplicaciones susceptibles de ser analizadas y realizar una taxonomía basada en el tipo de tratamiento del fenómeno electromagnético, se han revisado diferentes aplicaciones y líneas de investigación en las que la frecuencia de la señal, además de ser factor clave en la interacción con el medio, condiciona, con su valor, el resultado final de esta interacción. La revisión del estado del arte, realizada con esta perspectiva, ha permitido encontrar un punto en común a todas las aplicaciones analizadas.

El método propuesto, utilizado de forma generalizada, tiene como objetivo obtener un modelo de comportamiento donde se integren, tanto los parámetros que representan el medio analizado, como aquellos que caracterizan la onda electromagnética. En relación a los parámetros que caracterizan el medio hay características aplicables a todo tipo de materiales: la permitividad, la conductividad o la constante dieléctrica son ejemplos de parámetros que aparecen en diferentes aplicaciones [25], pero también otro hay tipo de parámetros que son específicos de la aplicación: la tasa de lluvia en radares meteorológicos o la densidad electrónica en las ionosondas son dos ejemplos de ello.

En este trabajo la onda electromagnética queda definida mediante su frecuencia, amplitud, fase y velocidad de propagación. Para todos ellos, la frecuencia es el punto de enlace que une, no sólo lo que representa a la propia señal, sino su modificación conforme se produce la interacción con los diferentes parámetros con los que se representa el medio físico.

Después de la revisión del estado del arte se ha propuesto formalmente un modelo de tratamiento multifrecuencial para la interacción de ondas electromagnéticas con el medio. El modelo se presenta como una alternativa a diferentes aplicaciones que utilizan el tratamiento a diferentes frecuencias de forma individual. Además de esta alternativa, el

tratamiento en diferencias que defiende el modelo de tratamiento multifrecuencial aporta un método original para la determinación de la distancia entre el emisor y el receptor; se trata por tanto de un método que se podría emplear en los sistemas de posicionamiento [83].

El marco conceptual que presenta el modelo multifrecuencial se analiza utilizando métodos de tratamiento numérico que resuelven los fenómenos de propagación de la onda electromagnética en el medio físico. Tanto las ecuaciones de Maxwell, como las ecuaciones constitutivas del medio son introducidas en una herramienta de simulación diseñada a tal efecto. Esta herramienta de simulación utiliza plataformas de desarrollo abierto y universal, en las que la difusión y las posibilidades de modificación de los núcleos de simulación son dos de los requerimientos utilizados en su desarrollo.

Se ha creado un banco de pruebas configurable y adaptable al análisis de los problemas de la interacción onda-medio, donde se puedan integrar, a modo de núcleos de simulación, nuevos entornos o avances en la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales que representan el comportamiento de la señal. Para ello se han implementado diferentes algoritmos que representan la propagación de la onda electromagnética y su interacción con el modelo que represente, en cada caso, el medio analizado. En cada simulación el algoritmo que resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales es el mismo, lo que cambia para cada núcleo de simulación es el modelo del medio.

Esta batería de pruebas ha permitido analizar la potencialidad del método de tratamiento multifrecuencial y proponerlo como alternativa para cualquier aplicación que cuente con un modelo dispersivo en la interacción onda-medio. Así, desde radares de subsuelo a ionosondas, pasando por aplicaciones biomédicas, el modelo multifrecuencial puede ser utilizado como herramienta de trabajo en el conocimiento de los diferentes entornos analizados. Queda, por tanto, definida una línea de trabajo en la que el desarrollo de sistemas de tratamiento multifrecuencial con los que realizar ensayos de laboratorio, sería el siguiente paso en la consolidación del método propuesto.

De los resultados de las simulaciones y del tipo de aplicaciones tratadas podemos concluir que la hipótesis de trabajo es plausible dentro del ámbito que establecen los modelos matemáticos y físicos que representan los fenómenos de interacción onda-medio.

5.2 Líneas de trabajo futuras

La propuesta del tratamiento diferencial de la señal es una alternativa que inicia diferentes líneas de trabajo. Las simulaciones que representan los diferentes escenarios analizados ofrecen la base teórica con la que abordar la realización de una arquitectura especializada. Esta arquitectura deberá efectuar un procesamiento de la señal tanto en el tiempo como en la frecuencia para, de ese modo, abordar el tratamiento y análisis acorde al modelo teórico del escenario analizado.

Los rangos de frecuencias que se han utilizado (radiofrecuencia y microondas) y el tipo de señal (onda electromagnética) no son una restricción para el método de tratamiento en diferencias. Se trata de obtener diferentes comportamientos en el receptor, el factor que origina estas diferencias es, para este trabajo, la frecuencia de una onda electromagnética plana.

Las diferencias en un receptor también pueden producirse en ondas sonoras y ondas sísmicas. Dado que la frecuencia, en este tipo de señales, también interviene en los procesos de interacción con el medio que atraviesan, se abren dos posibles líneas de trabajo con las que aplicar el método de tratamiento diferencial. El tipo de aplicaciones que este tipo de señales podría abarcar amplía el campo de acción de la onda electromagnética. La capacidad de penetración de las ondas sonoras y sísmicas en escenarios marinos y terrestres es mayor en este caso que en el de las ondas electromagnéticas.

Por último, el rango de las frecuencias visibles a partir del infrarrojo, también son susceptibles de ser analizadas con la filosofía del tratamiento diferencial. El diferente índice de refracción en el medio para cada frecuencia o los mecanismos de detección del contraste cromático son ejemplos de la potencialidad del método. Además, el tamaño de las longitudes de onda de estas señales en relación a las de las microondas, también amplían los posibles escenarios de trabajo en relación del que pueden abarcar estas últimas.

Como resumen de lo expuesto en este apartado, las líneas de trabajo propuestas se pueden dividir en dos grandes grupos:

1. Las que se derivan de los resultados de las simulaciones en lo que compete a la realización de un prototipo hardware que procese la señal y efectúe el tratamiento diferencial.

2. Las que se extraen del método de tratamiento diferencial en relación a su posible utilización en otro tipo de señales (sonoras, sísmicas) o en otro tipo de rangos de frecuencias (infrarrojos, visible).

Del primer grupo se pueden extraer diferentes posibilidades que pueden depender del tipo de escenario analizado y del diseño del receptor que mida las diferencias con las que analizar el medio. En cuanto al receptor, la señal o señales captadas pueden ser bajo dos tipos de funcionamiento básicos. Podemos captar diferentes señales a diferentes frecuencias de portadora o bien podríamos captar una única señal sobre la cual analizar el comportamiento de las diferentes frecuencias que su ancho de banda permite. Para ambos, los órdenes de magnitud de las diferencias analizadas y los requerimientos que las frecuencias de trabajo imponen obligan a pensar en la utilización de arquitecturas basadas en procesadores digitales de la señal que utilicen técnicas de alto rendimiento (paralelismo extendido en arquitecturas VLIW o SMD).

Capítulo 6

Bibliografía

- [1] **Adey W.R., Ann N.Y.**, 1975. *Effects of Electromagnetic Radiation on de Nervous System*. Ac. Science N.Y. Vol 247, pgs. 15-20.
- [2] **Annan A.P., Cosway S.W., Sigurdsson T.**, 1994. *Ground Penetrating Radar for Snow Pack Water Content*. Proceedings of the fifth international conference on ground penetrating radar. Vol. 2. Canada, pgs. 465-475.
- [3] **Annan A.P., Davis J.L.**, 1977. *Radar Range Analysis for Geological Materials*. Geological Survey of Canada. Vol 77-1B, pgs. 117-124.
- [4] **Barret E.C., Curtis L.F.**, 1992. *Introduction to environmental remote sensing*. 3ª Ed. Chapman and Hall. 339 pgs.
- [5] **Battan L.J.**, 1973. *Radar Observation of the Atmosphere*. University of Chicago Press, 323 pgs.
- [6] **Braasch M.S., v Dierendonck A.J.**, 1999. *GPS Receiver Architectures and Measurements*. Proc. IEEE, Vol. 87, N1, pgs 48-64.
- [7] **Burden R.L.**, 1998. *Numerical Análisis*. 6th. Ed. Internacional Thomson Publishing. 812 pgs.
- [8] **Callahan I.S.**, 1984. *Ionosphere variations affecting altimeter measurements*, Marine Geodesy. Vol 8. Pgs.249-263.
- [9] **Campbell J.C.**, 1990. *Dielectric Properties and Influence of Conductivity in Soils at one to fifty Megahertz*. Soil Science Society of America Journal

150 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

SSSJD4 Vol. 54, No. 2, p 332-341

- [10] **Carcione J.M.**, 2001. *Radiation Patterns for 2-D Forward Modelling*. Geophysics. Vol. 63(2). Pgs: 424-430.
- [11] **Carcione J. M.**, 1996. *Ground Penetrating Radar: Wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media*. Geophysics, Vol. 61, N. 6. Pgs. 1664-1677.
- [12] **Carmichael, R.S.**, 1990. *Practical handbook of physical properties of rocks and minerals*. Ed. CRC Press. 741 pgs.
- [13] **Casañas R.**, 2003. *Contribución a la Caracterización Dieléctrica y Magnética del Tejido Bilógico*. Ph.D. Thesis, División Instrumentación y Bioingeniería de la Universitat Politècnica de Catalunya. 145 pgs.
- [14] **Coster A.J., Pratt M.M, Burke B.P., Misra P.N.**, 1998. *Characterization of Atmospheric Propagation Errors for DGPS*. Proc. ION 54th Annual Meeting, pgs 327-336.
- [15] **Davis J.L., Annan A.P.**, 1998. *Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy*. Geophysical Prospecting. Vol 37. Pgs. 531-551.
- [16] **Deitel H.M., Deitel P.J.**, 2004. *Java How to Program*, 6th Edition. Prentice Hall, 1568 pgs.
- [17] **Dobrin M.B.**, 1988. *Introduction to Geophysical Prospecting*. 4^a Ed. Mc Graw-Hill. 867 pgs.
- [18] **Donald, F.**, 1997. *Adaptive Antenna Arrays Applied to position Location*. Tesis. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Virginia.
- [19] **Dormido, S.**, 2004. *Prólogo Creación de Simulaciones Interactivas en Java. Aplicación a la Enseñanza de la Física*. Fco. Esquembre. Ed. Pearson Prentice-Hall. 330 pgs.
- [20] **Emslie A.G., Lagece R.L.**, 1976. *Propagation of Low and Medium Frequency Radio Waves in a Coal Seam*. Radio Science. Vol 4 n 11. Pgs 253-261.
- [21] **Esquembre F.**, 2005. *Creación de Simulaciones Interactivas en Java*. Prentice Hall. 330 pgs.
- [22] **Estrela d S., Marques de Sá J.P., Jossinet J.**, 2000. *Classification of Breast Tissue by Electrical Impedance Spectroscopy*. Med. Biol. Engin. Comput. 2000, 38:26.
- [23] **Fariñas W., Paz Z., Orta G., Rodríguez E.**, 2001. *A study of the*

- dielectric dissipation factor as a diagnostic tool. Rev. Biomed. Vol.13 N4. pgs 249-255.*
- [24] **Fatorelli S.**, 1997. *Integrating Radar and Remote Sensing Techniques of RainFall Estimation in Hydrological Applicatons.* Informe de la Comision Europea. Ciencia, Investigación y Desarrollo, 77 pgs.
- [25] **Ferrández F. J., C** 2003. *Estimation of permittivity and conductivity indispersive and attenuating media using multifrequency technique.* IEEE International Geoscience and Remote Senging IGARSS 2003. Vol II. Pgs 1097-1099
- [26] **Ferrández F.J., García J.M., Pujol F.**, 2000. *A new Multifrequency Technique to Measure Distances.* TELECOM 2000 International Conference.
- [27] **Fischer S., Grubeck H., Kangas A., Koorapaty H., Larsson E., Lundqvist, P.**, 1998. *Time of Arrival Estimation of Narrow Band Signals for Mobile Positioning.* Proceedings PIMRC-98. Pgs 456-460.
- [28] **Foy W.H.**, 1976. *Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation.* IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-12, pgs. 187-194.
- [29] **Fredick S., Videkanandan J., Ware R.H.**, 2001. *Propagation delays inducided in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and others particulates.* Journal of Geophysical research, Vol. 104, N.D8, pgs. 9663-9670.
- [30] **Fruhwrith R.K., Schmoedler R., Oberaigner E.R.**, 1996. *Some aspects on the Estimation of Electromagnetic Wave Velocity.* Proceedings of the sixth international conference on GPR. Tohoku University, Sendai. Pgs.: 135-138.
- [31] **Gabriel S., Lau R.W., Gabriel C.**, 1995. *The dielectric properties of biological tissues: measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz.* Physics Med Biol , 41:2251-69.
- [32] **Gabriel S., Lau R.W., Gabriel C.**, 1996. *The dielectric properties of biological tissues: models for the frequency dependence.* Physics Med Biol , 41:2271-93.
- [33] **Gabriel S.**, 1996. *Parameterized Cole-Cole Model.* Phys. Med. Biol. Vol.41 2251.
- [34] **García E. M.**, 2001. *Ciencia, tecnología y sociedad: una aproximación conceptual.* OEI.
- [35] **García F.**, 1997. *Aplicaciones de la técnica geofísica de prospección por geo-radar en glaciología e ingeniería civil.* Tesis Doctoral. Universitat

152 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

- Politécnica de Catalunya. 219 pgs.
- [36] **García M.**, 2004. *Contributions to the 3D ionospheric sounding with GPS data*. Ph. D. Thesis, Research group of Astronomy and Geomatics. Universitat Politècnica de Catalunya, 126 pgs.
- [37] **Geselowitz D.B.**, 1967. *On bioelectric potentials in on inhomogeneous volume conductor*. Biophys J., 7:1-11.
- [38] **Golio M.**, 2001. *The RF and Microwave Handbook*. CRC Press.
- [39] **González M. I.**, 1996. *Ciencia, Tecnología y Sociedad. Una introducción al estudio social de la ciencia y la tecnología*. Ed. Tecnos.
- [40] **Goodman D.**, 1994. *Ground-penetrating Radar Simulation in Engineering and Archaeology*. Geophysics. Vol. 59, n.2. Pgs.: 224-232.
- [41] **Goodman D., Nishimura Y.**, 1992. *2-D Synthetic Radargrams for Archaeological Investigation*. IV International Conference on GPR. Geological Survey of Finland, special paper 16. Pgs. 339-343.
- [42] **Grady B.**, 1998. *The Unified Modeling Language User Guide*. Addison-Wesley.
- [43] **Grasmueck M.**, 1996. *3-D Ground-penetrating Radar Applied to Fracture Imaging in Gneiss*. Geophysics, Vol 61 n.4. Pgs.: 1050-1064.
- [44] **Grimmes S., Martinsen G.**, 2000. *Bioimpedance & Bioelectricity Basics*. Academic Press, San Diego.
- [45] **Guru B.S., Chen K.M.**, 1976. *Experimental and Theoretical Studies on Electromagnetic Fields induced inside finite biological bodies*. IEEE Transaction on Microwave Theory and Technique. MTT 24, pgs. 433-440.
- [46] **Halamshaw R.**, 1994. *Non Destructive Testing*. 2 Ed. E. Arnold.
- [47] **Hänninen P., Koponen L., Koskihade A., Maijada R., Pollari R., Saarenketo, T., Satinen R.**, 1992. *Ground Penetrating Radar. Geophysical Research Methods*. Ed. The Finnish Geotechnical Society. The Finnish Building Centre Ltd. 64 pgs.
- [48] **Hao X.**, 2000. *Terrestrial Radio Wave Propagation at Millimeter-Wave Frequencies*. Virginia Polytechnic Institute. For the degree of Doctor in Electrical and Computer Engineering. 217 pgs.
- [49] **Hurt W.D.**, 1985. *Multiterm Debye Dispersion Relations for Permittivity of Muscle*. IEEE Trans. On Biomedical Engineering, Vol. BME-32, N°1, pgs. 60-64.

- [50] **Hurt W.D., Erwin D.N.**, 1981. *Assessment of Possible Hazards Associated with Applications of Millimeter-Wave Systems*. USAF School of Aerospace Medicine. Review 2-81.
- [51] **Iakubovskii U.V.**, 1980. *Exploración eléctrica*. Ed. Reverté, 3ª edición. (edición original: ed. Nedra, Moscú). Barcelona (España). 421 pgs.
- [52] **ITU 838**, 2004. *Draft revision of Recommendation ITU-R P.838-2 - Specific attenuation model for rain for use in prediction method*.
- [53] **Jacobson I.**, 2000. *El Proceso Unificado de Desarrollo de Software*. Addison-Wesley. 438 pgs.
- [54] **Jones F., Melvill H.**, 1987. *Digital Impulse Radar for Glaciology: Instrumentation, Modelling and Field Studies*. Tesis . Universidad de British Columbia. Pgs.: 100.
- [55] **Kenneth J., Thomas C., Azoubib J.**, 2000. *Use of a Dual-frequency Multi-channel Geodetic GPS for the Estimation of Ionospheric delays applied to accurate time transfer*.
- [56] **Klobuchar J.**, 1996. *Ionospheric Effects on GPS. Global Positioning System: Theory and Applications*. Vol. I, American Institute of Aeronautics and Astronautics, pgs. 485-515.
- [57] **Kocach K.**, 2001. *New User Equivalent Range Error Budget for the Modernized Navstar Global Positioning System*. Proc. ION National Technical Meeting, pgs 550-573.
- [58] **Lanyi G.E., Roth T.**, 1988. *A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations*. Radio Science, 23 pgs. 483-492.
- [59] **Lau C.L., Scullion T., Chan P.**, 1992. *Modeling of Ground Penetrating Radar Wave Propagation in Pavement System*. Proceedings of the 71 Annual meeting transportation research board. Washington D.C., pgs. 1-27.
- [60] **Lebedeva G N.**, 1998. *Electrical Parameters of Sandy and Clayey Soils as function of the Soil Moisture at the Seven Separate Higher Frequencies from 36765 Mhz to 132.7 Mhz*. Proceedings of the 7th Int. Conference on Ground-Penetrating Radar. Vol II. Lawrence, Kansas. Pgs. 719-722.
- [61] **Lin J., Clarke M.J.**, 1982. *Microwave imaging of cerebral edema*. Proc. IEEE, Vol 70, pgs 523-24.
- [62] **Loran C System Characterization**, 1976. *International Loran Association Publication*. N 1. The Plains, Ohio.

154 *Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio*

- [63] **Lorenzo E.**, 1994. *Prospección geofísica de alta resolución mediante georadar. Aplicación a obras civiles.* Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 201 pgs.
- [64] **Lytle R.J., Lainer E.F., Lager D.L., Okada J.T.**, 1976. *Determination of the in situ high frequency electrical properties of permafrost rock.* Radio Science. Vol. 11 n 4. Pgs: 285-293.
- [65] **Majjala P.**, 1992. *Application of some Seismic Data Processing Methods to Ground Penetrating Radar Data.* Proceedings of the fourth international conference on ground-penetrating radar. Rovaniemi (Finlandia). Pgs.:103-110.
- [66] **Mancilla L., Gomez E.**, 1994. *Modelling GPR Reflections from Magnetic Susceptibility and Electrical Conductivity Variations.* Proceedings of the fifth international conference on ground penetrating radar. Kitchener (Ontario, Canadá). Pgs. 79-86.
- [67] **Marshall J., Palerm W.M.**, 1948. *The distribution of raindrops with size.* J. Meteor.,5.pgs. 165-166.
- [68] **Marshall S. V.**, 1982. *Electromagnetic concepts and applications.* Ed. Prentice Hall International. 734 Páginas.
- [69] **Matthew N.O.**, 2001. *Numerical Techniques in Electromagnetics* 2nd Ed. CRC Press. 743 pgs.
- [70] **Maxwell J.C.**, 1865. *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field.* Royal Society Transactions, vol. CLV, reprinted in Simpson, T., *Maxwell on the Electromagnetic Field.* 1997. Rutgers University Press, New Brunswick.
- [71] **Murray T., Kagawa W.**, 1985. *Electrical impedance computed tomography based on a finite element model.* IEEE Transaction On Biomedical Engineering 32 (3):177-84.
- [72] **Orellana E.**, 1972. *Prospección geoeléctrica en corriente continua.* Ed. Paraninfo. 578 pgs.
- [73] **Parkinson B.W.**, 1996. *GPS Error Analysis. Global Positioning System: Theory and Applications.* American Institute of Aeronautics and Astronautics, pgs. 469-483.
- [74] **Patricia M.**, 2001. *The Handbook of Modern Telecommunications.* CRC Press.
- [75] **Penning C.**, 1994. *Floods across Europe,* Middlesex University Press, London, 213 pgs.

- [76] **Pérez V.**, 2001. *Radar de Subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología*. Ph. D. Thesis. Depto. Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [77] **Peter C.**, 1997. *Cell Phone Positioned for new Services*. Electronic Engineering Times. Vol. 30, 25 pgs.
- [78] **Piggot W., Rawer K.**, 1978. *URSI Handbook of ionogram interpretation and reduction. World Data*. Center A for Solar-Terrestrial Physics.
- [79] **Polk C., Postow E.**, 1995. *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*. CRC Press LLC.
- [80] **Polk C.**, 1995. *Biological effects of low-level low-frequency electric and magnetic fields*. IEEE Transactions on Education. Vol. 34, Issue 3, Aug 1991 Page(s):243 - 249
- [81] **Polk C., Golio M.J.**, 2001. *The RF and Microwave Handbook*. CRC Press LLC.
- [82] **Pruppacher H.R., Piter R.L.**, 1971. *A Semi-empirical Determination of the Shape of Cloud and Rain Drops*. Journal Atmospheric Science, Vol. 28, pgs. 86-94.
- [83] **Pujol F., Ferrández, F.J., García J.M., Pujol M., Rizo R.**, 2005. *Numerical Analysis in position location: a frequency-domain model*. Kybernetes. Vol. 34 No 5, pgs 704-710.
- [84] **Rappaport T.S.**, 1996. *Position Location Using Wireless Communications on Highways of the Future*. IEEE Communications Magazine, vol.34, N. 10, pgs. 33-41.
- [85] **Redl S.M., Weber M.K., Oliphant M.W.**, 1995. *An introduction to GSM*. Artech House. Ed. Boston, 379 pgs
- [86] **Reynolds J. M.**, 1997. *An introduction to applied and environmental geophysics*. Ed: John Wiley & sons. 796 pgs.
- [87] **Rigaud B., Morucci J.P., Chauveau N.**, 1996. *Bioelectrical Impedance Techniques in Medicine*. Biomedical Engineering. Vol. 24, pgs. 257-352.
- [88] **Saarenketo T.**, 2001. *Electrical Properties of Water in clay and silty Soils*. Journal of Applied Geophysics. Vol 40, Nos. 1-3. Pgs: 73-88.
- [89] **Sauvageot H.**, 1991: *Radar Meteorology*. Artech House, 366 pgs.
- [90] **Schwan H.P.**, 1957. *Four-electrode null techniques for impedance measurement with high resolution*. The Review of Scientific Instrument;

39 (4):481-5.

- [91] **Seklesky S.M., Ecklund W.L., Firda J.M., Gage K.S., McIntosh R.E.** 1998. *Particle Size Estimation in Ice-Phase Clouds Using Multifrequency Radar Reflectivity*. Journal of Applied Meteorology: Vol. 38, pgs. 5–28.
- [92] **Seklesky S.M., McIntosh R.**, 1996. *Cloud Observation with a Polarimetric 33 GHz and 95 GHz Radar*. Meteorology and Atmospheric Physics. Vol 59, pgs. 123-140.
- [93] **Sevruk B.**, 1982. Method of correction for systematic error in point precipitation measures for operational use. WMO Operational Hydrology Rep. No. 21. WMO No. 589, 91 pgs.
- [94] **Simicevic N., Haynie D.T.**, 2004. FDTD Simulation of Exposure of Biological Material to Electromagnetic Nanopulses. Physics 0407054 V.1, 16 pgs.
- [95] **Stanley L.R.**, 1995. *Patología Funcional y Estructural*. Editorial Interamericana. 6ª Ed.
- [96] **Steller J., Wtorek J.**, 1998. *Complex Permittivity of Breast Tumour Tissue*. X International Conference on Electrical Bioimpedance. Barcelona, pgs. 55-63.
- [97] **Stergiopoulos**, 2001. *Advanced Signal Processing Handbook*. CRC Press.
- [98] **Stuchly, M.A.**, 1980. *Dielectric Properties of Biological Substances*. Journal Microwave Power. Vol. 15, pgs 16-19.
- [99] **Sullivan D.M.**, 1990. *Three Dimensional Computer Simulation in deep Regional Hyperthermia using the Finite-difference Time-domain Method*. IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. Vol. MTT-38, pgs 204-211.
- [100] **Sullivan D.M.**, 2000. *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*. IEEE Press, 163 pgs.
- [101] **Taflove A.**, 2000. *Computational Electrodynamics, the difference time-domain method* 2nd Ed. Artech House. 852 pgs.
- [102] **Tegopoulos J.A.**, 1984. *Eddy Currents in Lineal Conducting Media*. Elsevier Science. Studies in Electrical and Electronic Engineering.
- [103] **Unterberger R.R.**, 1978. *Radar Propagation in Rock Salt*. Geophysical Prospecting. Vol. 26. Pgs: 312-328.
- [104] **Vickers R.S., Dolphin L.T., Jonhson D.**, 1976. *Archeological Investigations at Chaco Canyon using Subsurface Radar*. Experiments in Cultural Resource Studies. Ed. T.R. Lyons. Chaco Center, USDI-NPS y

- University of New Mexico, Albuquerque (U.S.A.). Pgs: 81-101.
- [105] **Walter D.**, 2002. *Bluetooth Technology*. RFI Mobile.
- [106] **Wells D.**, 1986. *Guide to GPS Positioning*. University of New Brunswick. Graphic Services. Canada.
- [107] **Wilfredo F.C., Zenaida P., Orta G.J.**, 2002. *Dielectric Loss Factor of Pathological Mammarian Tissue Versus Normal Mammarian Tissue*. Centro Ingeniería Biomédica, Unexpo. Venezuela.
- [108] **Wilson B.D., Yinger C.H., Feess W.A., Shank C.**, 1999. *The Broadcast Interfrequency Biases*. GPS World. Vol. 10, N9, pgs 56-66.
- [109] **Wilson B.D., Mannucci A.J., Edwards C.D.**, 1993. *Sub-Daily Northern hemisphere ionosphere maps using the GPS network*. Proceedings of 7th International Ionospheric Effects Symposium.
- [110] **Wolfgang C.**, 2006. *Open Source Physics. A user's guide with exmples*. Addison Wesley 360 pgs.
- [111] **Won I.J., Keiswetter D.**, 1998. *Electromagnetic Induction Spectroscopy*. IGARSS 98 IEEE International, Vol. 1, pgs 515-519.
- [112] **Xu T., McMechan G.A.**, 1997. *GPR attenuation and its numerical simulation in 2.5 dimensions*. Geophysics, Vol. 62, N. 1 . Pgs. 403-414.
- [113] **Yee K.S.**, 1966. *Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media*. IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-14(4), pgs. 302-307.
- [114] **Y-Essex J., Bond X. L., Susan C. H., Barry D. V. V.**, 2003. *Microwave Imaging via Space-Time Beamforming for Early Detection of Breast Cancer*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, no. 8.
- [115] **Z-Kerhet A., Mirco R., Boni A., Massa A.**, 2006. *A SVM-based approach to microwave breast cancer detection*. Engineering Applications of Artificial intelligence. Elsevier Volume 19, Issue 7, October 2006, Pages 807-818.

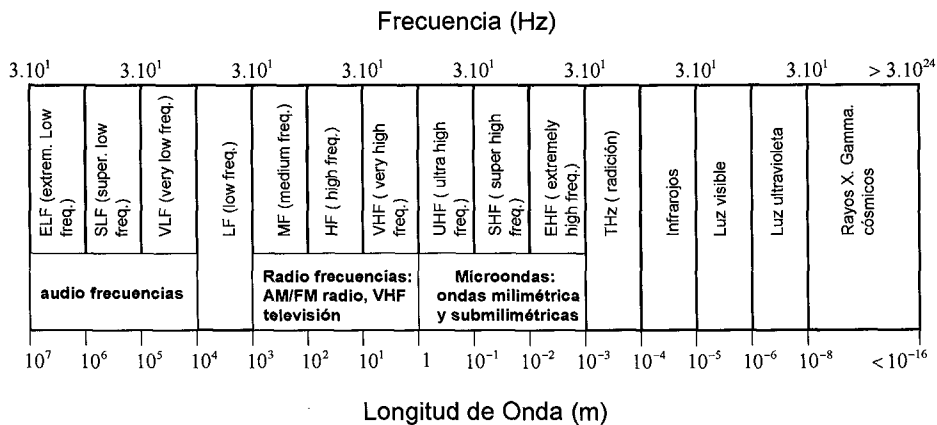
A n e x o I

Teoría del fenómeno electromagnético

En este apartado se revisan los modelos fisico-matemáticos que tratan sobre la propagación e interacción de las OE en función del rango de frecuencias utilizado y del medio con el que interaccionan.

Esta revisión tiene dos objetivos, por una parte analizar los fundamentos teóricos de los modelos relacionados con la hipótesis de trabajo y por la otra adquirir experiencia con los métodos (analíticos o numéricos) utilizados en la resolución del fenómeno electromagnético. Todo ello será de utilidad para la realización de un entorno de simulación que trate el fenómeno de la interacción señal-medio físico y su dependencia con la frecuencia.

La propagación de OE se plantea como una transferencia de energía desde un punto (emisor) a otro (receptor). Los mecanismos que explican su propagación dependen del rango de frecuencias empleado que puede clasificarse en las categorías definidas por el espectro electromagnético de la figura A1.1.

**Figura A1.1** Espectro electromagnético

Si tomamos las bajas frecuencias (LF) como punto de partida observamos que la propagación en este caso está definida por ondas de superficie que se desplazan sobre el terreno. El rango de MF y RF tienen la ionosfera como elemento reflector y, a partir de las VHF, la propagación se puede modelar mediante una línea directa de señal entre el emisor y el receptor. Es en este último rango donde los mecanismos de reflexión, refracción, dispersión y efecto multitrayecto se manifiestan. Las condiciones atmosféricas, el estado de la ionosfera, el perfil del terreno o los objetos encontrados en su paso son elementos a considerar en la relación propagación de la OE medio físico.

Si buscamos una mayor interacción frecuencia-medio hay que aumentar la frecuencia. Si queremos que el medio no limite en demasía la propagación deberemos, por otra parte, tomar un rango de frecuencias menos elevadas. El nivel de compromiso que nos ofrece suficiente interacción pero con las menores pérdidas posibles nos lo brinda el rango de las microondas y nos lo confirma el hecho de que es uno de los más utilizados tanto en estudios científicos como en el desarrollo de nuevas aplicaciones de comunicaciones, radar, navegación y teledetección.

A partir del rango de las microondas se entra en el campo infrarrojo y visible donde los mecanismos de propagación y la interacción con el medio son más acusados y complejos. Igual que en el caso anterior el empleo de este rango se aplica en numerosas aplicaciones y disciplinas. Los niveles de pérdidas hacen que esta categoría de frecuencias no sean

las más adecuadas para iniciar nuestro análisis de propagación multifrecuencial.

A1.1 Interacción de la onda electromagnética con la materia

Veamos cómo la OE interacciona con los diferentes rangos del espectro visto con anterioridad. Los mecanismos de esta interacción son fuertemente dependientes de la frecuencia de la señal y de los niveles energéticos de la estructura de la materia. En el momento de la interacción los electrones o moléculas del gas, líquido o sólido son puestos en movimiento (rotación, vibración, desplazamiento).

Los sistemas atómicos y moleculares se encuentran en ciertos estados estacionarios de niveles energéticos. En el caso de los átomos aislados, los niveles de energía están relacionados con las órbitas de los electrones. En el caso de las moléculas hay niveles adicionales de energía de rotación y de vibración que dependen de la constitución y relación entre los átomos que las integran.

Revisión histórica

A finales del siglo XVIII Coulomb publicó sus trabajos acerca de las interacciones eléctricas y magnéticas. Su conocida ley, aún estudiada, es extremadamente parecida a la ley de la gravitación universal. En aquella época, la rama más conocida de la física era la mecánica de Newton. Las diversas leyes de las interacciones electromagnéticas descubiertas posteriormente como la ley de Ampère sobre corrientes eléctricas eran cercanas a la ley de Coulomb, en donde los investigadores suponían que la acción de un objeto sobre otro se produce instantáneamente sin participación alguna del medio auxiliar.

De acuerdo con los criterios físicos modernos, no existen interacciones instantáneas; el papel del medio auxiliar no puede ser ignorado ya que precisamente éste contiene la energía. La participación del medio en la transmisión de interacciones electromagnéticas se verifica a través del medio, que es el recipiente del proceso. Este concepto está relacionado con el nombre de Faraday que, desde un punto de vista moderno sería el primero en expresar esta realidad.

Alegando una cita de Maxwell: Faraday con su mirada mental veía líneas de fuerza que pasan por todo el espacio allí donde los matemáticos veían centros de fuerzas que se atraen a distancia. Faraday veía un medio (materia) allí donde ellos no veían nada más que una distancia. Faraday buscaba la fuente de los fenómenos en procesos reales que transcurren en el medio. Los matemáticos se sintieron satisfechos al encontrar dicha fuente en una fuerza que acciona a distancia aplicada a fluidos eléctricos.

Estas palabras son citadas por Maxwell a quien le estaba destinado hacer una extraordinaria aportación a la teoría del electromagnetismo. Maxwell deduce la existencia de ondas electromagnéticas y formula una hipótesis acerca de la naturaleza electromagnética de la luz. Estas ideas, adelantadas a las posibilidades experimentales de la época, provocaron poca aceptación por parte de sus contemporáneos.

Será Hertz el que, de forma experimental, excite por primera vez ondas electromagnéticas en un laboratorio. Sus trabajos previeron muchos conceptos básicos de lo que hoy es la radiotecnía. En particular, en sus experimentos empleó espejos parabólicos en los que podemos ver el prototipo de antenas actuales. Podemos afirmar, tras lo dicho, que la radiotecnía, apoyándose en las ecuaciones de Maxwell, ha servido de amplia base experimental del electromagnetismo y ha estimulado su propio desarrollo. Junto a la radiotecnía apareció la noción de ondas de radio, es decir, ondas electromagnéticas en los sistemas radiotécnicos. Todo ello condujo a un nuevo campo de investigación científica: el estudio de la propagación de las ondas de radio en condiciones naturales (sobre la Tierra). A su vez, el problema de la emisión y recepción de la energía electromagnética transportada por ondas de radio provocó la creación de la teoría de antenas.

Si continuamos con este recorrido histórico observamos que en los primeros experimentos la longitud de onda de las señales se medía por metros y la comunicación por radio se basaba en ondas largas. La invención de la radiolocalización durante los años de la segunda guerra mundial impulsará la aplicación de ondas más cortas centimétricas y milimétricas que hoy día encuentran extensa utilización en diferentes ramas.

Con el empleo de ondas tan cortas los elementos radiotécnicos pasaron a tener un tamaño comparable a la longitud de onda. Los objetos pasan a dividirse en cuasiestacionarios y no cuasiestacionarios. En la primeros

($L \ll \lambda$) la dimensión del objeto es mucho mas pequeña que la longitud de onda, con lo que se puede considerar que en todas las secciones del conductor se cumple el principio de constancia de la corriente instantánea. En los no cuasiestacionarios donde la longitud L del circuito es comparable a la longitud de onda λ , por lo que en diferentes puntos del circuito tendremos valores desfasados de las corrientes que se propagan, no pudiendo aplicar por lo tanto el principio de constancia de las corrientes en todo el circuito.

De lo anterior se desprende que los métodos de análisis y la propia concepción en la construcción de equipos radioeléctricos son extremadamente diferentes a los modelos electrotécnicos antiguos. Con gran frecuencia las antenas son no cuasiestacionarias, al igual que los elementos de los aparatos que se emplean para ondas decimétricas, centimétricas o milimétricas. En consecuencia, la teoría general del electromagnetismo y el campo electromagnético serán los fundamentos para las investigaciones relacionadas con este tipo de procesos.

En la actualidad las ondas de radio pueden ser ondas electromagnéticas de longitud desde decenas de kilómetros (ultralargas) hasta de miles de ángstrom (ópticas). Las condiciones de su propagación sobre la Tierra en tan enorme banda son muy diversas, pero sin embargo, su estructura puede ser muy cercana a la onda plana más sencilla que se propaga en un espacio infinito. Las particularidades de los diversos medios que interaccionan en este proceso son muy variadas, por lo que deberemos clasificarlos y analizarlos a lo largo del proyecto.

Modelo teórico de propagación en un medio simple

El modelo convencional de propagación de OE en un medio simple está definido en las ecuaciones de Maxwell,

$$\nabla \cdot D = \rho_v \quad (A1.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (A1.2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (A1.3)$$

164 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

$$\nabla \times B = J - \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{A1.4})$$

En estas ecuaciones, E representa la intensidad de campo eléctrico (v/m), H es la intensidad de campo magnético (A/m), D es la densidad de flujo eléctrico ($coulomb/m^2$), B es la densidad de flujo magnético (Wb^2), J es la densidad de corriente de conducción (A/m^2) y ρ_v representa la densidad de carga eléctrica ($coulomb/m^2$). El modelo se completa con las ecuaciones constitutivas del medio.

$$D = \varepsilon E \quad (\text{A1.5})$$

$$B = \mu H \quad (\text{A1.6})$$

$$J = \sigma E \quad (\text{A1.7})$$

Donde $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, $\mu = \mu_0 \mu_r$ y σ son, respectivamente, la permitividad, la permeabilidad y la conductividad del medio.

Velocidad de propagación y atenuación

A partir de las ecuaciones de Maxwell y considerando una onda plana que se propaga en la dirección \vec{r} , se obtienen las siguientes soluciones para el campo eléctrico y magnético:

$$\vec{E}(\vec{r}) = E_0 e^{(j\omega t - \gamma \vec{r})} \quad (\text{A1.8})$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = H_0 e^{(j\omega t - \gamma \vec{r})} \quad (\text{A1.9})$$

En donde $\gamma = \alpha + j\beta$ representa la constante de propagación o número de onda complejo que puede expresarse en función de los parámetros electromagnéticos característicos de cada medio.

El término α es la constante de atenuación medida en nepers por metro o decibelios por metro. El término β es la constante de fase medida en

radianes por metro. La relación de estos con la permitividad, conductividad y frecuencia es la siguiente:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} - 1 \right]} \quad (\text{A1.10})$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right]} \quad (\text{A1.11})$$

El segundo parámetro β permite determinar la velocidad de la onda en el medio material en el cual se está propagando, ya que $\beta = \omega/v$, donde v es la velocidad de fase de la onda electromagnética. La velocidad de propagación es la siguiente:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right]}} \quad (\text{A1.12})$$

En medios no magnéticos, los más frecuentes, la expresión se simplifica puesto que la permeabilidad es μ_0 . En cuanto a la conductividad, los materiales pueden clasificarse en función del factor de pérdidas

$$P = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon'} \quad (\text{A1.13})$$

Siendo

$$\varepsilon = \varepsilon' + j \frac{\sigma}{\omega} \quad (\text{A1.14})$$

En el caso de un medio conductor $P \gg 1$. En el caso de un dieléctrico de bajas pérdidas $P \ll 1$. Para un medio dieléctrico tanto la parte real como la imaginaria deberán mantenerse.

166 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

Además, tomando $\omega = 2\pi f$, la longitud de onda λ y la velocidad de propagación v vienen dados en relación a la constante de propagación como,

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (\text{A1.15})$$

$$v = \frac{\omega}{\beta} = f\lambda \quad (\text{A1.16})$$

Las ecuaciones (A1.8) y (A1.9) representan la propagación de la onda EM a través de un medio genérico. La amplitud es atenuada según el factor $e^{-\alpha z}$. El grado de penetración en el medio se mide a través de la distancia en la que la señal es atenuada un valor equivalente a e^{-1} (alrededor del 37 %) y representada por $\delta = 1/\alpha$.

La conclusión que se extrae del modelo es que la propagación de una onda electromagnética depende del medio representado por los parámetros electromagnéticos y de la frecuencia de la señal. Los parámetros velocidad de propagación (v) y nivel de penetración en el medio (δ) caracterizan los diferentes tipos de propagación, que pueden ser debidos bien a diferencias en la frecuencias o bien a diferencias en el medio.

Parámetros electromagnéticos del medio

Los parámetros que definen el medio al paso de una onda son la conductividad, permitividad dieléctrica y permeabilidad magnética.

Conductividad

La conductividad de un medio nos proporciona una medida de la respuesta de sus cargas libres en presencia de un campo eléctrico externo, es el factor de proporcionalidad entre el campo libre aplicado y la densidad de volumen de corriente debido al movimiento de estas cargas libres. Es decir, proporciona una medida de la capacidad de un material de conducir corriente eléctrica (A1.7).

Las unidades de medida de la conductividad, en el S.I., son mohs/metro o el equivalente Siemenes/metro. La conductividad de un medio es la inversa de su resistividad (medida en Ohmio metro).

En general podremos distinguir entre materiales conductores, semiconductores y aislantes. Pertenecen al primer grupo aquellos materiales cuya conductividad es mayor a 10^5 S/m, mientras que materiales que presentan una conductividad menor a 10^{-8} S/m se clasifican como aislantes, siendo los semiconductores aquellos cuya conductividad se encuentra entre estos dos valores.

En muchos medios sucede que el contenido de agua en los poros del material y la composición química de ésta son los factores que determinan su conductividad, más que los granos minerales que lo componen.

Para aplicaciones de análisis del suelo, la conductividad es principalmente electrolítica ya que, excepto en el caso de existencias de minerales metálicos o de arcillas, la mayor parte de los materiales habituales pueden ser considerados como aislantes. En estos medios la conducción eléctrica se debe básicamente a la existencia de fluido (con iones disueltos) en poros y fisuras. Es decir, cuanto mayor sea el contenido de agua, el porcentaje de iones disueltos y la porosidad del medio, mayor será su conductividad.

La temperatura afecta a la movilidad de los iones, de forma que influye en la conductividad electrolítica. Por ello, cambiar la temperatura de los medios la conductividad puede verse modificada. En general, la conductividad es un parámetro fuertemente variable que no depende sólo de los cambios de materiales del medio, ya que puede variar dentro de una misma formación. En materiales porosos este parámetro es fuertemente variable dependiendo de la naturaleza de los iones disueltos en el fluido intersticial, de la saturación de agua, del número de poros y de su comunicación, entre otros factores.

En general, la conductividad eléctrica se presenta como un valor complejo:

$$\sigma = \sigma' - j\sigma'' \quad (\text{A1.17})$$

Donde la parte real determina la amplitud de la corriente en fase con la intensidad del campo externo, y la imaginaria la amplitud de la corriente

desfasada que considera el retardo de la respuesta de conducción que presenta el material en presencia de un campo eléctrico variable.

Permitividad eléctrica

Representa la constante de proporcionalidad ente la intensidad de campo eléctrico externo aplicado y el vector de desplazamiento eléctrico (ecuación A1.5).

La permitividad absoluta ε , medida en el S.I. en F/m, se define como el producto entre una permitividad relativa del material ε_r (constante adimensional) y la permitividad dieléctrica del vacío ($\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (\text{A1.18})$$

La permitividad dieléctrica relativa es una constante que da una medida de la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico.

Proporciona un valor de la respuesta estática del material cuando está en presencia de un campo eléctrico externo. Para la mayoría de los materiales que se pueden encontrar en el subsuelo al realizar una prospección electromagnética, los valores de la permitividad dieléctrica relativa se encontrarán entre 1 (la del aire) y 81, siendo esta última la constante dieléctrica relativa del agua a 20° de temperatura.

La constante de proporcionalidad (adimensional) entre la polarización de un material, \vec{P} , y el campo externo es la susceptibilidad, χ . La relación con la permitividad absoluta es:

$$\vec{D} = \vec{P} + \varepsilon_0 \vec{E} = \chi \varepsilon_0 \vec{E} + \varepsilon_0 \vec{E} = (1 + \chi) \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \vec{E} \quad (\text{A1.19})$$

La constante dieléctrica se representa en forma compleja (Marshall, DuBroff y Skitek, 1982; Turner y Siggins, 1994) como una expresión en la que la componente real produce una corriente en fase respecto al campo eléctrico externo, y la componente imaginaria provoca una corriente en desfase respecto a dicho campo eléctrico, siendo:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (\text{A1.20})$$

Si dividimos la expresión compleja por ε_0 obtenemos una expresión similar para la permitividad relativa. La componente imaginaria de la permitividad dieléctrica considera los retardos en la respuesta a la polarización del material sometido a un campo electromagnético (Sutinen, 1992), es decir, indica el factor de pérdidas dieléctricas. Por otro lado también contiene el factor que indica las pérdidas por conducción. De forma habitual se suele considerar esta componente imaginaria como la suma de los dos factores, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon'' = \varepsilon_d'' + \frac{\sigma_{de}}{\omega} \quad (\text{A1.21})$$

Donde ω es la pulsación del campo electromagnético, ε_d'' es el factor de pérdidas dieléctricas que se relaciona con la respuesta frente a los fenómenos de relajación asociados con las moléculas de agua y σ_{de} es la conductividad estática-

Según lo visto la expresión de la permitividad queda como:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j \left(\varepsilon_d'' + \frac{\sigma_{de}}{\omega} \right) \quad (\text{A1.22})$$

Para altas frecuencias (entre 10 MHz y 1000 MHz), en la mayor parte de los materiales del subsuelo, los fenómenos de desplazamiento (o polarización) dominan sobre los fenómenos de conductividad. De esta forma, los medios suelen caracterizarse a partir de su constante dieléctrica. Para frecuencias algo menores el término de la conductividad estática predomina sobre el otro. Para frecuencias bajas (por debajo de los 100 Hz) no se ha observado que este parámetro dependa de la frecuencia del pulso, pero para frecuencias más altas se aprecia una dependencia entre ambos. Tanto la parte imaginaria como la parte real de la permitividad dieléctrica presentan variación en función de la frecuencia. Hay diferentes mecanismos que caracterizan esta dependencia. Los dos utilizados más comúnmente son el modelo de Debye (A1.23) y el modelo de Cole-Cole (1941), también llamado de Maxwell-Wagner (A1.24).

En los dos modelos se considera la variación de la permitividad dieléctrica en función de la frecuencia, de la conductividad estática, σ_{dc} , de dos

valores extremos de la permitividad, ϵ_s y ϵ_∞ , a baja frecuencia (el primero) y a muy alta frecuencia (el segundo) y del periodo de relajación, τ . Cuando en un medio con moléculas que pueden polarizarse en presencia de un campo eléctrico externo se aplica una intensidad de campo eléctrico entran en juego dos efectos contrarios: por un lado la tendencia a la polarización (que tiende a orientar las moléculas) y, por otro, la agitación térmica que tiende a desordenar las moléculas. Cuando el campo eléctrico externo desaparece las moléculas tienden a recuperar su posición inicial.

Al tiempo que invierten en este proceso, que se produce gracias a la agitación térmica que sigue actuando, se le denomina periodo o tiempo de relajación.

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)} - j \frac{\sigma(0)}{\omega\epsilon_0} \quad (\text{A1.23})$$

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{1-\xi}} - j \frac{\sigma(0)}{\omega\epsilon_0} \quad (\text{A1.24})$$

Con $0 \leq \xi \leq 1$.

Permeabilidad magnética

La permeabilidad μ relaciona la inducción magnética \vec{B} con la intensidad de campo magnético \vec{H} . Se mide en Henrios/metro y se puede escribir como el producto entre la permeabilidad magnética del vacío ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$) y la permeabilidad relativa del material:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (\text{A1.25})$$

Siendo μ_r la permeabilidad relativa del material, que depende a su vez de la susceptibilidad magnética del mismo χ_m . Esta última es la constante de proporcionalidad entre la imanación de un material y la intensidad de campo magnético externo.

La permeabilidad magnética compleja se puede escribir en forma compleja de la forma:

$$\mu_r = \mu' - j\mu'' = 1 + \chi_m \quad (\text{A1.26})$$

La parte real da una idea de la energía magnética almacenada en el material, se la denomina permeabilidad magnética elástica, mientras que la parte imaginaria determina la cantidad de pérdidas magnéticas debidas a histéresis, viscosidad magnética y se denomina permeabilidad magnética viscosa.

En la mayor parte de los materiales que nos encontraremos en los estudios (excepto en aquellos que contengan materiales ferromagnéticos) se cumple que la permeabilidad magnética es próxima a 1, no dependiendo de la frecuencia del campo magnético.

Parámetros efectivos

Los parámetros que definen el medio frente a la propagación de OE (permitividad dieléctrica, conductividad) tienen, tal y como se ha visto, una parte real y otra compleja.

Tanto la parte real de la expresión de la conductividad como la parte imaginaria de la constante dieléctrica compleja producen una corriente en desfase respecto al campo eléctrico, mientras que la parte imaginaria de la conductividad y la parte real de la permitividad dieléctrica provocan una corriente en fase respecto al campo eléctrico.

Las corrientes en fase respecto al campo eléctrico producen una conductividad que se denomina efectiva y que es el valor mensurable de este parámetro, mientras que las corrientes en desfase, junto con el efecto de las cargas libres para altas frecuencias, producen un retardo del campo eléctrico. De esta forma se definen los parámetros efectivos. La conductividad efectiva es la suma de los efectos de la componente real de la conductividad compleja y del efecto de la componente imaginaria de la permitividad dieléctrica, que genera un campo eléctrico en fase con el campo externo, según la expresión:

$$\sigma_{ef} = \sigma' + \omega\epsilon'' \quad (\text{A1.27})$$

La permitividad efectiva está compuesta en parte por la componente real de la permitividad compleja, y en parte por el efecto de las cargas libres (parte imaginaria de la conductividad compleja), siendo importante el

172 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

retardo del campo eléctrico debido al efecto de las cargas libres en el caso de altas frecuencias (Carcione, 1996). Este efecto es importante a altas frecuencias y debe tenerse en cuenta cuando se trabaja con unas antenas determinadas: aquellas que emiten en la banda de las microondas (antenas de 1 GHz y frecuencias superiores):

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon' - \frac{\sigma''}{\omega} \quad (\text{A1.28})$$

Son estos parámetros los que se pueden medir en experiencias de laboratorio y los que se utilizan para calcular la velocidad de propagación de la onda electromagnética por el medio así como la atenuación de la energía que se produce durante esta propagación.

Mecanismos de interacción

Absorción

La absorción se produce cuando durante la propagación de la onda parte de la energía electromagnética se convierte en calor. Esto es consecuencia de la polarización por orientación de las moléculas de agua, fenómeno que aparece para frecuencias de la banda de microondas y de la banda de ondas de radio. Otros tipos de polarización se producen a otras frecuencias (infrarrojos y ultravioletas): la polarización iónica y la polarización electrónica. Estos tres fenómenos se caracterizan por una disminución del valor de la parte real de la permitividad dieléctrica compleja y un aumento de la parte imaginaria para la banda de frecuencias dada, produciéndose un aumento del ángulo de pérdidas dieléctricas, definido a partir del cociente entre la parte imaginaria y la real de la permitividad dieléctrica.

La atenuación como resultado de la absorción de energía por el medio se produce como consecuencia de las características electromagnéticas del material por el que se propaga la onda y es la causa fundamental de las pérdidas de energía en el caso de medios materiales. Tal como se vio en el apartado anterior la atenuación es una función compleja de las propiedades dieléctricas, eléctricas y magnéticas de un medio. El factor de atenuación, a , depende de la permitividad dieléctrica del medio (ε), de su conductividad (s), de la permeabilidad magnética (m) y de la pulsación de la onda emitida (ω). Como los medios sobre los que se

trabaja en prospección no son homogéneos, sus propiedades electromagnéticas y su comportamiento dependen de los elementos que lo componen y de su abundancia.

Reflexión y refracción

Cuando la energía electromagnética alcanza una discontinuidad en los parámetros electromagnéticos del medio, se producen los fenómenos de reflexión y de refracción. Cuando la interfase es plana, la frecuencia de las ondas reflejadas y refractadas es la misma que la frecuencia de la onda incidente, siendo también el ángulo de reflexión igual al de incidencia. La ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia, reflexión y refracción con las velocidades de propagación de las ondas en los dos medios que están en contacto.

En la figura A1.1 se presenta esquemáticamente el proceso de incidencia de una onda electromagnética plana en un contacto entre dos materiales diferentes, siendo el contacto también plano. El porcentaje de energía reflejada depende del contraste existente entre los parámetros electromagnéticos de los diferentes materiales del medio. Este porcentaje nos define los coeficientes de transmisión y de reflexión de la energía.

La impedancia de un campo electromagnético es el cociente entre el campo eléctrico y el campo magnético, pudiendo definir una impedancia para el campo electromagnético incidente, η_1 , que coincidirá con la del campo magnético reflejado, y otra para el campo electromagnético refractado, η_2 , es decir, transmitido:

$$\eta_1 = \left\{ \frac{\vec{E}_i}{\vec{H}_i} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \right\} = \left\{ \frac{\vec{E}_r}{\vec{H}_r} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \right\} \quad (\text{A1.29})$$

$$\eta_2 = \left\{ \frac{\vec{E}_t}{\vec{H}_t} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_{r2}}{\epsilon_0 \epsilon_{r2}}} \right\} \quad (\text{A1.30})$$

A partir de las expresiones de las impedancias se pueden calcular los coeficientes de transmisión y de reflexión de Fresnel de la energía, como el cociente entre el campo incidente y el campo refractado en el primer caso, y el cociente entre el campo incidente y el campo reflejado en el segundo caso. Si θ_1 es el ángulo de incidencia de la onda sobre la

superficie plana, y at es el ángulo de refracción, estos coeficiente adoptan la siguiente expresión:

$$R_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} = \frac{\eta_2 \cos(at) - \eta_1 \cos(ai)}{\eta_1 \cos(ai) + \eta_2 \cos(at)} \quad (\text{A1.31})$$

$$T_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} = \frac{2\eta_2 \cos(at)}{\eta_1 \cos(ai) + \eta_2 \cos(at)} \quad (\text{A1.32})$$

Donde $T_{1 \rightarrow 2}$ es el coeficiente de Fresnel de refracción entre los medios superior (1) e inferior (2), $R_{1 \rightarrow 2}$ es el coeficiente de Fresnel de reflexión en el contacto entre los dos medios, \vec{E}_i el campo incidente, \vec{E}_r el campo reflejado y \vec{E}_t el campo refractado o transmitido.

Estas expresiones pueden simplificarse estas si el sistema opera con reflexión de muy pequeño ángulo, pudiendo ser considerados los ángulos de incidencia y de reflexión (en el caso de que la superficie reflectora sea plana) como de cero grados, es decir, que se trabaja con incidencia normal. En estas condiciones, los coeficientes de reflexión y de transmisión únicamente dependen de la relación entre impedancias complejas. Si además se trabaja en medio no magnéticos, una aproximación adecuada para la mayoría de los materiales queda como:

$$R_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_r}{\vec{E}_i} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (\text{A1.33})$$

$$T_{1 \rightarrow 2} = \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (\text{A1.34})$$

Se puede observar que la suma del coeficiente de reflexión (que representa el porcentaje de energía reflejada de la energía incidente) y del coeficiente de refracción (que representa el porcentaje de energía transmitida al segundo medio, de la energía incidente), es la unidad.

De las expresiones (A1.33) y (A1.34), se puede deducir que cuanto mayor sea la diferencia entre los parámetros electromagnéticos de los medios, mayor será el coeficiente de reflexión, es decir, que a mayor contraste entre los dos medio en contacto, mayor porcentaje de la energía

incidente será reflejada en la discontinuidad, y por lo tanto, tendremos un menor porcentaje de energía transmitida al medio inferior.

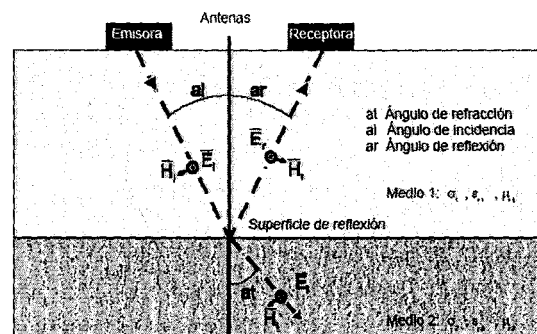


Figura A1.2 Mecanismos de reflexión y refracción.

Por ejemplo, valores de R elevados implican en un estudio de reflexiones, por una parte, la posibilidad con más facilidad la onda reflejada, mientras que por otro lado la penetración del método disminuye y las reflexiones producidas en contrastes posteriores son de menor amplitud, ya que el porcentaje de energía refractada es menor, lo que contribuye a que la amplitud de la onda en posteriores reflexiones sea menor.

La visión idealizada de la propagación de las OE que hemos mostrado se ve alterada, en mayor o menor grado, cuando pretendemos proyectarla a enlaces radioeléctricos en la atmósfera. Elementos como la presencia del terreno, la ionosfera, la troposfera o las precipitaciones atmosféricas (gotas de lluvia, hielo, nieve) influyen y modifican el modelo de comportamiento dado. Se diferencian dos grandes zonas de influencia la troposfera (región no ionizada) y la ionosfera (zona en la que la ionización condiciona la propagación de las OE). Contando con la superficie terrestre y las dos zonas ya citadas, los modos de propagación de las ondas electromagnéticas pueden ser,

- Propagación sobre la superficie terrestre.
- Propagación a través de las capas bajas de la atmósfera.
- Propagación mediante la reflexión producida por las capas altas de la atmósfera (ionosfera).

- Propagación de ondas en enlaces con satélites

Tanto el estado de la ionosfera (cambiante a lo largo del día y de la época del año) como la aparición de hidrometeoros modificarán el comportamiento de la propagación de la señal. En el caso de las telecomunicaciones se pretenderá que esta modificación no altere el nivel de transmisión de información y en el caso de aplicaciones de detección se buscarán modelos que incluyan estos fenómenos de manera que puedan ser detectados o cuantificados. En ambos casos es evidente la importancia del conocimiento de la interacción onda electromagnética-medio físico.

Dispersión

Este fenómeno se produce cuando la energía electromagnética incide en objetos cuyas dimensiones son del orden de su longitud de onda o inferiores. En estos casos se produce una distribución aleatoria de la energía incidente. El resultado es una disminución de la amplitud de la onda y la generación de un ruido aleatorio de fondo. El efecto de este ruido en un registro es similar al que se produce en la pantalla de un radar marino a consecuencia de un fuerte oleaje. Estos efectos son mayores cuando el tamaño de los objetos anómalos (o de las inhomogeneidades del material en el que se propaga la energía o del reflector en el que incide) es del orden de la longitud de onda. Este efecto es más evidente cuando en el estudio se utilizan antenas de más alta frecuencia, ya que en estos casos la longitud es de orden centimétrico.

Otro factor que se incluye en este apartado es la denominada dispersión cromática. En los medios transparentes a una radiación la constante dieléctrica depende de la frecuencia de la onda. Como se ha visto en el apartado anterior la velocidad depende de este parámetro, incluso en los casos en los que es posible aplicar las aproximaciones de bajas pérdidas, depende de la frecuencia. Si la permitividad dieléctrica no depende de la frecuencia, la velocidad de fase de la onda coincide con la velocidad de grupo.

Modelos teóricos en escenarios realistas: Clasificación de los problemas de propagación de OE

Para pasar de un modelo teórico, mostrado en el apartado anterior, a modelos más realistas clasificaremos el problema de la propagación de OE en función de:

- La región en la que reproduce la interacción.
- La naturaleza de la ecuación que describe el problema.
- Las condiciones frontera asociadas al problema.

En términos de la región o dominio del problema éste puede ser interior (región limitada) o exterior (región no limitada).

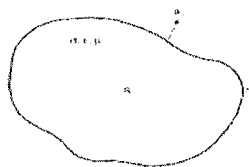


Figura A1.3 Región limitada por S

Consideramos la región solución R limitada por S (figura A1.3). Si S está en el infinito, R es exterior, en caso contrario R es interior. Como ejemplo la propagación de OE en dispositivos *waveguide* es un problema interior, mientras que la propagación en el espacio (propagación con dispersión de las OE por la lluvia, radiación de un dipolo de antena) son problemas exteriores.

El problema, por otra parte, también puede ser clasificado en términos de las propiedades que constituyen el medio al que pertenece R . De este modo la conductividad (σ), permitividad (ε) y permeabilidad (μ) caracterizan el medio. Podremos tener regiones o medios lineales (o no lineales), homogéneos (o no homogéneos), isotrópicos (o anisotrópicos).

La naturaleza de las ecuaciones que describen los procesos de propagación también nos proporciona diferentes alternativas en la clasificación del fenómeno electromagnético. Las ecuaciones pueden ser diferenciales, integrales o mixtas (parte integral, parte diferencial). En

178 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

cualquier caso gran parte de los problemas se presentan en términos de un operador L (diferencial, integral o integral-diferencial) del tipo,

$$L\Phi = g \quad (\text{A1.35})$$

Siendo g la fuente o excitación y Φ la función no conocida que debe ser determinada. Como ejemplo tomaremos la ecuación de la propagación de una OE en el espacio libre dada por,

$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{\mu\epsilon} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{A1.36})$$

En la cual $L = \nabla^2 - \frac{1}{\mu\epsilon} \frac{\partial^2}{\partial t^2}$, y la función Ψ simboliza los escalares E_x, E_y, E_z y H_x, H_y, H_z que representan los campos eléctrico y magnético de la OE.

Además de la región y del tipo de ecuación deberemos considerar las condiciones frontera del problema planteado. Si lo que se pretende es encontrar una función Φ solución de una ecuación en derivadas parciales dentro de R y limitada por S necesitaremos conocer las condiciones en la frontera del problema. Como ejemplo citaremos dos tipos,

- Condiciones límite de Dirichlet : $\Phi(r) = 0$, con r en S
- Condiciones límite de Neumann: $\frac{\partial \Phi(r)}{\partial n} = 0$, con r en S

Hemos visto tres tipos de elementos que pueden caracterizar el fenómeno electromagnético y algunas de las clasificaciones en los que pueden ser englobados. A partir de la tipificación del fenómeno (región, ecuaciones, condiciones frontera) buscaremos la solución matemática más exacta posible que nos informe acerca del campo electromagnético. Sin embargo, gran parte de los casos prácticos existentes no pueden solucionarse de forma analítica y se recurre a una aproximación basada en métodos numéricos, los cuales no sólo son recurso a dichas

limitaciones sino que, por sí mismos, ofrecen todo un abanico de posibilidades en la resolución de los problemas.

A1.2 Métodos utilizados en la resolución del problema electromagnético

Nuestro objetivo, en este análisis de la teoría electromagnética, será el de revisar tanto los métodos analíticos como los numéricos dentro de una misma perspectiva. Se tratará de conocer las ventajas y limitaciones de cada uno de ellos para, de ese modo, utilizar en cada instancia del problema el que consideremos más adecuado. Los métodos más utilizados son:

Métodos analíticos :

- Separación de variables
- Series

Métodos integrales:

- Transformadas de Fourier
- Transformada de Laplace

Métodos numéricos:

- Diferencias finitas
- Momentos
- Elementos finitos
- Monte Carlo

Si bien los métodos analíticos proporcionan soluciones formales, la complejidad de la geometría que define los problemas prácticos hace que sólo una pequeña cantidad de problemas reales pueden ser completamente tratados con estos métodos. La necesidad de las soluciones basadas en métodos numéricos se comprende a través la siguiente cita: *la mayoría de los problemas que pueden ser resueltos formalmente (métodos analíticos) ya han sido resuelt.* Hasta los años 40 los problemas de electromagnetismo se resolvían, en su mayoría,

180 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

utilizando métodos clásicos de separación de variables y soluciones de ecuaciones integrales.

Los modelos clásicos pueden fallar si la ecuación de derivadas parciales (*partial differential equation* - PDE) es no lineal y no puede ser linealizada sin afectar al resultado, la región solución es compleja, las condiciones frontera son dependientes del tiempo o bien si el medio es no homogéneo o anisotrópico.

Los métodos numéricos se desarrollan a partir de los 60 de la mano de los computadores digitales. Esto ha permitido que problemas complejos, intratables desde los métodos clásicos, puedan afrontarse desde una aproximación numérica. Otro beneficio indirecto de las técnicas numéricas es el hecho de que el nivel de conocimientos y desarrollo matemáticos, necesario en la metodología clásica, se simplifica con el tratamiento numérico.

Por ello nos centraremos en el método de las diferencias finitas que nos dará una medida de las posibilidades de la resolución numérica en problemas que plantean ecuaciones diferenciales parciales.

Método de las diferencias finitas

El método de diferencias finitas se inició en la década de 1920 para resolver sistemas de ecuaciones no lineales de hidrodinámica. Consiste en reemplazar las ecuaciones diferenciales por ecuaciones en diferencias finitas.

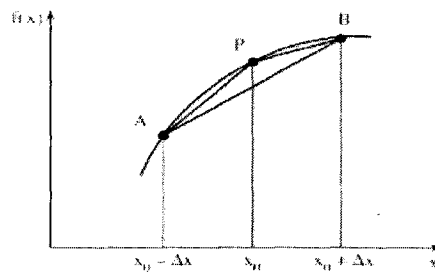


Figura A1.4 Aproximación numérica.

Se trata de una aproximación en la que el valor de la variable dependiente en un punto de la región solución se relaciona con los valores de los puntos vecinos. Una solución basada en diferencias finitas implica los siguientes pasos

- Dividir la región solución en rejillas o nodos
- Aproximar las ecuaciones dadas en derivadas parciales por ecuaciones equivalentes en diferencias que relacionen la variable dependiente en un punto con los valores de los puntos vecinos
- Resolver las ecuaciones en diferencias finitas sujetas a las condiciones de frontera o/y a las condiciones iniciales establecidas

Como muestra de los fundamentos del método podemos ver la aproximación en diferencias finitas de las derivadas de la función $f(x)$ en P (figura A1.4) en donde es posible utilizar tres tipos de aproximaciones en función de los puntos que se tomen en las diferencias.

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (\text{A1.37})$$

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0) - f(x_0 - \Delta x)}{\Delta x} \quad (\text{A1.38})$$

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0 - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (\text{A1.39})$$

Para las segundas derivadas tendremos,

$$f''(x_0) = \frac{f(x_0 + \Delta x) - 2f(x_0) + f(x_0 - \Delta x)}{(\Delta x)^2} \quad (\text{A1.40})$$

El desarrollo de este modelo ha derivado en diferentes alternativas de las que cabe destacar el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (*finite-difference time-domain* o FDTD) formulado por Yee. Es uno

182 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

de los más indicados para tratar el problema de interacción multifrecuencial señal-medio físico. Desarrollado a partir de 1966 y completado por Taflove y otros autores ofrece una formulación del problema del campo electromagnético con soluciones adaptables a problemas de medios dispersivos.

Este método lo utilizaremos en la resolución numérica del modelo dentro del escenario de simulación con el que trabajaremos.

El algoritmo de Yee resuelve los valores del campo magnético y eléctrico en el tiempo y el espacio mediante la resolución del sistema de ecuaciones de Maxwell formuladas con el rotacional (operador *curl*) en las que se relaciona el campo electromagnético con los parámetros de un medio isotrópico genérico (ecuaciones A1.41 y A1.42).

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (\text{A1.41})$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (\text{A1.42})$$

Para ello el espacio tridimensional se divide en un conjunto de celdas cúbicas de coordenadas,

$$(i, j, k) \equiv (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z) \quad (\text{A1.43})$$

y cualquier función en el espacio y el tiempo se escribe como,

$$u(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) \equiv u_{i,j,k}^n \quad (\text{A1.44})$$

Siendo $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ incrementos en el espacio y Δt el incremento en el tiempo, mientras que i, j, k, n son enteros. Mediante esta notación y la utilización de las diferencias centrales se establece que la derivada parcial de la función u en la dirección x evaluada en el tiempo $t_n = n\Delta t$,

$$\frac{\partial u}{\partial x}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta x} \quad (\text{A1.45})$$

Los incrementos $\pm 1/2$ denotan un espacio en diferencias finitas tomado sobre $\pm 1/2\Delta x$. Por analogía la derivada parcial en el tiempo evaluada en (i,j,k) será,

$$\frac{\partial u}{\partial t}(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = \frac{u_{i+1/2,j,k}^n - u_{i-1/2,j,k}^n}{\Delta t} \quad (\text{A1.46})$$

Como muestra de la aplicabilidad del método proponemos la resolución de la propagación de una OE en el vacío en una dimensión. En estas condiciones, las ecuaciones diferenciales que lo representan son,

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (\text{A1.47})$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (\text{A1.48})$$

Estas ecuaciones corresponden a una onda plana con el campo eléctrico orientado en la dirección del eje x con el campo magnético viajando en la dirección del eje z . Tomando la aproximación propuesta por Yee para las derivadas en el espacio y el tiempo se tiene el siguiente sistema,

$$\frac{E_x \Big|_k^{n+1/2} - E_x \Big|_k^{n-1/2}}{\Delta t} = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{H_y \Big|_{k+1/2}^n - H_y \Big|_{k-1/2}^n}{\Delta x} \quad (\text{A1.49})$$

$$\frac{H_y \Big|_{k+1/2}^{n+1} - H_y \Big|_{k+1/2}^n}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{E_x \Big|_{k+1}^{n+1/2} - E_x \Big|_k^{n+1/2}}{\Delta x} \quad (\text{A1.50})$$

En el sistema plantado se ha utilizado Δx en lugar del Δz debido al uso común del primero cuando de incrementos espaciales se trata.

Las ecuaciones anteriores pueden reagruparse en el siguiente algoritmo iterativo,

$$E_x \Big|_k^{n+1/2} = E_x \Big|_k^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \Delta x} \left[H_y \Big|_{k+1/2}^n - H_y \Big|_{k-1/2}^n \right] \quad (\text{A1.51})$$

184 *Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio*

$$H_y \Big|_{k+1/2}^{n+1} = H_y \Big|_{k+1/2}^n - \frac{\Delta t}{\mu_0 \cdot \Delta x} \left[E_x \Big|_{k+1}^{n+1/2} - E_x \Big|_k^{n+1/2} \right] \quad (\text{A1.52})$$

Como ejemplo la figura A1.5 muestra la simulación de la propagación de un pulso electromagnético con frecuencias e instantes de tiempo diferentes.

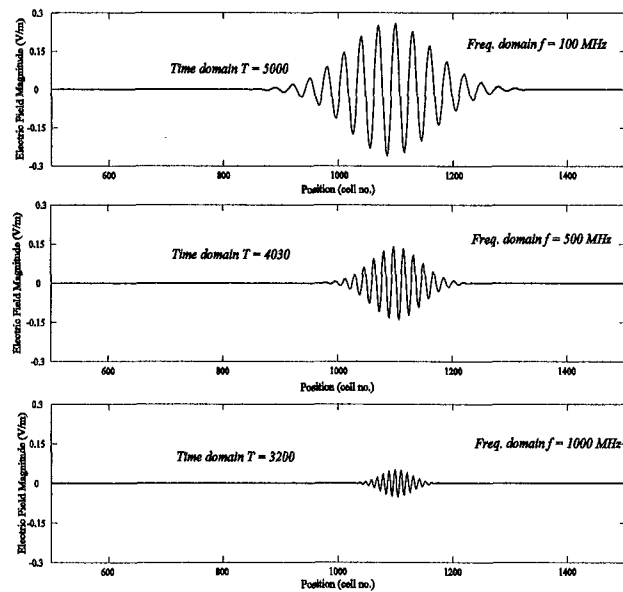


Figura A1.5 Simulación de un pulso electromagnético

A n e x o I I

Diseño de un entorno de simulación adaptado

Si reflexionamos acerca de la concepción tradicional de la ciencia y la tecnología y si observamos el devenir de los avances tecnocientíficos con su implicación social detectaremos cierto anacronismo entre conceptos y realidades. Ciencia y tecnología, además de tener dimensiones sociales ofrecen, en la actualidad, una mayor interrelación y dependencia de lo que la idea tradicional nos transmite. Ni la ciencia es independiente de la sociedad ni la tecnología se reduce a la mera construcción de máquinas.

El fenómeno científico-tecnológico y su creciente importancia en la sociedad actual han provocado la aparición de nuevas formas de entender las relaciones entre ciencia, tecnología y sociedad. Se trata de los estudios CTS (Ciencia, Tecnología y Sociedad) o estudios sociales de la ciencia y la tecnología. Es un movimiento con repercusiones políticas y educativas que rechaza la imagen intelectualista de la ciencia y critica la concepción de la tecnología como mera ciencia aplicada [31].

Merece la pena enumerar las líneas de actuación de esta corriente surgida en los años setenta:

- En el campo de la investigación, los estudios CTS se han desarrollado como una alternativa a la reflexión académica tradicional sobre la ciencia y la tecnología, promoviendo una

186 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

nueva visión no racionalista y socialmente contextualizada de la actividad científico-tecnológica.

- En el campo de la educación, esta nueva imagen de la ciencia y la tecnología en sociedad ha cristalizado en la aparición en numerosos países de programas interdisciplinares de enseñanza secundaria y universitaria
- En el campo de la política, los estudios CTS han defendido una activa participación pública en la gestión de la ciencia y la tecnología, promoviendo la creación de diversos mecanismos institucionales que faciliten la apertura de los procesos de toma de decisiones concernientes a políticas científico-tecnológicas.

Estas tres líneas ofrecen posibilidades de desarrollo y de aportación de nuevas ideas. En efecto, siguiendo con la consecución del movimiento CTS en alternativas concretas ¿podremos pensar en herramientas que nos ayuden, a la vez, en el desarrollo científico, tecnológico y social?

El acercamiento a esta propuesta desde la ciencia y la tecnología de los computadores nos mueve en la línea del paradigma de la simulación por computador. Consideramos que el desarrollo de entornos de simulación adecuados a cada problema proporciona facilidades en las tres líneas antes citadas. En efecto, tanto la investigación como la educación y las implicaciones políticas pueden utilizar este paradigma en beneficio de sus objetivos convirtiéndose de esta manera en un útil que abarca e integra las líneas de esta corriente. Pensamos que el entorno de simulación deberá diseñarse y adaptarse al problema de estudio a modo de núcleo que proporcione las facilidades necesarias en su diseño.

A2.1 El entorno de simulación adaptado como herramienta CTS

Nuestra propuesta en lo referente a la metodología utilizada defiende la utilidad del diseño y desarrollo de entornos de simulación adaptados al fenómeno de estudio. Pero ¿Cuáles son sus ventajas y que defectos detectamos?

- En cuanto a las bondades del diseño de un entorno de simulación adaptado observamos su utilidad ya contrastada en ambientes científicos. Por otra parte también proporciona nuevas alternativas en la educación. La interactividad de un

mundo virtual en el que el estudiante se implique dota a esta herramienta de capacidad para la participación en la construcción de conocimientos. Por último, su utilización y sus conclusiones podrán ser utilizadas como elemento a tener en cuenta para la participación pública en proyectos de investigación y desarrollo. La asignación de recursos a determinados proyectos científico-tecnológicos podría estar vinculada a la existencia de este diseño y a los resultados obtenidos.

- Los defectos pasan por el hecho de que la utilización de estos mundos virtuales no constituye, por sí mismo, como concluyente en ningún estudio de investigación. Su fiabilidad dependerá tanto de los resultados obtenidos como del propio diseño y utilización. El análisis y desarrollo de los experimentos por computador deberán haber sido objeto de un estudio y adaptación al fenómeno previo lo que en ocasiones provoca costes elevados.

A pesar de sus limitaciones el diseño y desarrollo de entornos de simulación adaptados a cada problema (a modo de núcleos de simulación) que puedan interrelacionarse en entornos globales proporcionaría capacidades con las que profundizar en las líneas CTS. La construcción de estos entornos podríamos enfocarlos como una actividad pre-experimental que nos orientará e informará acerca de las líneas a seguir en la determinación de los experimentos de laboratorio o en la construcción de prototipos. El diseño de esta herramienta supondrá, por lo tanto, un nuevo paso a incluir en el método. En la figura A2.1 se muestra el diseño el contexto de un núcleo de simulación adaptado como una etapa más que induce y realimenta tanto a las etapas previas como a las de experimentación y construcción.

Detectada la necesidad de racionalizar nuestro trabajo mediante la creación de herramientas de simulación adaptadas nos hemos marcado el diseño y desarrollo de un entorno de simulación multifrecuencial que sirva de núcleo para la simulación de los problemas derivados de la hipótesis de trabajo. Este núcleo se diseñará con criterios y técnicas que nos proporcionen facilidades de integración y ampliación en un contexto general de simulación de los fenómenos físicos.

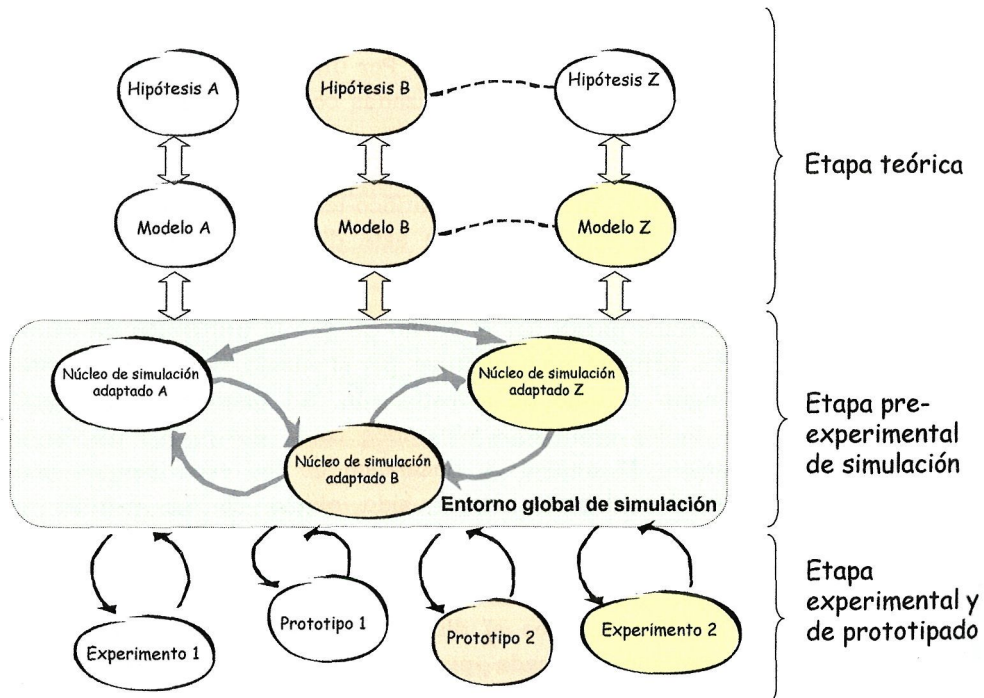


Figura A2.1 Etapas en el desarrollo de aplicaciones a partir del método propuesto.

Introducción a la simulación de fenómenos físicos

La simulación por computador, como cualquier nueva tecnología, afecta a nuestra forma de aprender y pensar. Pero ¿por qué es importante la simulación de fenómenos físicos? Una de las razones está en el hecho de que esta nueva herramienta proporciona soluciones a los problemas no lineales (gran parte de los fenómenos naturales) que los métodos tradicionales no pueden resolver. Otra razón es la capacidad que tiene de resolver problemas complejos con varias variables y grados de libertad. En definitiva, la simulación por computador es una herramienta que puede ser usada en la comprensión de fenómenos complejos y que estimula el desarrollo teórico.

Elementos del entorno de simulación

Nos acercaremos a la herramienta desde la perspectiva de establecer los requerimientos con los que definir la especificación de un diseño apropiado. No será el elemento clave de nuestro trabajo pero si un instrumento muy importante con el que poder llevarlo a cabo. Como contrapunto a estas consideraciones iniciales nos marcamos criterios de diseño generales relativos a fenómenos de interacción onda-medio físico. Trataremos de identificar el problema desde niveles que contemplen la simulación de fenómenos físicos y, a partir de ese momento, definiremos la particularidad del fenómeno electromagnético analizado.

El objetivo final es, por una parte, obtener criterios de diseño abiertos que puedan utilizarse en la creación de otros entornos y, por otra, realizar uno con el que cumplir con los requerimientos de nuestra hipótesis de trabajo. El entorno final, a modo de núcleo funcional, podrá integrarse o participar dentro de contexto general de simulación.

En una primera aproximación identificamos algunos elementos clave con los que abordar el diseño propuesto. En primer lugar definir las necesidades del usuario del entorno. A continuación precisar los lenguajes y las técnicas de programación que determinan las capacidades del sistema. Finalmente analizar todo lo relacionado con la integración o relación con otros entornos dentro de un contexto genérico.

Necesidades del usuario del entorno

Dado el perfil del usuario y el tipo de problemas que se pretenden estudiar establecemos que el sistema deberá ofrecer las siguientes facilidades:

- Información acerca de los métodos numéricos utilizados con los que determinar las posibilidades de resolución del problema (tipo, alcance, errores)
- Posibilidad de incorporar o modificar los algoritmos (dependientes de los métodos numéricos) que resuelven los sistemas de ecuaciones
- Facilidades para la visualización y obtención de gráficas y datos
- Capacidad de interactuar con el proceso de simulación modificando sus parámetros

Los métodos numéricos con los que se resuelven el conjunto de ecuaciones que modelan un fenómeno físico determinan las posibilidades de aplicabilidad del sistema. Como ejemplo podemos citar el utilizado en la resolución de los casos prácticos vistos en el capítulo 4. En ellos se manejan algoritmos FDTD para medios dispersivos los cuales derivan del método denominado *método de las diferencias finitas*.

El proceso es siempre el mismo, de un método general se obtienen posibilidades de aplicación en problemas en los que hay que definir las *condiciones frontera, condiciones iniciales* y *parámetros constitutivos*. La adaptación a un determinado tipo de problema lo dota en numerosas ocasiones de categoría de método que podrá ser utilizado en familias de problemas similares. Es el caso del FDTD utilizado en problemas de dispersión. Estos métodos, por otra parte, son objeto de continuas mejoras y modificaciones dado que se constituyen como objeto de estudio para las matemáticas.

Las combinaciones y adaptaciones en el planteamiento de los problemas son numerosas. Las modificaciones o mejoras de los métodos son continuas y, por último, la aparición de nuevos métodos con nueva algoritmia posible. Todo esto hace que una herramienta de simulación adecuada deba contemplar la posibilidad tanto de modificar y adaptar los algoritmos existentes como de incorporar nuevos métodos con los que no perder capacidades de representación de los fenómenos físicos estudiados. Lo anterior marca una línea de diseño de librerías especializadas con carácter abierto, ampliables y modificables.

Dado que la representación visual de resultados numéricos complejos facilita la comprensión del fenómeno físico, las capacidades gráficas de una herramienta de simulación se vuelven muy importantes en su diseño. De modos tradicionales con representaciones en dos o tres dimensiones se deberá evolucionar a desarrollos con métodos de colores y texturas que ayuden al investigador en la identificación de los datos en problemas de más de tres variables.

Por último, el proceso de configuración, inicio y finalización de la simulación deberá ser flexible y posibilitar la interacción durante el propio proceso de simulación. Con la representación gráfica de la evolución del sistema y la posibilidad de interactuar con él se agiliza el análisis e incluso se ayuda a detectar relaciones y comportamientos entre las variables y los parámetros del sistema.

Lenguajes de programación

Dentro de los entornos científicos Fortran es el más antiguo y uno de los más populares. Desarrollado por John Backus en IBM entre 1954 y 1957 tiene en su evolución Fortran 90/95 características modernas similares a C/C++.

El lenguaje Basic fue desarrollado en 1965 por John Kemeny y Thomas Kurtz en el Dartmouth Collage como un lenguaje de introducción a la ciencia de los computadores. En 1983 Kemeny y Kurtz crearon una versión extendida y estándar con una estructura de programación y plataforma gráfica independientes. Versiones populares de este lenguaje son Visual Basic y Real Basic.

C fue desarrollado en 1972 por Dennis Ritchie en los laboratorios Bell como un lenguaje y sistema de programación de propósito general. Entre sus características podemos destacar un amplio conjunto de operadores y una estructura moderna de datos y de instrucciones de control. C++ es una extensión de C diseñado por Bjarne Stroustrup y los laboratorios AT&T Bell en la década de los 80. Es un lenguaje orientado a objetos que incorpora mejoras en relación a su antecesor. C++ es uno de los lenguajes comerciales más utilizados en la actualidad.

Python, como Basic, tiene su origen en un entorno docente. Guido van Rossum fue su creador a finales de los 80. Es un lenguaje interpretado, interactivo, orientado a objetos y de propósito general. Mientras que se dice que el lenguaje C fue creado para facilitar la vida a los computadores Python lo fue para facilitársela a los programadores.

Java es un nuevo lenguaje orientado a objetos creado por James Gosling y otros en Sun Microsystems en los 90. Se ha convertido en un lenguaje muy popular con una rápida evolución.

Los lenguajes de programación no son estáticos, evolucionan y surgen otros con los sucesivos desarrollos en el hardware y las teorías de la computación. C, Basic y Fortran son lenguajes procedurales en los que el estado de la memoria cambia conforme a la secuencia de instrucciones dentro de un programa. Como alternativa los lenguajes orientados a objetos tales como C++, Java y Python proponen programas como una colección estructurada de objetos. El objeto encapsula tanto las funciones como los datos que son modificados mediante la comunicación con otros objetos. Uno de los objetivos de este tipo de

192 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

lenguajes es la producción de librerías de objetos que pueden modificarse y extenderse a los problemas individuales fácilmente.

Con los antecedentes que marcan de los apartados anteriores y con la revisión de lo que en la actualidad podemos utilizar como herramienta de programación apostamos por el lenguaje Java. Se trata de una plataforma independiente, con facilidades gráficas, con posibilidades de realizar una programación basada en eventos, manipulación a nivel de bit y posibilidades en el procesamiento paralelo. Si a esto le sumamos el contexto en el que se está evolucionando (código abierto, independencia de plataformas, amplia utilización en el entorno universitario) con la constante aparición y mejora de librerías matemáticas para el tratamiento numérico nos encontramos ante un candidato válido como propuesta de lenguaje para nuestro núcleo de simulación.

Java cuenta con una API que puede manejar gráficos e interfaces de usuario amigables e intuitivas (botones, campos de texto). Los programas son compilados a una plataforma neutral lo que significa que se pueden ejecutar en cualquier computador, aunque su ejecución será más lenta en relación a otros lenguajes dependientes de la plataforma. Este inconveniente no lo consideramos un factor que limite las capacidades de nuestro simulador adaptado considerando por otra parte que el propio lenguaje de programación esté mejorando y evolucionando de forma rápida y constante. Por otra parte, en el caso de requerir mayores velocidades en la ejecución de los programas, las partes del código que interesen podrán convertirse a C/C++ o Fortran.

Requerimientos y especificaciones del entorno de simulación adaptado

La capa pre-experimental de la figura 4.1 establece la necesidad de diseñar un conjunto de servicios que toman como entrada la especificación de los modelos creados y ofrecen como salida un conjunto de resultados numéricos, gráficas y estadísticas que podrán ser adaptables y configurables conforme a las necesidades de la simulación.

Esta caja negra o núcleo simulador deberá integrarse en un contexto de trabajo distribuido y ofrecer facilidades para configurar e interactuar con cada simulación. Ofrecerá por lo tanto una interfaz amigable con capacidades de adaptación al experimento.

La plataforma de trabajo deberá contar con herramientas que permitan crear o modificar los algoritmos numéricos que conforman el núcleo del simulador. Esto sugiere una separación clara entre la interfaz de usuario, los algoritmos numéricos y el control de la marcha de la simulación.

Por último, Los lenguajes de programación deberán ser independientes de la plataforma y contar con recursos de tratamiento numérico y gráficos adecuados.

Lo enumerado en la introducción y los requerimientos perfilan un conjunto de especificaciones para el diseño del núcleo simulador. De la elección de técnicas de programación orientada a objetos obtenemos de forma inherente propiedades como la abstracción, la herencia, el encapsulamiento y el polimorfismo, que pueden ser tratadas como especificaciones para el diseño.

Hay un cierto desacuerdo sobre exactamente que características de un método de programación o lenguaje le califican como orientado a objetos, pero hay un consenso general en que las características siguientes son las más importantes:

Abstracción: Cada objeto en el sistema sirve como modelo de un agente abstracto que puede realizar trabajo, informar y cambiar su estado, y comunicarse con otros objetos en el sistema sin revelar cómo se implementan estas características. Los procesos, las funciones o los métodos pueden también ser abstraídos y cuando los están, una variedad de técnicas son requeridas para ampliar una abstracción.

Encapsulación: También llamada ocultación de la información, esto asegura que los objetos no pueden cambiar el estado interno de otros objetos de maneras inesperadas; solamente los propios métodos internos del objeto pueden acceder a su estado. Cada tipo de objeto expone una interfaz a otros objetos que especifica cómo otros objetos pueden interactuar con él. Algunos lenguajes relajan esto, permitiendo un acceso directo a los datos internos del objeto de una manera controlada y limitando el grado de abstracción.

Polimorfismo: Las referencias y las colecciones de objetos pueden contener objetos de diferentes tipos, y la invocación de un comportamiento en una referencia producirá el comportamiento correcto para el tipo real del referente. Cuando esto ocurre en tiempo de

ejecución, esta última característica se llama asignación tardía o asignación dinámica. Algunos lenguajes proporcionan medios más estáticos (en "tiempo de compilación") de polimorfismo, tales como las plantillas y la sobrecarga de operadores de C++.

Herencia: Organiza y facilita el polimorfismo y la encapsulación permitiendo a los objetos ser definidos y creados como tipos especializados de objetos preexistentes. Estos pueden compartir (y extender) su comportamiento sin tener que reimplementar su comportamiento. Esto suele hacerse habitualmente agrupando los objetos en clases y las clases en árboles o enrejados que reflejan un comportamiento común.

Con las características del paradigma de objetos hemos establecido un conjunto de especificaciones ya enumeradas válidas para el diseño del entorno de simulación, pero, éstas no son las únicas. Los requerimientos para el cálculo numérico, interactividad con el experimento, interfaz gráfica amigable y configurable, posibilidad de modificar o crear nuevos algoritmos y el trabajar en un entorno distribuido nos obligan a profundizar en la determinación de nuevas especificaciones orientadas a la consecución de un diseño adecuado.

En lo referente a la capacidad de tratamiento numérico el diseño del núcleo simulador deberá establecer la capacidad de cómputo con la que garantizar la obtención de resultados. Además el sistema deberá trabajar mediante la utilización de librerías matemáticas que podrán ser ampliables en función de las necesidades establecidas. Los entornos de programación utilizados deberán contar con herramientas capaces de cumplir con las especificaciones de cálculo numérico enumerados.

La interactividad con el experimento proveerá al sistema de capacidades en las que el usuario podrá controlar tanto la configuración como la marcha de la simulación. Podrá observar la evolución del proceso y obtener la información en el momento que interese.

La interfaz gráfica será amigable y ofrecerá facilidades para la utilización, configuración y ampliación de los experimentos. El usuario podrá modificar el aspecto de la simulación con el objetivo de visualizar los datos necesarios de forma más clara.

Dado que la parte más importante de la simulación es el análisis y la extracción de conclusiones acerca de un conjunto de algoritmos

numéricos, el núcleo de simulación deberá contar con las herramientas adecuadas para la creación, modificación y mantenimiento de estos algoritmos dentro del contexto general. Estos útiles deberán facilitar dicho manejo reduciendo al máximo los costes de aprendizaje, de utilización y de mantenimiento.

Por último la línea metodológica en la que integramos una capa pre-experimental de simulación (figura..) nos introduce a un contexto de trabajo en red, distribuido con servicios y aplicaciones remotas. Todo ello marca un conjunto de especificaciones relacionadas con estos entornos con las que el diseño del núcleo de simulación adaptado deberá contar, tanto a nivel particular de funcionamiento interno como a nivel de integración en una capa de simulación genérica.

A2.2 Diseño del entorno de simulación adaptado

Establecidos los requerimientos y definidas las especificaciones pasamos a proponer el diseño de un entorno de simulación que servirá como núcleo de experimentación para el fenómeno de interacción señal-medio físico. Este núcleo se integrará en la capa pre-experimental dentro de un contexto general de simulación. Con el entorno de desarrollo que ofrece la plataforma Java se facilita el cumplimiento de la mayor parte de las especificaciones enumeradas con anterioridad. Si a esto le añadimos la utilización de una arquitectura modelo-vista controlador (MVC) podremos separar de forma sencilla la parte de los algoritmos numéricos que caracterizan el modelo (Modelo) de la interfaz gráfica de usuario (Vista), además de ofrecer servicios de interacción con cada experimento (Controlador) mediante los cuales se observe la evolución del proceso estudiado [16].

Arquitectura MVC

De acuerdo al paradigma MVC la simulación por computador se dividirá tres partes:

- El modelo (M), que incluye el conjunto de algoritmos numéricos y las variables que representan el estado de la simulación. Los algoritmos representan las leyes que gobiernan el fenómeno físico.

- La vista (V), con una representación gráfica de los estados de la simulación. Aquí se muestran los aspectos más relevantes del fenómeno.
- El control (C), en donde se incluyen la interactividad del usuario en el control de la simulación.

Estas tres partes necesitarán relacionarse mediante conexiones formando una parte más dentro de la separación estándar MVC. Existen interrelaciones entre las partes puesto que una modificación en el modelo afectará a las posibilidades de representación de la vista, el usuario mediante el control podrá modificar el modelo puesto que cambiará el estado de las variables. La propia vista dará opciones de cambio en el modelo (mediante la modificación de variables) o en el control (mediante acciones de ratón o teclado).

Esta separación refuerza la independencia del modelo. La tarea de crear una simulación se hace más modular y se promueve la reutilización de ciertas partes.

En el diseño de un núcleo de simulación adaptado a un problema o fenómeno de estudio deberá especificar la simulación, definir las acciones de control, crear la interfaz gráfica y determinar las conexiones existentes entre el modelo, la vista y el controlador:

- Con la especificación del modelo se determinan las magnitudes (variables de estado y parámetros) más relevantes y las leyes que gobiernan el cambio de dichas magnitudes. En este primer paso se deberán definir los algoritmos que gobiernan la dinámica de la simulación y las posibles conexiones existentes entre las variables. Para completar la especificación del modelo de la simulación se deben establecer el estado inicial, las ecuaciones de evolución (algoritmos que evolucionan con el tiempo) y las ecuaciones de relación (relación entre variables no temporales). Por tanto se pueden crear modelos que sólo cuenten con ecuaciones de evolución, modelos que estén formados sólo por ecuaciones de relación no temporal y modelos híbridos en los que en cada paso primero se evalúan las ecuaciones de evolución para, a continuación hacerlo con las de conexión.
- Con el control se definen un conjunto de acciones que el usuario puede querer realizar. Estas acciones podrán ser sobre el modelo

o sobre la vista. Como ejemplo típico se encuentran las instrucciones que otorgan valores específicos a las variables del modelo tratando de establecer un estado concreto del mismo. Otro tipo de acciones son las que controlan la ejecución de la simulación. Sobre la vista es posible que se quiera modificar en un momento dado la visualización de un componente.

- Con la creación de la vista o interfaz gráfica estamos ante la parte más dependiente de la plataforma en la que la simulación se hace efectiva, además de ser la más exigente en cuanto al conocimiento de técnicas de programación avanzada. La búsqueda de librerías gráficas adecuadas resulta de vital importancia en esta parte del diseño. Java, mediante su librería AWT (abstract window toolkit) es un ejemplo de una librería gráfica potente.
- Mediante las conexiones diremos a la vista qué variables del modelo (conexión modelo con vista) debe utilizar y cómo debe hacerlo y permitir que al accionar algunos componentes de la vista (como botones) se ejecuten determinadas acciones de control (conexión vista con control).

Dependencias entre modelo, vista y controlador

Si ordenamos estos tres grupos por probabilidad de ser reutilizable, tenemos un resultado como el siguiente:

Lo más reutilizable y que es menos susceptible de cambio, es el modelo. Las reglas del algoritmo que modela un comportamiento físico no cambian de un día para otro. En un punto intermedio está el controlador. Es posible que mejoremos con cierta frecuencia nuestro algoritmo de control de la simulación. Finalmente, lo que más cambia, es la vista. De hecho, una misma simulación suele darnos posibilidad de varias presentaciones. El modelo y el controlador serían los mismos, pero habría varias vistas distintas.

Tras este tipo de ordenación, si queremos reaprovechar cosas en futuros programas de simulación que traten sobre problemas similares, está claro que el modelo debe ser independiente. Las clases (o funciones y estructuras) del modelo no deben ver a ninguna clase de los otros grupos. De esta forma podremos compilar el modelo en una librería independiente que podremos utilizar en cualquier programa de

simulación que hagamos. Es más, suponiendo que hagamos el programa en C y queramos cambiarnos de plataforma (de linux a windows, por ejemplo), tenemos bastantes posibilidades de que el código utilizado sea C standard y compile casi directamente en cualquier plataforma. No tenemos librerías gráficas, de sockets ni otras librerías avanzadas que suelen ser muy distintas, incluso dentro de una misma plataforma si utilizamos distintos entornos de desarrollo (comparemos por ejemplo, los gráficos de visual C++ con los de borland C++, ambos en PC/windows).

Siguiendo con el orden de posibilidad de reutilización, el controlador podría (y suele) ver clases del modelo, pero no de la vista. Si en el juego del ajedrez el controlador es el que analiza el tablero y hace los movimientos del ordenador, está claro que el controlador debe ver el modelo que tiene las piezas y hacer en él los movimientos. Sin embargo, no debe ver nada de la vista. De esta forma, el cambio de interfaz gráfica no implicará retocar el algoritmo y recompilarlo, con los consiguientes riesgos de estropearlo además del trabajo del retoque.

La vista es lo más cambiante, así que podemos hacer que vea clases del modelo y del controlador. Si cambiamos algo del controlador o del modelo, es bastante seguro que tendremos como mínimo que recompilar la interfaz gráfica.

Ejemplo de diseño y realización de un núcleo de simulación adaptado

La potencialidad del entorno de desarrollo propuesto la podremos apreciar en un ejemplo básico de diseño y desarrollo de un núcleo de simulación adaptado al movimiento de una onda electromagnética plana en el vacío.

El proceso que nos lleva a la creación de un núcleo MVC que simule dicho movimiento pasa, en primer lugar, por obtener un modelo y un método numérico de resolución del problema. El modelo se plantea con la formulación adaptada al fenómeno estudiado. En este caso la tomamos de la solución de las ecuaciones de Maxwell para el vacío:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0} \nabla \times H \quad (A2.1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times E \quad (\text{A2.2})$$

Las ecuaciones expresan el campo eléctrico y magnético en tres dimensiones. Si queremos partir de una representación unidimensional podemos utilizar las siguientes:

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (\text{A2.3})$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (\text{A2.4})$$

Tras la formulación del problema debemos elegir el método numérico que nos proporcionará la solución al problema. El método es el de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) que nos proporciona una solución a las ecuaciones diferenciales planteadas:

$$\frac{E_x^{n+1/2}(k) - E_x^{n-1/2}(k)}{\Delta t} = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{H_y^n(k+1/2) - H_y^n(k-1/2)}{\Delta x} \quad (\text{A2.4})$$

$$\frac{H_y^{n+1}(k+1/2) - H_y^n(k+1/2)}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{E_x^{n+1/2}(k+1) - E_x^{n-1/2}(k)}{\Delta x} \quad (\text{A2.5})$$

En donde el tiempo está expresado como $t = \Delta t \cdot n$ y el espacio como $z = \Delta z \cdot k$

Reagrupando términos la solución numérica se expresa como un algoritmo iterativo del tipo:

$$E_x^{n+1/2}(k) = E_x^{n-1/2}(k) - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \cdot \Delta x} [H_y^n(k+1/2) - H_y^n(k-1/2)] \quad (\text{A2.6})$$

$$H_y^{n+1}(k+1/2) = H_y^n(k+1/2) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \cdot \Delta x} [E_x^{n+1/2}(k+1) - E_x^{n-1/2}(k)] \quad (\text{A2.7})$$

200 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

Como se observa los cálculos entrelazan espacio y tiempo en un área de trabajo dividida en celdas de tamaño Δx e intervalos de tiempo Δt . Las ecuaciones anteriores son similares, sólo el orden de magnitud de ε_0 y de μ_0 las hace manejar dimensiones diferentes. Esta diferencia se puede subsanar mediante el siguiente cambio de variable :

$$\overset{\square}{E} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} E \quad (\text{A2.8})$$

Las ecuaciones 4.4 a 4.7 quedan

$$\overset{\square}{E}_x^{n+1/2}(k) = \overset{\square}{E}_x^{n-1/2}(k) - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{\Delta t}{\Delta x} [H_y^n(k+1/2) - H_y^n(k-1/2)] \quad (\text{A2.9})$$

$$H_y^{n+1}(k+1/2) = H_y^n(k+1/2) - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{\Delta t}{\Delta x} [E_x^{\square n+1/2}(k+1) - E_x^{\square n+1/2}(k)] \quad (\text{A2.10})$$

Una vez se determina el tamaño de celda Δx , el incremento de tiempo puede ser

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{2 \cdot c_0} \quad (\text{A2.11})$$

con c_0 como la velocidad de la luz en el vacío. De este modo se cumple

$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \frac{\Delta t}{\Delta x} = c_0 \cdot \frac{\Delta x / 2 \cdot c_0}{\Delta x} = \frac{1}{2} \quad (\text{A2.12})$$

Rescribiendo el algoritmo con notación de lenguaje de programación quedaría de la siguiente forma

$$ex[k] = ex[k] + 0.5 * (hy[k-1] - hy[k]) \quad (\text{A2.13})$$

$$hy[k] = hy[k] + 0.5 * (ex[k] - ex[k+1]) \quad (\text{A2.14})$$

Aquí $k+1/2$ y $k-1/2$ se redondean a k y $k-1$, mientras que el

tiempo está implícito en el método puesto que el lado izquierdo de ex representa a $n+1/2$ y el lado derecho a $n-1/2$.

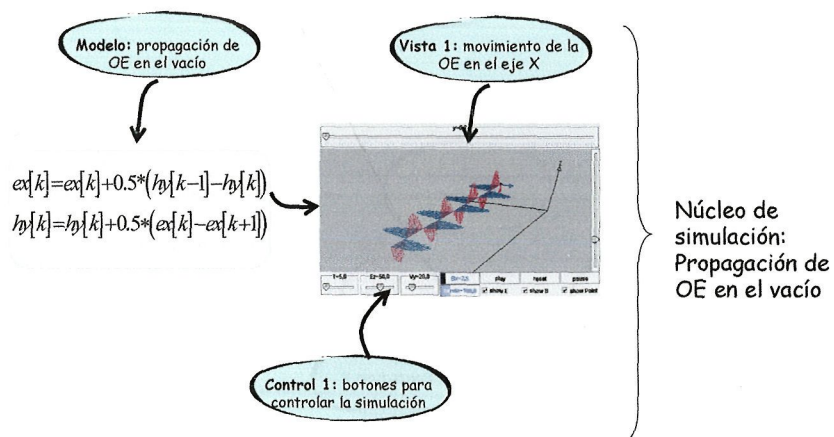


Figura A2.2 Interfaz de usuario

La solución FDTD al problema de la propagación de una OE en el vacío se representa con el algoritmo iterativo representado en A2.13 y A2.14. Este algoritmo llevado a una arquitectura MVC dentro de un entorno de desarrollo Java se corresponde a un núcleo de simulación adaptado que ofrecerá al usuario la posibilidad de configurar y simular el movimiento de la onda en una región 2D.

Para la realización del modelo de propagación hemos trabajado con una plataforma de desarrollo MVC denominada *Easy Java Simulations* [21] que nos ayuda a generar el código MVC y que nos ofrece un conjunto de librerías matemáticas y gráficas útiles en la implantación de los núcleos de simulación. La capa pre-experimental comienza con el diseño de un núcleo que simula la propagación de una OE en el vacío. A continuación se diseña e implementan los núcleos con los que diseñar la propagación en diferentes medios (fig A2.3). El conjunto diseñado se integra en un entorno general con el que estudiar y analizar la interacción de las OE multifrecuenciales con diferentes modelos de medios.

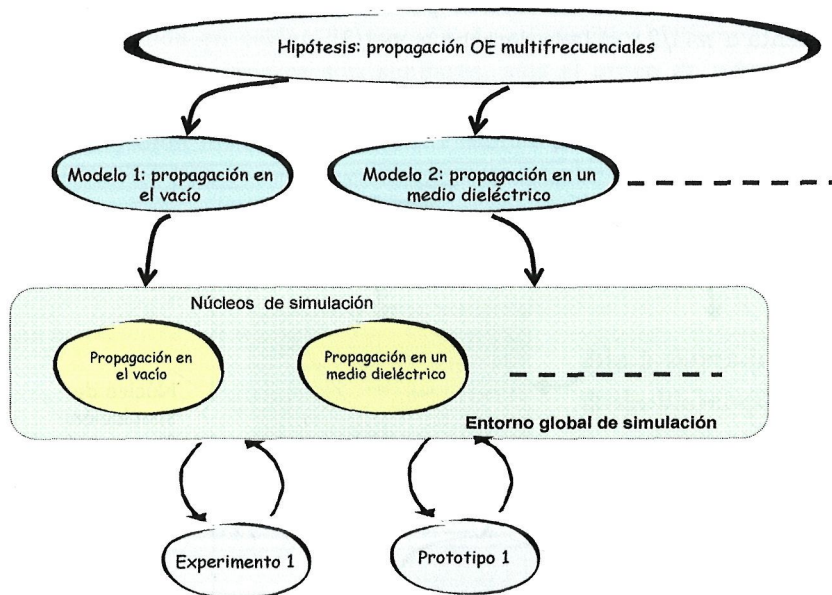


Figura A2.3 Estructura del núcleo de simulación adaptado al problema interacción onda-medio.

Escalabilidad del simulador

El simulador cuenta con diferentes modelos de medios dispersivos (Debye, Lorentz, tejido humano, atmósfera) con los que se podrá experimentar la interacción onda-medio. Estos modelos están almacenados en una base de datos tras ser transformados a algoritmos computacionales. El simulador tendrá la posibilidad de ir incorporando nuevos modelos conforme se vayan adquiriendo. Con el acceso y ampliación de la base de datos de los modelos en estudio se dota al sistema de facilidades tanto de ampliación como para adaptarse a las circunstancias cambiantes del conocimiento. En la figura A2.4 se muestra un escenario de simulación en un medio Debye y la posibilidad de incorporar nuevos modelos a la base de datos.

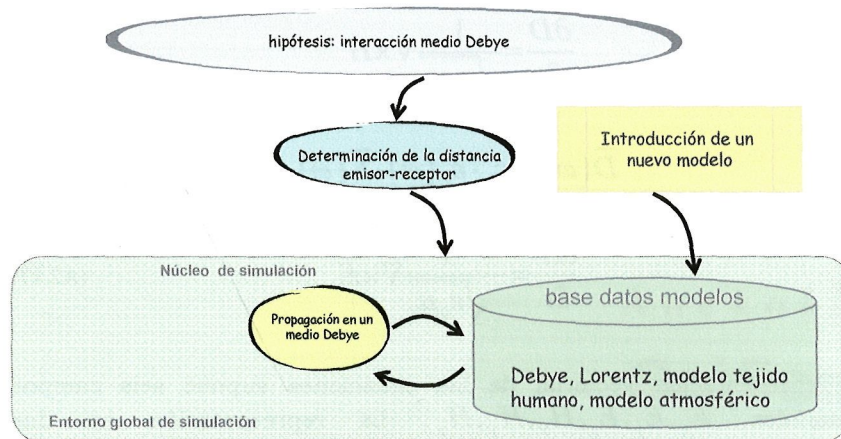


Figura A2.4 Escalabilidad del núcleo de simulación.

Acceso a la simulación

Las herramientas y paradigmas informáticos con los que ha sido construido el entorno de simulación permiten el acceso y difusión a través de Internet. Esto lo dota de independencia de las diferentes plataformas y una capacidad de acceso sólo limitado por la capacidad del servidor utilizado en cada momento.

El usuario entra al sistema mediante una dirección web mediante la cual se descargarán las diferentes aplicaciones en función del tipo de simulación. El sistema irá informando de los servicios disponibles así como de los resultados obtenidos.

Además de utilizar la base de conocimiento, en la cual se encuentran el conjunto de algoritmos que representan diferentes condiciones, modelos y aplicaciones, el usuario podrá modificar y testar nuevas alternativas a los modelos existentes o incorporar nuevos algoritmos que expresan nuevas condiciones. Esto dota al sistema de la realimentación necesaria para mantener la base de datos actualizada conforme a las mejoras y nuevas propuestas.

Simulación en 2 dimensiones

Del mismo modo que para el caso de una dimensión comenzamos por normalizar el conjunto de ecuaciones de Maxwell.

204 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

$$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \nabla \times H \quad (\text{A2.15})$$

$$\bar{D}(\omega) = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r^*(\omega) \cdot \bar{E}(\omega) \quad (\text{A2.16})$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \nabla \times \bar{E} \quad (\text{A2.17})$$

La representación vectorial de las ecuaciones supone seis campos vectoriales $\bar{E}_x, \bar{E}_y, \bar{E}_z, \bar{H}_x, \bar{H}_y, \bar{H}_z$. La representación en dos dimensiones reduce el conjunto de ecuaciones. Para una onda transversal el campo magnético estará representado por $\bar{E}_x, \bar{H}_x, \bar{H}_y$, y el eléctrico por $\bar{E}_y, \bar{E}_z, \bar{H}_x$. Las ecuaciones vectoriales se verán reducidas a,

$$\frac{\partial D_z}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \quad (\text{A2.18})$$

$$D_z(\omega) = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r^*(\omega) \cdot E_z(\omega) \quad (\text{A2.19})$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (\text{A2.20})$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (\text{A2.21})$$

A n e x o I I I

Gráficas

En este anexo se recopilan las curvas patrón que permiten calcular el factor de atenuación α , la penetración nominal P y la velocidad de propagación, en función de la permitividad relativa efectiva del medio, ϵ_r , para distintos valores de la conductividad efectiva σ_{ef} y para unas frecuencias habituales en prospección con radar. Con este conjunto de gráficas se pretende mostrar la influencia y la relación existente entre la frecuencia de la onda electromagnética, los parámetros que caracterizan un medio genérico y el proceso de transmisión de la señal representado por su factor de penetración y velocidad de propagación. Las ecuaciones utilizadas para construir las curvas son las que representan la propagación de la onda electromagnética plana en un medio genérico:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right]} \quad (\text{A3.1})$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right]} \quad (\text{A3.2})$$

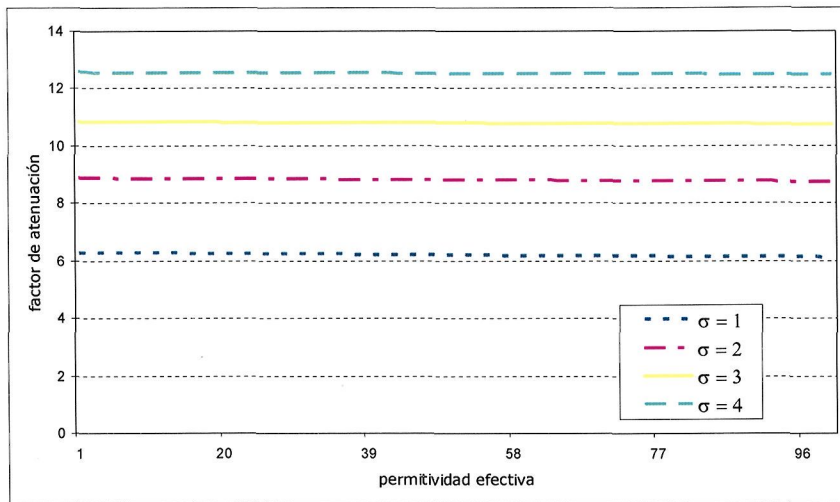


Figura A3.1 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 10 MHz.

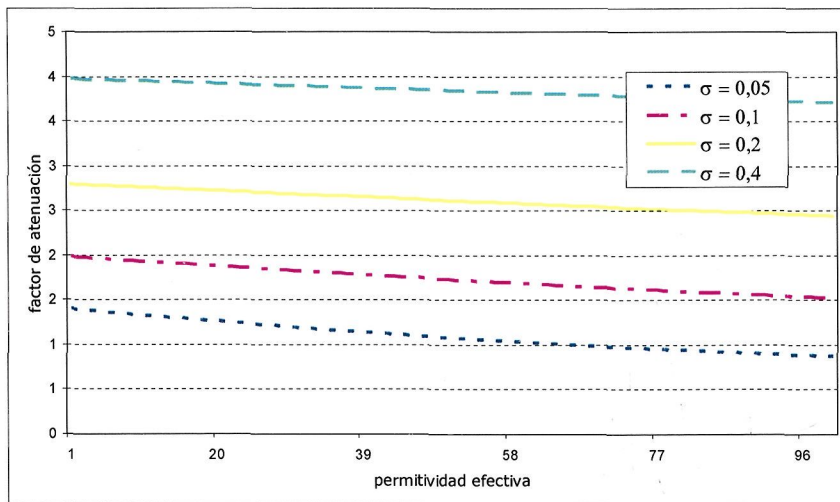


Figura A3.2 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 10 MHz.

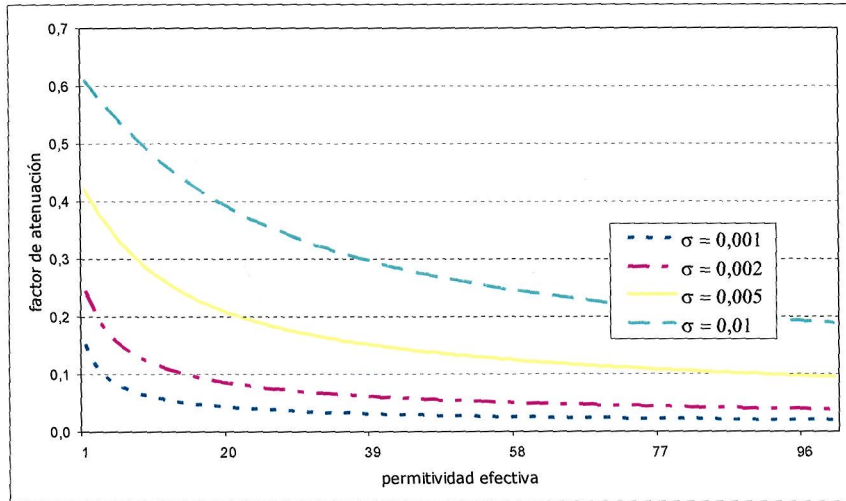


Figura A3.3 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 10 MHz.

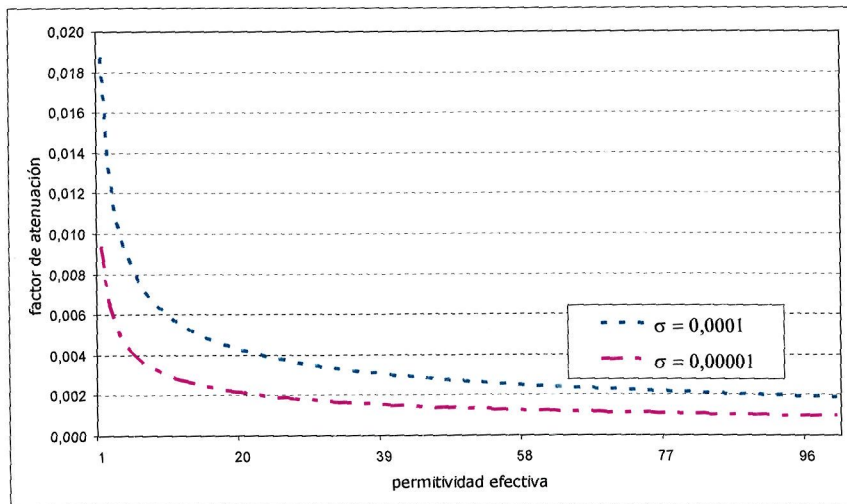


Figura A3.4 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi perfectamente dieléctricos, dada una frecuencia de 10 MHz.

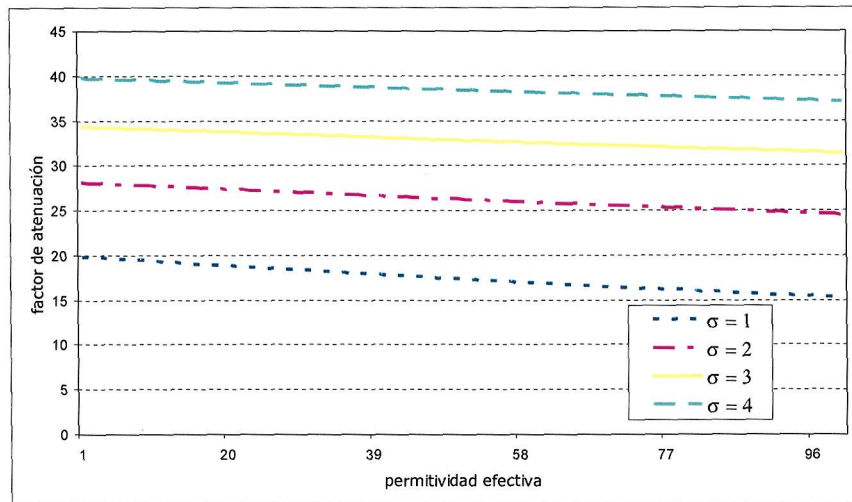


Figura A3.5 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 100 MHz.

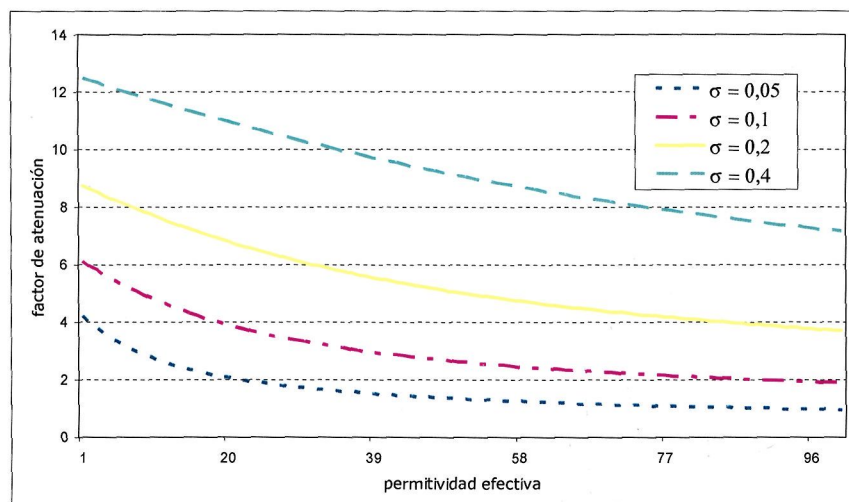


Figura A3.6 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 100 MHz.

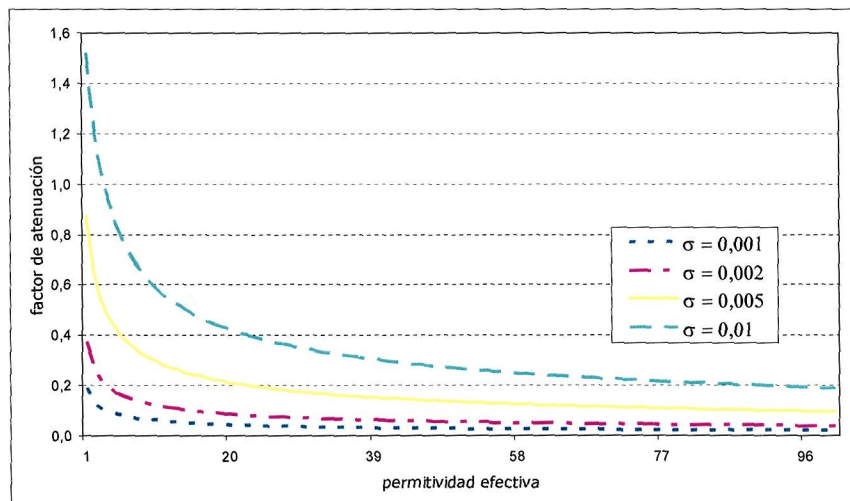


Figura A3.7 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 100 MHz.

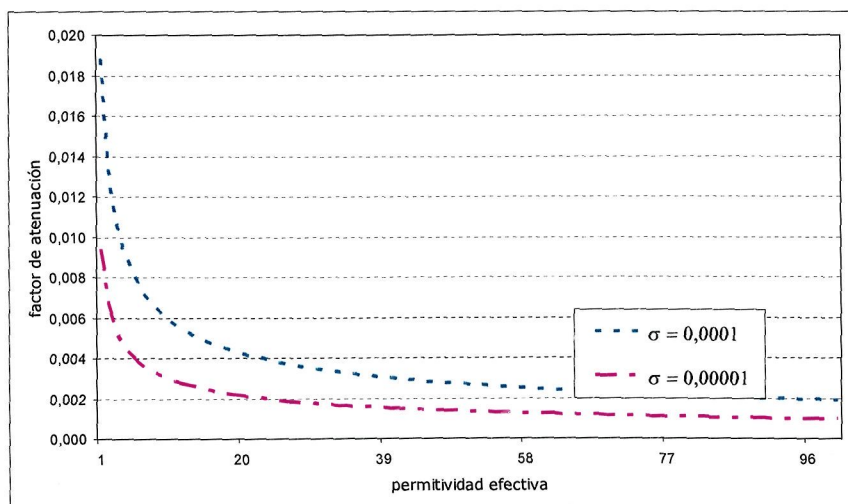


Figura A3.8 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios casi perfectamente dieléctricos, dada una frecuencia de 100 MHz.

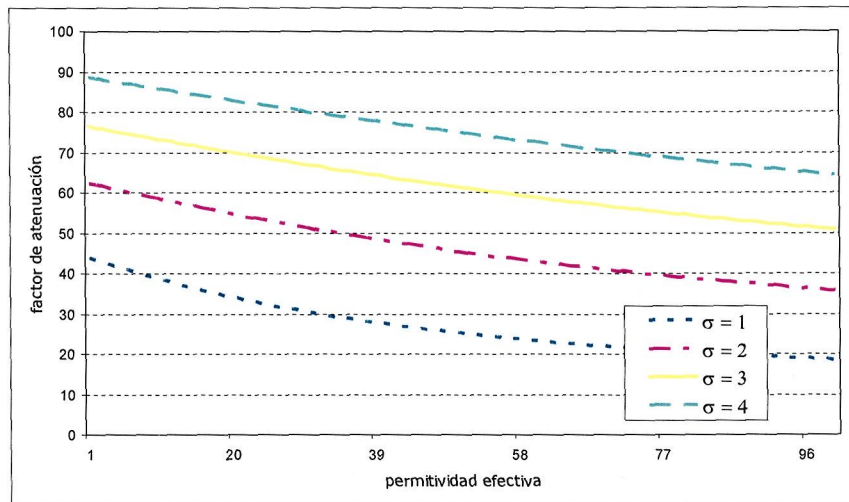


Figura A3.9 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 500 MHz.

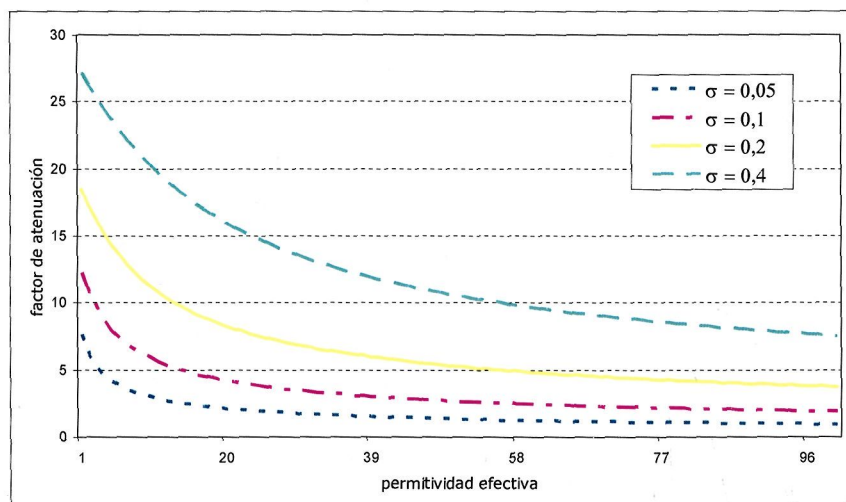


Figura A3.10 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 500 MHz.

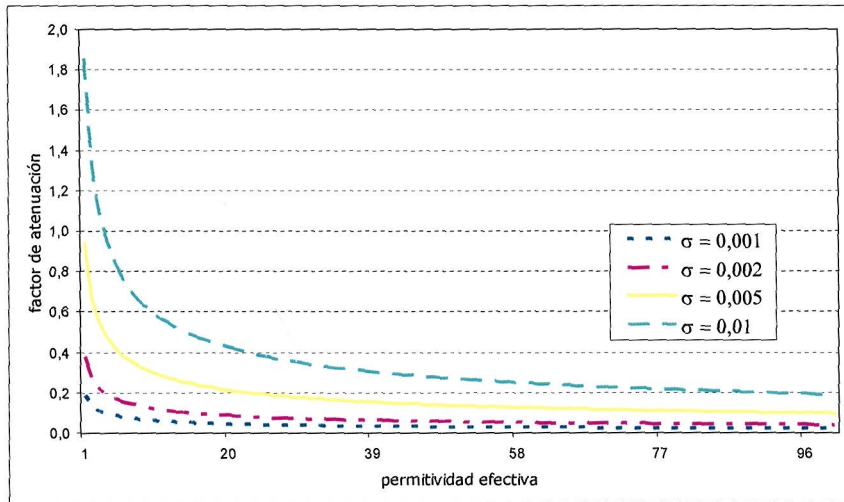


Figura A3.11 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 500 MHz.

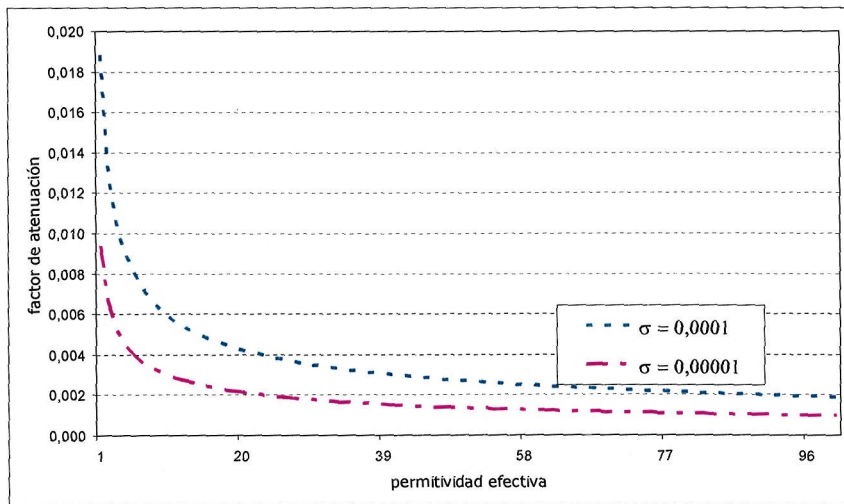


Figura A3.12 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios casi perfectamente dieléctricos, dada una frecuencia de 500 MHz.

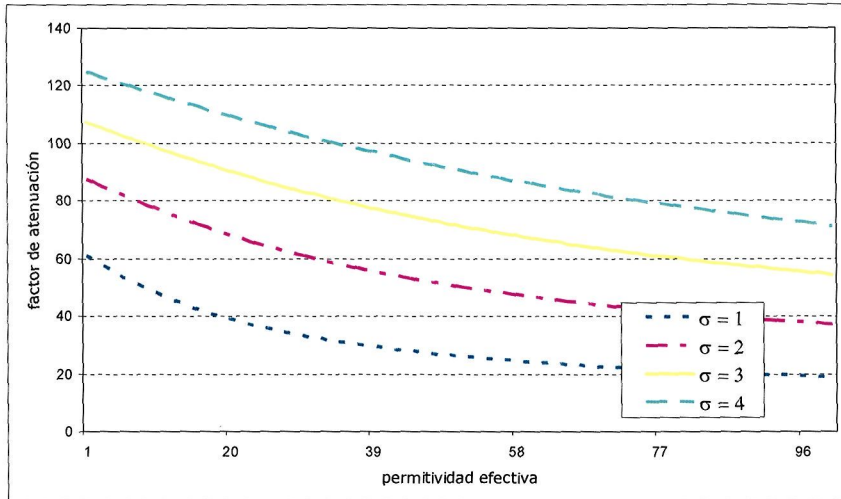


Figura A3.13 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 1000 MHz.

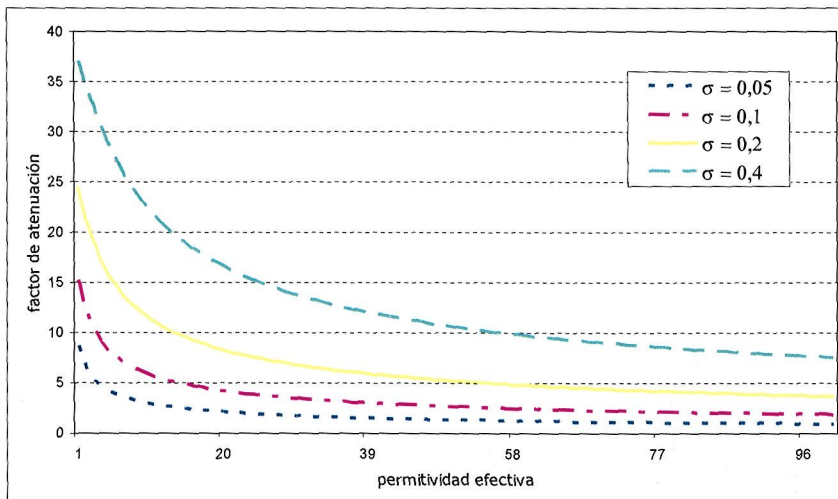


Figura A3.14 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 1000 MHz.

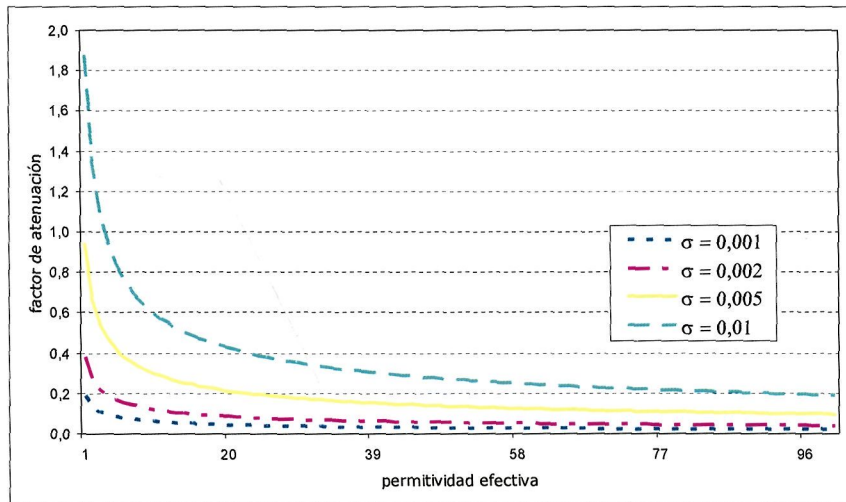


Figura A3.15 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 1000 MHz.

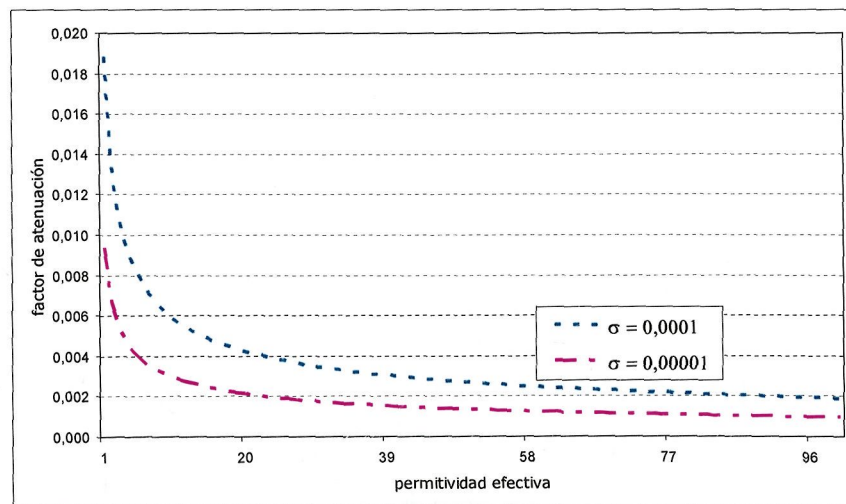


Figura A3.16 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios casi perfectamente dieléctricos, dada una frecuencia de 1000 MHz.

Las gráficas anteriores muestran la relación existente entre el factor de penetración, los parámetros electromagnéticos que caracterizan un medio genérico y la frecuencia de trabajo. A continuación se obtienen diferentes curvas patrón que relacionan la velocidad de propagación con los factores ya citados.

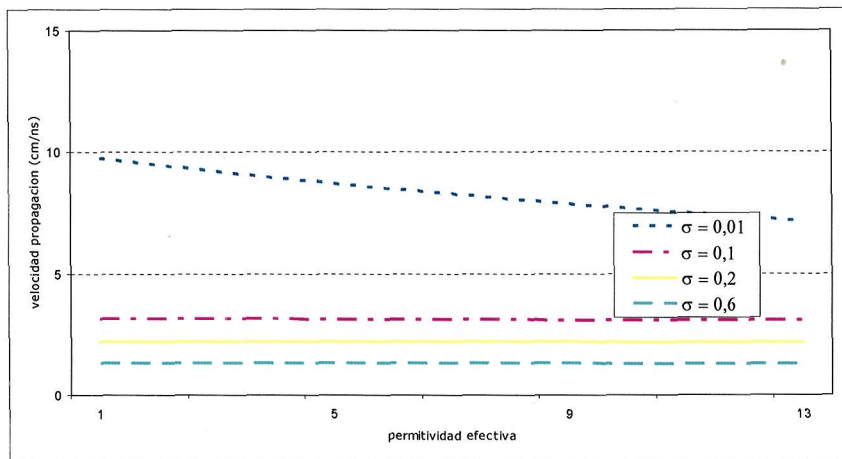


Figura A3.17 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 10 MHz.

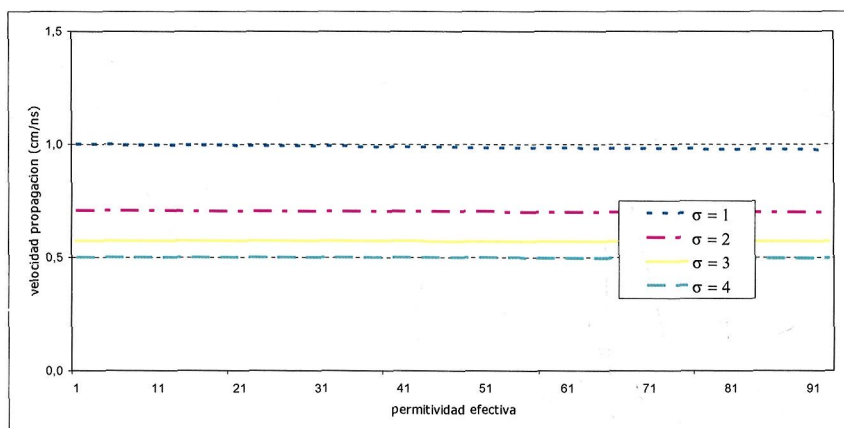


Figura A3.18 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 10 MHz.

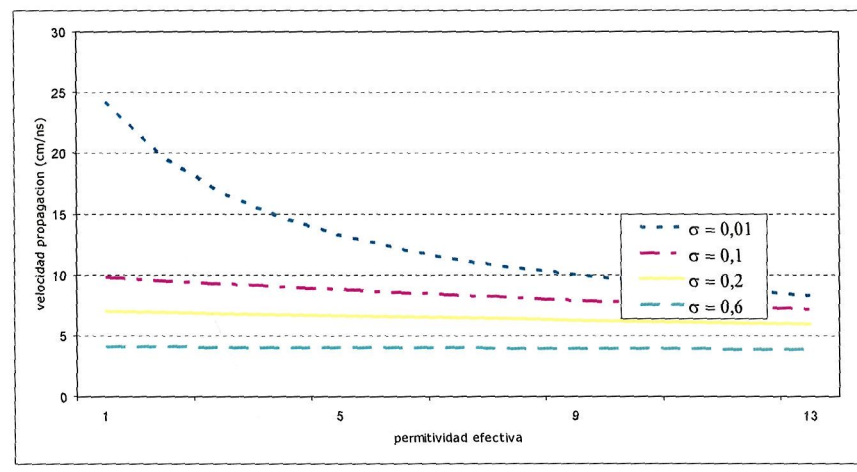


Figura A3.19 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 100 MHz.

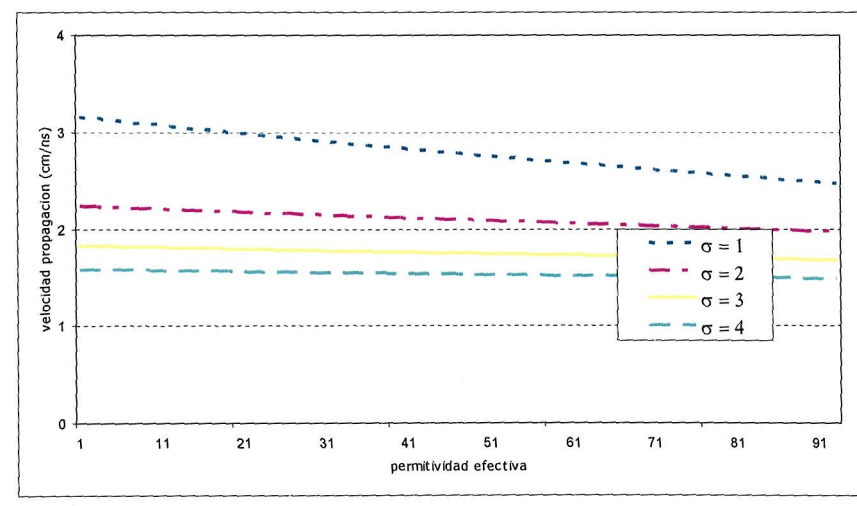


Figura A3.20 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 100 MHz.

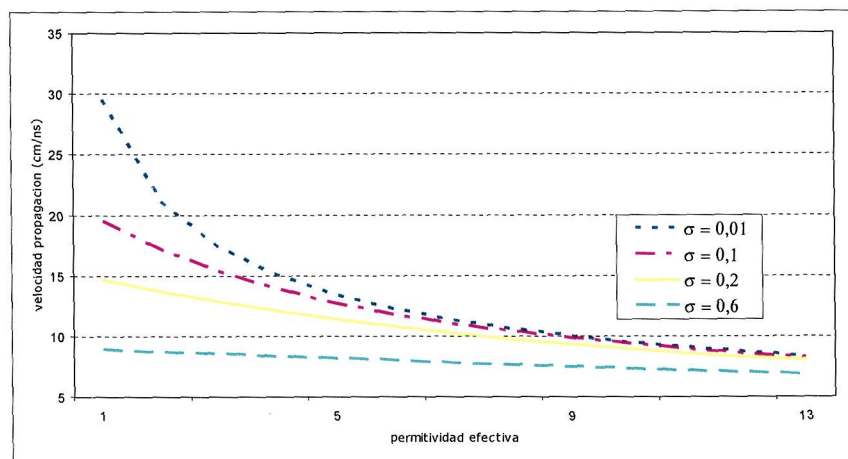


Figura A3.21 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 500 MHz.

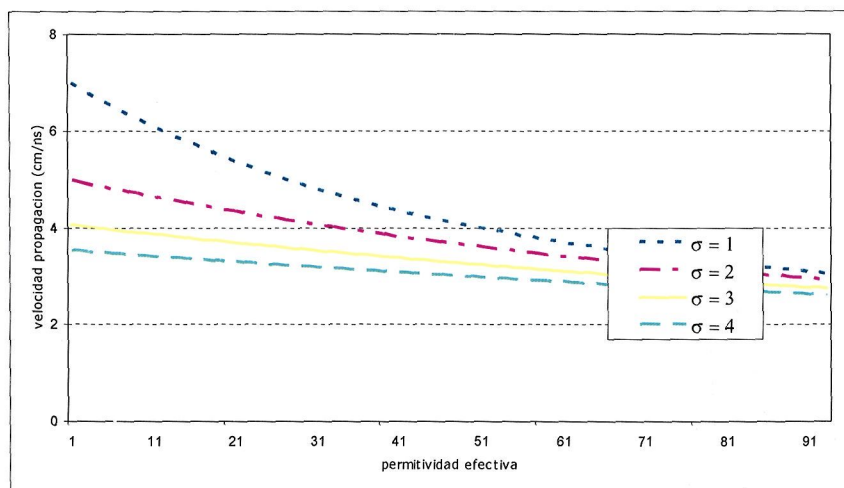


Figura A3.22 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 500 MHz.

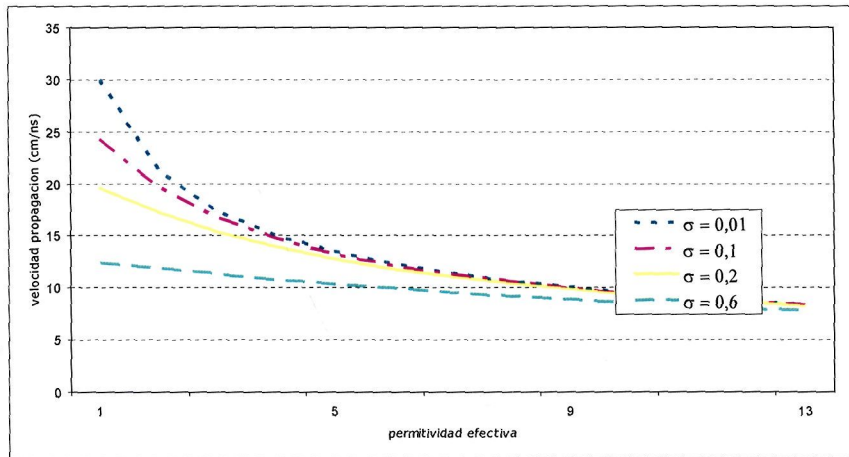


Figura A3.23 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 1 GHz.

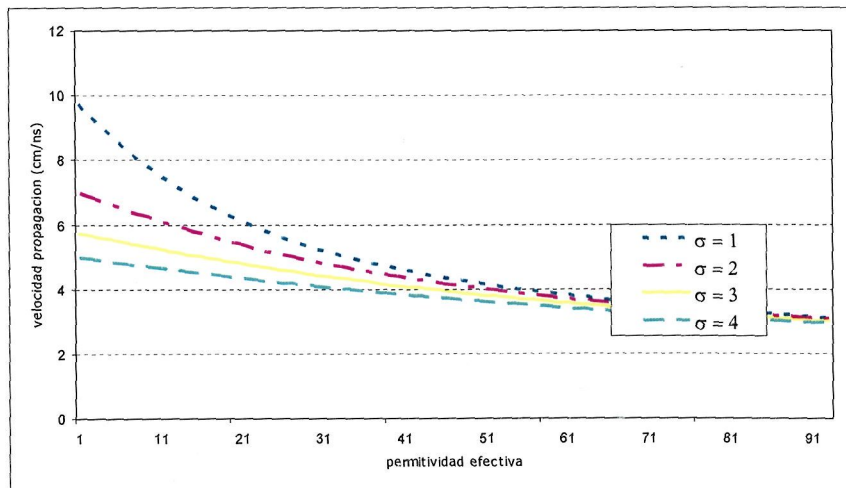


Figura A3.24 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 1 GHz.

Mostrada la dependencia de la velocidad de propagación en función de los diferentes parámetros del modelo general de propagación de la onda electromagnética plana se pasa a construir curvas patrón que relacionan diferentes frecuencias con las velocidades de propagación resultantes de su relación con diferentes tipos de medios.

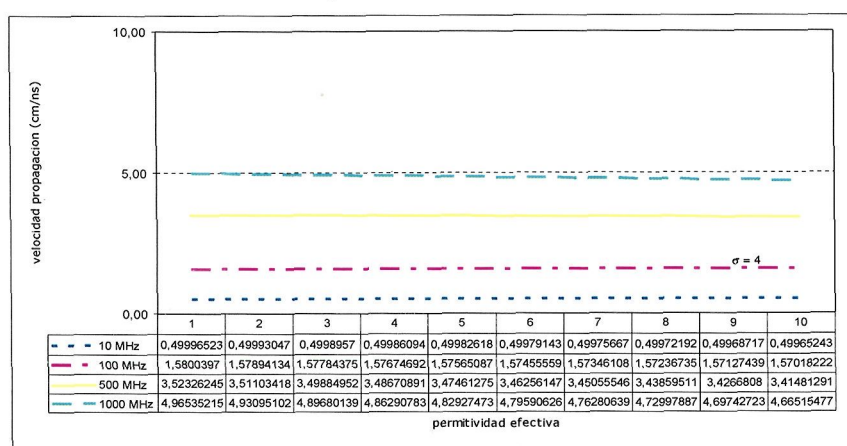


Figura A3.25 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=4$.

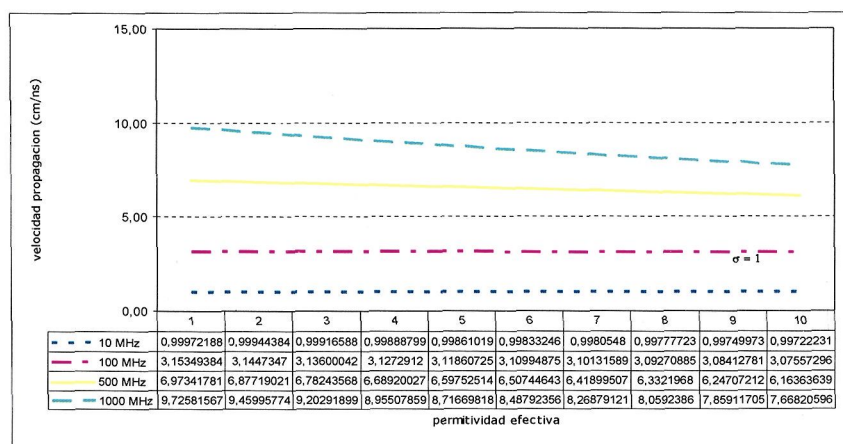


Figura A3.26 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=1$.

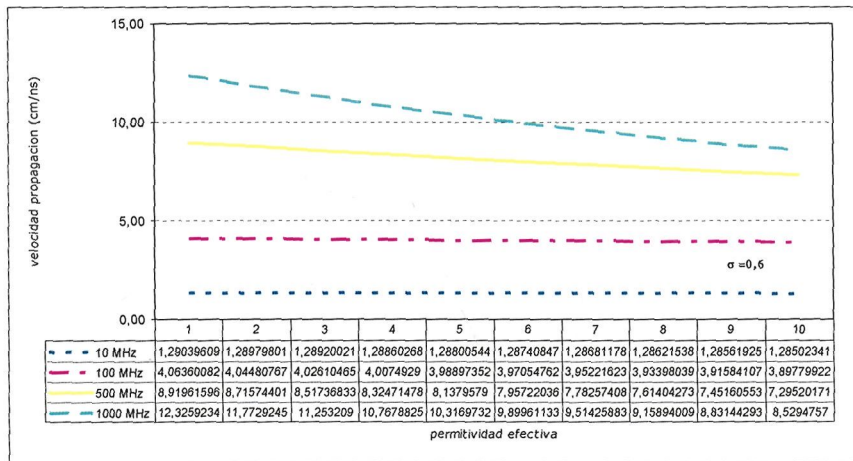


Figura A3.27 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0,6$

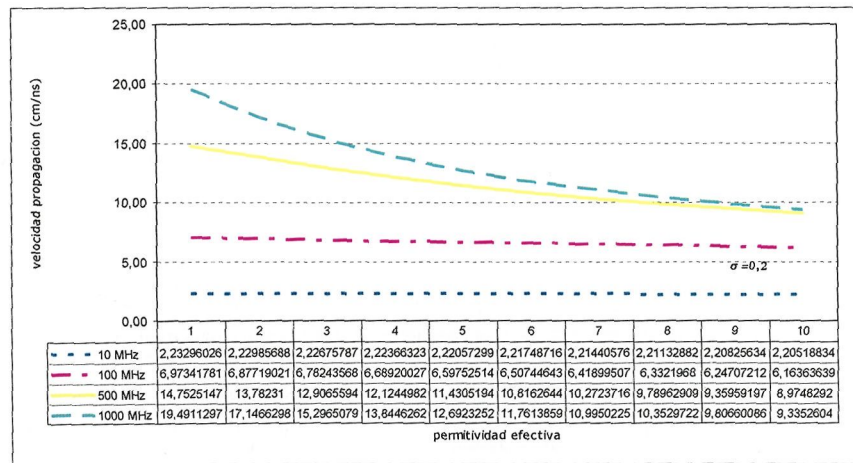


Figura A3.28 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0,2$

220 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

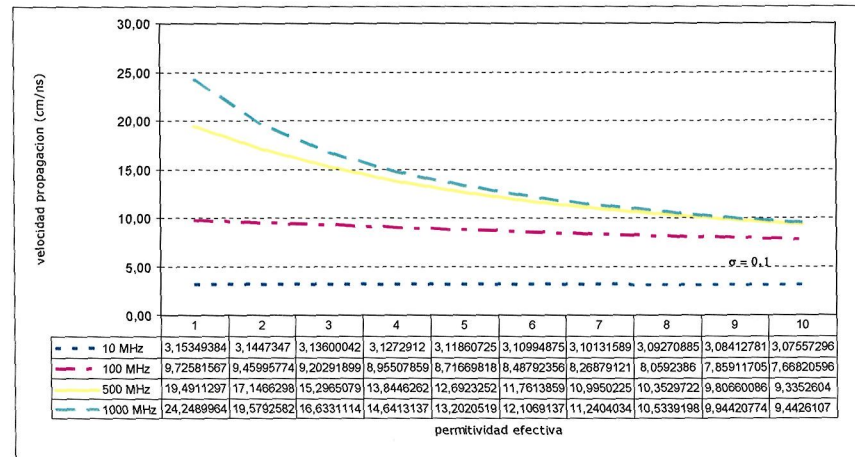


Figura A3.29 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0,1$

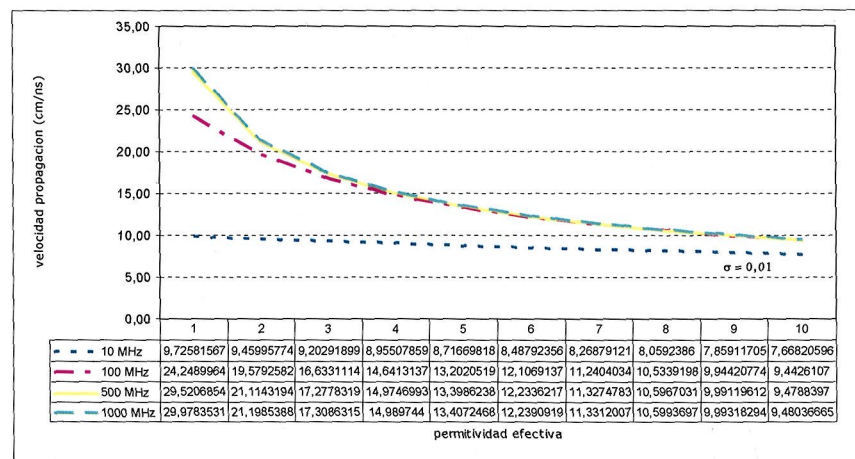


Figura A3.30 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0,01$

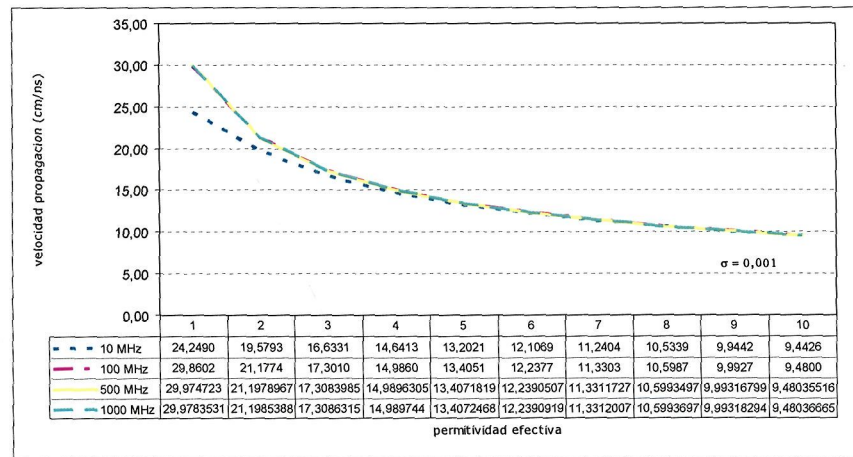


Figura A3.31 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0,001$

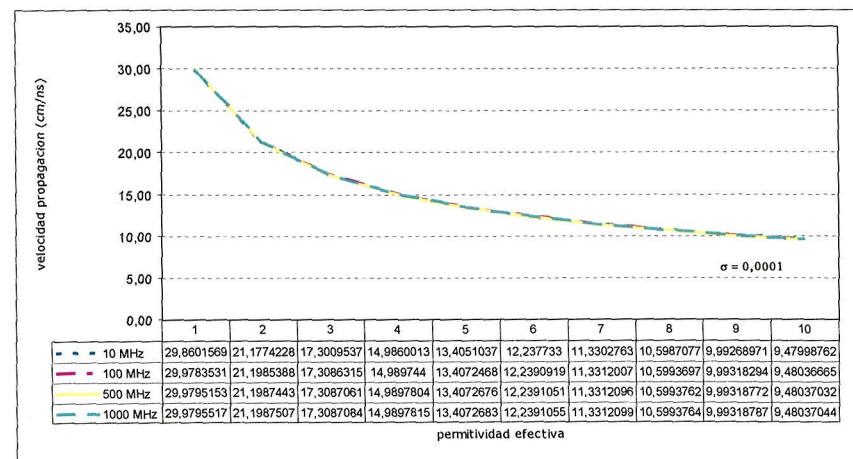


Figura A3.32 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0,0001$

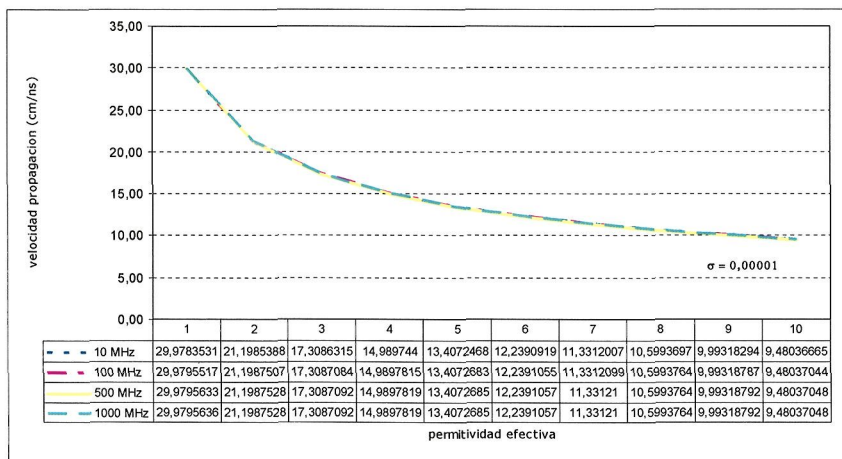


Figura A3.33 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0,00001$

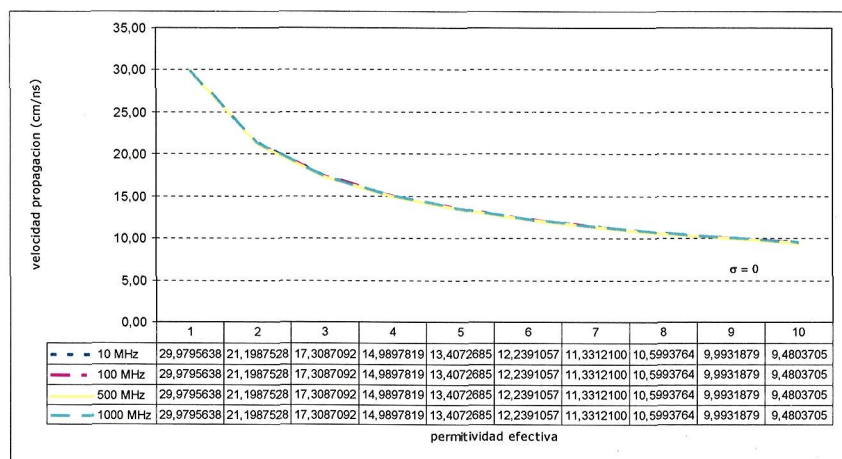


Figura A3.34 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0$

A n e x o I V

Lista de figuras y tablas

- Figura 2.1 Radargrama formado con reflexiones del subsuelo
- Figura 2.2 Ilustración del espectro electromagnético
- Figura 2.3 GPS con error por deriva
- Figura 2.4 Determinación de la posición con el ángulo de llegada
- Figura 2.5 Sistema hiperbólico de localización
- Figura 2.6 Sistema de coordenadas GPS
- Figura 2.7 Código de tiempo de la señal GPS
- Figura 2.8 Red de satélites utilizados para obtener información sobre el estado de las capas atmosféricas que interactúan con las señales GPS
- Figura 2.9 Ejemplo de perfil ionosférica obtenido con dos modelos que utilizan los datos obtenidos por los ionogramas
- Figura 2.10 Modelo para la detección de tumores en mamografías mediante el análisis de la energía reflejada en la interacción onda-tejido biológico-tumor
- Figura 2.11 Simulación FDTD de la energía reflejada por un tumor que es captada por un array de sensores

224 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

- Figura 3.1 Tratamiento convencional de la onda electromagnética
- Figura 3.2 Método de tratamiento multifrecuencial
- Figura 3.3 Determinación de la distancia mediante el tiempo de llegada
- Figura 3.4 Medición de la distancia mediante el retraso de dos señales de diferente frecuencia con diferentes velocidades de propagación
- Figura 3.5 Tratamiento multifrecuencial diferencial
- Figura 3.6 Interacción de la onda plana con un medio genérico
- Figura 3.7 Curvas patrón que representan los valores de la profundidad de penetración
- Figura 3.8 Variación de la velocidad con la frecuencia
- Figura 3.9 Aplicación del método multifrecuencial en problemas de determinación de los parámetros constitutivos del medio
- Figura 3.10 Aplicación del método multifrecuencial en problemas de determinación de la distancia entre el emisor y el receptor
- Figura 3.11 Determinación del grosor de la capa superficial en una aplicación basada en el radar de subsuelo
- Figura 3.12 Resultados de la determinación de la distancia del enlace
- Figura 3.13 Resultados de la estimación de los parámetros del medio
- Figura 3.14 Resultados del cálculo de la permitividad efectiva
- Figura 3.15 Posicionamiento en medio dispersivo
- Figura 3.16 Resultados de la determinación de la distancia del enlace
- Figura 3.17 Error en la determinación de la distancia ante desviaciones en la estimación del medio
- Figura 3.18 Error en la determinación la distancia ante desviaciones en la medición de las diferencias en el receptor
- Figura 3.19 Diferencias de tiempo en el receptor en función de las velocidades y la distancia medida
- Figura 4.1 Plataforma de simulación del modelo multifrecuencial

- Figura 4.2 Propagación de dos pulsos electromagnéticos unitarios antes de su entrada en el medio dieléctrico
- Figura 4.3 Determinación de la permitividad de una probeta mediante la emisión de ondas electromagnéticas que atraviesan el material en estudio
- Figura 4.4 Procedimiento para determinar el cambio de material estratigráfico
- Figura 4.5 Esquema del registro obtenido en un medio en el que existe un reflector y un medio con permitividad efectiva que depende de la frecuencia
- Figura 4.6 Esquema del registro obtenido en un medio en el que existe un objeto reflector y un medio con permitividad efectiva que depende de la frecuencia
- Figura 4.7 Radargramas obtenidos con una frecuencia de 900 MHz en la reflexión de diferentes superficies
- Figura 4.8 Trazas para la reflexión en la superficie del suelo
- Figura 4.9 Espesor estratigráfico en función de la diferencia de tiempos medida en el receptor
- Figura 4.10 Simulación de la propagación de un pulso electromagnético unitario tras atravesar un medio dieléctrico con atenuación
- Figura 4.11 Simulación de dos pulsos que atraviesan, respectivamente, dos medios con diferentes valores de la conductividad
- Figura 4.12 Simulación de dos pulsos que atraviesan, respectivamente, dos medios con diferentes valores de la constante dieléctrica
- Figura 4.13 Modelo de atenuación de la OE por la lluvia
- Figura 4.14 Atenuación específica. Curvas con tasa de lluvia R medida en mm/h
- Figura 4.15 Tasa de lluvia en función de las diferencias de atenuación en el receptor
- Figura 4.16 Tasa de lluvia en función del vector de diferencias de atenuación medidas en el receptor
- Figura 4.17 Simulación de la propagación de un pulso electromagnético tras atravesar un medio dispersivo

226 Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio

- Figura 4.18 Parámetro ionosférico en función de la diferencia en el tiempo de llegada de señales multifrecuenciales
- Figura 4.19 Geometría de la simulación sobre tejido biológico
- Figura 4.20 Simulación de un pulso electromagnético que atraviesa diferentes materiales
- Figura 4.21 Constante dieléctrica y conductividad como función de la frecuencia en un medio dispersivo
- Figura 4.22 Evolución de los pulsos de diferente frecuencia en el medio dispersivo analizado
- Figura 4.23 Escenario de simulación para un sistema de posicionamiento local
- Figura 4.24 Diferencias obtenidas en el receptor en función de la variación de la permitividad efectiva y de la distancia al emisor
- Figura 4.25 Evolución de un pulso electromagnético que atraviesa la muestra de tejido marcada en la gráfica
- Figura 4.26 Evolución de un pulso electromagnético de 100 MHz que atraviesa la muestra de tejido marcada en la gráfica
- Figura 4.27 Configuración de la emisión-recepción de la energía reflejada por un tumor en una mamografía realizada con microondas
- Figura 4.28 Diagrama de casos de uso del simulador
- Figura A1.1 Espectro electromagnético
- Figura A1.2 Mecanismos de reflexión y refracción
- Figura A1.3 Región limitada por S
- Figura A1.4 Simulación de un pulso electromagnético
- Figura A2.1 Etapas en el desarrollo de aplicaciones a partir del método propuesto
- Figura A2.2 Interfaz de usuario
- Figura A2.3 Estructura del núcleo de simulación adaptado al problema interacción onda-medio
- Figura A2.4 Escalabilidad del núcleo de simulación

- Figura A3.1 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 10 MHz
- Figura A3.2 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 10 MHz
- Figura A3.3 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 10 MHz.
- Figura A3.4 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi perfectamente dieléctricos, dada una frecuencia de 10 MHz
- Figura A3.5 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 100 MHz
- Figura A3.6 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 100 MHz
- Figura A3.7 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 100 MHz.
- Figura A3.8 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi perfectamente dieléctricos, dada una frecuencia de 100 MHz
- Figura A3.9 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 500 MHz
- Figura A3.10 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 500 MHz
- Figura A3.11 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 500 MHz.
- Figura A3.12 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi perfectamente dieléctricos, dada una frecuencia de 500 MHz
- Figura A3.13 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi perfectamente dieléctricos,

dada una frecuencia de 1 GHz

Figura A3.14 Factor de atenuación en función de la permitividad relativa efectiva para medios conductores, dada una frecuencia de 1 GHz

Figura A3.15 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios poco conductores, dada una frecuencia de 1 GHz

Figura A3.16 Factor de atenuación en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para medios casi dieléctricos, dada una frecuencia de 1 GHz.

Figura A3.17 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 10 MHz

Figura A3.18 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 10 MHz

Figura A3.19 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 100 MHz

Figura A3.20 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 100 MHz

Figura A3.21 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 500 MHz

Figura A3.22 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 500 MHz

Figura A3.23 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 1 GHz

Figura A3.24 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes valores de la conductividad del medio, dada una frecuencia de 1 GHz

Figura A3.25 Velocidad de propagación de la señal en función de la

permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=4$

Figura A3.26 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=1$

Figura A3.27 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0,6$

Figura A3.28 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0,2$

Figura A3.29 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0,1$

Figura A3.30 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0,01$

Figura A3.31 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0,001$

Figura A3.32 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0,0001$

Figura A3.33 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0,0001$

Figura A3.34 Velocidad de propagación de la señal en función de la permitividad dieléctrica relativa efectiva para diferentes frecuencias, para un valor de la conductividad de $\sigma=0$

Tabla 2.1 Retrasos en la propagación de la señal GPS debidos a diferentes componentes atmosféricos

Tabla 4.1 Valores de los parámetros del modelo de atenuación por lluvia

Tabla 4.2 Constante dieléctrica y conductividad de algunos materiales biológicos

Tabla 4.3 Parámetros de Debye para los materiales utilizados en la

230 *Deriva Frecuencial de la Transmisión Electromagnética por Efecto del Medio*

simulación

- Tabla 4.4 Valores efectivos de la constante dieléctrica para cada una de las frecuencias utilizadas
- Tabla 4.5 Tabla patrón para determinar la distancia del enlace en función de la velocidad de propagación y de la diferencia de tiempo medida en el receptor
- Tabla 4.6 Valores de la permitividad y conductividad de muestras de tejido humano en función de la frecuencia
- Tabla 4.7 Valores de la permitividad y conductividad de tejido mamario frente a los valores de un tumor presente en dicha zona
- Tabla 4.8 Valores de la permitividad y conductividad para el rango de frecuencias dado
- Tabla 4.9 Diferencias obtenidas en función de la distancia y de las frecuencias utilizadas