

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

**ANÁLISIS DE SISTEMAS RADIANTES SOBRE
GEOMETRÍAS ARBITRARIAS DEFINIDAS
POR SUPERFICIES PARAMÉTRICAS**

Juan Antonio Saiz Ipiña

TESIS DOCTORAL

Santander 1995

ANALYSIS OF RADIANT SYSTEMS ON BOARD OF ARBITRARY GEOMETRIES DEFINED BY PARAMETRIC SURFACES

ABSTRACT

In this thesis a method to analyze antennas on board of complex bodies is presented. The Geometrical Optics (GO) and Uniform Theory of Diffraction (UTD) have been used to analyze the effect of the structure in the radiation pattern of the antennas. The bodies are geometrically modelled by using NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) surfaces. In addition to be accurate and efficient, the method is compatible with most of the modern CAGD (Computer Aided Geometric Design) available programs.

The treatment of arbitrary geometries requires a code which can carry out an efficient 3D analysis. To obtain accurate results the description of the surface must be close to the real model, however this complicates the computational procedure. Here the structure is modeled by a collection of individual N.U.R.B.S. surface patches joined to form a complete description of the surface model. The NURBS description is able to manipulate free form surfaces with a low number of patches, and therefore, with a low amount of information. The initial description of the model by NURBS surfaces is accompanied with other complementary data for example : the topology of the surfaces, the boundary curves, the types of material and other inputs. It is very interesting to apply criteria to make the complete analysis faster.

The method reads the NURBS description of the model and transforms the NURBS into the rational BEZIER surfaces. A rational BEZIER patch is also a parametric surface defined in terms of a linear combination of Bernstein polynomials.

The antennas are modelled using simple numerical models based on arrays of electric and magnetic infinitesimal dipoles. This antenna modelization is very advantageous because with a little input data, the source is defined in any direction and the field value is readily accessible.

The electromagnetic analysis of the contributive effects to the scattering field by the geometry, starts with the rigorous selection of the geometry illuminated from the source. Only the Bezier patches illuminated will be in memory of the computer during the analysis. The philosophy of this previous process is to discard in the process the part of the geometry which does not contribute to the scattering effects.

The total field is the superposition of the following GO and UTD field components: direct field from the source, reflected fields from the Bezier patches of the model, diffracted fields from the arbitrary edges defined as a Bezier curves, creeping waves, double reflected field and diffracted-reflected and reflected-diffracted fields. The search of specular and diffraction points are the most CPU time consuming, thus before using the intersection algorithms it is necessary to apply a set of fast selection criteria which depend on the observation direction.

The Fermat principle in conjunction with the Conjugate Gradient Method (CGM) is used for obtaining efficiently the reflection points and diffraction points on the structure. For each effect the complete ray path is examined to see whether or not it is interrupted by any Bezier patch of the model, in this case the field component is not computed. The double effects are treated using a generalization of the single effects algorithms. The method has been developed to analyze the near and far field cases for different frequencies.

The developed method is quite efficient because it makes use of a small number of surfaces to model complex bodies, so it requires few memory and low computing time.

ANALISIS DE SISTEMAS RADIANTES SOBRE GEOMETRIAS ARBITRARIAS DEFINIDAS POR SUPERFICIES PARAMETRICAS

RESUMEN

En esta tesis se presenta un método para analizar antenas montadas sobre estructuras arbitrarias. La Óptica Geométrica (GO) y la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD), han sido empleadas para analizar los efectos que la estructura produce sobre el diagrama de radiación de la antena emisora. Para la descripción geométrica de la estructura, han sido utilizados parches NURBS (Non Uniform Rational B-Spline), por lo que el método presentado, es compatible con la mayoría de los programas gráficos disponibles en el mercado.

EL tratamiento de geometrías arbitrarias requiere un código eficiente en el análisis de tres dimensiones. Por otro lado, para obtener resultados satisfactorios, la descripción de la superficie de la estructura, debe ser muy próxima al modelo real, sin embargo, esto complica el tratamiento computacional. Aquí la estructura es modelada mediante un conjunto de parches NURBS, que unidos entre sí, describen el modelo completo. Esta descripción permite manipular superficies arbitrarias con un bajo número de parches, lo que significa un volumen de información reducido. La descripción inicial por NURBS del modelo, es acompañada con información complementaria como por ejemplo: la tipología de las superficies, las curvas frontera, el tipo de material, etc. Esto es imprescindible para la aplicación de criterios de selección dedicados a la aceleración del proceso.

El método tras leer la descripción del modelo, descompone los parches NURBS en superficies racionales de Bezier. Un parche de Bezier es también una superficie paramétrica definida en términos de una combinación lineal de los polinomios de Bernstein.

Las antenas son modeladas usando modelos numéricos simples basados en agrupaciones de dipolos infinitesimales eléctricos y magnéticos. Esta caracterización de la antena es muy ventajosa ya que con un número reducido de datos de entrada, la fuente queda definida para cualquier dirección del espacio y el valor del campo radiado puede ser calculado fácilmente.

El análisis electromagnético de los efectos que contribuyen al campo dispersado por la geometría comienza con una selección rigurosa de la geometría iluminada desde la fuente. Únicamente los parches de Bezier iluminados serán almacenados por el ordenador durante el análisis. La filosofía de este proceso es descartar aquella parte de la geometría que no contribuye a los efectos de dispersión.

El campo total calculado es la superposición de los siguientes efectos pertenecientes a la GO y a la UTD: campo directo procedente de la fuente, campo reflejado por los parches de Bezier, campo difractado por las aristas del modelo definidas como curvas de Bezier, ondas de superficie, dobles reflexiones, reflexión-difracción y difracción-reflexión. El método ha sido diseñado para analizar campo cercano y lejano. El mayor gasto computacional se debe a la búsqueda de los puntos de dispersión, por lo que antes de emplear los algoritmos de intersección es necesario aplicar un conjunto de criterios rápidos dependientes de la dirección de observación.

El principio de Fermat en combinación con el Gradiente Conjugado (CGM) es usado para obtener de manera eficiente los puntos de dispersión sobre la estructura. Para cada efecto, la posible ocultación de la trayectoria completa del rayo es examinada, por ello, si el rayo corta alguno de los parches de Bezier su contribución será descartada. Los dobles efectos son tratados como una generalización de los simples efectos.

El método desarrollado es eficiente ya que precisa de un número reducido de superficies para modelar objetos complejos lo que se traduce en bajos requerimientos de memoria y reducidos tiempos de cálculo.

INDICE

Capítulo 1 :

Introducción

1.1	OBJETIVOS Y JUSTIFICACION DE LA TESIS	1.1
1.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1.2
1.3	CONTENIDO DE LA TESIS	1.4
1.4	METODOS DEL ELECTROMAGNETISMO COMPUTACIONAL	1.5
1.5	DESARROLLO HISTORICO DE LAS TECNICAS APLICADAS EN EL ANALISIS DE ANTENAS EMBARCADAS	1.12

Capítulo 2 : Introducción a la Optica Geométrica (GO) y a la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD)

2.1	NOTAS HISTORICAS DEL METODO	2.1
2.2	OPTICA GEOMETRICA Y ECUACIONES DE MAXWELL	2.4
2.3	APUNTES SOBRE LA GO y UTD	2.9

Capítulo 3 :

Modelado Geométrico

3.1	INTRODUCCION	3.1
3.2	TIPOS DE MODELADOS GEOMETRICOS	3.2
3.3	INTRODUCCION A LAS SUPERFICIES PARAMETRICAS	3.4
3.4	CONCEPTOS FUNDAMENTALES SOBRE SUPERFICIES NURBS (Non Uniform Rational B-Spline)	3.8
3.4.1	CURVAS DE BEZIER	3.8
3.4.2	CURVAS B-SPLINE	3.13
3.4.3	SUPERFICIES DE BEZIER	3.15
3.4.4	SUPERFICIES NURBS	3.18
3.5	CARACTERISTICAS DEL FICHERO GEOMETRICO EMPLEADO	3.20

Capítulo 4 :

Tratamiento geométrico

4.1	PROCESADO INICIAL DE LA GEOMETRIA	4.1
4.1.1	PROCESADO INICIAL DE LOS PARCHES DE BEZIER	4.3
4.1.2	PROCESADO INICIAL DE LAS CURVAS DE BEZIER	4.8
4.2	CRITERIOS INICIALES DE SELECCION	4.11
4.3	ALTERNATIVAS DEL PROCESO	4.14
4.4	GENERACION DE LOS PARCHES DE PROPAGACION	4.17
4.4.1	CALCULO DE LAS LINEAS DE HORIZONTE	4.17
4.4.2	FRAGMENTACION DE LAS CURVAS DEL HORIZONTE	4.22
4.4.3	GENERACION POR INTERPOLACION DE LOS PARCHES DE HORIZONTE	4.24
4.4.4	PROPAGACION SOBRE LOS PARCHES HORIZONTE	4.26
4.4.5	GENERACION POR INTERPOLACION DE LOS PARCHES DE PROPAGACION	4.29

Capítulo 5 :

Interacciones rayo-geometría

5.1	INTRODUCCION	5.1
5.2	INTERACCIONES PARA LOS SIMPLES EFECTOS	5.3
5.2.1	ALGORITMO DE INTERACCION RAYO-PARCHE	5.3
5.2.2	ALGORITMO DE INTERACCION RAYO-ARISTA	5.9
5.2.3	ALGORITMO DE INTERACCION RAYO-CURVA ISOPARAMETRICA	5.12
5.2.4	ALGORITMO DE INTERACCION RAYO-GEODESIA	5.14
5.3	INTERACCIONES PARA LOS DOBLES EFECTOS	5.18
5.3.1	ALGORITMO DE INTERACCION RAYO-PARCHE-PARCHE	5.19
5.3.2	ALGORITMO DE INTERACCION RAYO-ARISTA-PARCHE	5.20
5.3.3	ALGORITMO DE INTERACCION RAYO-PARCHE-ARISTA	5.22
5.4	METODOS ITERATIVOS DE MINIMIZACION DE FUNCIONES : EL GRADIENTE CONJUGADO	5.25
5.5	INTERACCION RAYO-CAJA ENVOLVENTE	5.31

Capítulo 6 :

Campos

6.1	INTRODUCCION	6.1
6.2	CARACTERIZACION DE LA FUENTE	6.1
6.2.1	CARACTERIZACION DE LA FUENTE MEDIANTE CORTES ESFERICOS	6.2
6.2.2	CARACTERIZACION DE LA FUENTE MEDIANTE UNA AGRUPACION DE DIPOLOS ELEMENTALES	6.4
6.3	CAMPO DIRECTO	6.8
6.4	CAMPO REFLEJADO	6.13
6.5	CAMPO DIFRACTADO EN ARISTAS	6.20
6.6	CAMPO DIFRACTADO EN SUPERFICIE	6.25
6.7	DOBLES EFECTOS	6.27
6.7.1	CAMPO DOBLEMENTE REFLEJADO	6.28

6.7.2	CAMPO REFLEJADO Y DIFRACTADO	6.32
6.7.3	CAMPO DIFRACTADO Y REFLEJADO	6.35

Capítulo 7 : ***Resultados***

7.1	INTRODUCCION	7.1
7.2	GEOMETRIAS SENCILLAS	7.2
7.3	GEOMETRIAS COMPUESTAS	7.14
7.4	GEOMETRIAS COMPLEJAS	7.31

Capítulo 8 : ***Conclusiones***

8.1	CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE TRABAJO	8.1
-----	--	-----

D. Manuel Felipe Cátedra Pérez, Catedrático de Universidad de Teoría de la Señal y Comunicaciones del Departamento de Electrónica de la Universidad de Cantabria;

HACE CONSTAR:

Que el trabajo titulado *Análisis de sistemas radiantes sobre geometrías arbitrarias definidas por superficies paramétricas* presentado por **Juan Antonio Saiz Ipiña**, para optar al grado de Doctor en Ciencias Físicas, ha sido realizado en el Departamento de Electrónica de la Universidad de Cantabria bajo mi dirección y que reúne las condiciones exigidas a los trabajos de Doctorado.

Santander, Noviembre 1995

M. F. Cátedra Pérez

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis es el fruto del trabajo de varios años; recuerdo que fue una puerta abierta por la que entré lleno de ilusión y de entusiasmo, donde he aprendido y he conocido. Durante este trayecto he tenido la suerte de contar con la dirección y el apoyo de Manuel Felipe Cátedra, a quien le estoy sinceramente agradecido. Otro punto de apoyo importante ha sido Rafael Torres, a quien agradezco su disposición e interés.

Me gustaría remontarme a los orígenes de este trabajo, para poder agradecer a Marta Domingo y a José Basterrechea, que me tendieran la primera mano, esa primera mano sin la que no pueden venir otras.

El presente trabajo lleva impresas las huellas de la gente que me ha rodeado. Las aportaciones de los miembros del grupo de sistemas y radio han sido de gran valía; a todos ellos, gracias.

INTRODUCCION

1.1 OBJETIVOS Y JUSTIFICACION DE LA TESIS

El objetivo de la tesis ha sido desarrollar una herramienta fiable y rápida para analizar y predecir el comportamiento electromagnético en alta frecuencia de antenas embarcadas en aeronaves, barcos u otros soportes de geometría arbitraria. El código simulador debe predecir, lo mas fielmente posible, el efecto deformador que produce la geometría soporte sobre el diagrama de radiación en zona cercana y lejana de la antena.

Este tipo de programas de simulación son de gran utilidad para toda empresa que monte antenas sobre cualquier tipo de estructuras durante la etapa de diseño. La simulación mediante ordenador evita los enormes gastos que originan la realización de medidas orientativas del funcionamiento de las antenas embarcadas, realizadas en cámaras anecóicas sobre modelos escalados.

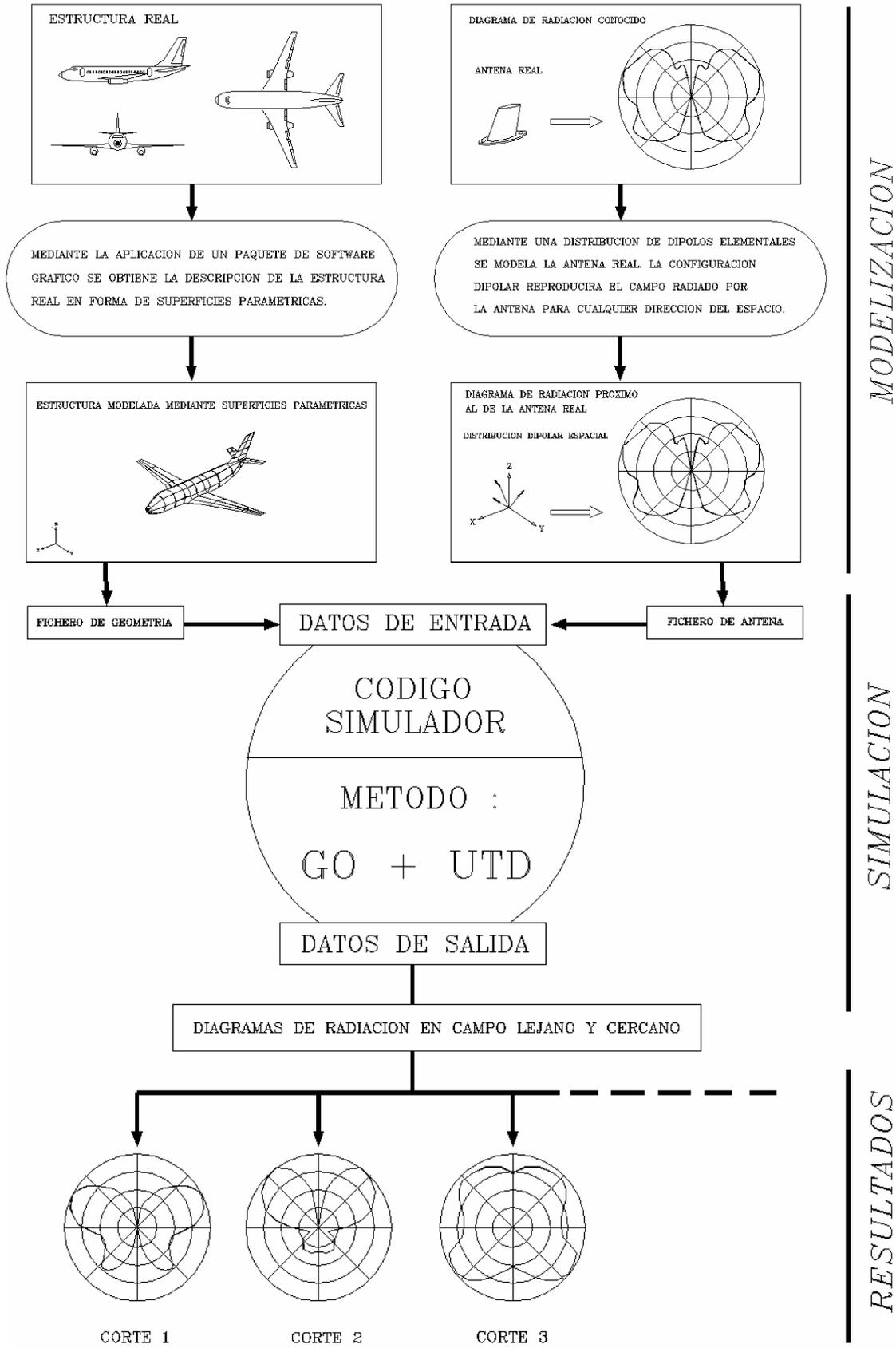
El nombre de la tesis, - ANALISIS DE SISTEMAS RADIANTES SOBRE GEOMETRIAS ARBITRARIAS DEFINIDAS POR SUPERFICIES PARAMETRICAS -, aunque largo, describe el planteamiento inicial del problema y advierte de la utilización de superficies paramétricas en la resolución del problema. Este último aspecto es una de las características mas importantes de la tesis, puesto que la utilización de las superficies paramétricas en la descripción de la geometría, en combinación con técnicas de alta frecuencia, tiene carácter novedoso. El abordar el tratamiento de una estructura arbitraria muy próxima al objeto real, facilita la convergencia entre los resultados obtenidos y las medidas realizadas; sin embargo, implica desarrollar una serie de criterios geométricos de diferentes tipos con el fin de simplificar el tratamiento, sin que por ello se pierda validez en los resultados obtenidos. Por otro lado, el empleo de una descripción de la estructura en forma de superficies y curvas paramétricas, ha supuesto desarrollar algoritmos de interacción rayo-geometría en combinación con métodos numéricos iterativos para calcular los diferentes puntos dispersores asociados a cada efecto. Por

todo ello, el mayor esfuerzo de la tesis se ha concentrado en el desarrollo de un tratamiento geométrico eficaz y en relacionar adecuadamente esa descripción con la formulación propia del método aplicado.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El problema genéricamente consiste en que, dada una geometría tridimensional arbitraria y dado un sistema radiante o antena, se precisa obtener el diagrama de radiación para zona cercana o lejana cuando la antena es montada sobre la superficie de la geometría. El simulador deberá calcular la interacción entre la geometría y el campo radiado, con el fin de obtener la deformación del diagrama de radiación de la antena calculado de forma aislada. El planteamiento inicial para la simulación de este fenómeno debe estar ligado a la frecuencia de trabajo y al tamaño eléctrico de las geometrías que soportan la antena. Esta dependencia implica la selección de una determinada técnica y, por esta razón, mas adelante, se realiza un pequeño repaso a los métodos del electromagnetismo más importantes, justificándose en última instancia el empleo de una determinada técnica.

En la página siguiente, la figura 1.1 muestra un diagrama representativo del proceso global de la resolución del problema realizado en esta tesis. Pueden verse en forma de diagrama de flujo cada una de las etapas que conlleva el análisis de las antenas embarcadas. La primera etapa, o de *MODELIZACION*, está dedicada a la preparación de los datos de entrada del código simulador : por una parte está la modelización de la estructura, con el fin de obtener un fichero manejable que contenga la descripción geométrica en forma de superficies paramétricas; por otra parte está la modelización de la antena mediante una configuración de dipolos infinitesimales. Esta definición de la fuente facilita al código simulador obtener en todo momento, y para cualquier dirección del espacio, el campo radiado por la antena. Una vez almacenados los datos de entrada principales en la etapa de *SIMULACION*, el código aplicará GO+UTD como técnicas de cálculo, con el fin de obtener el diagrama de radiación del conjunto para una posición de la antena prefijada por el usuario. Por último, la etapa de *RESULTADOS* mostrará los diagramas de radiación finales. Del análisis de estos resultados podrán ser valorados los efectos de ocultación y dispersión que la estructura produce, y así en la etapa de diseño, optimizar el rendimiento de la antena analizada.



1.3 CONTENIDO DE LA TESIS

La tesis está estructurada de manera que su lectura sea paralela al desarrollo del método aplicado para resolver el problema planteado. De este modo, el lector reconocerá de manera gradual y progresiva los diferentes pasos que han sido necesarios para obtener el resultado final. Una vez fijadas las características de la descripción geométrica, pasaremos a resolver los diferentes problemas que se plantean a la hora de conjugar GO y UTD con una descripción geométrica por superficies paramétricas.

En el capítulo 1, a modo de introducción, se definen los objetivos y justificación de la tesis. Así mismo, se describe de manera global el planteamiento de la tesis, mostrándose de manera gráfica las diferentes etapas que el proceso de resolución del problema conlleva. Por otro lado, se realiza un breve recorrido por los métodos del electromagnetismo computacional más importantes, con el fin de establecer una visión general de los métodos existentes y justificar el empleo de la GO y de la UTD en la resolución del problema planteado por esta tesis. Por último, se dedica un apartado al repaso histórico de los trabajos más importantes relacionados con los métodos de análisis de antenas embarcadas.

El capítulo 2, presenta una introducción básica de la técnica electromagnética aplicada en la resolución del problema. Se comienza con una revisión histórica de la evolución del método, para desembocar en una revisión de la formulación empleada por esta tesis, a través de una introducción a la GO y a la UTD.

El capítulo 3 está dedicado en exclusiva a la descripción del modelado geométrico empleado. Comienza por introducir al lector de manera gradual en el campo de las superficies paramétricas, para desembocar en la presentación de los conceptos fundamentales de las superficies y curvas NURBS. Este capítulo puede ser, en cierto modo, el más arduo, puesto que las superficies paramétricas presentan una formulación compleja y su interpretación tridimensional, así como su visualización, no es inmediata; sin embargo, serán abundantes las figuras aclaratorias que ayuden a entender el tipo de modelización utilizado. El propósito de todo ello es facilitar el entendimiento de las características del fichero de geometría empleado, que contiene los datos de entrada correspondientes a la descripción de la estructura.

El capítulo 4 inicia la descripción del procesado aplicado sobre la geometría; durante el mismo, son numerosos los criterios de selección, ocultación y almacenamiento aplicados, con el propósito de hacer más eficiente el método y por ello serán descritos

ampliamente.

En el capítulo 5, se describe la técnica desarrollada en la resolución de la interacción rayo-geometría. Su importancia es grande, ya que presenta un método eficaz en la resolución de las diferentes interacciones que se producen para cada uno de los efectos considerados.

El capítulo 6 está dedicado a la descripción de los procesos aplicados a los diferentes efectos considerados. Cada efecto es presentado individualmente, con el fin de mostrar los criterios empleados en el cálculo del campo electromagnético.

El capítulo 7 presenta resultados que abarcan casos sencillos y análisis de geometrías reales complejas. Los resultados obtenidos por el método son comparados con simulaciones realizadas mediante otros códigos; este capítulo pretende ser una validación del método empleado.

Finalmente, el capítulo 8 está dedicado a la exposición de las conclusiones y futuras líneas de trabajo.

1.4 METODOS DEL ELECTROMAGNETISMO COMPUTACIONAL

En este apartado se pretende realizar una breve revisión de los principales métodos numéricos aplicados al electromagnetismo [1][2]. En la actualidad, existen numerosas técnicas numéricas que evolucionan constantemente; el rango de aplicación a problemas reales y al tratamiento de geometrías cada vez más complejas, va creciendo simultáneamente al desarrollo de la capacidad de los nuevos computadores. El hecho de existir numerosas técnicas indica, sin embargo, que no existe una capaz de resolver todo tipo de problemas, sino que cada una de ellas tiene su rango de aplicación específico y, por lo tanto, tratar de aplicar una determinada técnica a problemas para los que originalmente no ha sido diseñada, puede ser excesivamente complicado. Por otro lado, existen técnicas mixtas que, beneficiándose de las ventajas de diferentes métodos, pueden ofrecer resultados satisfactorios. En este apartado realizaremos un repaso general de los principales métodos sin entrar en detalles ni describir las diferentes variantes que existen de cada método.

La solución analítica del problema de radiación y dispersión de ondas electromagnéticas en presencia de geometrías, únicamente es factible para algunas geometrías canónicas en las que las condiciones de contorno se simplifican considerablemente. Nuestro caso se aleja de este condicionante puesto que, desde su origen, la tesis pretenden analizar geometrías arbitrarias y por ello es preciso recurrir a una solución numérica y aproximada del problema. La utilización de un método numérico presenta una serie de inconvenientes inevitables que desde un principio hay que tener en cuenta, y que son [3]:

- ▶ *Las técnicas de modelado mediante superficies interpoladoras no reproducen exactamente el modelo real.*
- ▶ *La formulación matemática sufre una serie de aproximaciones y discretizaciones necesarias para su tratamiento por ordenador.*
- ▶ *El método seleccionado para la resolución del problema presenta determinadas limitaciones que deben ser interpretadas adecuadamente, a la hora de valorar los resultados.*
- ▶ *Existen errores de truncamiento y precisión al analizar el problema mediante un ordenador, que inevitablemente tiene una exactitud determinada y finita.*

Para realizar un repaso significativo de las técnicas existentes es preciso realizar una agrupación, pero esta agrupación puede basarse en diferentes aspectos de los métodos: si atendemos al dominio en que se trabaja podremos diferenciar entre métodos en el dominio del tiempo [4], que utilizan una formulación temporal del problema electromagnético y métodos en el dominio de la frecuencia, que emplean el régimen permanente senoidal; esta agrupación es demasiado genérica y por ello se establece otro tipo de criterio de agrupación atendiendo al tipo de ecuaciones electromagnéticas empleadas para la resolución del problema.

En algunas ocasiones los problemas electromagnéticos son planteados en forma de ecuaciones diferenciales; otras veces en forma de ecuaciones integrales y en algunas, en

forma de integral de la energía del sistema con el fin de ser minimizada. Por regla general, la función incógnita es continua y depende de variables independientes continuas, por lo que las ecuaciones integrales y diferenciales deben ser manipuladas con el fin de que el computador pueda trabajar con un conjunto de números finito.

■ *MÉTODOS DIFERENCIALES (Método de las diferencias finitas)*

Este tipo de métodos requiere un mínimo preproceso matemático y resuelve satisfactoriamente problemas de penetración y radiación en geometrías complicadas [5]. Para su aplicación es preciso definir una malla volumétrica de puntos que contenga a la geometría analizada. Las ecuaciones diferenciales obtenidas directamente de las ecuaciones de Maxwell, son sustituidas por expresiones definidas en cada uno de los puntos discretos de la malla, para de este modo obtener los campos eléctricos y magnéticos en cualquier punto de la región de estudio. Sin embargo, la discretización espacial en celdas produce un elevado número de incógnitas, que además crece rápidamente con el tamaño eléctrico de la estructura.

■ *MÉTODOS INTEGRALES (Método de los Momentos y Método del Gradiente Conjugado)*

Este tipo de métodos permiten el cálculo del campo en el exterior o el interior de un objeto mediante la aplicación del teorema de equivalencia [6-10]. En este caso, la distribución de corrientes en una antena o estructura, es desarrollada sobre pequeños subdominios en los que se divide la geometría. El campo se obtiene mediante la aplicación de la integral de radiación y la imposición de las condiciones de contorno. La resolución de las ecuaciones integrales mediante ordenador, implica discretizar las funciones y operadores para obtener una ecuación de tipo matricial; esta operación, junto con la técnica que se utilice para imponer numéricamente las condiciones de contorno, distingue a ambos métodos. Los métodos integrales tienen como ventaja que pueden abordar geometrías arbitrarias y obtener información acerca de diferentes parámetros asociados a la antena, como son: la impedancia, distribución de corrientes, diagramas de radiación, etc. [11]. Sin embargo, este tipo de métodos están limitados en su aplicación, puesto que la memoria necesaria durante la ejecución es dependiente de la frecuencia y el sistema de ecuaciones a resolver aumenta con el tamaño eléctrico de la estructura bajo estudio. Por todo ello, los métodos integrales no suelen aplicarse a tamaños eléctricos superiores a una longitud de

onda.

■ *METODOS VARIACIONALES (Método de los Elementos Finitos)*

El método de las diferencias finitas fue desarrollado inicialmente para aplicaciones en mecánica e ingeniería civil, sin embargo su evolución amplió, en gran medida, el campo de aplicaciones [12]. Este tipo de métodos también requieren una discretización volumétrica de la estructura o dominio sobre el que se trabaja; este procedimiento es muy eficiente en el tratamiento de materiales no lineales. La discretización de la estructura en elementos finitos favorece la linealización de las propiedades del material, con lo que el problema se simplifica enormemente. La ecuación a resolver viene dada en términos de un funcional tipo integral representativo de la energía del sistema. Este funcional es seleccionado de tal manera que los campos solución hagan al funcional estacionario.

Los métodos anteriormente expuestos requieren la discretización de la estructura en elementos que, por lo general, tienen un tamaño eléctrico de $\lambda/10$; este condicionante implica el tratamiento de estructuras eléctricamente pequeñas, por este motivo este tipo de métodos suelen denominarse métodos de baja frecuencia.

■ *METODOS DE ALTA FRECUENCIA*

Con este nombre se agrupan una serie de métodos que permiten abordar problemas de radiación electromagnética en presencia de cuerpos eléctricamente grandes y con un coste computacional razonable. La mayoría de ellos provienen de aproximaciones válidas únicamente en las regiones de alta frecuencia y de ahí su nombre [13]. Esta limitación se traduce en que las características geométricas de las superficies que componen la estructura, tales como : longitud, anchura y radios de curvaturas, deben ser grandes en comparación con la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de análisis.

Este tipo de métodos son los más sencillos de aplicar, debido fundamentalmente a que los efectos considerados sobre la estructura presentan un carácter local, es decir, que los campos dispersados por la estructura son producto, únicamente, del campo incidente sobre los puntos de dispersión (puntos de reflexión y puntos de difracción). A continuación

realizaremos un repaso a los principales métodos de alta frecuencia, reservando el siguiente apartado al desarrollo detallado del método empleado en esta tesis.

- *Método basado en la Óptica Física (PO).*

El método basado en la óptica geométrica es empleado fundamentalmente para obtener el campo dispersado por las superficies de un objeto impenetrable, y para ello obtiene las corrientes inducidas superficiales, a partir de las cuales se calculará el campo dispersado. Este método es empleado con gran éxito en el cálculo de la sección radar (RCS) de blancos arbitrarios.

El teorema de equivalencia es aplicado para aproximar las corrientes inducidas desconocidas en cada punto de la superficie conductora de la estructura, por las que existirían sobre un plano infinito tangente a la superficie en cada punto cuando la superficie esta iluminada directamente por el campo incidente [14]. De este modo, la corriente inducida de superficie para la óptica física viene dada por :

$$\begin{aligned} \vec{J} &= 2 (\hat{n} \times \vec{H}^i) && \text{Region iluminada} \\ \vec{J} &= 0 && \text{Region no iluminada} \end{aligned} \quad (1.1a)$$

Siendo \hat{n} el vector normal al plano tangente infinito y \vec{H}^i el campo incidente, como se muestra en la siguiente figura.

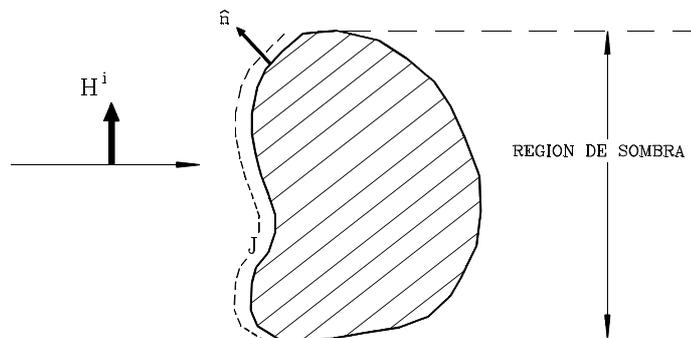


Fig.-1.2 Corriente superficial inducida J para una estructura arbitraria iluminada por un campo H^i .

Una vez obtenidas las corrientes equivalentes, la integral de óptica física que proporciona la radiación en el espacio libre para campo lejano es :

$$\vec{E}^s = -\frac{j\omega\mu}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \int \int_{S_{iluminada}} 2\hat{n} \times \vec{H}^i e^{j\vec{k}\cdot\vec{r}'} ds' \quad (1.2)$$

Como puede verse, el integrando depende únicamente del campo incidente sobre la estructura y por lo tanto la contribución de las regiones no iluminadas no interviene en el cálculo del campo dispersado. A la expresión anterior, llamada integral de óptica física, se le aplica la aproximación de fase estacionaria que consiste en calcular la integral, desarrollando el termino exponencial por una serie de Taylor para $k \rightarrow \infty$, y calcular la integral analíticamente con el primer término del desarrollo. Este resultado se interpreta como si la reflexión se produjera únicamente en un punto, para el que la variación de fase es muy lenta y presenta un máximo o un mínimo. Este punto de fase estacionaria, denominado también punto de reflexión especular, presenta como singularidad que la dirección de incidencia y la dirección de reflexión cumplen la ley de Snell sobre el plano tangente.

Esta metodología de aproximación y de reducción de los efectos a su carácter local, conllevan una serie de limitaciones, las cuales son intrínsecas a los métodos de alta frecuencia y deben ser interpretadas adecuadamente.

Para este método caben destacar como principales inconvenientes los siguientes : el suponer que las corrientes inducidas se anulan en las regiones no iluminadas directamente por la fuente desestima el efecto de las ondas de superficie, este tipo de fenómeno debe ser tenido en cuenta y solamente a frecuencias muy altas y para caminos de largo recorrido de propagación sobre la superficie puede ser despreciado; por otra parte, en puntos de la superficie en los cuales la curvatura sea menor que la longitud de onda, la aproximación de las componentes tangenciales del campo por las que se obtienen sobre un plano tangencial infinito, no es válida. La consideración de que el plano sea infinito, también introduce un error cuando nos encontramos calculando las corrientes equivalentes

en las cercanías de una arista, y por ello el fenómeno de la difracción en aristas no se predice adecuadamente.

- *Método de las corrientes equivalentes (MEC)*

Como su nombre indica, el método aplica el teorema de las corrientes equivalentes, pero con la particularidad de aproximar el campo radiado por una distribución superficial de corrientes equivalentes en regiones próximas a una arista, mediante el campo radiado por las corrientes equivalentes I (eléctrica) y M (magnética) que recorren una línea indefinida tangente a la arista en el punto de difracción, la siguiente figura muestra la equivalencia [15].

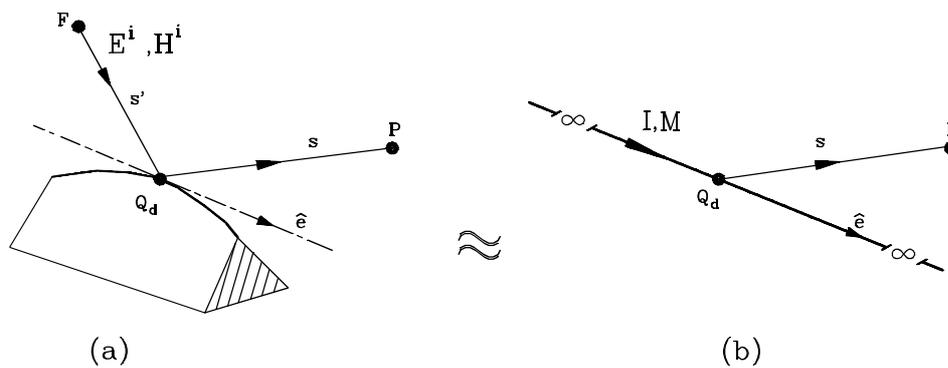


Fig.-1.3 Corriente equivalente de arista.(a) Arista iluminada por E^i y H^i en el punto de difracción Q_d .(b) Corriente equivalente para la dirección de observación s .

Estas corrientes dependen de la dirección de observación y son conocidas como corrientes equivalentes de arista, careciendo de naturaleza física. La expresión que proporciona el campo radiado por estas corrientes en zona lejana es :

$$= \frac{jk}{4\pi} \frac{e^{-jks}}{s} \int [\eta I \hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{e}) + M(\hat{s} \times \hat{e})] e^{jk\hat{s}\hat{s}'} \quad (1.3)$$

Para la resolución de la expresión anterior, denominada integral de arista, es preciso calcular el valor de las corrientes equivalentes de arista, a partir de la solución exacta obtenida de forma analítica sobre una geometría canónica. Al igual que en óptica física, la

integral puede realizarse para alta frecuencia en puntos de fase estacionaria. En este caso, sobre los puntos de fase estacionaria las direcciones de difracción generan un cono de rayos cuyo eje es la propia arista (cono de Keller).

Las corrientes equivalentes de arista suelen estar desarrolladas en función de unos coeficientes de difracción, que desglosan sus contribuciones para cada polarización. Existen numerosas versiones de este tipo de coeficiente, lo que diversifica las características de este método según el tipo de coeficientes que se utilice. Es importante reseñar que entre las ventajas de este método está su capacidad de predecir el campo en determinadas regiones (cáusticas) en las que otros presentan singularidades en forma de valores de campo infinitos; por lo cual, este método ofrece determinadas soluciones que pueden considerarse complementarias a otros.

Este breve repaso a los diferentes métodos indica que no existe un procedimiento ideal que resuelva todos los problemas; por ello es común, en los códigos de alta frecuencia, encontrar aplicados diferentes métodos para obtener las contribuciones de las diferentes partes de la estructura.

En la relación de métodos de alta frecuencia presentada, no han sido incluidos los métodos asintóticos o de trazado de rayos que engloban a la Óptica Geométrica (GO), la Teoría Geométrica de la Difracción (GTD) y a la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD), debido a que por ser éste el método aplicado en esta tesis, se le dedica un apartado en exclusiva.

1.5 DESARROLLO HISTORICO DE LAS TECNICAS APLICADAS EN EL ANALISIS DE ANTENAS EMBARCADAS

En este apartado realizaremos un recorrido sobre los estudios y trabajos más emblemáticos que, aplicando la óptica geométrica y la teoría geométrica de la difracción, han sido desarrollados para resolver problemas similares al que esta tesis plantea. Se ha realizado una selección de trabajos que describen el tratamiento completo del problema, es decir, que describen el tratamiento geométrico y electromagnético simultáneamente, por ello la estructura de los trabajos analizados es común a todos ellos. Existen otro tipo de trabajos complementarios, que si bien no realizan una descripción completa del problema, presentan soluciones de carácter particular. Estos serán citados en apartados posteriores.

El estudio se ha centrado en los trabajos que presentan técnicas de alta frecuencia, lo cual tiene como limitación que la fuente y los diferentes puntos de dispersión estén separados una λ o mas, aunque en determinadas ocasiones este requerimiento puede relajarse a $\lambda/4$. Con esta restricción, el límite inferior en frecuencia se sitúa en torno a los 100 MHz. y el límite superior dependerá lógicamente de lo bien que el modelo describa la geometría real; en general este límite suele fijarse en torno a 35 GHz. Dicho esto como aspectos comunes a los estudios que presentaremos a continuación, nos fijaremos en como han resuelto la modelización de la geometría real y que tipos de efectos han sido capaces de calcular cada uno de ellos; es decir, con que grado de precisión obtienen los resultados y que grado de aplicabilidad tiene el método empleado. Estos aspectos son fundamentales en la crítica de un método, debido a que las expresiones de la GO y la GTD están ligadas de manera directa con parámetros geométricos de la superficie del modelo para cada centro dispersor, lo que provoca una dependencia directa entre los resultados obtenidos y la capacidad del método de realizar tratamientos de modelos cercanos al modelo real. Dicho aspecto presenta la contrapartida de que una descripción de la geometría real mediante un modelo extremadamente complejo provoca una ineficacia del método que no debe consentirse, puesto que el fin de todo software de este tipo es obtener resultados fiables que se acerquen lo más posible a las medidas, de una forma rápida y con pocos recursos de memoria.

La evaluación de los estudios realizados sobre este tipo de problemas, no pretende desmerecer los resultados y los métodos aplicados en cada caso; es preciso en cada momento observar la fecha de publicación del estudio, para observar el desarrollo de cada una de las técnicas aplicadas y el carácter novedoso que en su día tuvieron. El análisis mas o menos crítico que de ellos haga, tiene el propósito de ir desvelando sus carencias y comparar sus planteamientos con el de esta tesis.

Como ya hemos dicho anteriormente, la aplicación de la GO y GTD es común a los trabajos presentados y por ello no aparecen diferencias en cuanto a las expresiones electromagnéticas aplicadas en el cálculo del campo dispersado. Sin embargo, durante los años setenta la GO y la GTD, fueron desarrolladas ampliamente teniendo como punto culminante y de referencia, aún en nuestros días, la aparición de la UTD, y por ello este desarrollo se verá reflejado en los diferentes artículos analizados. Paralelamente al desarrollo de la teoría electromagnética se fueron aplicando diferentes soluciones al tratamiento de la geometría, pasando de soluciones en 2D a soluciones mas generales en 3D.

La recopilación realizada sobre este tema nos remonta al año 1973, en el que fue

publicado el trabajo " Roll-Plane Analysis of On-Aircraft Antennas" de W.D. Burnside, R.J. Marhefka y C.L. Yu [16]. Este artículo puede considerarse como el origen de una serie de comunicaciones que describen el desarrollo del tratamiento geométrico y electromagnético aplicado a las antenas embarcadas en aviones. En este primer estudio, el avión es modelado mediante placas planas para simular las alas, y cilindros de longitud infinita para los motores y fuselaje. Esta configuración geométrica pretende modelar de forma sencilla las partes principales del avión, siendo estas las que mayor dispersión producen. Una de las mayores ventajas de esta descripción es que puede ser introducida en un código simulador de manera muy simple, puesto que los planos que definen las alas quedarán fijados únicamente con los vértices de cada polígono, y el fuselaje con forma de cilindro infinito quedará definido en el espacio a través de su centro y su radio. La figura 1.4 ofrece una representación de las características para este tipo de modelado.

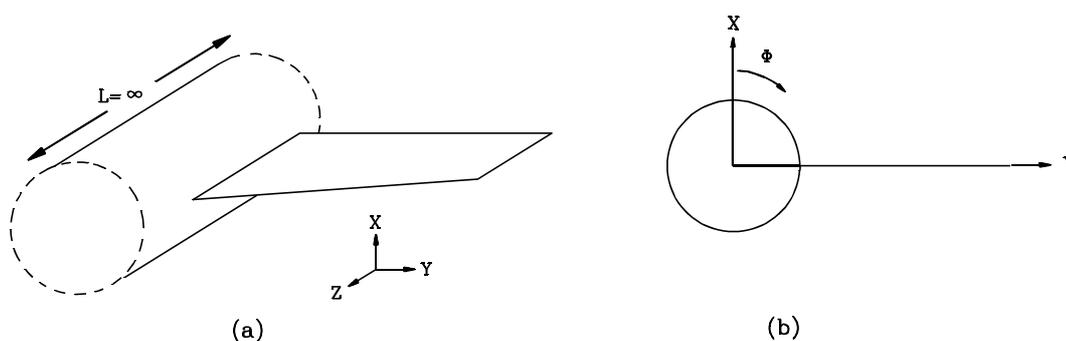


Fig.-1.4 (a) Modelado mediante cilindro de longitud infinita y placa plana. (b) Plano transversal XY, barrido para el ángulo esférico Φ .

Los objetos empleados en el modelo anterior son extremadamente sencillos y por ello mediante su combinación podemos llegar a la interpretación mas simple de un avión común. Los resultados obtenidos son muy interesantes; sin embargo, pueden no ser correctos para determinadas direcciones de observación. El hecho de que los cilindros sean de longitud infinita, restringe el análisis a diagramas de radiación correspondientes a cortes alejados del plano XZ (Roll Plane). Esta limitación debe ser eliminada, si lo que se pretende es independizar el modelado del análisis electromagnético. Por otro lado, el planteamiento ideal de este tipo de simuladores, debe favorecer al usuario su utilización y no obligarle a conocer internamente las limitaciones del tratamiento y sus consecuencias.

Las primeras soluciones electromagnéticas aplicadas para este tipo de geometrías fueron obtenidas de soluciones modales para cilindros infinitamente largos y de sección circular o elíptica [17][18]. Las técnicas de alta frecuencia empleadas fueron la GO y la

GTD, con el fin de obtener la difracción sobre aristas y la reflexión sobre superficies. Con este tipo de geometrías el trazado de rayos, el cálculo de los puntos de dispersión y la determinación de las geodésias es sencillo y por ello el esfuerzo requerido para el tratamiento geométrico es muy reducido. Para el caso de la difracción bastará analizar cada uno de los lados de los polígonos que forman las alas y obtener el campo difractado.

Por otro lado la fuente, en general, puede ser considerada como un bloque y en este caso es definida mediante su diagrama de radiación en campo lejano. Esta configuración permite modificar cómodamente la antena y posicionarla en cualquier punto de la superficie del modelo. La aproximación de campo lejano es válida siempre y cuando la fuente esté separada de la geometría al menos $2D^2/\lambda$, siendo D la dimensión máxima de la fuente, aunque este requerimiento puede ser relajado en determinadas ocasiones. El campo total es obtenido como superposición de los efectos : campo directo radiado por la antena, campo reflejado en superficie planas y en superficies simple curvas, y campo difractado en aristas rectas y en superficies simple curvas.

Hemos advertido una serie de limitaciones en la obtención de resultados con este tipo de modelado; sin embargo, el planteamiento del problema y la línea de desarrollo iniciada pueden considerarse como lo más valioso y representativo de este artículo.

Probando la valía del planteamiento anteriormente expuesto, en el año 1975 apareció el artículo " A Study of KC-135 Aircraft Antenna Patterns " de W. D. Burnside [19], en el cual se presenta un estudio sobre los resultados obtenidos aplicando GTD para antenas embarcadas en aviones en campo lejano. Este artículo, continuación del anterior, amplía considerablemente el margen de resultados que pueden ser obtenidos mediante un nuevo modelado. El estudio realiza un análisis comparativo con medidas realizadas sobre un modelo escalado (1/25) del avión KC-135 (Boeing 707) a una frecuencia de 34,92 GHz. Esta validación es común para este tipo de códigos simuladores.

Lo más significativo, es el tratamiento diferenciado que hace de la geometría dependiendo del corte del diagrama de radiación que se realice, con el fin de ampliar el margen angular de resultados. Así en la figura 1.5 se muestra la geometría empleada para cortes contenidos en el plano XZ y barridos del ángulo esférico Θ (Elevation Plane). Como puede observarse para este tipo de corte, la geometría empleada se reduce a la unión entre dos semieleipses A y B en 2 dimensiones.

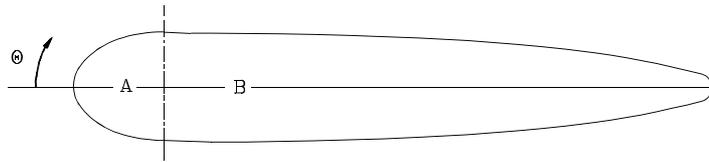


Fig.-1.5 Modelado del fuselaje para el plano XZ mediante la unión de dos semielipses A y B.

Cuando la antena se encuentra sobre el fuselaje y se analiza un corte con variación angular del ángulo Θ , los efectos predominantes son producidos por el propio fuselaje y por lo tanto, la aproximación puede ser válida. No reproduciremos los resultados puesto que pueden estudiarse sobre el artículo directamente; sin embargo, comentaremos que en determinados márgenes angulares los resultados obtenidos no concuerdan con las medidas, debido a la ausencia de los efectos producidos por otras partes del avión que no han sido consideradas.

Si el corte analizado se realiza variando el ángulo Φ , la descripción del modelo varía pasando a ser un modelo constituido por un cilindro de sección elíptica y de longitud infinita (fuselage) y de placas planas (alas), como ya se mostró en la figura 1.4.

Es importante observar el tratamiento de la onda de superficie, calculando la trayectoria geodésica sobre un cilindro elíptico y aplicando las expresiones desarrolladas por Pathak y Kouyoumjian en [20]. El campo total calculado para una dirección de observación, se obtiene como la suma de los campos: directo, reflejado y difractado por aristas y por superficies curvas.

El empleo de superficies canónicas reduce considerablemente el problema de la interacción rayo-geometría. Los puntos de intersección, reflexión, difracción, y geodésias pueden ser calculados con exactitud en todo momento; sin embargo, este tipo de aproximaciones hacen perder generalidad al método; y por lo tanto, los resultados obtenidos sólo son válidos para determinadas geometrías susceptibles de ser modeladas mediante placas planas, curvas elípticas y cilindros elípticos. Como puede intuirse, el gran caballo de batalla de este tipo de códigos simuladores es manejar y tratar eficientemente una descripción de la geometría lo más próxima a la estructura real.

En 1976 aparece un artículo de C.A. Balanis y Yuk-Bun Cheng, [21], en el cual, aplicando GO y GTD, analiza las antenas montadas sobre aviones. En esta ocasión el análisis mediante la simulación es comparado con medidas realizadas sobre modelos escalados (1/11) del Boeing 737 y (1/35) del Space Shuttle. El modelo real es aproximado

para su tratamiento por un modelo de 2D denominado "wedged-surface", en el cual el contorno de la sección vertical del fuselaje del avión es aproximado por una sucesión de aristas unidas entre si, como se muestra en la figura 1.6.

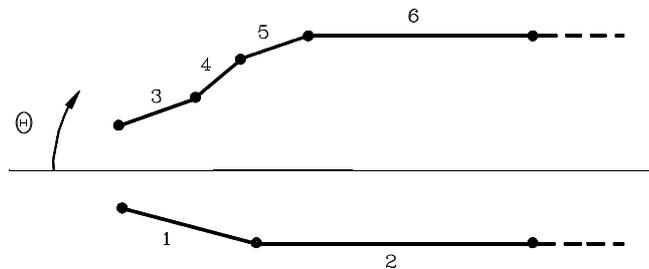


Fig. 1.6 Modelo en 2D del contorno exterior de un avión mediante la unión de aristas rectas.

La metodología en este caso consiste en emplear las aristas como únicos elementos dispersores y así obtener el diagrama de radiación a partir del campo difractado. Este tipo de aproximación proporciona resultados cercanos a los obtenidos en las medidas para cortes en elevación y para determinadas posiciones de la antena emisora. Sin embargo, no obtiene resultados de campo satisfactorios para determinados márgenes angulares, y su aplicación a situaciones tridimensionales y a geometrías arbitrarias parece de difícil ejecución.

En 1978 aparece un artículo escrito por C. L. Yu, W. D. Burnside y M. C. Gilreath, [22], que puede considerarse como una mejora sustancial del método aplicado por los mismos autores en el artículo de 1975, anteriormente descrito. Manteniendo el tipo de modelado anterior, introduce una serie de mejoras a la hora de considerar efectos producidos por las diferentes partes del avión en los cortes analizados.

Los cortes en elevación se ven mejorados con la inclusión del estabilizador vertical que hasta ahora no había sido considerado. Por otro lado, a través del análisis pormenorizado del morro de la aeronave, en donde comúnmente se encuentra el radomo, los autores propusieron considerar a esta parte del avión como transparente y añadir en esta región de la geometría una placa plana, como se detalla en la figura 1.7.b.

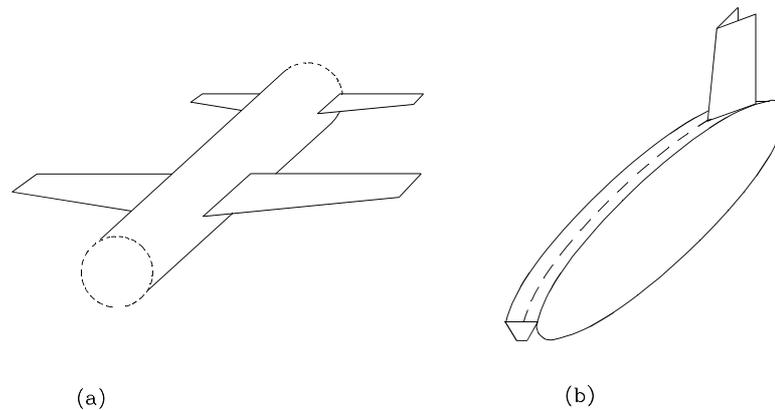


Fig.-1.7 (a) Modelado para cortes del tipo " Roll plane". (b) Modelado para cortes del tipo " Elevation Plane".

Como puede observarse, la tendencia es la de considerar en todo momento, y para cualquier dirección espacial, la contribución de todas las partes de la geometría significativas, lo que supone obligar al código a realizar tratamientos de geometrías en 3D. Estas mejoras aplicadas en el tratamiento geométrico, repercuten de manera directa en una mejora muy significativa de los resultados. Como complemento al trabajo realizado en el artículo anterior, los autores W. B. Burnside, Nan Wang y Edward L. Pelton, publicarán en 1980 el artículo "Near -Field Pattern Analysis of Airborne Antennas", [23], en donde se amplía el rango de resultados del método a campo cercano.

Los artículos comentados anteriormente correspondientes a los años 1975, 1978 y 1980 reflejan el desarrollo de un código de simulación de antenas embarcadas en aviones, y sus características y cualidades son las que todo código debe tener cuando se pretende analizar antenas de alta frecuencia montadas sobre estructuras. El desarrollo del método presenta ciertas limitaciones a la hora de modelar objetos, lo que impide su aplicación a geometrías de forma arbitraria; sin embargo, es un buen exponente de lo que un programa de estas características debe ser.

En 1986 aparece el artículo "Simulation and Analysis of Antennas Radiating in a Complex Enviroment " de los autores J. J. Kim y W. D. Burnside [24]. En este trabajo se realiza un tratamiento novedoso del fuselaje del avión y se mantienen ciertos planteamientos iniciados en [16],[19] y [23]. En el artículo que nos ocupa, el fuselaje es modelado mediante la composición de dos elipsoides, que según los autores reproduce con mayor exactitud los cuerpos de los aviones mas comunes. El artículo está centrado en esta mejora y da por supuesto que la simulación de las demás partes del avión puede realizarse mediante placas planas. La mejora específica aplicada sobre el elemento central del avión, tiene como fin mejorar los resultados para determinados márgenes angulares y plantear un

nuevo método de cálculo de las geodesias sobre el fuselaje. Este último aspecto es uno de los más novedosos y de mayor repercusión en el diagrama total. Hemos de tener en cuenta que la inclusión de la difracción por superficies curvas, es decir, el efecto producido por las ondas de superficie, provoca un efecto de relleno en las regiones de sombra en el diagrama de radiación final, en las que, de no haber sido a consecuencia de alguna difracción en aristas, no se habría obtenido campo. Cuando un rayo procedente del foco emisor incide tangente a una superficie curva, comienza a propagarse sobre la misma, recorriendo un camino denominado geodesia y radiando de forma continua para direcciones que en todo momento son tangentes a la superficie y a la curva que describe su camino sobre la superficie. Este efecto conlleva una formulación dependiente, como es lógico, de todos los parámetros geométricos asociados a la curva descrita por el rayo sobre la superficie (normales, curvaturas, longitud del recorrido, etc.). Este requerimiento es muy exigente cuando se trata de una superficie no desarrollable, y por ello se tiende a aproximar la superficie por la que se propaga el rayo por una en la que la determinación del camino geodésico sea sencillo y no requiera grandes cálculos. En concreto, el artículo presenta una aproximación en la que la región del fuselaje afectada por la onda de superficie, es sustituida por un cono elíptico sobre el cual se realizan los cálculos correspondientes a la geodésia; esta sustitución puede observarse en la figura 1.8.

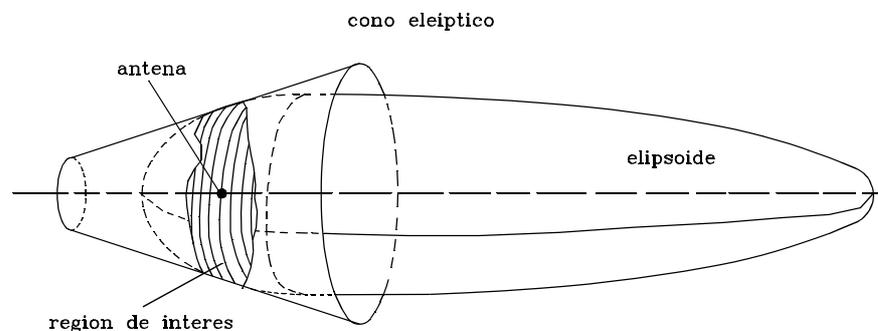


Fig.-1.8 Aproximación mediante un cono elíptico de la región de la superficie de mayor interés en el cálculo de difracción por superficie.

Observando los resultados presentados en el artículo, parece ser una buena aproximación en las regiones en las que la onda de superficie es predominante para los casos analizados; sin embargo, el procedimiento presenta un carácter particular en cuanto a su aplicación, restringiendo el modelado del fuselaje a aquellos constituidos por dos

elipsoides enfrentados.

Como resumen a este breve repaso de los trabajos mas significativos concernientes al tema que nos ocupa, podemos entender la determinante dependencia de los métodos aplicados con la capacidad de manejar eficazmente la geometría. Dado que la técnica empleada es una técnica de trazado de rayos, y que los rayos son dispersados por la geometría que soporta la antena en forma de rayos reflejados por las superficies y rayos difractados por las aristas, es preciso encontrar un compromiso entre una descripción geométrica manejable, próxima al objeto real, con un tiempo de cálculo razonable. La teoría electromagnética aplicada en esta tesis, es común a la presentada como válida por los artículos anteriores; sin embargo, el tratamiento geométrico es mucho mas ambicioso y novedoso, ya que en ningún momento se recurre al modelado mediante objetos regulares, sino que se modela mediante superficies paramétricas, lo que favorece la aproximación al modelo real.

REFERENCIAS

- [1] Richard C. Booton, Jr. " Computational Methods for Electromagnetics and Microwaves." John Wiley & Sons, INC, 1992.
- [2] Tatsuo Itoh " Numerical Techniques for Microwave and Millimeter-Wave Passive Structures" John Wiley & Sons, INC. 1989.
- [3] A. Cardama. LL. Jofre. J.M. Rius. J. Romeu. S. Blanch. " Anetnas". Ediciones UPC, Area de comunicaciones. 1993.
- [4] C. L. Britt, " Solution of Electromagnetic Scattering Problems Using Time Domain Techniques", IEEE Trans.AP, vol37, pp 1181-1192, 1989.
- [5] A. Taflove, " Application of the Finite-Difference time domine Method to Sinusoidal Steady-State Electromagnetic-Penetration Problems", IEEE Trans. Electr. Compt. vol EMC-22, pp 191-202, Aug. 1980.
- [6] R.F. Harrington, " Matrix Methods for Field Problems", Proc IEEE, vol 55, pp. 136-149, Feb 1967.
- [7] J.H. Richmond, " A wire-grid Model for Scattering by Conducting Bodies". IEEE, trans. Antennas Propagat., vol AP-14, pp. 782, 1966.
- [8] J.H. Richmond, " Digital computer Solutions of the Rigorous Equations for Scattering Problems". Proc. IEEE, , vol 53, pp. 796, 1965.
- [9] T.K. Sarkar, " The Application of the Conjugate Gradient Method for the solution of Operator Equations Arising in Electromagnetic Scattering from Wire Antennas", Radio Science, vol 19, n°5, Sept.-Oct. 1984.
- [10] T.K. Sarkar, K.R. Siarkiewicz, R.F. Stratton, " Survey of Numerical Methods for Solution of Large System of Linear Equations for Electromagnetic Field Problems," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol AP-29, pp. 847-856, Nov 1981.
- [11] R.F. Harrington, " Field Computation by Moment Methods", Macmillan, New York 1968.

- [12] O.L. Zienkiewicz, " The Finite Element Method", Mc. Graw-Hill, 3rd ed. 1979.
- [13] R.G. Kouyoumjian. "Asymptotic High-Frequency Methods", Proc IEEE, Vol.53, Aug. 1965, pp. 864-876.
- [14] W.L. Stutzman, G.A. Thiele. " Antenna Theory and Design ". John Wiley & Sons. 1981.
- [15] M. Marin. Tesis Doctoral : " Análisis de antenas de hilo en las proximidades de cuerpos conductores empleando métodos híbridos. Método de los momentos / Teoría geométrica de la difracción " . ETSIT Universidad politécnica de Madrid. febrero 1987.
- [16] W. D. Burnside, R. J. Marhefka and C. L. Yu " Roll-Plane Analysis of Aircraft Antennas ", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-21, no. 6, pp. 780-786, Nov 1973.
- [17] P.S. Carter " Antenna arrays around cylinders". Proc. IRE, vol 31, pp 671-693, Dec. 1943.
- [18] G. Sinclair, " The patterns of antennas located near cylinders of elliptical cross section". Proc. IRE, vol 39, pp 660-668, June 1951.
- [19] W. D. Burnside, M. C. Gilreath, R. J. Marhefka and C. L. Yu " A study of KC-135 aircraft antenna patterns ", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-23, no. 3, pp. 309-316, May 1975.
- [20] P.H.Pathak and R.G.Kouyoumjian, " The radiation from apertures in curved surfaces". NASA, Washington, Rep NASA CR-2263, July 1973.
- [21] C.A.Balanis and Y.B.Cheng,. "Antenna Radiation Modeling for Microwave Landing System". IEEE Trans. Antennas Propagat., July 1976, pp. 490-497.
- [22] C. L. Yu, W. D. Burnside and M. C. Gilreath, " Volumetric pattern analysis of airborne antennas ", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-26, no. 5, pp. 6363-641, Sept. 1978.
- [23] W. D. Burnside, N. Wang, and E. L. Pelton, " Near-field pattern analysis of

airborne antennas ", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-28, no. 3, pp. 318-327, May 1980.

- [24] J. J. Kim and W. D. Burnside, " Simulation and Analysis of antennas radiating in a complex enviroment ", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-34, no. 4, pp. 554-562, April 1986.

**INTRODUCCION A LA OPTICA GEOMETRICA Y
A LA TEORIA UNIFORME DE LA DIFRACCION**

2.1 NOTAS HISTORICAS DEL METODO

Cuando se realiza una revisión histórica de la evolución de la Óptica Geométrica, es preciso remontarse a tiempos muy lejanos. Esto se debe fundamentalmente al hecho de que este tipo de método basado en el trazado de rayos, fue descubierto paralelamente a la observación detenida de la luz por el ser humano. Hay que tener en cuenta que los rayos en una región homogénea e isotrópica, como es el espacio libre, describen trayectorias rectas y de ahí su relación estrecha con la observación geométrica del fenómeno.

Las primeras observaciones de la luz desde este punto de vista, fueron realizadas por los griegos [1]. De entre ellos cabe resaltar a Pitágoras (580-500 a.C.) y Empédocles (siglo V a.C.), pero fue Euclides matemático alejandrino, (Circa 330-275 a.C.) quien da al fenómeno de la propagación de la luz un sentido matemático y geométrico, estableciendo las propiedades de los espejos curvos, experimentando con diferentes tipos de reflectores y deduciendo la ley de la reflexión en su forma más simple, la cual postula que los ángulos de incidencia y de reflexión son iguales.

Hero (Circa 330-275 a.C.) dio un paso más y demostró que el punto de reflexión por el que pasa un rayo, en su recorrido desde la fuente hasta el punto de observación, se encuentra sobre una trayectoria de recorrido mínimo. Este resultado fue recogido más adelante por Fermat

(1654) para establecer lo que hoy se conoce como el principio de Fermat.

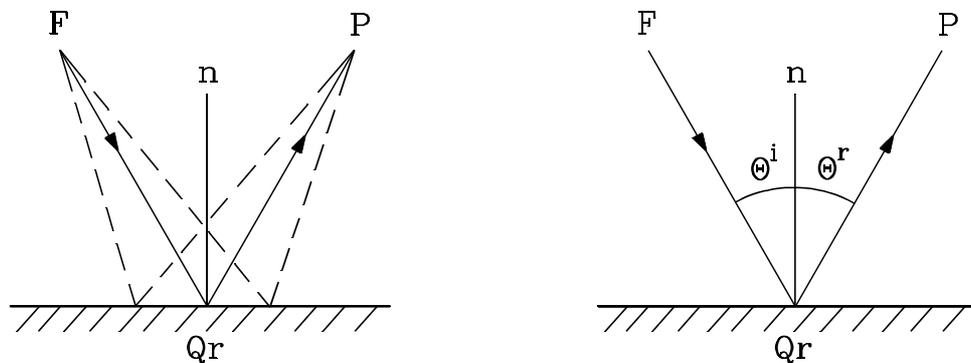


Fig.-2.1 Representación gráfica de la ley de la reflexión, bajo sus dos expresiones.

El primer paso concerniente a la desviación que sufre la luz cuando en su trayectoria cambia de medio (refracción), fue dado por Ptolomeo (Circa 140 d.C.), estableciendo la ley de la refracción únicamente válida para ángulos de incidencia pequeños.

Hasta trece siglos después, no hubo avance alguno en este terreno, y fue Alhazen (Basora, 965-1039) quien redescubre la ley de la reflexión y la aplica a la formación de imágenes en los espejos, dando un carácter mas cuantitativo a la óptica geométrica clásica.

Ya en el siglo XVI y principios del XVII se desarrolla una gran actividad en el campo de la óptica [2]. En este período Kepler (1571-1630) y Galileo (1565-1642) aplicaron sus principios a la construcción de instrumentos ópticos; el holandés Snell (1580-1626) descubre experimentalmente la ley de la refracción, siendo revisada y establecida posteriormente por Descartes (1596-1615). Mas adelante, en 1654, el francés Fermat postuló su principio, denominado principio de Fermat, y junto con Hamilton (1805-1865), quien sentó las bases matemáticas de la óptica, cerraron una etapa de descubrimientos y desarrollo de teorías que hoy en día se conocen como Optica Geométrica Clásica. Esta definición determinante de un período de evolución, se justifica en el hecho de que todo lo desarrollado hasta ese momento fue concebido independientemente del carácter electromagnético de la luz; es decir, de la teoría electromagnética. Esta independencia limita de una manera importante a esta teoría como método de alta frecuencia, puesto que no contempla los conceptos de fase, polarización y amplitud de la propagación.

El modelo ondulatorio de la luz fue presentado en 1690 por Huygens, que era contemporáneo de Newton y por ello el fenómeno pudo ser interpretado en forma de teoría de onda. El desarrollo durante este período fue grande, por lo que el francés A. Fresnel (1788-1827) pudo explicar el fenómeno de la difracción descubierto anteriormente por R. Hooke y P. Grimaldi, en 1665.

Los intentos iniciales de dotar a la luz de un carácter ondulatorio conllevaron numerosas contradicciones, que más adelante fueron resueltas con la consecución por parte de J.C. Maxwell, en 1864, de las ecuaciones que llevan su nombre. La aparición de estas ecuaciones supone una interpretación macroscópica del fenómeno electromagnético, y todos sus resultados derivados se aplican a la propagación de ondas; de esta forma la luz queda englobada en esta teoría como una onda electromagnética de extrema alta frecuencia. La aparición de este conjunto de ecuaciones marcan un punto de referencia claro en la evolución de la teoría electromagnética.

Una vez llegado a este punto, puede entenderse que la óptica geométrica clásica evoluciona apoyada por la teoría electromagnética, desembocando en una nueva y moderna óptica geométrica, que denotaremos por GO, y que lleva incluidos en su formulación los efectos de fase, amplitud y polarización de los campos electromagnéticos. Las conexiones de forma rigurosa entre los campos electromagnéticos derivados de las ecuaciones de Maxwell y los conceptos geométricos de propagación, fueron descritas por Luneberg [3] y Kline [4].

Por otro lado, el fenómeno de la difracción, que durante este estudio tendrá una importancia capital, fue desarrollado a partir de la interpretación de la luz como una onda electromagnética, siendo sus principales precursores: Rayleigh, Kelvin, Stokes, Kirchoff, Helmholtz y Sommerfeld entre otros. Mas adelante, este fenómeno fue estudiado por Keller (1953) y sentó las bases de la Teoría Geométrica de la Difracción, cuya abreviatura es GTD. Esta teoría, describe el fenómeno de la difracción de manera que pueda ser integrado como un efecto complementario a los que ya son considerados por la óptica geométrica, que son el campo directo y el campo reflejado. Este efecto resuelve la predicción de la GO de campo nulo en las regiones de sombra producidas por aristas y discontinuidades del obstáculo con características de conductor perfecto. Esta cualidad hace a la superficie impenetrable desde un punto de vista electromagnético. El planteamiento se basa en obtener el campo difractado por la arista cuando es iluminada por rayos definidos mediante la GO. Los caminos recorridos por los rayos difractados describen un cono (cono de Keller), cumpliendo todos ellos el principio de Fermat para un determinado punto de difracción situado sobre la arista. El mismo Keller, en 1956

extiende el fenómeno de la difracción a superficies con suave curvatura cuando la incidencia es tangente, introduciendo así una nueva contribución a la suma de campos que tiene por nombre onda de superficie. En este caso el efecto resuelve la predicción de la GO de campo nulo en las regiones de sombra, producidas por la ocultación del rayo directo por una superficie curvada.

La formulación postulada por Keller supuso un paso de gran importancia para que, de una manera sencilla, como suma de contribuciones, pudieran ser obtenidos resultados de campo radiado para geometrías intratables por cualquier otro método. Sin embargo, la GTD en su forma original presenta una serie de problemas: el más importante es que la difracción se comporta con discontinuidad cuando se atraviesan las regiones correspondientes a la frontera de sombra FS y a la frontera de reflexión FR; esta discontinuidad predice campo infinito para estas regiones y por lo tanto, implica la imposibilidad de calcular la difracción en direcciones próximas a las fronteras de sombra y reflexión. La solución a estos problemas fue descrita durante los años setenta y ochenta por el grupo de R.G. Kouyoumjian, formado por P.H. Patak, W.D. Burnside y R.J. Marhefka. El tratamiento específico de las discontinuidades contenidas en la GTD, desembocaron en una nueva formulación más compleja, pero más efectiva, que se denomina Teoría Uniforme de la Difracción, conocida por las siglas UTD [5][6] y que es la que se encuentra en vigor en nuestros días.

2.2 OPTICA GEOMETRICA Y ECUACIONES DE MAXWELL

Las expresiones originales de la Óptica Geométrica han sido desarrolladas, en cierto modo, sin un claro apoyo teórico, la formulación aplicada a la propagación de campos fue producto de un planteamiento meramente intuitivo. Este desarrollo inicial, pleno de validez, obligó en cierta medida a formular un lenguaje teórico y cuantitativo, teniendo siempre presente la solución anticipada. Para lograr este fin y dotar al fenómeno de entidad electromagnética, fue preciso recurrir a las ecuaciones de Maxwell.

R.M. Luneberg [3] y M. Kline [4] adoptaron una solución previa a las ecuaciones de Maxwell, logrando así el nexo de unión entre la Óptica Geométrica clásica y las ecuaciones, así como la demostración teórica. A continuación se describe el procedimiento seguido por Luneberg-Kline, y para ello es preciso, en primer lugar, plantear las ecuaciones de Maxwell en el entorno en el que se va a desarrollar el fenómeno de la propagación [1]. Suponemos que el medio va a ser homogéneo, isótropo y lineal. Es decir, que la permitividad ϵ y la permeabilidad $\mu = \mu_0$ son constantes en todos los puntos, para todas las direcciones e

independientes de las intensidades de los campos. Bajo estas condiciones y siendo \vec{r} el vector de coordenadas espaciales (x, y, z) , \vec{E} el vector campo eléctrico, \vec{H} el vector de campo magnético y ω la frecuencia, podemos escribir :

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, \omega) + j \omega \mu_0 \vec{H}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (2.1.a)$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, \omega) - j \omega \epsilon \vec{E}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (2.1.b)$$

$$\nabla \cdot \vec{E}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (2.1.c)$$

$$\nabla \cdot \vec{H}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (2.1.d)$$

Eliminando \vec{H} de las dos primeras ecuaciones podemos deducir una expresión denominada ecuación de Helmholtz :

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, \omega) + k^2 \vec{E}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (2.2)$$

En donde $k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon$. Teniendo en cuenta que la velocidad de la luz en el medio viene dada por $v = (\mu_0 \epsilon)^{-1/2}$, podemos definir el número de onda como $k = 2\pi/\lambda$.

La solución planteada por Luneberg-Kline, estuvo basada en la observación física del fenómeno descrito por la Óptica Geométrica clásica y para campos suficientemente distantes de las fuentes.

Las expresiones para el campo eléctrico y magnético tienen forma de serie de potencias, como se muestra a continuación :

$$\vec{E}(\vec{r}, \omega) \sim e^{-jk\Psi(\vec{r})} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\vec{E}_n(\vec{r}, \omega)}{(j\omega)^n} \quad (2.3.a)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, \omega) \sim e^{-jk\Psi(\vec{r})} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\vec{H}_n(\vec{r}, \omega)}{(j\omega)^n} \quad (2.3.b)$$

La función $\Psi(\vec{r})$ se denomina función fase o eikonal y su interpretación es clara, una vez introducidas las expresiones anteriores en las ecuaciones de Maxwell, por lo que se verá mas adelante.

Por otro lado, las soluciones planteadas contemplan una serie de longitud infinita para cada tipo de campo, por lo que durante la inclusión de estas expresiones en la ecuaciones de Maxwell se plantea imponer un limite, en función del problema que se quiera abordar. En el caso de alta frecuencia, es inmediato deducir que bastará con quedarse con el primer termino de serie.

Introduciendo las soluciones en las ecuaciones (2.1.a),(2.1.b),(2.1.c),(2.1.d) y teniendo en cuenta que el operador ∇ opera únicamente sobre las coordenadas espaciales del vector \vec{r} , podemos obtener las siguientes expresiones :

$$1/\nu (\nabla \Psi \times E_0) = \mu_0 H_0 \quad (2.4.a)$$

$$\nabla \Psi \cdot E_0 = 0 \quad (2.4.b)$$

$$1/\nu (\nabla \Psi \times H_0) = \epsilon E_0 \quad (2.4.c)$$

$$\nabla \Psi \cdot H_0 = 0 \quad (2.4.d)$$

Definiendo la impedancia de onda del medio como $Z = (\mu_0 / \epsilon)^{1/2}$ y la admitancia de onda como $Y = 1 / Z$, podemos escribir la primera de las ecuaciones como :

$$H_0 = Y(\nabla \Psi \times E_0) \quad (2.5)$$

Lo que demuestra la condición de perpendicularidad entre los vectores campo eléctrico, campo magnético y el gradiente de la función fase [7]. Es decir, el campo es perpendicular a la dirección de propagación definida por $\nabla \Psi$, como se muestra en la siguiente figura.

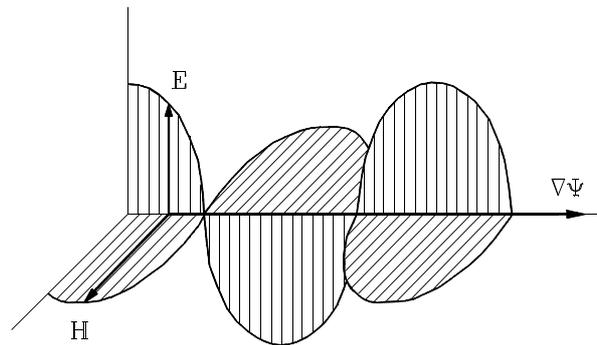


Fig.-2.2 Onda plana transversal electromagnética.

Por otro lado, si incluimos el resultado (2.5) en (2.4.c) tendremos que:

$$(\nabla\Psi \cdot \nabla\Psi) E_0 - (\nabla\Psi \cdot E_0) \nabla\Psi = E_0 \quad (2.6)$$

Aplicando (2.4.b) en la expresión anterior, se obtiene finalmente la llamada ecuación eikonal:

$$|\nabla\Psi|^2 = 1 \quad (2.7)$$

Teniendo en cuenta que $\nabla\Psi$ describe la dirección perpendicular en todo momento a la superficie definida por $\Psi(\vec{r})$, podemos encontrar las expresiones representativas de tres frentes de onda mas importantes, que son :

- Onda Plana : La superficie que define el frente de onda es un plano sobre el que la magnitud y la fase permanece constante, este frente de onda es característico en campos procedentes de fuentes muy alejadas del observador.

$$\Psi(x, y, z) = \alpha x + \beta y + \gamma z \quad (2.8)$$

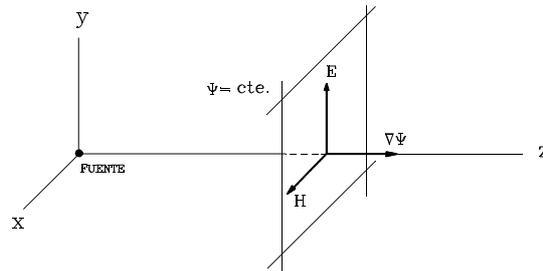


Fig.-2.3 Frente de onda plano

- Onda Cilíndrica : La superficie que define el frente de onda tiene forma de sección cilíndrica. La fuente generadora de un campo con frente de onda cilíndrico, es por lo general una línea recta de corriente.

$$\Psi(x, y, z) = (x^2 + y^2)^{1/2} \tag{2.9}$$

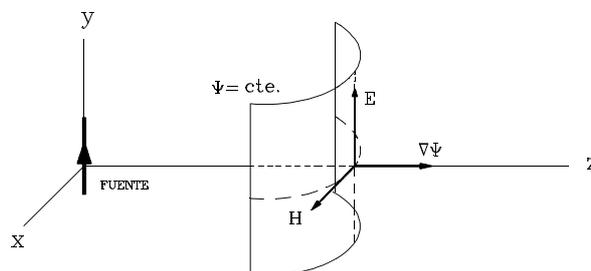


Fig.-2.4 Frente de onda cilíndrico.

- Onda Esférica : La superficie que define el frente de onda tiene forma de sección esférica. El origen de este tipo de ondas tiene un carácter puntual, por ejemplo un dipolo infinitesimal.

$$\Psi(x, y, z) = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} \tag{2.10}$$

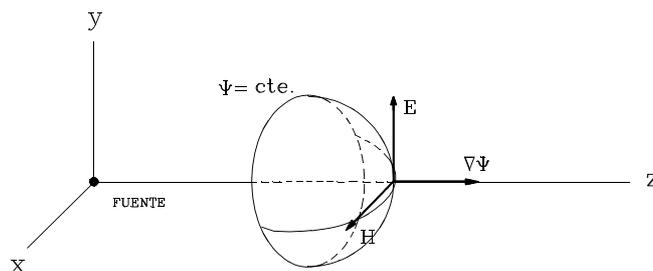


Fig.-2.5 Frente de onda esférico.

2.3 APUNTES SOBRE GO y UTD

■ DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE LOS EFECTOS CONSIDERADOS POR LA GO Y LA UTD

La GO junto con la UTD contemplan una serie de efectos electromagnéticos de carácter individual pero complementarios, que deben ser tratados con un orden de prioridad en función de la importancia de cada uno de ellos [8]. Esta importancia se refleja directamente en la magnitud de los campos que cada efecto ofrece al resultado final, obtenido como superposición de todos los efectos considerados. Para entender con mayor facilidad el planteamiento del problema y los diferentes efectos a considerar, se representa a continuación la sección de una figura imaginaria, sobre la que se aprecian de manera simultánea todos los efectos simples o de primer orden analizados en esta tesis.

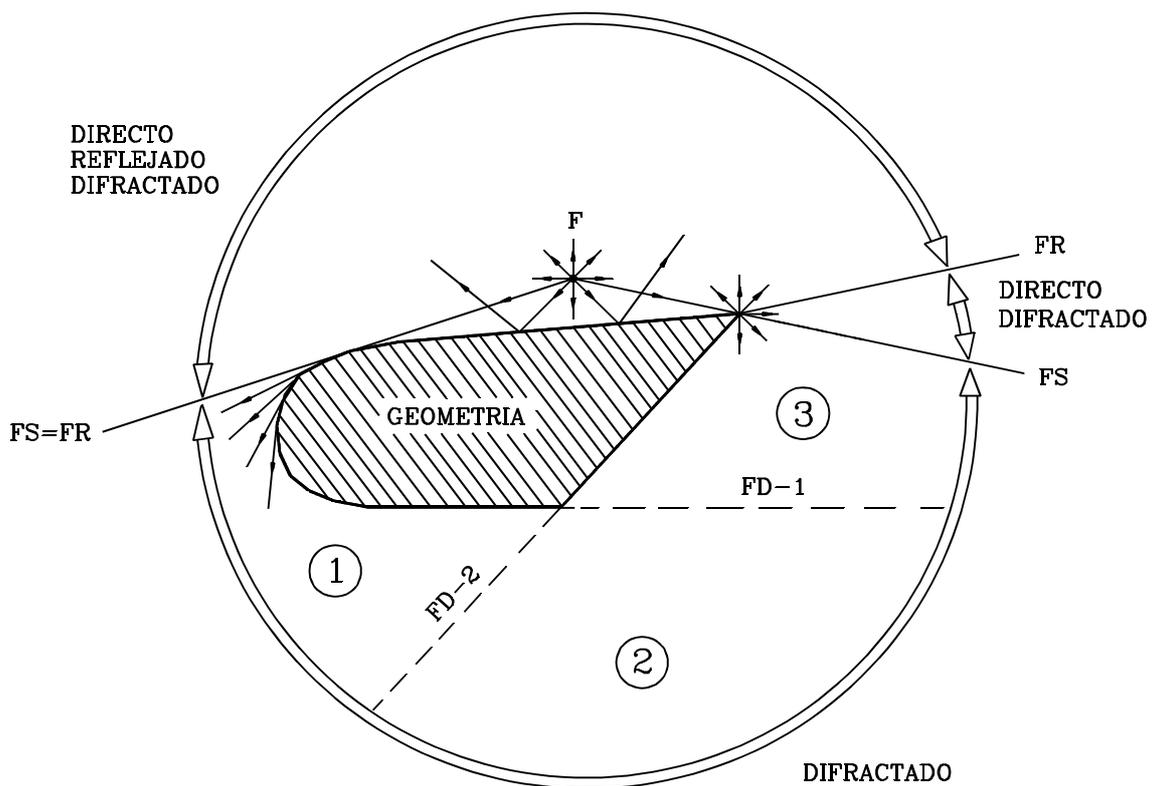


Fig.-2.6 Campos de la GO y de la UTD. FS=Frontera de Sombra, FR=Frontera de Reflexión, FD-2=Frontera de Difracción en aristas en la región de sombra, FD-1=Frontera de Difracción en superficie en la región de sombra.

La región de campo difractado puede dividirse en 3 zonas, dependiendo del tipo de difracción que contribuya, así tendremos : la *ZONA 1*, en la que únicamente contribuye la difracción producida por la onda de superficie; la *ZONA 3*, en la que hay contribución de la difracción de arista; y la *ZONA 2*, en la que contribuyen los dos tipos de difracción.

Hemos presentado los efectos simples, que son aquellos en los que el rayo dispersado por la geometría solo ha sufrido una interacción con la superficie del modelo durante su recorrido. El siguiente paso son los efectos de segundo orden o dobles efectos. En este tipo de efectos el rayo dispersado es obtenido producto de dos interacciones con la geometría durante su trayectoria; siendo la naturaleza del efecto para cada uno de los trayectos la misma o diferente. Es decir, podrán existir dobles reflexiones, reflexión difracción, difracción reflexión etc. El resultado final es la superposición de los campos electromagnéticos, correspondientes a cada uno de los efectos para obtener el campo en cualquiera de las regiones reseñadas en la figura 2.6.

■ CARACTERISTICAS DE LOS CAMPOS RADIADOS EN ALTA FRECUENCIA

- Cuando las frecuencias de trabajo son suficientemente altas, el fenómeno de propagación, reflexión y difracción presenta propiedades de carácter local.
- Se denomina rayo a la trayectoria o camino que recorre la energía en forma de línea recta para medios homogéneos.
- Una familia de rayos procedentes de una fuente común, tienen asociados infinitos frentes de onda en forma de superficies envolventes, sobre las que todos los rayos presentan la misma fase.

■ DESCRIPCION MEDIANTE GO DE CAMPO ELECTROMAGNETICO EN PROPAGACION

- Un pincel de rayos infinitesimal con un frente de onda astigmático, presenta dos radios de curvatura principales: ρ_1 y ρ_2 . A estos radios de curvatura se les llama también distancias cáustica, puesto que determinan la distancia de separación entre el frente de onda y su origen. A este origen, definido en la figura 2.7 por dos rectas AA' y BB', se les denomina cáusticas [1][9].

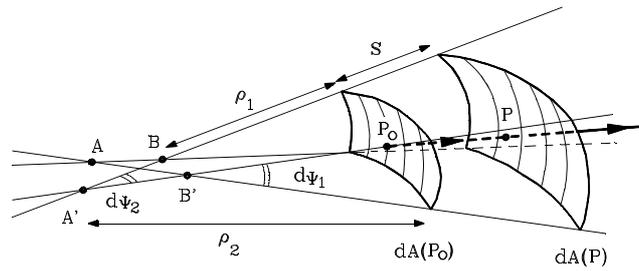


Fig.-2.7 Frente de onda astigmático

- Para un tubo de rayos, la energía ha de conservarse, debido a que los rayos son considerados líneas de flujo de energía [10-12]. Por ello si igualamos la energía que atraviesa cada una de las superficies de la figura anterior tendremos que :

$$| \vec{E}(p) |^2 dA(p) = | \vec{E}(p_0) |^2 dA(p_0) \tag{2.11}$$

$$| \vec{E}(p) |^2 (\rho_1 + s)(d\psi_1)(\rho_2 + s)(d\psi_2) = | \vec{E}(p_0) |^2 \rho_1 d\psi_1 \tag{2.12}$$

$$| \vec{E}(p) | = | \vec{E}(p_0) | \left(\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)} \right)^{1/2} \tag{2.13}$$

- La fase del campo se considera creciente a lo largo de la trayectoria del rayo. Además se asume que su comportamiento es igual al de una onda plana propagándose a lo largo del rayo. Es decir, el vector campo es siempre perpendicular a la dirección de propagación. Por ello la expresión anterior se completa del siguiente modo :

$$\vec{E}(p) = | \vec{E}(p_0) | e^{j\psi_0} \left(\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)} \right)^{1/2} e^{-jks} \tag{2.14}$$

La expresión (2.14) define el campo electromagnético para la GO y puede descomponerse en los siguientes términos atendiendo a su función :

$|\vec{E}(p_0)| e^{j\phi_0}$ - Valor de la amplitud y fase del campo en el origen, $S=0$

e^{-jks} - Término que expresa la variación de fase a lo largo de la trayectoria.

$\left(\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)} \right)^{1/2}$ - Factor que expresa la variación de la amplitud del campo.

Este último término toma diferentes formas dependiendo del tipo de onda con que se propague la energía y en caso de que la observación se realice en campo lejano, las simplificaciones son las siguientes :

» Onda esférica producto de una fuente puntual.

$$- \text{ si } \rho_1 = \rho_2 = \rho \Rightarrow \left(\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)} \right)^{1/2} = \frac{\rho}{\rho + s} \text{ y si} \quad (2.15)$$

» Onda cilíndrica producto de una línea fuente.

$$= \rho \Rightarrow \left(\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)} \right)^{1/2} = \left(\frac{\rho}{\rho + s} \right)^{1/2} \text{ y si } s \gg \rho \Rightarrow \quad (2.16)$$

» Onda plana producto de fuentes muy alejadas.

$$- \text{ si } \rho_1 = \infty \text{ y } \rho_2 = \infty \Rightarrow \left(\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)} \right)^{1/2} = \text{cte} \quad (2.17)$$

■ COMPORTAMIENTO DEL CAMPO INCIDENTE

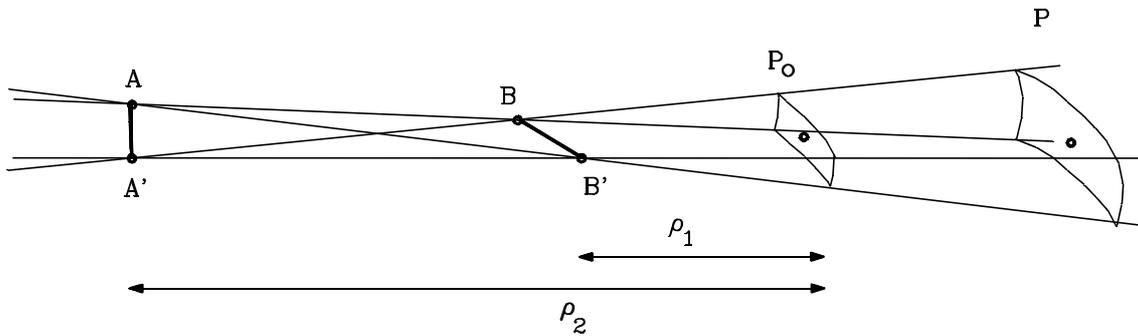


Fig.-2.8 Frente de onda astigmático incidente

La figura 2.8 muestra la posición de los frentes de onda p_0 y p , respecto de las líneas cóusticas AA' y BB'.

$$s \equiv | \overline{p_0 P} | \quad \rho_{1,2} \equiv + | \rho_{1,2} | \quad (2.18)$$

En este caso y considerando las anteriores relaciones tendremos :

$$\vec{E}(p) = \vec{E}(p_0) \left(\frac{\rho_1}{(\rho_1 + s)} \frac{\rho_2}{(\rho_2 + s)} \right)^{1/2} e^{-jks} \quad (2.19)$$

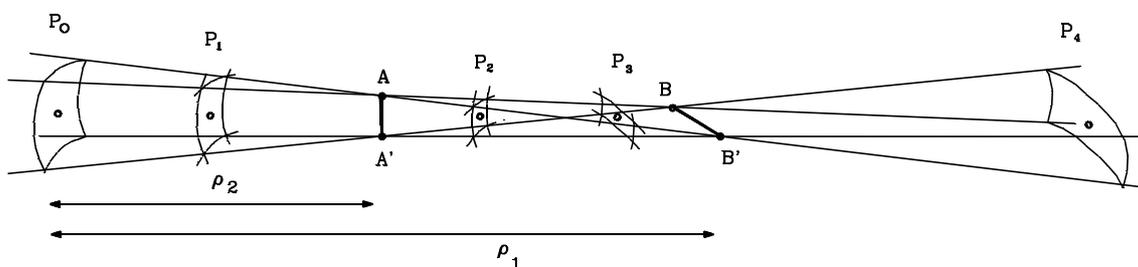


Fig.-2.9 Frente de onda astigmático.

La figura 2.9 muestra la posición de los frentes de onda p_0 , p_1 , p_2 , p_3 y p_4 , respecto de las líneas cáusticas AA' y BB'.

$$s_{1,2,3} \equiv \overline{p_0 p_{1,2,3}} \quad \rho_{1,2} \equiv - | \rho_{1,2} | \quad (2.20)$$

Teniendo en cuenta las anteriores relaciones se presentan los siguientes casos:

- Trayectoria de propagación $\overline{p_0 p_1}$, con $s_1 < | \rho_{1,2} |$.

$$\vec{E}(p_1) = \vec{E}(p_0) \left| \left(\frac{\rho_1}{\rho_1 + s_1} \right)^{1/2} \right| \left| \left(\frac{\rho_2}{\rho_2 + s_1} \right)^{1/2} \right| e^{-jks_1} \quad (2.21)$$

- Trayectoria de propagación $\overline{p_0 p_2}$, con $s_2 < | \rho_1 |$ $s_2 > | \rho_2 |$.

$$\vec{E}(p_2) = \vec{E}(p_0) \left| \left(\frac{\rho_1}{\rho_1 + s_2} \right)^{1/2} \right| \left| \left(\frac{\rho_2}{\rho_2 + s_2} \right)^{1/2} \right| j e^{-jks_2} \quad (2.22)$$

- Trayectoria de propagación $\overline{p_0 p_3}$, con $s_3 < | \rho_1 |$ $s_3 > | \rho_2 |$.

$$\vec{E}(p_3) = \vec{E}(p_0) \left| \left(\frac{\rho_1}{\rho_1 + s_3} \right)^{1/2} \right| \left| \left(\frac{\rho_2}{\rho_2 + s_3} \right)^{1/2} \right| j e^{-jks_3} \quad (2.23)$$

- Trayectoria de propagación $\overline{p_0 p_4}$, con $s_4 > | \rho_{1,2} |$.

$$\vec{E}(p_4) = \vec{E}(p_0) \left| \left(\frac{\rho_1}{\rho_1 + s_4} \right)^{1/2} \right| j \left| \left(\frac{\rho_2}{\rho_2 + s_4} \right)^{1/2} \right| j e^{-jks_4} \quad (2.24)$$

Para ilustrar la descripción de los diferentes efectos considerados por la GO y la UTD, se van a presentar una serie de diagramas de radiación en campo lejano para cada uno de los efectos, con el propósito de ilustrar las sucesivas inclusiones en el diagrama resultante.

La figura 2.6 dividió el espacio angular en diferentes zonas, con el fin de presentar los diferentes efectos producidos por una geometría soporte. El primero de los efectos a considerar es el campo directo; su desaparición es debida a la intersección de los rayos directos con la geometría. Sin embargo, puede observarse en la figura 2.6 que la ocultación del campo directo se produce por regiones de características geométricas bien diferentes. Para uno de los casos, el último rayo directo interceptado por la superficie, incide tangente a la misma, mientras que en el otro, el campo directo desaparece por incidir sobre la geometría en una región de clara discontinuidad. Ambos casos deben ser diferenciados, puesto que los efectos que angularmente aparecen con posterioridad son distintos, por ello y para realizar un seguimiento, serán empleadas las configuraciones de la figura 2.10 para el análisis de los campos.

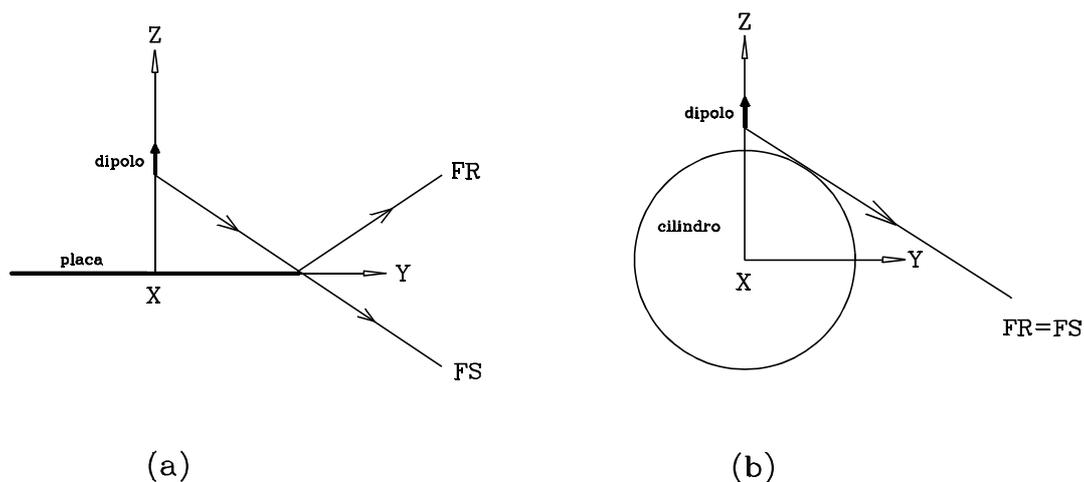


Fig.-2.10 (a).- Dipolo montado (Altura= 0.1 mts) sobre placa plana conductora cuadrada (1x1 mts.) de grosor despreciable. (b).- Dipolo montado (Altura 0.025 mts.) sobre un cilindro conductor (Radio=0.25 mts.,Longitud=1 mts).

En ambos casos han sido utilizados dipolos eléctricos infinitesimales, para el caso de la configuración 2.10(a) la frecuencia de análisis ha sido de 1.075 GHz., mientras que para la 2.10(b) ha sido de 3.0 GHz. El plano **YZ** representado en la figura anterior y sobre el que han sido definidas las fronteras de sombra y de reflexión, se corresponde con el corte $\phi = 90^\circ$, que será el analizado para los diferentes efectos. Por otro lado, los campos representados estarán normalizados con respecto al máximo valor del campo total.

Si representamos el diagrama de radiación del campo directo en zona lejana para la configuración 2.10(a), realizando un barrido para $\theta \in [0, 180]$, el resultado es el que se muestra a continuación.

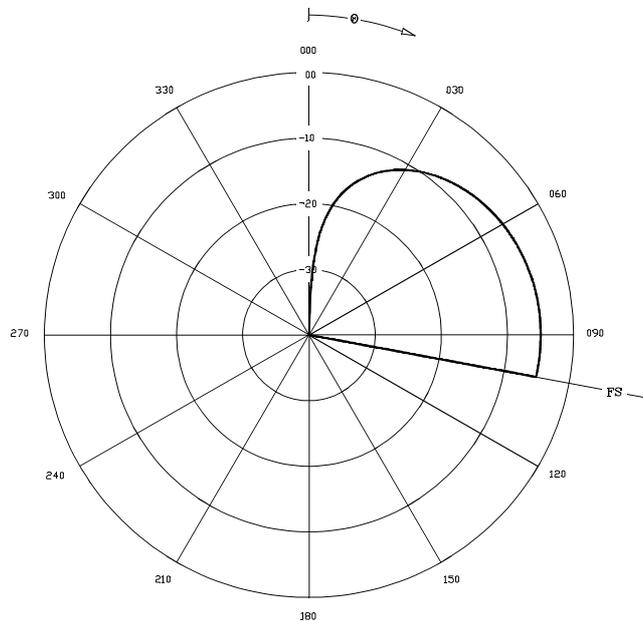


Fig.-2.11 Componente **E-theta**, del campo directo para la configuración de la figura 2.10(a)

Por otro lado, el diagrama de radiación del campo directo en zona lejana para la configuración 2.10(b) para un barrido para $\theta \in [0, 180]$ es el siguiente.

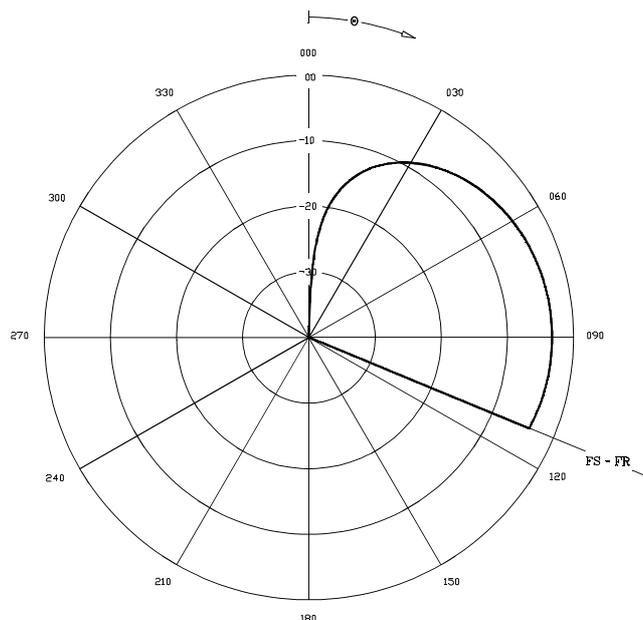


Fig.-2.12 Componente **E-theta**, del campo directo para la configuración de la figura 2.10(b)

En ambos casos, se observa la desaparición del campo directo a consecuencia de la ocultación producida por la geometría soporte, tal y como predice la GO.

■ DESCRIPCIÓN MEDIANTE GO DE CAMPO REFLEJADO

La expresión que describe el tratamiento de la reflexión se muestra a continuación.

$$\vec{E}^r(\mathbf{p}) = E^r(Q_r) \left(\frac{\rho_1^r \rho_2^r}{(\rho_1^r + s^r)(\rho_2^r + s^r)} \right)^{1/2} e^{-jks^r} \quad (2.25)$$

Siendo \mathbf{p} el punto de observación y Q_r el punto de reflexión. La interpretación en este caso de cada uno de los términos es :

$$\vec{E}^r(Q_r) = \vec{E}^i(Q_r) \bar{\bar{R}}$$

- Valor del campo reflejado sobre el punto de reflexión, Q_r . Se calcula como el producto entre el campo incidente calculado en Q_r y la matriz de los coeficientes de reflexión $\bar{\bar{R}}$.

$$e^{-jks^r}$$

- Término que expresa la variación de fase a lo largo de la trayectoria que describe el rayo a partir del punto de reflexión.

$$\left(\frac{\rho_1^r \rho_2^r}{(\rho_1^r + s^r)(\rho_2^r + s^r)} \right)^{1/2}$$

- Factor que expresa la variación de la amplitud del campo después de la reflexión. Ahora los valores ρ_1^r y ρ_2^r , son los radios de curvatura del frente de onda reflejado y dependen del frente de onda incidente y de las curvaturas principales que presente la superficie en el punto de reflexión.

Para la aplicación de la matriz de reflexión $\overline{\overline{R}}$, es preciso descomponer el campo incidente en sus componentes paralela y perpendicular al plano de incidencia en el punto de reflexión. A continuación se muestran los vectores unitarios asociados a cada uno de los planos.

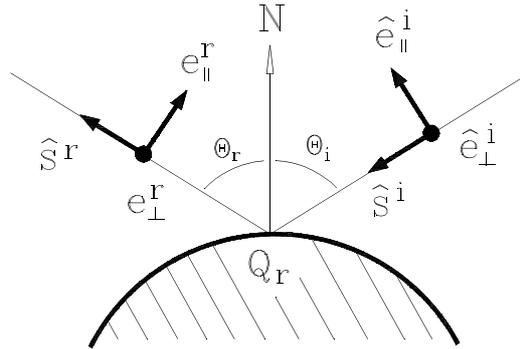


Fig.-2.13 Plano de incidencia y vectores unitarios de polarización en la reflexión.

El plano de incidencia queda definido por la dirección de incidencia y la normal a la superficie en el punto de intersección, de este modo los vectores unitarios involucrados en la descomposición del campo incidente y reflejado, presentan las siguientes relaciones:

$$\hat{e}_{\perp}^i \times \hat{s}^i = \hat{e}_{\parallel}^i \quad (2.26)$$

$$\hat{e}_{\perp}^r \times \hat{s}^r = \hat{e}_{\parallel}^r \quad (2.27)$$

Una vez definidos los vectores unitarios de polarización, el campo incidente y reflejado podrá ser expresado del siguiente modo:

$$\vec{E}^i = \hat{e}_{\parallel}^i E_{\parallel}^i + \hat{e}_{\perp}^i E_{\perp}^i \quad (2.28)$$

$$\vec{E}^r = \hat{e}_{\parallel}^r E_{\parallel}^r + \hat{e}_{\perp}^r E_{\perp}^r \quad (2.29)$$

A las componentes paralela y perpendicular del campo incidente se les aplica la matriz de reflexión, definida por los coeficientes $R_h = 1$ y $R_s = -1$, como se muestra a continuación:

$$\begin{pmatrix} E_{\parallel}^r \\ E_{\perp}^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_h & 0 \\ 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\parallel}^i \\ E_{\perp}^i \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

Para la obtención del factor de variación de amplitud del campo reflejado, es necesario calcular los radios de curvatura del frente de onda reflejado, cuyas expresiones son:

$$\frac{1}{\rho_1^r} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\rho_1^i} + \frac{1}{\rho_2^i} \right] + \frac{1}{f_1} \quad (2.31)$$

$$\frac{1}{\rho_2^r} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\rho_1^i} + \frac{1}{\rho_2^i} \right] + \frac{1}{f_2} \quad (2.32)$$

En donde ρ_1^i y ρ_2^i , son los principales radios de curvatura del frente de onda incidente, con f_1 y f_2 definidas por:

$$\begin{aligned} \frac{1}{f_{1(2)}} &= \frac{\cos \theta_i}{|\theta|^2} \left(\frac{\cos^2 \theta_{22}^2 + \theta_{12}^2}{R_1} + \frac{\theta_{21}^2 + \theta_{11}^2}{R_2} \right) \\ &\left\{ \left(\frac{1}{\rho_1^i} - \frac{1}{\rho_2^i} \right)^2 + \left(\frac{1}{\rho_1^i} - \frac{1}{\rho_2^i} \right) \frac{4 \cos \theta_i}{|\theta|^2} \left(\frac{\theta_{22}^2 - \theta_{12}^2}{R_1} + \frac{\theta_{21}^2 - \theta_{11}^2}{R_2} \right) \right. \\ &\left. + \frac{4 \cos^2 \theta_i}{|\theta|^4} \left[\left(\frac{\theta_{22}^2 + \theta_{12}^2}{R_1} + \frac{\theta_{21}^2 + \theta_{11}^2}{R_2} \right) - \frac{4 |\theta|^2}{R_1 R_2} \right] \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Siendo θ_i , el ángulo formado entre la dirección de incidencia y la normal a la superficie

en el punto de reflexión. Mientras que los términos $\theta_{j,k}$, son obtenidos a partir de los vectores unitarios \hat{u}_1 y \hat{u}_2 , tangentes a la superficie en el punto de reflexión contenidos en cada uno de los planos principales, y de las direcciones principales del frente de onda incidente \hat{X}_1^i , \hat{X}_2^i . Estos vectores son mostrados a continuación para un punto de reflexión arbitrario sobre una superficie curvada.

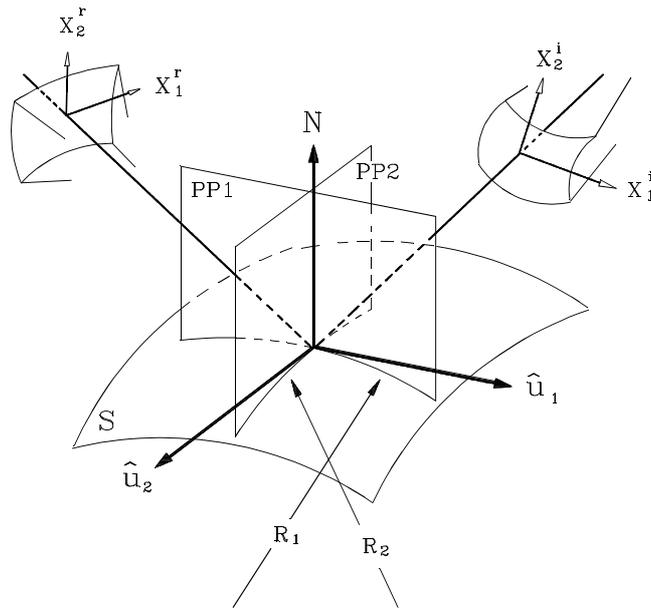


Fig.-2.14 Parámetros geométricos asociados a la reflexión.

Siendo la expresión que calcula los términos $\theta_{j,k}$, la que se muestra a continuación.

$$[\theta] = \begin{bmatrix} \hat{X}_1^i \hat{u}_1 & \hat{X}_1^i \hat{u}_2 \\ \hat{X}_2^i \hat{u}_1 & \hat{X}_2^i \hat{u}_2 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Esta formulación definida para una simple reflexión es aplicable al cálculo de una doble reflexión, mediante la aplicación reiterada de las expresiones anteriores. En este caso el rayo reflejado llevará asociado el frente de onda reflejado que podrá ser considerado como incidente sobre la siguiente superficie dispersora.

El análisis individualizado del campo reflejado para las configuraciones geométricas mostradas en la figura 2.10, es mostrado a continuación mediante dos diagramas de radiación, para campo lejano y para un barrido de $\theta \in [0, 180]$.

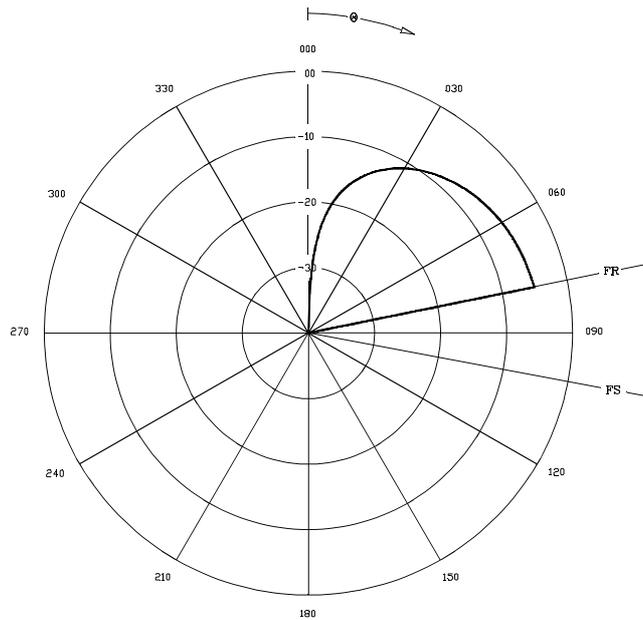


Fig.-2.15 Componente **E-theta**, del campo reflejado para la configuración 2.10(a).

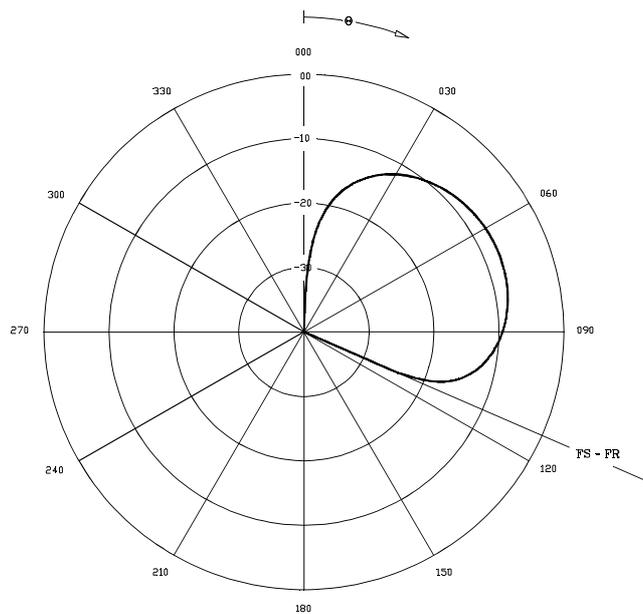


Fig.-2.16 Componente **E-theta**, del campo reflejado para la configuración de la figura 2.10(b).

Los resultados anteriores sumados con los resultados correspondientes al campo directo, se corresponden con el campo predicho por la Óptica Geométrica, sin embargo, presentan determinados fallos que son descritos a continuación.

■ FALLOS DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN GO

- Hemos supuesto que la densidad de potencia por unidad de área se conserva; esta ley de la conservación de la energía puede aplicarse para cualquier sección transversal del tubo de rayos, salvo en las cústicas debido a que aquí la sección transversal es nula y por lo tanto el campo tiende a infinito. Cuando se pretende calcular el campo en estas regiones, debe emplearse un método alternativo que resuelva satisfactoriamente la concentración de campo existente en dichas regiones. Es común encontrarse soluciones basadas en integraciones para estas situaciones.
- En la región de sombra el campo obtenido por la GO es nulo.
- Los campos definidos hasta el momento sólo son capaces de predecir el campo electromagnético en la región iluminada, presentando saltos cuando se atraviesan las fronteras de reflexión y de sombra.

Las figuras mostradas a continuación, presentan los diagramas de radiación obtenidos como la suma de las contribuciones del campo directo y reflejado, en ellos pueden ser observados con claridad las limitaciones que tiene la GO.

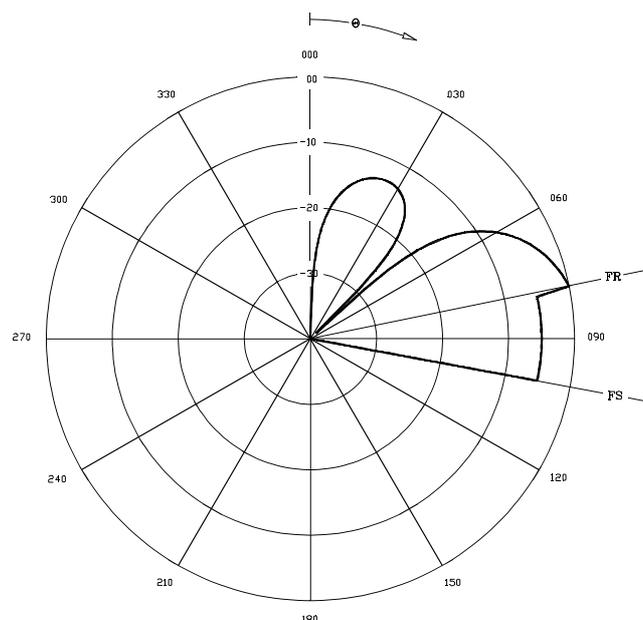


Fig.-2.17 Componente **E-theta**, del campo resultante (*Directo + Reflejado*), para la configuración de la figura 2.10(a).

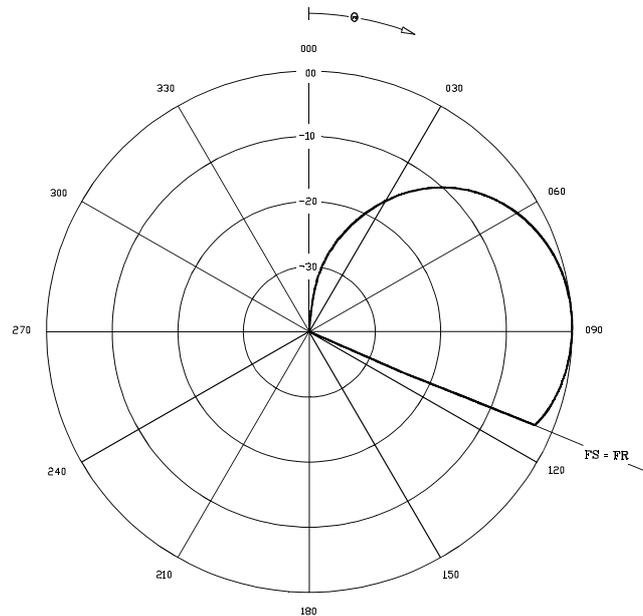


Fig.-2.18 Componente **E-theta**, del campo resultante (*Directo + Reflejado*), para la configuración de la figura 2.10(b).

■ DESCRIPCIÓN MEDIANTE UTD DEL CAMPO DIFRACTADO EN ARISTAS

La discontinuidad en la suma de los campos de GO para el caso de la configuración 2.10(a), es resuelta con la introducción del efecto de la difracción en aristas. Este tipo de contribución propuesta inicialmente por la Teoría Geométrica de la Difracción [13] y perfeccionada por la UTD [5], se produce en aquellas regiones de la superficie de la geometría que presentan discontinuidades en el vector normal.

La expresión que describe el tratamiento de la difracción tiene una estructura similar a la de los efectos anteriores, como se muestra a continuación.

$$\vec{E}^d(\mathbf{p}) = \vec{E}^d(Q_d) \left(\frac{\rho^d}{(\rho^d + s^d) s^d} \right)^{1/2} e^{-jks^d} \quad (2.35)$$

Siendo \mathbf{p} el punto de observación y Q_d el punto de difracción. La interpretación en este caso de cada uno de los términos es :

$\vec{E}^d(Q_d) = \vec{E}^i(Q_d) \overline{\overline{D}}$ - Término que representa el valor del campo difractado sobre el punto de difracción, Q_d . Se obtiene como el producto del campo incidente calculado en Q_d y la matriz de los coeficientes de difracción $\overline{\overline{D}}$.

e^{-jks^d} - Término que expresa la variación de fase a lo largo de la trayectoria que describe el rayo a partir del punto de difracción.

$\left(\frac{\rho^d}{(\rho^d + s^d) s^d} \right)^{1/2}$ - Factor que expresa la variación de la amplitud del campo después de la difracción. En donde ahora el valor ρ^d denota la distancia entre cústicas del rayo difractado y dependen del frente de onda incidente y de las características geométricas de la arista en el punto de difracción.

En la siguiente figura se muestran los parámetros geométricos asociados a la arista, que deben ser calculados sobre el punto de difracción para el análisis del campo difractado.

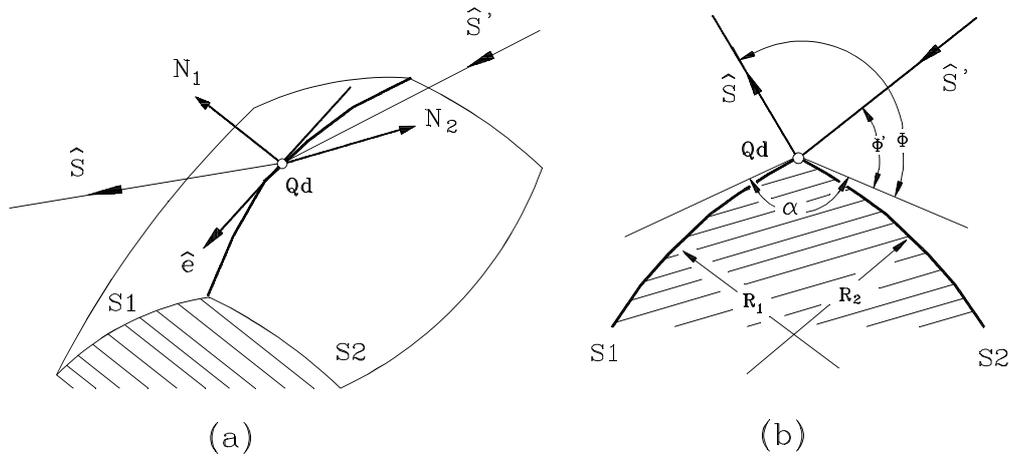


Fig.- 2.19 Parámetros geométricos asociados con la difracción.

En donde \hat{e} , es el vector tangente a la arista y N_1 , N_2 , son los vectores normales a cada una de las caras de la arista, todos ellos calculados en el punto Q_d de difracción. Por otro lado, en la sección transversal de la arista, figura 2.19(b), se muestran los radios de curvatura R_1 y R_2 , de cada una de las superficies, así como el ángulo de apertura de la arista α , medido entre los planos tangentes a cada una de las caras en el punto de difracción. Este parámetro, determina el numero de arista n , mediante la igualdad:

$$\alpha = (2 - n) \pi \tag{2.36}$$

Para la aplicación de la matriz de difracción $\overline{\overline{D}}$, es preciso descomponer el campo incidente sobre un sistema de coordenadas asociado a la arista y cuyos vectores unitarios de polarización son definidos del siguiente modo:

$$\hat{\Phi}' = \frac{-\hat{e} \times \hat{s}'}{|\hat{e} \times \hat{s}'|} \tag{2.37}$$

$$\hat{\beta}'_0 = \hat{\Phi}' \times \hat{s}' \tag{2.38}$$

$$\hat{\Phi} = \frac{\hat{e} \times \hat{s}}{|\hat{e} \times \hat{s}|} \tag{2.39}$$

$$\hat{\beta}_0 = \hat{\Phi} \times \hat{s} \tag{2.40}$$

Estos vectores se muestran a continuación, junto con otra serie de parámetros obtenidos sobre la arista que serán utilizados en la formulación posterior.

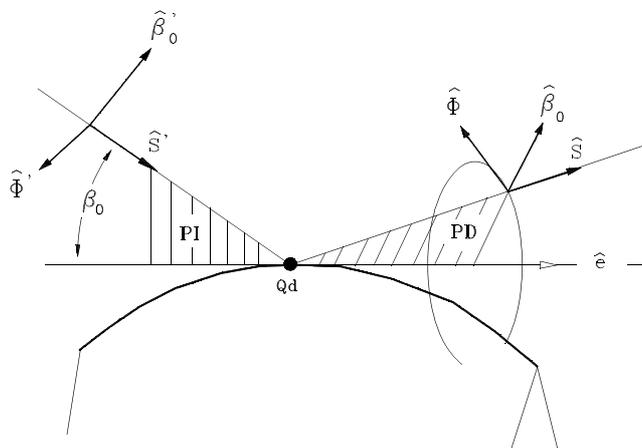


Fig.- 2.20 Vectores unitarios de polarización asociados con la difracción en aristas.

El rayo incidente denotado por \hat{S}' , genera un cono de rayos difractados, que tiene por eje el vector \hat{e} y como vértice el punto Q_d . El plano de incidencia **PI** queda establecido por los vectores \hat{S}' y \hat{e} , mientras que el plano de difracción dependiente de la dirección de observación estará fijado por \hat{S} y \hat{e} . Una vez definidos los vectores unitarios de polarización $(\hat{s}', \hat{\beta}'_0, \hat{\phi}'_0)$ para el campo incidente y $(\hat{s}, \hat{\beta}_0, \hat{\phi}_0)$ para el campo difractado, el campo incidente pueden ser expresado del siguiente modo:

$$\vec{E}^i = \hat{\beta}'_0 E_{\beta'_0}^i + \hat{\phi}'_0 E_{\phi'_0}^i \quad (2.41)$$

$$\vec{E}^d = \hat{\beta}_0 E_{\beta_0}^d + \hat{\phi}_0 E_{\phi_0}^d \quad (2.42)$$

Y el producto matricial:

$$\begin{pmatrix} E_{\beta_0}^d \\ E_{\phi_0}^d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -D_s & 0 \\ 0 & -D_h \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\beta'_0}^i(Q_d) \\ E_{\phi'_0}^i(Q_d) \end{pmatrix} \quad (2.43)$$

Siendo D_s y D_h , los coeficiente de difracción dependientes de una serie de parámetros que serán descritos a continuación.

$$D_{s,h} = (L^i, L^{ro}, L^m, \varphi, \varphi', \beta_0, n) = D_1 + D_2 \mp (D_3 + D_4) \quad (2.44)$$

Con D_1, D_2, D_3, D_4 definidos por:

$$D_1 = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \operatorname{sen}\beta_0} \cot \left[\frac{\pi + (\varphi - \varphi')}{2n} \right] F [kL^i a^+(\varphi - \varphi')] \quad (2.45)$$

$$D_2 = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \operatorname{sen}\beta_0} \cot \left[\frac{\pi - (\varphi - \varphi')}{2n} \right] F [kL^i a^-(\varphi - \varphi')] \quad (2.46)$$

$$D_3 = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \operatorname{sen}\beta_0} \cot \left[\frac{\pi + (\varphi + \varphi')}{2n} \right] F [kL^m a^+(\varphi + \varphi')] \quad (2.47)$$

$$D_4 = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k} \operatorname{sen}\beta_0} \cot \left[\frac{\pi - (\varphi + \varphi')}{2n} \right] F [kL^{ro} a^-(\varphi + \varphi')] \quad (2.48)$$

En donde los términos L^i, L^m, L^{ro} , denominados parámetros de distancia, son dependientes del ángulo de incidencia β_0 , de las distancias de incidencia $|\vec{S}'|$, y de observación $|\vec{S}|$, así como de los frentes de onda incidentes y reflejados, para cada una de las caras de la arista [1].

Por otro lado, F representa la función de transición, que tiene por argumentos a los parámetros de distancia y a la función $a^\pm(\varphi \pm \varphi')$, definida por:

$$a^\pm(\beta^\pm) = 2 \cos^2 \left(\frac{2n\pi N^\pm - \beta^\pm}{2} \right) \quad (2.49)$$

Siendo $\beta^\pm = (\varphi \pm \varphi')$ y en donde N^\pm , es el entero mas cercano que cumple la siguiente expresión.

$$2n\pi N^+ - \beta^+ = +\pi \quad (2.50)$$

$$2n\pi N^- - \beta^- = -\pi \quad (2.51)$$

El resultado del campo difractado, obtenido para la configuración 2.10(a), se muestra a continuación, en la figura 2.21.

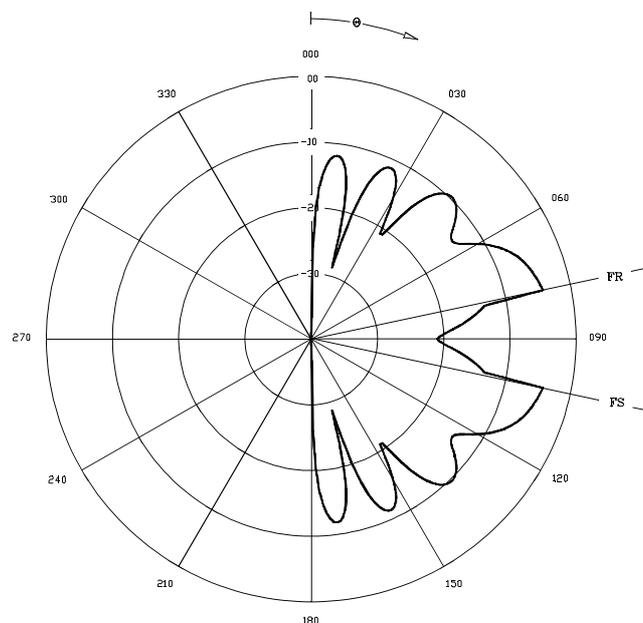


Fig.-2.21 Componente **E-theta**, del campo difractado para la configuración de la figura 2.10(a).

En este caso, el campo difractado es producto de la interacción del campo difractado por las dos arista del la placa plana, atravesadas por el corte analizado. En la misma figura puede ser observado el comportamiento del campo difractado en las direcciones correspondientes a las fronteras de sombra y reflexión, así como en el margen angular que separa a ambas.

El resultado anterior debe ser sumado al obtenido por la Óptica Geométrica y representado en la figura 2.17, con el fin de obtener un diagrama resultante producto de la

superposición del campo directo, campo reflejado y campo difractado en aristas. Este diagrama final es mostrado a continuación en la figura 2.22.

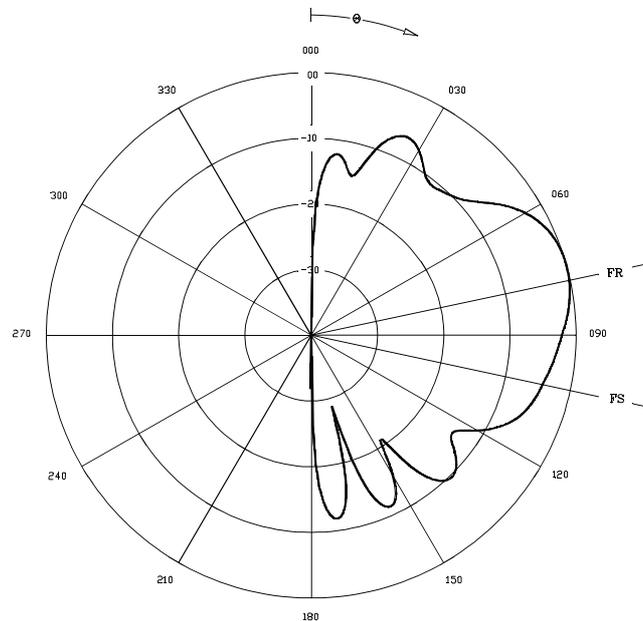


Fig.-2.22 Componente **E-theta**, del campo resultante (*Directo + Reflejado + difractado en aristas*), para la configuración de la figura 2.10(a).

La formulación definida para una simple difracción, puede ser aplicada en el cálculo de una doble difracción o en el cálculo de un efecto doble mixto, mediante la utilización de las expresiones anteriores, en cada una de las etapas que el rayo describe en su doble interacción con la geometría.

■ DESCRIPCION MEDIANTE UTD DEL CAMPO DIFRACTADO POR SUPERFICIES

Los apartados anteriores han descrito los efectos que mediante superposición han completado el diagrama de radiación, de la configuración 2.10(a), sin embargo, en este caso se

retomará el diagrama de la figura 2.16; para establecer un nuevo efecto difractor de características diferentes al anterior, a consecuencia de que la región de la geometría en que se produce presenta propiedades diferentes.

Este tipo de efecto puede ser entendido claramente como una continuación del campo reflejado cuando este desaparece, y su última contribución ha sido debida a la reflexión en una región de la superficie continua y convexa. Debido a esta relación, la formulación aplicada al efecto de la difracción en superficies propone la modificación de los coeficientes de reflexión R_h , R_s , por otros R'_h , R'_s , que describiremos a continuación y que deberán ser aplicados de igual forma sobre el campo incidente. Las expresiones para ambos coeficientes [1][6]:

$$= - \left[\sqrt{-\frac{4}{\zeta^L}} e^{-j \frac{(\zeta^L)^3}{12}} \left(\frac{e^{-j(\pi/4)}}{2\sqrt{\pi\zeta^L}} [1 - F(X^L)] + \hat{P}_{s,h}(\zeta) \right) \right] \quad (2.52)$$

Siendo $F(X^L)$, la función de transición cuyo argumento en este caso se calcula mediante la expresión:

$$X^L = 2kL^L \cos^2 \theta^i \quad (2.53)$$

En donde L^L es el parámetro de distancia y θ^i el ángulo de incidencia. Por otro lado, el término ζ^L denominado parámetro de Fock, tiene por expresión:

$$\zeta^L = -2m(Q_R)[f(Q_R)]^{-1/3} \cos \theta^i \quad (2.54)$$

En donde $m(Q_r)$, es un parámetro dependiente de la curvatura de la superficie en el punto de reflexión y medida en el plano de incidencia, denotada por $\rho_g(Q_r)$. Por otro lado, $f(Q_r)$ es dependiente de los radios de curvatura principales, así como del ángulo de incidencia.

La función $\hat{P}_{s,h}$, es la función de Pekeris y puede ser definida en términos de las funciones de Fock p^* y q^* , tal y como se describe a continuación [14].

$$\hat{P}_{s,h}(\zeta^L) = \begin{Bmatrix} p^*(\zeta^L) \\ q^*(\zeta^L) \end{Bmatrix} e^{-j(\pi/4)} - \frac{e^{-j(\pi/4)}}{2\sqrt{\pi}\zeta^L} \quad (2.55)$$

Este tipo de coeficientes, deberán ser aplicados en el tratamiento de la reflexión en superficies convexas, y sus valores en regiones alejadas de la frontera de sombra se aproxima a los coeficientes propuestos por la Óptica Geométrica. En dichas regiones el ángulo de incidencia: $\theta^i \rightarrow 0$ y por lo tanto: $\cos \theta^i \rightarrow 1$, esto nos lleva a realizar las siguientes aproximaciones:

$$\hat{P}_{s,h}(\zeta^L) \approx \pm \left(\frac{-\zeta^L}{4} \right)^{1/2} e^{j(\zeta^L)^3/12} \quad (2.56)$$

$$[1 - F(X^L)] \approx 0 \quad (2.57)$$

Y siendo aplicadas estas expresiones en (2.52), entonces puede deducirse:

$$\begin{aligned} R_s' \rightarrow R_s &= -1 \\ R_h' \rightarrow R_h &= +1 \end{aligned} \quad (2.58)$$

Una vez sobrepasada la frontera de sombra, comienza la continua emisión de rayos

difractados por el rayo que se propaga por la superficie. Este tipo de radiación es mostrado a continuación para una geometría arbitraria. El efecto, como puede observarse, se genera a partir del rayo que incide tangencialmente a la superficie curva en un punto Q_1 , y comienza a propagarse por la superficie sobre una trayectoria geodesia, a la vez que emite rayos difractados con direcciones emergentes y siempre tangentes a la curva geodesia.

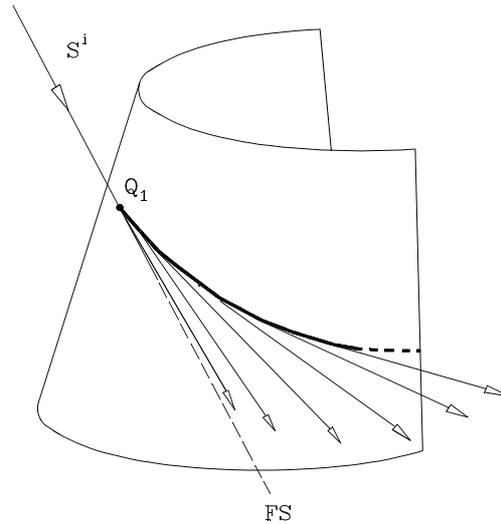


Fig.- 2.23 Difracción producida por la propagación de la onda de superficie.

Si tomamos uno de los puntos para el cual un rayo difractado despegue de la superficie, la expresión que describe el tratamiento de la difracción debida a una onda de superficie es:

$$\vec{E}^d(p) = \vec{E}^d(Q_2) \left(\frac{\rho_2^d}{s^d (\rho_2^d + s^d)} \right)^{1/2} e^{-jk s^d} \quad (2.59)$$

Siendo p el punto de observación y Q_2 el punto en el que el rayo difractado despegue de la superficie de la geometría. La interpretación en este caso de cada uno de los términos es [6]:

$$\vec{E}^d(Q_2) = \vec{E}^i(Q_1) \bar{\bar{T}}$$

- Término que representa el valor del campo difractado sobre el punto de difracción Q_2 . Este campo es obtenido como el producto del campo incidente, calculado sobre un punto Q_1 de la superficie, en el que el rayo incidente es tangente a la superficie y la matriz de los coeficientes de difracción para superficies $\bar{\bar{T}}$.

$$e^{-jk_s^d}$$

- Término que expresa la variación de fase a lo largo de la trayectoria que describe el rayo a partir del punto de difracción Q_2 .

$$\left(\frac{\rho_2^d}{s^d (\rho_2^d + s^d)} \right)^{1/2}$$

- Factor que expresa la variación de la amplitud del campo después de la difracción. En donde ρ_2^d , es la distancia entre cústicas del rayo difractado y dependen del frente de onda incidente y de las características geométricas de la superficie por la que se propaga.

En este caso, el cálculo del campo radiado por la onda de superficie involucra a dos puntos de la superficie Q_1 y Q_2 , sobre los que es preciso definir vectores unitarios de polarización. Estos vectores son obtenidos a partir de las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \hat{b}_1 &= \hat{t}_1 \times \hat{n}_1 & \text{en } Q_1 \\ \hat{b}_2 &= \hat{t}_2 \times \hat{n}_2 & \text{en } Q_2 \end{aligned} \tag{2.60}$$

En donde \hat{n}_1 , \hat{n}_2 , \hat{t}_1 y \hat{t}_2 , denotan los vectores normales y tangentes a la superficie en los puntos Q_1 y Q_2 , respectivamente. Estos vectores son mostrados a continuación.

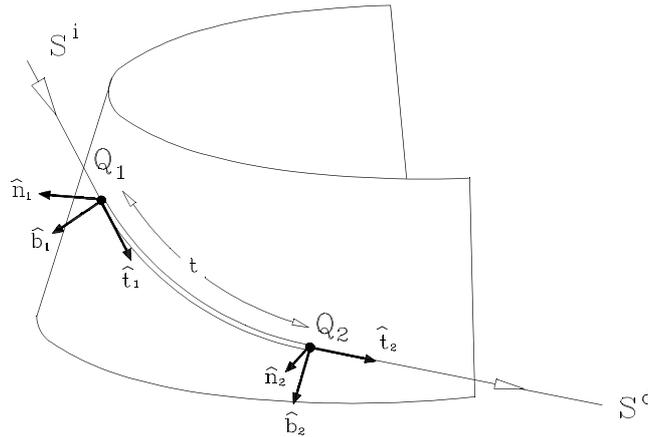


Fig.- 2.24 Vectores de polarización asociados con la difracción en superficie.

Una vez fijados los puntos sobre la superficie y conocidos los vectores de polarización, al igual que en efectos anteriores, serán aplicados sobre el campo incidente los coeficientes de difracción en superficies convexas, que tiene por expresión:

$$\overline{Q_1} m(Q_2) \sqrt{\frac{2}{k} \left(\frac{e^{-j(\pi/4)}}{2\sqrt{\pi\zeta^d}} [1 - F(X^d)] + \hat{P}_{s,h}(\zeta^d) \right)} \sqrt{\frac{\zeta}{\zeta}} \quad (2.61)$$

El parámetro de Fock tiene por expresión, para este tipo de efecto:

$$\zeta^d = \int_{Q1}^{Q2} dt' \frac{m(t')}{\rho_g(t')} \quad (2.62)$$

En donde $t = \int_{Q1}^{Q2} dt'$, es la longitud del arco recorrida por el rayo sobre la superficie,

interviniendo también en el cálculo del siguiente factor:

$$\sqrt{\frac{d\eta(Q_1)}{d\eta(Q_2)}} = \sqrt{\frac{s^i}{s^i + t}} \quad (2.63)$$

Por otro lado, el argumento de la función de transición viene definido por:

$$X^d = \frac{KL^d (\zeta^d)^2}{2 m(Q_1) m(Q_2)} \quad (2.64)$$

Siendo L^d , el parámetro de distancia.

El campo reflejado, obtenido mediante la aplicación de los coeficientes de reflexión propuestos por la UTD, sumado a la contribución debida a la difracción por superficie para la configuración de la figura 2.6(b), es mostrado a continuación en la figura 2.25.

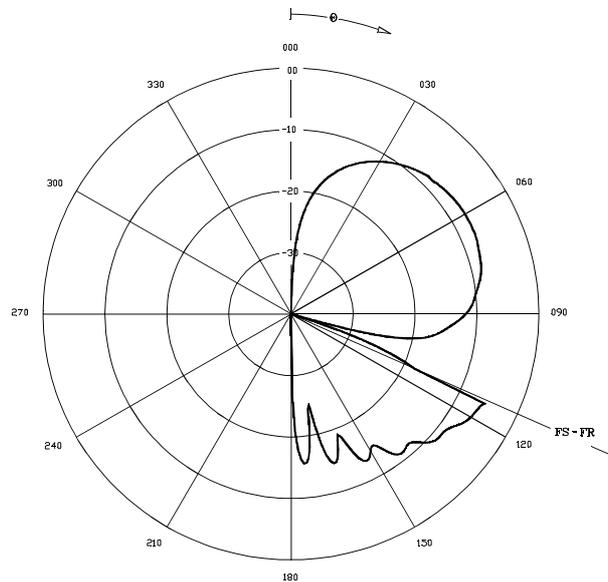


Fig.-2.25 Componente **E-theta**, del campo resultante (*Reflejado + Difractado en superficie*) para la configuración de la figura 2.10(b).

El resultado anterior es sumado al campo directo, para obtener el diagrama resultante de la superposición del campo directo, reflejado y difractado en superficie. Este diagrama final es

mostrado a continuación en la figura 2.26.

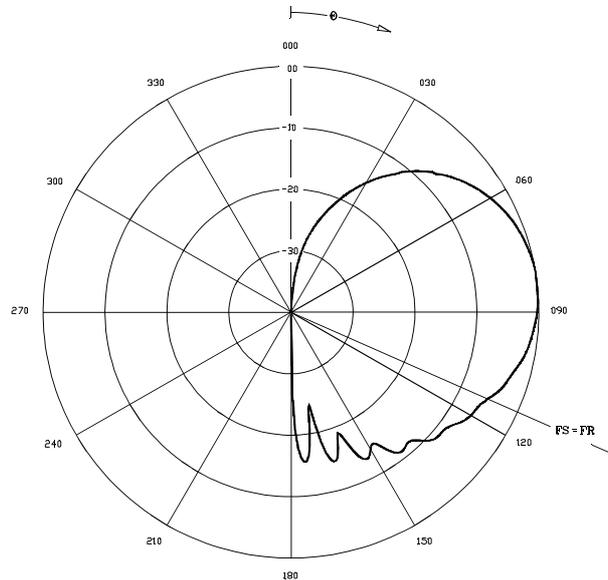


Fig.-2.26 Componente **E-theta**, del campo resultante (*Directo + Reflejado + Difractado en superficie*), para la configuración de la figura 2.10(b).

Ha sido realizada una introducción del tipo de formulación empleada por este método en cada uno de los efectos, como puede observarse la construcción es común y sólo a través de las matrices $\bar{\bar{R}}$, $\bar{\bar{D}}$ y $\bar{\bar{T}}$, son introducidos los efectos en el campo resultante como superposición de todos ellos. Esta uniformidad hace que el método sea fácilmente programable desde un punto de vista electromagnético. Por otro lado, el mayor esfuerzo computacional se debe al cálculo de los puntos de dispersión que sobre la geometría es preciso calcular, para cada dirección de análisis y para cada efecto. La complejidad, es aun mayor, por el hecho de considerar geometrías arbitrarias, puesto que en este caso es preciso recurrir a métodos iterativos de búsqueda de puntos de dispersión, con lo que el tiempo de cálculo aumenta.

Habiendo llegado a este punto, debe notarse, que un problema es el cálculo electromagnético y otro bien distinto es el tratamiento de la geometría durante la simulación. Estas dos partes del proceso global están entrelazadas, claro está; sin embargo, pueden identificarse claramente dentro del proceso. El tratamiento electromagnético, estará relacionado al hecho de aplicar expresiones puramente electromagnéticas cuando el punto dispersor haya sido calculado; y el tratamiento geométrico, lo estará con la aplicación de criterios de selección y algoritmos numéricos de minimización con el fin de calcular el punto dispersor.

REFERENCIAS

- [1] D. A. McNamara, C. W. I. Pistorius, J. A. G. Malherbe, " Introduction to the uniform geometrical theory of diffraction ", Artech House. 1990.
- [2] J. Casas " Optica ". 1985.
- [3] R.K. Luneberg. " Mathematical Theory of Optics " Brown University Notes. Rhode Island. 1944.
- [4] M. Kline. " An Asymptotic Solution of Maxwell's Equations ". Comm. Pure Appl. Math. Vol. 4 pp 225-262. 1951.
- [5] R.G.Kouyoumjian, P.H.Pathak. "A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a perfectly Conducting Surface". Proc. IEEE, November, 1974, pp. 1448-1461.
- [6] P.H.Pathak, W.D.Burnside, R.J.Marhefka. " A Uniform GTD analysis of the Diffraction of Electromagnetic Waves by a Smooth Convex Surface". IEEE Trans. on Ant. and Prop. Vol. AP-28, No. 5, September 1980, pp. 631-642.
- [7] R. H. Clarke, J. Brown, "Diffraction Theory and Antennas". John Wiley & Sons. 1980.
- [8] P.H. Pathak. " Introduction to HF techniques for EM Scattering Analysis ". The Ohio State University. Electroscience Lab. Columbus, Ohio, USA. 1990.
- [9] C. A. Balanis, " Advanced Engineering Electromagnetics", John Wiley & Sons. 1989.
- [10] Graeme L. James. "Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves". IEE Electromagnetic Waves Series 1. 1986.
- [11] W.L. Stutzman, G.A. Thiele. " Antenna Theory and Design ". John Wiley & Sons. 1981
- [12] V.A. Borovikov, B. Ye. Kinber. " Geometrical Theory of Diffraction". The Institution of Electrical Engineers. IEE. 1994.
- [13] J.B. Keller. "Geometrical Theory of Diffraction". Journal of the Optical Society of America. February 1962.

- [14] P.H. Pathak "An asymptotic analysis of the scattering of plane waves by a smooth convex cylinder". *Radio Sci.* vol 14, pp. 419-435, May-June 1979.

MODELADO GEOMETRICO

3.1 INTRODUCCION

En la descripción y visualización de un objeto resulta evidente la importancia de escoger un buen sistema de representación en tres dimensiones, que facilite al diseñador el poder añadir o suprimir objetos y modificar superficies con un mínimo esfuerzo. De esta parte del diseño se encargan diferentes y variados programas gráficos, que facilitan el manejo y la visualización de objetos tridimensionales mediante potentes ordenadores. En la actualidad, todos ellos se engloban dentro de lo que se llama CAGD (Computer Aided Geometric Design).

Para que un modelo geométrico tridimensional pueda ser manipulado con facilidad; los datos almacenados deben ser :

- Datos de tipo geométrico que permiten fijar en el espacio aquellas entidades que describan el objeto, bien sean polígonos planos, triángulos, cilindros, esferas, superficies paramétricas, etc.
- Datos de tipo topológico que almacenan las relaciones existentes entre las entidades que forman el objeto real.
- Por último, existen una serie de datos auxiliares que dependen de las aplicaciones que se quiera dar al modelo diseñado.

Existen diferentes softwares gráficos en el mercado, capaces de manipular con gran efectividad modelos tridimensionales. Además, en la mayoría de los casos tienen la capacidad de comunicarse a través de ficheros con formato standard (IGES, DXF, etc.) y por lo tanto un mismo objeto puede ser representado en todos ellos a partir de un único fichero. Sin embargo, cada uno de los programas gráficos manejan otro tipo de ficheros propios, con mayor cantidad de información y de los que se pueden obtener datos de tipo geométrico, de tipo topológico y otros complementarios, que pueden servir para la creación del fichero de geometría final necesario para la simulación electromagnética. Ha de entenderse que la información que precisamos para la creación de ese fichero, no se debe alejar mucho de la base de datos que el programa gráfico maneja para la representación y tratamiento visual del objeto; sin embargo, cualidades como el color, escalado, tipo de vista, tipo de sombreado y otras relacionadas con la visualización, deben ser desechadas con el fin de reducir el fichero de geometría lo máximo posible [1][2].

3.2 TIPOS DE MODELADO GEOMETRICO

La etapa de modelización geométrica de la estructura que se pretende analizar, es de gran importancia, debido a que las expresiones electromagnéticas empleadas están ligadas, en todo momento, a las propiedades geométricas de los diferentes puntos de dispersión que sobre la estructura del objeto se producen. Durante la simulación electromagnética, la búsqueda con exactitud de los puntos de dispersión repercute aumentando en el tiempo de cálculo y por ello el análisis secuencial de las interacciones rayo-geometría debe ser eficiente y lo más preciso posible. La relación tan estrecha de la geometría con el método aplicado, supone que cuanto mayor sea la complejidad del tratamiento de la descripción del modelo, mayor será el esfuerzo global del código para obtener un resultado final satisfactorio y por lo tanto, los tiempos de cálculo deben ser tenidos en cuenta en todo momento.

Por lo tanto, el problema a resolver es: dado un sólido tridimensional multiforme, es decir, constituido por secciones o cuerpos diferenciados en contacto; obtener una descripción lo mas sencilla y manejable posible de la superficie; sin alejarse de la superficie real. Este problema, como ya se ha indicado anteriormente, le corresponde resolverlo a los programas utilizados en la etapa de modelización; sin embargo, el diseñador deberá decidir que tipo de entidades deberán configurar la superficie del modelo, ya que la mayoría de los programas de diseño pueden modelar un objeto tridimensional mediante: un facetado triangular, un facetado o parcheado mediante polígonos planos, utilizar superficies regulares, superficies de revolución, superficies regladas, o algún tipo de superficies paramétricas. Esta decisión repercute de manera decisiva en el proceso global, ya que el enfoque del tratamiento geométricos depende del tipo de modelado

escogido.

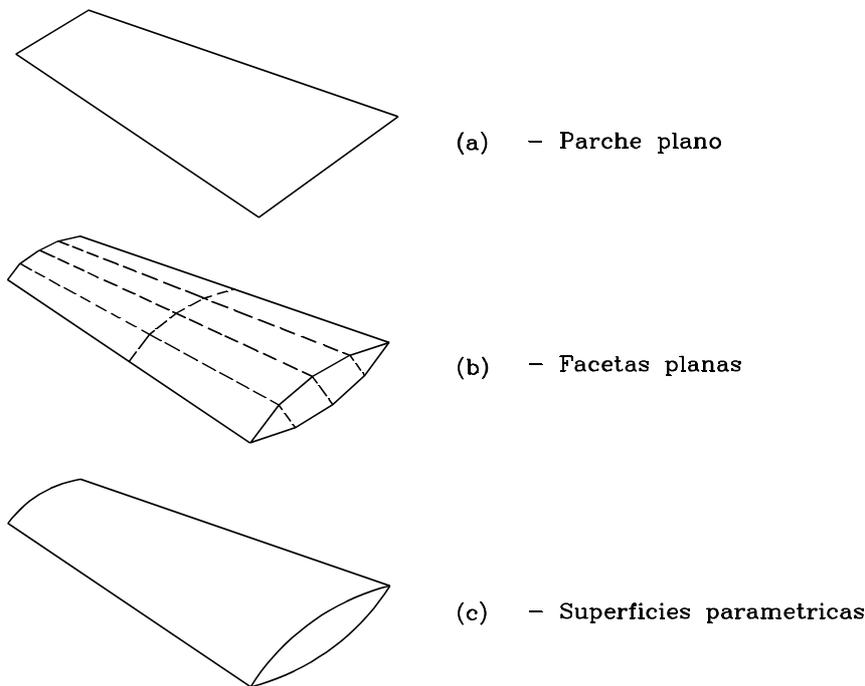


Fig.-3.1 Diferentes tipos de modelado aplicados sobre el ala de una avión.

En capítulos anteriores se han presentado modelizaciones de aviones empleando geometrías canónicas y parches planos, este tipo de modelización limita en gran medida la aproximación del modelo al objeto real; sin embargo, su descripción y tratamiento es sencilla por lo que los tiempo de cálculo son realmente reducidos.

En general, esta solución es válida siempre y cuando el análisis se realice sobre estructuras de baja complejidad. Este tipo de solución aplicada de manera rigurosa sobre un perfil de ala común es representada en la figura 3.1.a, como puede observarse la reducción del modelo es excesiva. Cuando mediante este tipo de modelado se pretende describir estructuras mas complejas, hay que recurrir a la discretización de la superficie mediante la unión de facetas planas. La figura 3.1.b muestra la discretización observándose la aparición de aristas irreales, representadas mediante líneas discontinuas, producto de la fragmentación de la superficie curvada.

En este caso, el campo total es calculado a partir del campo reflejado por cada una de las facetas iluminadas, sumado al campo difractado por las aristas rectilíneas originadas por la unión de dos facetas. Los inconvenientes de este método son numerosos: en ocasiones la ocultación de una de las facetas puede no ser completa, por lo que es preciso calcular mediante complejos

algoritmos la región iluminada; las aristas generadas por el facetado de una superficie curva no son reales, y aunque el campo difractado de las mismas compensa la discontinuidad en el campo reflejado, los resultados no son los más adecuados; el tratamiento de una superficie arbitraria compleja conlleva una discretización elevada de la superficie y los requerimientos de memoria se disparan. Por otro lado, este tipo de modelados no permiten el cálculo del efecto de la onda de superficie de manera directa, sino que es preciso sustituir el modelo facetado por otro, lo que produce un trastorno considerable a la hora de realizar una simulación completa. Toda esta problemática puede reducirse con el empleo de una modelización única, que resuelva satisfactoriamente los problemas anteriores y que además ofrezca un almacenamiento reducido.

Esta tesis propone el empleo de superficies paramétricas como elementos discretizadores de la superficie real de la estructura (fig.-3.1.c). Las características de este tipo de superficies permiten el ensamblado de unas con otras de forma continua, desapareciendo los problemas de aristas irreales comentados anteriormente para otros tipos de modelado. Por otro lado, las superficies paramétricas permiten obtener una descripción geométrica muy próxima al objeto real y por lo tanto, podremos emplear una única modelización para cualquier tipo de análisis de la antena sobre la estructura; es decir, independizamos los resultados del modelo empleado. En resumen, esta modelización permite abordar geometrías arbitrarias lejanas a cualquier forma canónica con bajos requerimientos de memoria.

3.3 INTRODUCCION A LAS SUPERFICIES PARAMETRICAS

Comenzar a trabajar con superficies paramétricas supone ampliar el concepto del espacio en el que una superficie convencional se desarrolla. Ahora, además de un espacio tridimensional cartesiano, hemos de añadir un espacio paramétrico de gran utilidad en la manipulación de la superficie. Una superficie paramétrica puede entenderse como el lugar geométrico de los puntos que pueden moverse a lo largo de E_3 con dos grados de libertad.

El elemento más simple utilizado para modelar es una región de superficie delimitada por curvas frontera; a este elemento de superficie se le denomina parche [2][3]. El vector de posición de un punto cualquiera definido sobre la superficie viene dado por la expresión:

$$\vec{r} = \vec{r}(u, v) \quad (3.1)$$

Siendo u y v las variables paramétricas independientes. El vector de posición puede expresarse para cada una de las componentes cartesianas rectangulares del siguiente modo:

$$\begin{aligned}
 x &= x(u, v) \\
 y &= y(u, v) \\
 z &= z(u, v)
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

La representación gráfica de cada una de las expresiones anteriores se muestra en la figura 3.2. Las coordenadas espaciales x , y y z , son representadas respecto del espacio paramétrico bidimensional definido por sus coordenadas u y v , acotadas por el intervalo $[0, 1]$.

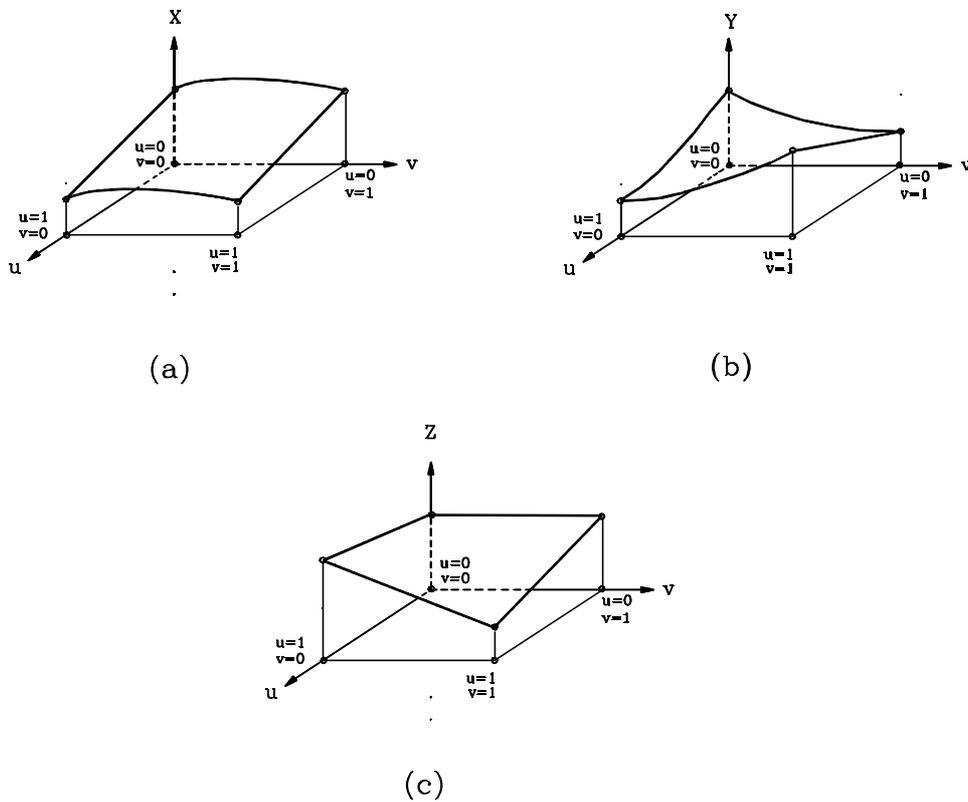


Fig.-3.2 Representación de las coordenadas X, Y y Z respecto al espacio paramétrico.

La construcción de la superficie paramétrica mediante la combinación de las tres coordenadas espaciales para el espacio paramétrico común, se muestra en la siguiente figura.

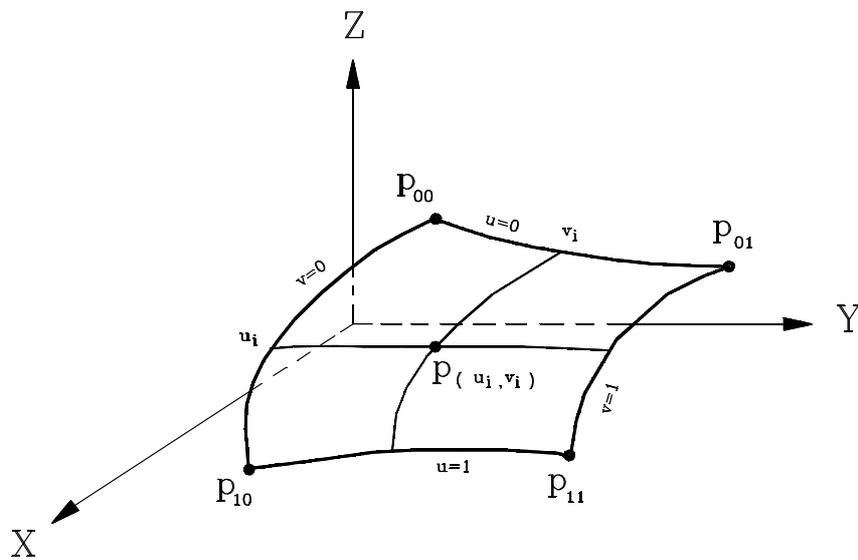


Fig.-3.3 Superficie paramétrica.

En la figura 3.3 se muestran los vértices del parche denotados por P_{00} , P_{10} , P_{11} y P_{01} . Cuando se fija una de las coordenadas paramétricas y hacemos variar dentro del intervalo paramétrico la otra, la sucesión de puntos que se obtienen sobre el parche describen una curva denominada curva paramétrica. Dependiendo de la coordenada paramétrica fijada tendremos curvas a $u = cte.$ y curvas a $v = cte.$.

En la figura anterior se muestran ambas curvas para un valor arbitrario y como su intersección define un punto sobre la superficie, denotado por $P(u_i, v_i)$. Por otro lado las curvas frontera que delimitan la superficie, se obtienen igualando una de las coordenadas paramétricas al extremo del intervalo y haciendo variar la otra a lo largo del mismo.

La correspondencia entre los infinitos puntos que describen la superficie y el espacio paramétrico puede verse en la siguiente figura, en donde se muestra el espacio paramétrico asociado y la interpretación de las curvas paramétricas definidas anteriormente.

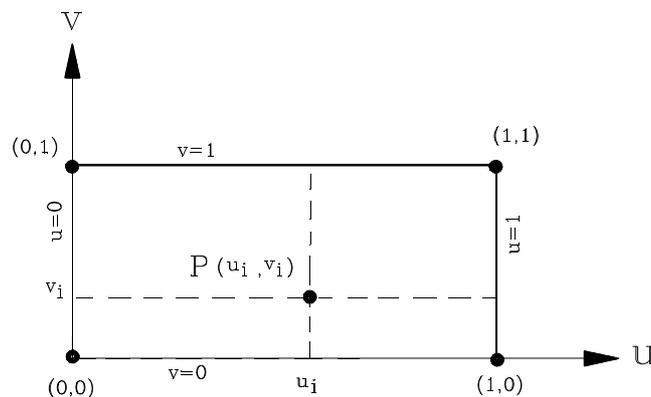


Fig.-3.4 Espacio paramétrico.

La correspondencia del espacio paramétrico y el espacio tridimensional cartesiano viene determinado por las expresiones (3.2), mediante determinadas funciones que caracterizan el tipo de superficies paramétricas empleadas. Estas funciones pueden ser de diferentes tipos y es deseable que sean uniformes y continuas, para facilitar su tratamiento matemático.

Entre las ventajas de la descripción paramétrica se encuentran :

- ▶ Los puntos sobre la superficie pueden ser calculados rápidamente mediante la fijación de sus coordenadas paramétricas.
- ▶ Los ejes de referencia pueden sufrir transformaciones sin necesidad de modificar las funciones de los parámetros empleados.
- ▶ La superficie paramétrica puede ser ajustada de forma sencilla mediante una parametrización adecuada.
- ▶ Este tipo de descripción favorece la construcción de superficies arbitrarias complejas mediante la unión de sucesivas superficies paramétricas, siendo éste un procedimiento común en el diseño geométrico computacional.
- ▶ La manipulación numérica de este tipo de descripción es sencilla y por lo tanto fácil de ser programada.

3.4 CONCEPTOS FUNDAMENTALES SOBRE SUPERFICIES NURBS (Non

Uniform Rational B-Spline).

En la descripción de la estructura que soporta la antena, han sido empleados los NURBS. Este tipo de superficies pertenecen al grupo de las superficies paramétricas y su descripción tridimensional viene determinada por dos variables paramétricas. Por otro lado, los NURBS utilizan técnicas interpolatorias para aproximarse al contorno superficial del objeto modelado [4].

En este capítulo se pretende realizar una descripción fundamental de este tipo de superficies y un repaso general a sus características; para ello es conveniente comenzar la descripción por otro tipo de curvas y superficies mas sencillas, como son las curvas y superficies de Bézier. Esta descripción gradual, además de ayudar a comprender lo que es un NURBS, nos servirá para introducirnos en el tratamiento que el código realiza sobre estas superficies, debido a que las superficies NURBS son descompuestas en superficies de Bezier durante la simulación y por lo tanto el termino superficie, o parche de Bezier, será utilizado con frecuencia.

Una superficie B-Spline, se obtiene mediante el barrido de una curva B-Spline para cada una de las dos coordenadas paramétricas. De igual modo ocurre con las superficies de Bezier y las curvas de Bezier, por lo tanto es preciso comenzar por la descripción de una curva de Bezier.

3.4.1 CURVAS DE BEZIER

Una curva de Bezier de grado n , es una curva que interpola a $n+1$ puntos del espacio $P_i(x, y, z)$, por medio de una función polinómica de orden n [2][5][6]. Las bases mas comúnmente empleadas con este tipo de curvas son los polinomios de Bernstein, dada su gran estabilidad numérica.

El grado de curva puede llegar a ser intratable cuando se intenta modelar formas complicadas y por ello en estos casos se emplean curvas de tipo polinómico segmentario, lo que significa construir a base de segmentos sencillos unidos entre si, que son mas fáciles de manejar.

La expresión matemática de una curva de Bezier no racional viene dada por :

$$\vec{r}(t) = \sum_{i=0}^n \vec{P}_i B_i^n(t) \quad (3.3)$$

Siendo t la coordenada paramétrica de la curva $\vec{r}(t)$ perteneciente al intervalo $[0, 1]$, n el grado de la curva, \vec{P}_i los vértices del polígono o puntos de control y B^n_i los polinomios de Bernstein, que representan una función de mezcla o ponderación y cuya definición se muestra a continuación :

$$B^n_i(t) = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i} \quad (3.4)$$

A continuación en la figura 3.5 se muestran diferentes tipos de curvas de Bezier.

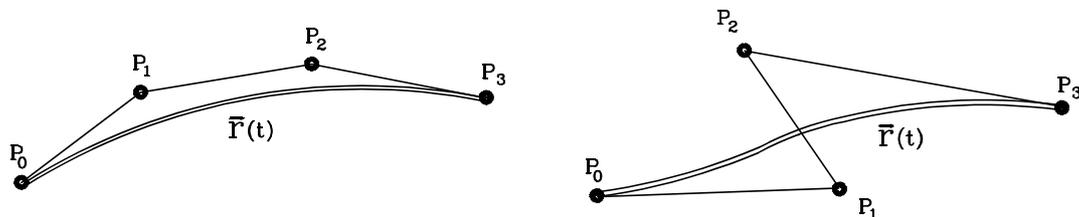


Fig.-3.5 Curvas de Bezier

Entre las principales propiedades de las curvas de Bezier se encuentran :

- ▶ La curva de Bezier pasa por el punto inicial \vec{P}_0 y el punto final \vec{P}_n . Por los demás puntos, en general, no pasa.
- ▶ La curva es tangente a los lados del polígono en sus puntos extremos.
- ▶ Cada punto de control ejerce una influencia sobre un tramo de curva próxima al mismo, proporcional al coeficiente B^n_i correspondiente. En la figura 3.6 se muestra la influencia de la modificación de uno de los puntos de control sobre la curva.

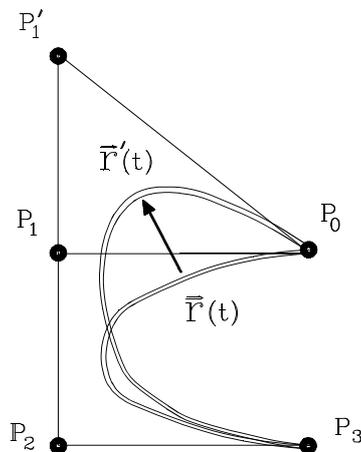


Fig.-3.6 Modificación en los puntos de control en una curva de Bezier.

- ▶ La curva es independiente del sistema de coordenadas empleado.
- ▶ La formulación paramétrica de la curva permite la construcción de curvas cerradas y de curvas que se cortan.
- ▶ La curva esta contenida en la envolvente convexa del polígono de control.

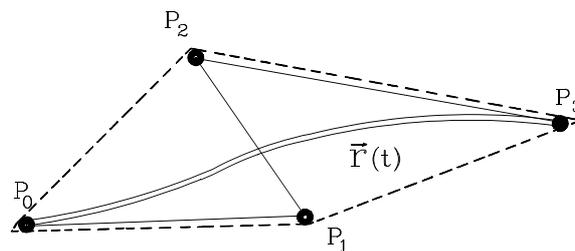


Fig.-3.7 Envolvente poligonal convexa (línea discontinua).

- ▶ El control de la curva es global, por lo que un cambio en alguno de sus puntos de control repercute en toda la curva.
- ▶ Las curvas de Bezier son siempre derivables

- ▶ La multiplicidad de un determinado punto de control provoca un acercamiento de la curva a ese punto de control.

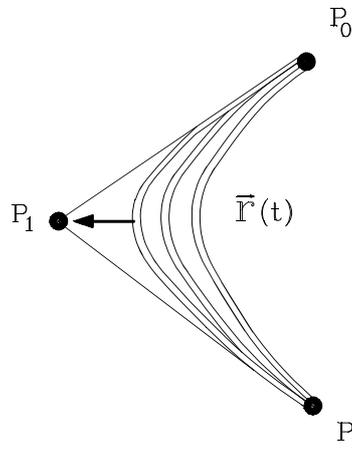


Fig.-3.8 Efecto de la multiplicidad de un punto de control.

- ▶ En la unión entre dos curvas de Bezier pueden darse fundamentalmente los siguientes casos :

a.- La unión entre las curvas presenta continuidad de orden 0, lo que obliga únicamente a que el punto final de la curva 1 y el punto inicial de la curva 2 coincidan, como se muestra en la figura 3.9.

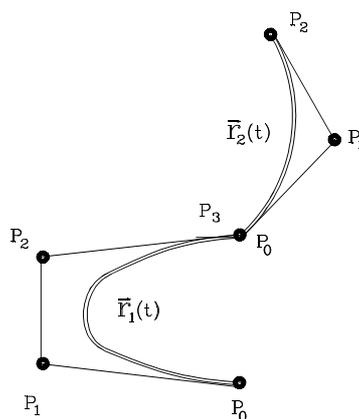


Fig.-3.9 Unión de curvas de Bezier con continuidad 0.

b.- La unión entre las curvas presenta continuidad de orden 1, en este caso, además de coincidir, los tramos del polígono de control final $\overline{P_2P_3}$ de la curva 1 e inicial $\overline{P_0P_1}$ de la curva 2, deben estar alineados, tal y como se muestra en la figura 3.10.

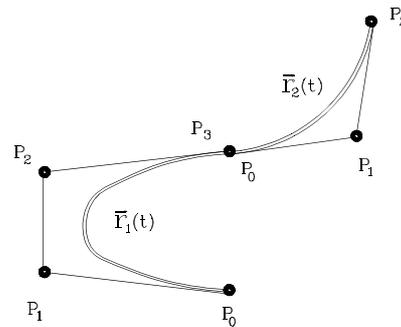


Fig.-3.10 Unión de curvas de Bezier con continuidad 1.

Este tipo de curvas de Bezier no racionales (pesos=1), deben entenderse como un caso particular de las racionales [4]. La expresión que describe las curvas de Bezier racionales se muestra a continuación :

$$\vec{r}(t) = \frac{\sum_{i=0}^n \vec{P}_i w_i B^n_i(t)}{\sum_{i=0}^n w_i B^n_i(t)} \tag{3.5}$$

En este caso los coeficientes que ponderarán a cada punto de control suman la unidad y vienen dados por :

$$\frac{w_i}{\sum_{i=0}^n w_i B^n_i(t)} \tag{3.6}$$

En donde w_i son los pesos asociados a los puntos de control. La racionalización de las curvas presenta como ventaja el incremento de la flexibilidad, al contar con un mayor grado de libertad, y por lo tanto pueden ajustarse mejor a formas complejas.

3.4.2 CURVAS B-SPLINE

Una curva B-Spline racional de grado n , está formada por segmentos de curvas de Bezier racionales de grado n , con la particularidad de que en los puntos de unión entre los segmentos se verifican condiciones de continuidad de las derivadas hasta el orden $n-1$ [2][5][6]. La curva B-Spline racional se define a través de su grado, los puntos de control, los pesos asociados y por una partición en forma de intervalos sobre la dimensión paramétrica. La división del espacio paramétrico genera una serie de valores u_i para la coordenada paramétrica, denominados nudos, que son almacenados en el vector de nudos. La siguiente figura muestra una partición de coordenada paramétrica, en donde cada uno de los intervalos $[u_i, u_{i+1}]$ se corresponden con segmentos de la curva polinómica.

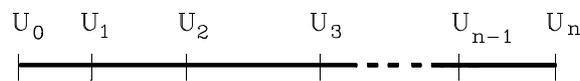


Fig.-3.11 Intervalos paramétricos.

Esta partición se aplica sobre el denominado parámetro global y por ello si se desea evaluar un determinado punto para un determinado valor del parámetro global u , es preciso determinar a que intervalo pertenece e introducir una coordenada de carácter local t , con lo que podremos trabajar en el segmento polinómico de Bezier correspondiente [4]. La expresión que define esa coordenada local es la siguiente :

$$t = \frac{u - u_i}{u_{i+1} - u_i} \tag{3.7}$$

La expresión que define una curva B-Spline racional es la siguiente :

$$\vec{r}(u) = \frac{\sum_{i=0}^{L+n-1} \vec{P}_i w_i N_i^n(u)}{\sum_{i=0}^{L+n-1} w_i N_i^n(u)} \tag{3.8}$$

Siendo t la coordenada paramétrica de la curva $\vec{r}(t)$ perteneciente al intervalo $[0, 1]$, n el grado de la curva, L función del número de puntos de control, \vec{P}_i los vértices del polígono o puntos de control, y N_i^n las Bases B-Spline. En este caso a diferencia de las curvas de Bezier, las funciones mezcla están definidas por las bases B-Spline, cuya expresión matemática es la siguiente:

$$N_i^n(u) = \frac{(u - u_i) N_i^{n-1}(u)}{u_{i+n-1} - u_i} + \frac{(u_{i+n} - u) N_{i+1}^{n-1}(u)}{u_{i+n} - u_{i+1}} \quad (3.9)$$

$$N_i^1(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3.10)$$

El comportamiento numérico de este tipo de bases es más problemático que el de las bases de Bernstein, debido fundamentalmente a que contienen diferencias en los cocientes que pueden provocar, para valores próximos al parámetro, inestabilidades numéricas difíciles de tratar. Por ello es recomendable realizar la conversión a formato Bezier y trabajar directamente durante el tratamiento geométrico con las bases de Bernstein.

Las curvas B-Spline presentan las siguientes propiedades comunes a las curvas de Bezier :

- ▶ La curva B-Spline pasa por el punto inicial \vec{P}_0 y el punto final \vec{P}_n . Por los demás puntos, en general, no pasa.
- ▶ La curva es tangente a los lados del polígono en sus puntos extremos.
- ▶ La curva es independiente del sistema de coordenadas empleado.
- ▶ La formulación paramétrica de la curva permite la construcción de curvas cerradas y de curvas que se cortan.
- ▶ La curva está contenida en la envolvente convexa del polígono de control.

Además, se pueden añadir las siguientes propiedades :

- ▶ El control de la curva es local, por lo que un cambio en alguno de sus puntos de control repercute en una región determinada de la curva.
- ▶ Las bases B-Spline permiten cambiar el orden de la curva sin cambiar el número de vértices del polígono de control.
- ▶ Si el orden de la curva es igual al número de vértices del polígono de control, entonces el B-Spline es idéntico a la curva de Bezier correspondiente.

3.4.3 SUPERFICIES DE BEZIER

Una vez introducidas las curvas de Bezier, es sencillo comprender que las superficies racionales de Bezier se generan a partir de un barrido bidimensional de curvas racionales de Bezier [2][5]. Para ello añadiremos una nueva coordenada paramétrica y el polígono de control \vec{P}_i se convertirá en una malla poligonal cuyos nudos serán los puntos de control de la superficie. La expresión matemática de una superficie racional de Bezier es :

$$\vec{r}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \vec{P}_{i,j} w_{i,j} B_i^m(u) B_j^n(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{i,j} B_i^m(u) B_j^n(v)} \tag{3.11}$$

En donde u y v son las dos coordenadas paramétricas con sus grados correspondientes m y n , $w_{i,j}$ son los pesos asociados a los puntos de control $\vec{P}_{i,j}$, y los términos B_i^m y B_j^n las bases de Bernstein. A continuación se muestra una superficie de Bezier con la correspondiente malla de puntos de control poligonal.

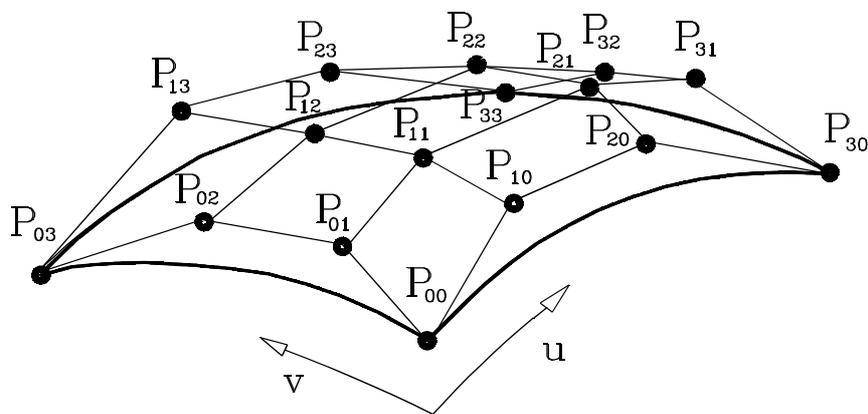


Fig.-3.12 Superficie de Bezier.

Las superficies racionales de Bezier, lógicamente heredan las propiedades fundamentales de las curvas racionales que la forman y por ello caben destacar las siguientes:

- ▶ Las cuatro curvas frontera de la superficie son curvas de Bezier, cuyos puntos de control son los cuatro lados de la malla de puntos de control de la superficie. En

la figura anterior serían los puntos $P_{00} P_{10} P_{20} P_{30}$ para $v = 0$,
 $P_{03} P_{13} P_{23} P_{33}$ para $v = 1$, $P_{00} P_{01} P_{02} P_{03}$ para $u = 0$ y
 $P_{30} P_{31} P_{32} P_{33}$ para $u = 1$.

- ▶ La superficie esta contenida en la envolvente convexa de los puntos de control.
- ▶ La superficie es invariante ante transformaciones afines de las coordenadas paramétricas o transformaciones afines de los puntos de control.
- ▶ La superficie es derivable respecto a las coordenadas paramétricas en todos sus puntos.

Como ya se ha comentado, el tratamiento geométrico se realiza sobre este tipo de superficies, y durante la simulación es preciso calcular parámetros de la superficie en determinados puntos de la misma, debido a que la formulación electromagnética requiere este tipo de parámetros para calcular los diferentes tipos de efectos dispersores. A continuación se realizará un repaso a las expresiones que calculan los parámetros geométricos fundamentales para un punto de coordenadas genéricas (u, v) sobre una superficie de Bezier [2][5].

■ *Coordenadas espaciales de un punto sobre la superficie :*

Una vez conocidas las coordenadas paramétricas el punto será calculado a través de la expresión (3.11)

■ *Vector normal a la superficie :*

La expresión del vector normal viene dada en función de las derivadas paramétricas como se muestra a continuación :

$$\vec{n}(u, v) = \frac{\vec{r}^u \times \vec{r}^v}{|\vec{r}^u \times \vec{r}^v|} \quad (3.12)$$

Con $\vec{r}^u = \frac{\partial \vec{r}(u,v)}{\partial u}$ y $\vec{r}^v = \frac{\partial \vec{r}(u,v)}{\partial v}$.

La siguiente figura muestra el vector normal para una superficie de Bezier.

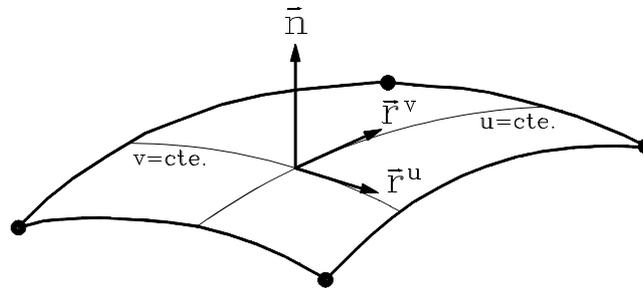


Fig.-3.13 Vector normal sobre una superficie de Bezier.

■ *Curvatura de la superficie y direcciones principales :*

La curvatura ρ_g es calculada a partir de los valores extremos o curvaturas principales k_1 y k_2 del siguiente modo :

$$\rho_g(u, v) = k_1 \cos^2 \alpha + k_2 \sin^2 \alpha \tag{3.13}$$

La siguiente figura muestra la curvatura de una superficie para un plano π , así como las direcciones principales definidas por los planos φ_1 y φ_2 , que son aquellas en las que la curvatura toma valores extremos, es decir, estarán asociadas a los valores k_1 y k_2 . Por otro lado el ángulo α es el formado por el plano π y el plano principal φ_1 asociado a k_1 .

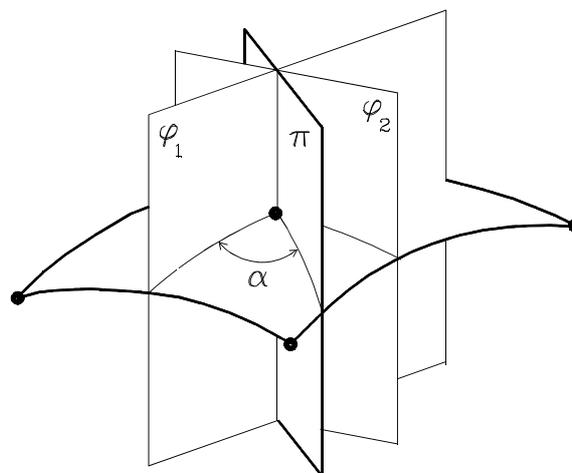


Fig.-3.14 Curvaturas sobre una superficie de Bezier.

Los valores k_1 y k_2 son obtenidos a partir de :

$$k_1 k_2 = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \quad k_1 + k_2 = \frac{NE + GL - 2FM}{EG + F^2} \quad (3.14)$$

Donde :

$$\begin{aligned} E &= \vec{r}^u \cdot \vec{r}^u & F &= \vec{r}^u \cdot \vec{r}^v & G &= \vec{r}^v \cdot \vec{r}^v \\ L &= \vec{r}^{uu} \cdot \vec{n} & M &= \vec{r}^{uv} \cdot \vec{n} & N &= \vec{r}^{vv} \cdot \vec{n} \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\text{con } \vec{r}^{uu} = \frac{\partial^2 \vec{r}(u,v)}{\partial u \partial u}, \quad \vec{r}^{vv} = \frac{\partial^2 \vec{r}(u,v)}{\partial v \partial v} \quad \text{y} \quad \vec{r}^{uv} = \frac{\partial^2 \vec{r}(u,v)}{\partial u \partial v} .$$

3.4.4 SUPERFICIES NURBS

Al igual que las superficies de Bezier, las superficies racionales B-Spline deben entenderse como un barrido bidimensional de curvas racionales B-Spline [2][5][7]. Este tipo de superficies permiten modelar superficies arbitrarias con un número de datos reducido. Cuando lo que se modela es una superficie compleja se recurre al facetado mediante este tipo de superficies, con lo que se garantiza un grado razonable para cada uno de los parches NURBS que describen la superficie. Si atendemos a las curvaturas que presenta una superficie NURBS y a sus curvas frontera, los parches NURBS pueden agruparse en : parches poligonales planos, parches planos con contornos curvos, parches simple curvos y parches doble curvos.

La expresión matemática de una superficie NURBS viene dada por:

$$\vec{r}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^{L1+m-1} \sum_{j=0}^{L2+n-1} \vec{P}_{i,j} w_{i,j} N_i^m(u) N_j^n(v)}{\sum_{i=0}^{L1+m-1} \sum_{j=0}^{L2+n-1} w_{i,j} N_i^m(u) N_j^n(v)} \quad (3.16)$$

En donde u y v son las dos coordenadas paramétricas con sus grados correspondientes m y n , $w_{i,j}$ son los pesos asociados a los puntos de control $\vec{P}_{i,j}$, y los términos N_i^m y N_j^n las bases B-Spline.

Las superficies NURBS, heredan las propiedades fundamentales de las curvas racionales B-Spline que la forman y por ello caben destacar las siguientes :

- ▶ Las cuatro curvas frontera de la superficie son curvas NURBS, cuyos puntos de control son los cuatro lados de la malla de puntos de control de la superficie.
- ▶ La superficie está contenida en la envolvente convexa de los puntos de control.
- ▶ La superficie es invariante ante transformaciones afines de las coordenadas paramétricas o transformaciones afines de los puntos de control.

Realizar el tratamiento geométrico directamente sobre las superficie NURBS, supone trabajar con las bases B-Spline con un volumen de datos reducido, sin embargo este formato implica calcular cocientes de diferencias que en algunos casos pueden ser críticos y provocar importantes inestabilidades numéricas, por lo que es preferible aplicar la conversión a formato Bezier dado el comportamiento mas estable de las bases de Bersntein, a cambio de aumentar los requerimientos de memoria [4][8].

Para la descomposición de una superficie NURBS en superficies de Bezier, se aplica el algoritmo de Cox-De Boor [9], que consiste en la inserción de nudos en una curva NURBS, con el fin de obtener que cada uno de los nudos tengan multiplicidad igual al grado. Esta operación de inserción repercute en el hecho de que ahora los puntos de control de la curva B-Spline son también los puntos de control de una de las curvas de Bezier resultante. De este modo, aplicando el algoritmo se obtiene un conjunto de curvas de Bezier a partir de una curva B-Spline.

3.5 CARACTERISTICAS DEL FICHERO DE GEOMETRIA UTILIZADO

La información contenida en el fichero de entrada de la geometría de un programa de análisis electromagnético, es de carácter numérico. Su contenido debe ser lo más extenso posible, pero manteniendo un volumen de datos reducido. Esta característica se puede conseguir mediante la definición de la superficie por parches NURBS, los cuales requieren poca información para su descripción. Por ello una estructura compleja puede ser almacenada cómodamente en un fichero de tamaño reducido. Además de la propia definición de los parches NURBS que describen la superficie, la información se puede complementar con otro tipo de datos dirigidos a facilitar el tratamiento de los parches NURBS y su catalogación, tanto geométrica como electromagnética.

La información principal radica en la descripción de los diferentes parches NURBS que modelan la superficie de la estructura; en la siguiente figura se muestra la superficie de un avión común, modelado por una determinada distribución de parches NURBS.

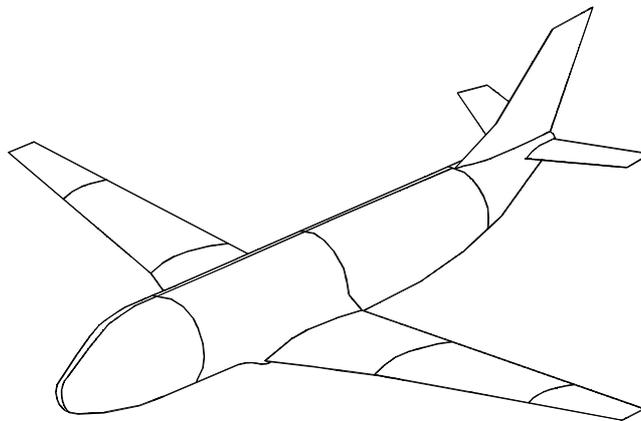


Fig.-3.15 Avión modelado mediante superficies NURBS.

La representación mostrada no es la única válida y dependerá del grado de exactitud con el que se pretenda describir la superficie real de la estructura. Tanto la distribución de los parches como sus grados pueden ser modificados, sin embargo en todo momento es preciso encontrar un compromiso entre el modelo y la estructura, pensado en el tipo de aplicación en que será utilizado ese modelo. Hay que tener en cuenta que un modelado excesivamente detallado puede presentar problemas a la hora de obtener buenos resultados, al igual que un modelo demasiado reducido.

En ocasiones la interpretación de la geometría real y su parcheado en superficies, puede provenir de un determinado software y por lo tanto la manipulación de la modelización es complicada, puesto que los criterios vienen dados por el propio software. En este caso, es preciso recurrir a técnicas interactivas que permitan modificar aquellos aspectos de la modelización que no satisfagan nuestros requerimientos. Por otro lado, si la etapa de modelización permite definir el parcheado y sus características, este debe hacerse con cierta previsión con respecto a la técnica de análisis electromagnética que va a ser empleada, por ello el diseñador del modelo debería tener presente determinados criterios de carácter electromagnético a la hora de modelar.

Cada superficie NURBS estará asociada a su índice de aparición dentro del fichero y en cada definición aparecerán los siguientes datos : las coordenadas espaciales de los puntos de control, sus pesos asociados, los ordenes para cada coordenada paramétrica, vector de nudos, forma de la superficie, y datos que contemplan la racionalidad y periodicidad de la superficie así como del material de que esta compuesta. Por otro lado, las curvas de contorno que son las regiones en las que los parches adyacentes están unidos, se describen de forma similar para facilitar su tratamiento. Como ejemplo se muestra a continuación una de las superficies que forman el ala del avión de la figura 3.15.

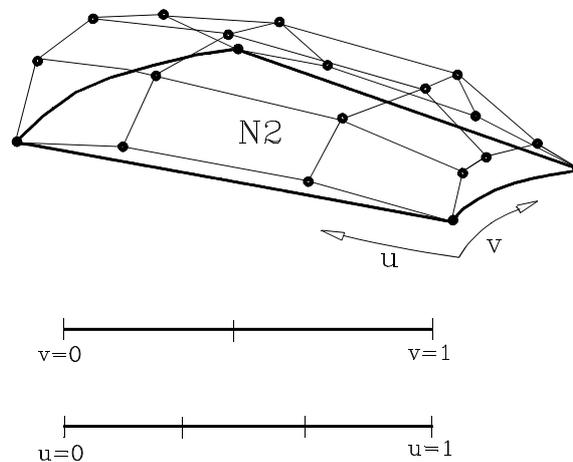


Fig.-3.16 Parche NURBS.

La ordenación secuencial de las superficies favorece la agrupación de las mismas, mediante la asignación a cada una de ellas de un índice de cuerpo. Una división en diferentes cuerpos para un avión, se muestra en la siguiente figura.

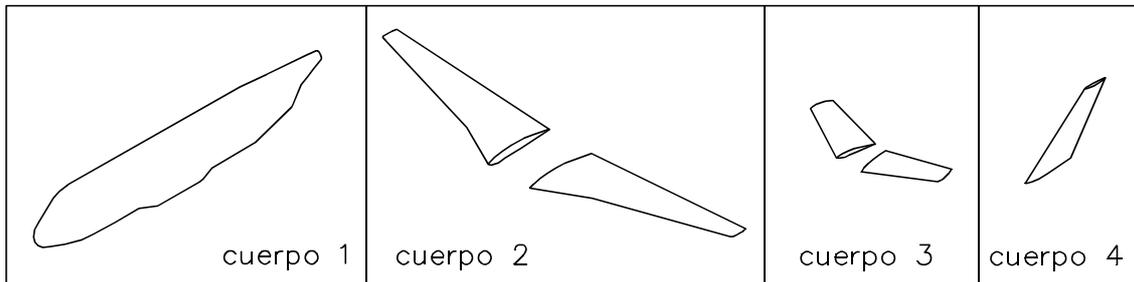


Fig.-3.17 División por cuerpos de un avión común.

Esta técnica de agrupamiento es producto de un diseño por bloques y su aplicación en la simulación electromagnética es de gran importancia; por un lado, permitiendo analizar de forma independiente determinados cuerpos; y por otro, plantear criterios de selección de parches durante la simulación de efectos de borde, como se podrá ver más adelante.

La información geométrica de cada uno de los parches NURBS se complementa con la declaración del número de superficies adyacentes y sus índices correspondientes. Esta información es de gran importancia ya que durante la simulación es preciso descubrir en la superficie, aquellas uniones entre parches que se comporten como aristas. A continuación se muestra de forma aislada una parte del avión con su correspondiente parcheado.

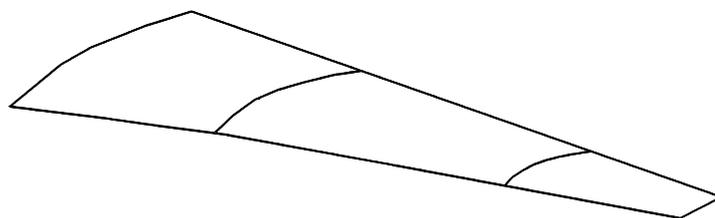


Fig.-3.18 Ala de un avión modelada por parches NURBS.

La descomposición del parcheado en sus correspondiente NURBS puede observarse a continuación :

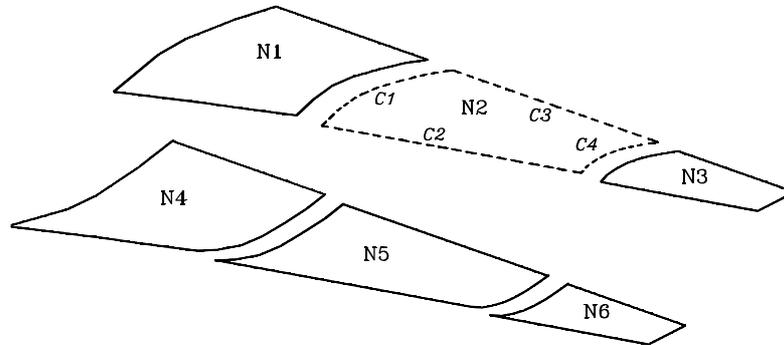


Fig.-3.19 Descomposición en parches NURBS de una ala.

Si nos centramos el NURBS $N2$, puede observarse que se encuentra unido al $N1$ a través de contorno $C1$, al $N5$ a través de los contornos $C2$ y $C3$, y al $N3$ a través de contorno $C4$. Las características de continuidad de estas uniones definirán las aristas del modelo.

La implantación de un criterio que analice las normales para cada uno de los parches que forman la unión, es un mecanismo válido para detectar discontinuidades bruscas entre parches NURBS. En el caso mostrado en la figura anterior es claro intuir que existirá arista a lo largo de los contornos $C2$ y $C4$, mientras que en los contornos $C1$ y $C3$ parece no existir discontinuidad en la transición de una parche a otro.

En resumen, el fichero de geometría empleado contiene toda la información necesaria para interpretar fácilmente las características de la superficie de la estructura. De cada parche NURBS del modelo, además de su propia definición y tipología, se dispone de la información necesaria para relacionarle con los parches adyacentes. Por otro lado, se conoce la pertenencia de cada uno de los NURBS a los diferentes cuerpos de que consta la estructura global. Toda esta información es suficiente para concebir una descripción completa y rigurosa del modelo empleado en la simulación electromagnética. Una vez fijado el tipo y la cantidad de información de la que se dispone, se procederá a describir en capítulos posteriores el tipo de tratamiento que se aplica sobre la misma.

REFERENCIAS

- [1] Bruce R. Dewey " Computer Graphics for Engineers ". Harper & Row. 1988.
- [2] M. E. Mortenson, " Geometric Modeling ", John Wiley & Sons.
- [3] J.D. Foley, A. Van Dam, S.K. Feiner, J.F. Hughes. "Computer Graphics, principles and practice". Addison Wesley. 1990
- [4] Pizarroso M., Cátedra M.F., Gago E. " Programa de interrogacion Volumetrica de Geometrias Arbitrarias ". Documanetacion del software, /UPM/ETSIT/DSSR/7/91.
- [5] G.Farin. "Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design". Academic Press. 1988.
- [6] R.Dony, " Eliminación de partes ocultas, Aproximación de curvas por el metodo de Bezier y de las B-Splines ". Masson, S.A. 1988.
- [7] W.Tiller. "Rational B-Splines for Curve and Surface Representation". IEEE Computer Graphics Appl. 3, pp. 61-69. 1983.
- [8] R. E. Barnhill, R. F. Riesenfeld. "Computer Aided Geometric Desing". Academic Press 1974.
- [9] W. Boehm. " Generating the Bezier points of B-Spline Curves and Surfaces ". Computer Aided Desing 13 (16), 1981.

TRATAMIENTO GEOMETRICO

4.1 PROCESADO INICIAL DE LA GEOMETRIA

Con este capítulo nos adentramos en la etapa denominada de simulación, que fue mostrada en el esquema correspondiente a la página 1.3 del capítulo 1. En dicha figura puede observarse que los datos de entrada al código simulador son : el fichero de antena, del que por ahora únicamente nos fijaremos en que contiene la posición de la antena respecto de la estructura; y el fichero de geometría, que contiene la descripción de la geometría en forma de curvas y superficies NURBS.

El primer paso del tratamiento geométrico es la descomposición de las curvas y superficies NURBS en los correspondientes parches y curvas de Bezier, de este modo y después de la transformación, el aspecto del avión mostrado en el capítulo 3 en la figura 3.15, pasa a ser el que la figura 4.1 muestra a continuación.

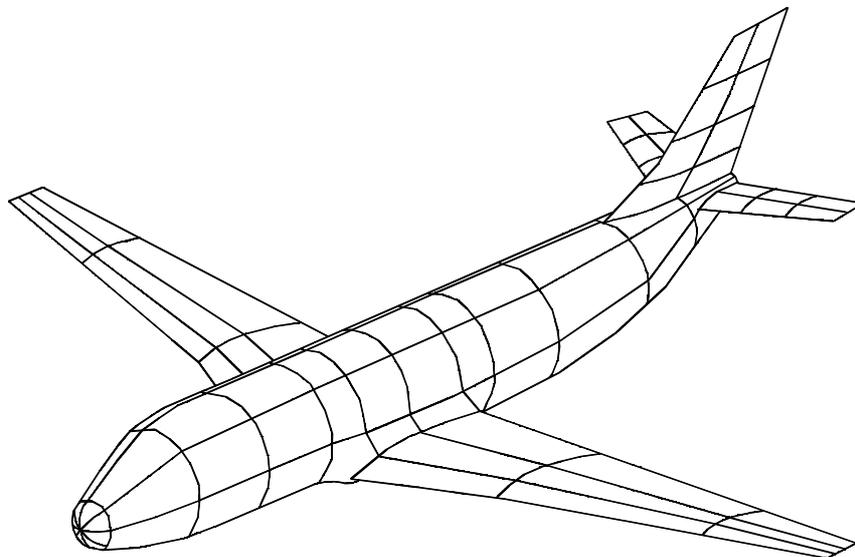


Fig.-4.1 Avión modelado mediante superficies de Bezier.

La descomposición en parches de Bezier implica una mayor densidad del facetado, sin alejarse de la descripción original de la superficie definida mediante parches NURBS. La mayor parte de las características sobre las curvas y superficies de Bezier presentadas hasta ahora, son ventajosas para el propósito del método; sin embargo, el mayor inconveniente se presenta a la hora de calcular interacciones de una curva o superficie de Bezier con otra entidad como puede ser una recta. El carácter paramétrico de la curva o superficie, impide emplear expresiones analíticas y provoca la necesidad de recurrir a determinados algoritmos iterativos que determinen los puntos de dispersión.

Si se realiza un balance de los tiempos que un código simulador electromagnético emplea en cada una de sus etapas, se observará que el mayor tiempo de cálculo lo invierte en la evaluación mas o menos exacta de los puntos de dispersión. Por esta razón es necesario recurrir a procesos de selección de la geometría, previos a la aplicación de un algoritmo numérico iterativo, con el fin de reducir los tiempos de simulación. Los procesos de selección consisten en la aplicación de sucesivos criterios de selección, de fácil y rápida evaluación, que descartan aquellas regiones de la geometría que por su posición respecto a la antena emisora, no se verán involucradas en la dispersión del campo radiado por la fuente. Con esta selección, se evita que numerosos parches y curvas de Bezier, ocultos para la antena, intervengan en los procesos de búsqueda iterativos. La reducción del tiempo de cálculo es muy grande, ya que hay que tener en cuenta, que de ser analizados estos parches ocultos por el método numérico iterativo, consumirían la totalidad de las iteraciones, con el consiguiente gasto computacional infructuoso.

4.1.1 PROCESADO INICIAL DE LOS PARCHES DE BEZIER

Los criterios selectivos, que mas adelante veremos, son aplicados sobre las curvas y parches de Bezier obtenidos después de la descomposición. El hecho de realizar la selección sobre el formato Bezier y no sobre el formato NURBS, favorece la efectividad de los criterios, ya que la descripción en formato Bezier supone una mayor densidad del parcheado y por lo tanto, la región no seleccionada se ajustará con mayor rigor a la verdadera región oculta para la fuente. La siguiente figura muestra un parche NURBS (trazo grueso), su descomposición en parches de Bezier (trazo fino) y la posición del foco emisor.

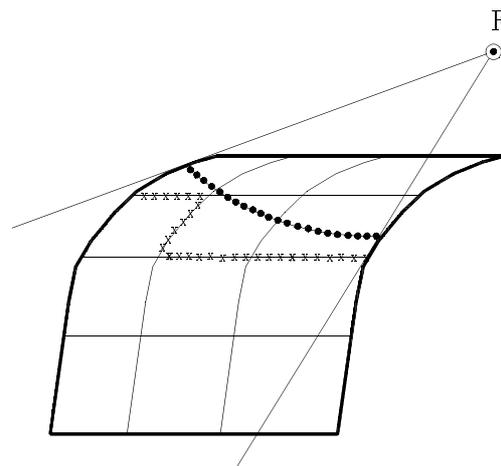


Fig.-4.2 Propiedades de la selección sobre formato Bezier.

El parche NURBS mostrado en la figura anterior, se encuentra dividido por la línea de puntos trazada sobre la superficie que delimita la verdadera región de sombra. Esto significa, que de haberse aplicado la selección sobre el parche NURBS, este quedaría seleccionado en su totalidad; sin embargo, al aplicarse la selección sobre el formato Bezier, la eficacia de la selección queda patente, puesto que los Beziers inferiores a la línea definida por cruces no serán seleccionados, evitándose su almacenamiento y posterior tratamiento.

Los criterios rápidos de selección están basados en sencillas operaciones vectoriales; para su aplicación es necesaria la extracción de una serie de vectores asociados a la geometría. La primera acción sobre los parches de Bezier, consiste en calcular sobre cada uno de ellos una serie de vectores asociados a determinados puntos de muestreo fijos. Estos puntos y sus parámetros asociados deben representar en conjunto, lo mas fielmente posible, al propio parche, ya que a través de los mismos un parche puede ser o no ser seleccionado. Por esta razón los puntos de muestreo r_i , deben estar espaciados de forma uniforme y son los que la siguiente figura muestra representados en el espacio paramétrico y en el espacio tridimensional.

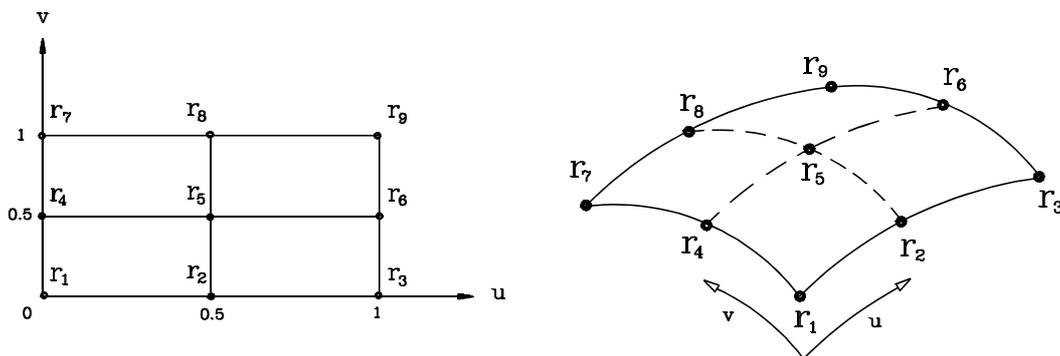


Fig.-4.3 Representación de los puntos de muestreo en el espacio paramétrico y tridimensional

Una vez fijadas las coordenadas paramétricas de los puntos de muestreo, los parámetros extraídos de cada uno de los parches de Bezier y para cada punto de muestreo son:

■ *Vectores Normales sobre un parche*

Los vectores normales N_i , son calculados a través de las derivadas paramétricas del parche para cada punto de muestreo, una representación de su distribución se muestra en la siguiente figura.

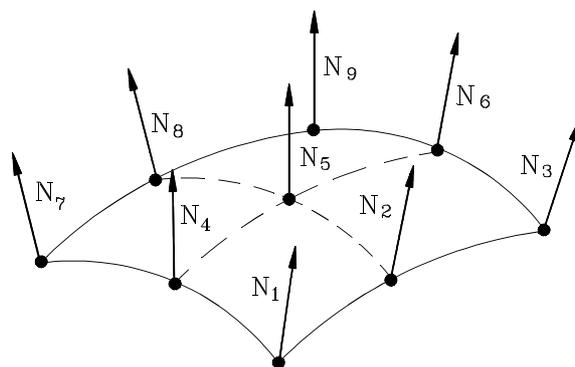


Fig.-4.4 Muestreo de vectores normales sobre un parche de Bezier.

Si el parche no presenta grandes deformaciones, los vectores normales no se entrecruzarán y la representación a través de los mismos será válida para la aplicación de criterios de selección. Esta cualidad necesaria está ligada al parche NURBS del que procede el parche de Bezier, y por lo tanto, el diseñador debe procurar un facetado de parches NURBS equilibrado

de manera que cada NURBS modele una región de la superficie de dimensiones y curvaturas razonables.

■ *Vectores de Incidencia sobre un parche*

Este segundo grupo de vectores, relacionan la posición del parche con la posición del foco emisor. Este dato es captado en la simulación a través del fichero de antena, que más adelante será desarrollado. En la siguiente figura se muestra este punto F , que denominaremos centro de antena o foco.

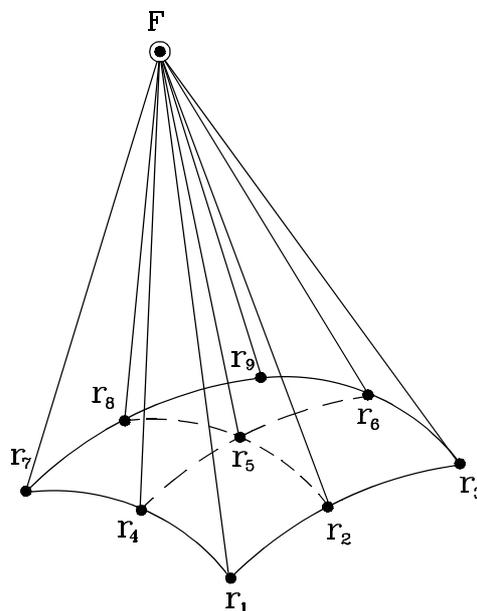


Fig.-4.5 Muestreo de vectores incidentes sobre un parche de Bezier.

Los vectores calculados, son ahora, los que unen el centro de antena y cada uno de los puntos de muestreo, es decir los vectores $\overline{F r_i}$ de incidencia, mostrados en la figura anterior y que denotaremos con K^i . Con el cálculo de estos dos grupos de vectores asociados a cada parche de Bezier, finaliza la etapa de preparación, correspondiente a los parches de Bezier.

■ *Cajas envolventes a los parches de Bezier*

En este caso, la información extraída de cada parche de Bezier, consiste en el paralelepípedo que lo encierra, con la particularidad de que sus caras son paralelas a los planos

coordenados del sistema absoluto. En la siguiente figura pueden observarse dos parches de Bezier $B1$ y $B2$, encerrados en sus correspondientes cajas $C1$ y $C2$.

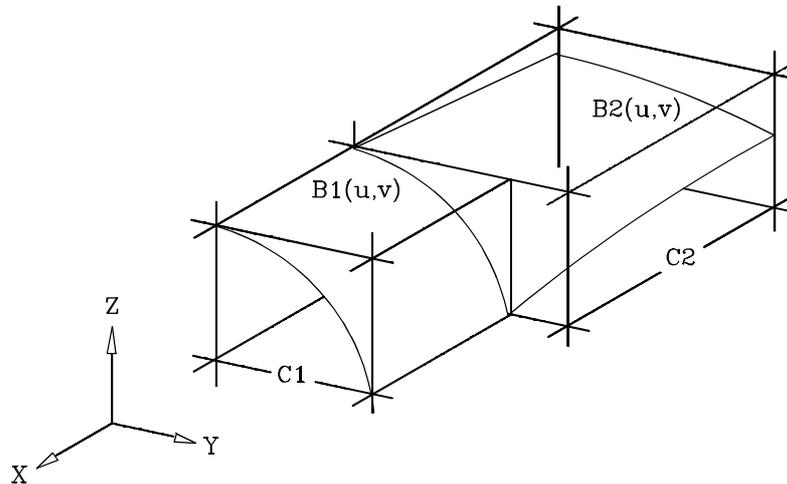


Fig.-4.6 Paralelepípedos envolventes a los parches de Bezier.

El almacenamiento de las cajas, se realiza asociando a cada Bezier seis coordenadas espaciales que reflejan los valores mínimos y máximos para cada eje del sistema de referencia. Para la determinación de las coordenadas de acotación espacial, se realiza un estudio de las coordenadas espaciales de los puntos de control del Bezier, tomándose los extremos para cada coordenada. De este modo y a través de las coordenadas X_{\min} , X_{\max} , Y_{\min} , Y_{\max} , Z_{\min} , Z_{\max} , podrán ser determinadas las cajas envolventes de cada uno de los parches, ya que cada coordenada determina uno de los planos del paralelepípedo.

El propósito de esta información geométrica asociada a cada parche, es posibilitar la aplicación del algoritmo de intersección rayo-caja. Este algoritmo, que será descrito mas adelante, es de fácil y rápida aplicación, por lo que constituirá un proceso de selección, encaminado a descartar aquellos parches de Bezier que para una dirección de análisis determinada, no causen intersecciones.

■ *Caja envolvente al modelo*

Para la obtención de la caja envolvente al modelo completo, se realiza el mismo procedimiento que para el caso de un solo Bezier, sin embargo ahora se seleccionarán seis

coordenadas, de entre todos los Beziers que modelan la estructura, de este modo las coordenadas X_{\min}^T , X_{\max}^T , Y_{\min}^T , Y_{\max}^T , Z_{\min}^T , Z_{\max}^T , determinarán la caja máxima que envuelve al modelo completo. A continuación se muestra el aspecto de una caja máxima, aplicada sobre un avión.

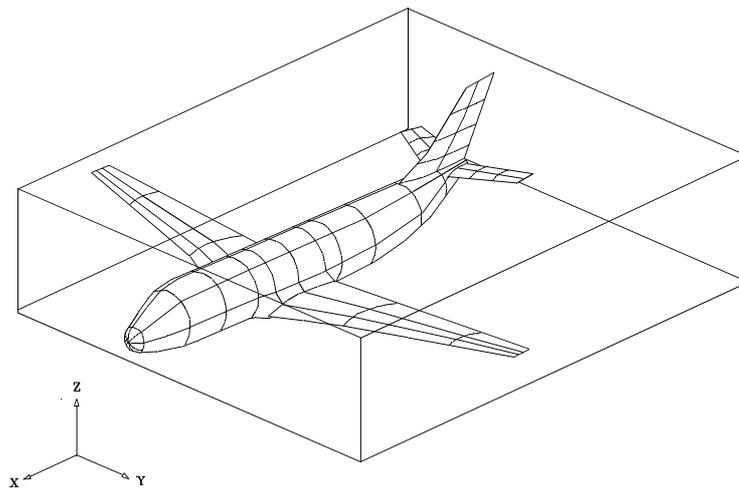


Fig.-4.7 Paralelepípedo máximo.

El propósito de esta información es el de conocer de manera aproximada durante la simulación, las dimensiones del modelo. El conocimiento del tamaño espacial no influye durante la simulación en la aplicación del método electromagnético empleado, al que únicamente le concierne el tamaño eléctrico; sin embargo, puede ayudar a fijar parámetros de precisión, márgenes de error y otras constantes asociadas con el tratamiento puramente geométrico. Estableciendo estas relaciones, el proceso puede ser aplicado con mayor fiabilidad sobre modelos de tamaños o escalas diversas.

4.1.2 PROCESADO INICIAL DE LAS CURVAS DE BEZIER

El proceso continua con el tratamiento de las curvas de Bezier, obtenidas por la descomposición de las curvas NURBS que delimitan las fronteras entre parches NURBS, que forman el modelo. Los contornos NURBS seleccionados a partir de la información topológica,

se clasifican en cóncavos y convexos, dependiendo de las características geométricas de los parches que los forman, siendo estos últimos los únicos analizados.

Una vez obtenidas las curvas de Bezier y antes de calcular los vectores asociados a estas entidades, es preciso analizar si las curvas de Bezier son susceptibles de ser consideradas por la técnica electromagnética aplicada como aristas. Para ello, se comparan las normales en determinados puntos de muestreo sobre la curva que define el contorno de unión entre dos parches. En la siguiente figura se describe el ángulo α , que es el parámetro de control de selección de cuando un contorno debe ser considerado como arista. Por lo tanto, definiremos una arista como una curva de Bezier perteneciente a la unión entre dos parches de Bezier y que además haya sobrepasado el criterio de selección.

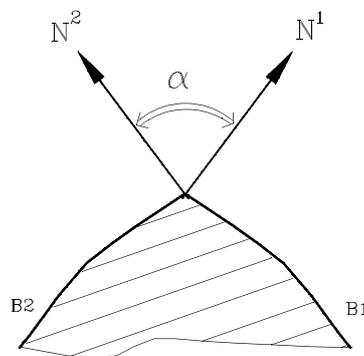


Fig.-4.8 Variación del vector normal sobre una curva frontera común a dos parches.

Los vectores N^1 y N^2 , representan los vectores normales a cada uno de los parches de Bezier $B1$ y $B2$, que forman el contorno de unión, su ángulo de apertura determinará si el contorno es o no es arista.

Una vez seleccionada una curva de Bezier y catalogada como arista, se procede a calcular los vectores asociados a la curva, de forma análoga a como se ha realizado para los parches de Bezier. En el caso de una curva, el espacio paramétrico se reduce a una dimensión tal como se muestra en la figura 4.9, al igual que para las superficies se fijan valores para la coordenada paramétrica, obteniéndose sus correspondientes puntos r_i en el espacio tridimensional situados sobre la curva de Bezier.

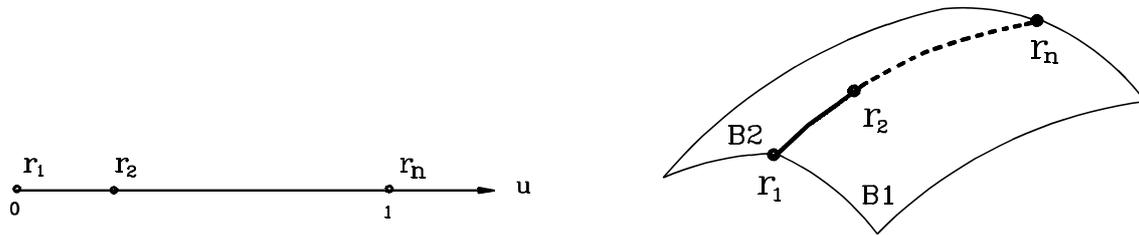


Fig.-4.9 Representación de los puntos de muestreo sobre una curva de Bezier en el espacio paramétrico y tridimensional.

Una vez fijadas las coordenadas paramétricas de los puntos de muestreo sobre la arista, los vectores asociados a cada curva de Bezier y para cada punto de muestreo son:

■ *Vectores Normales sobre una curva*

En la arista definida como curva de Bezier confluyen dos parches, $B1$ y $B2$; con la particularidad de que presentarán vectores normales diferentes en cada uno de los puntos de muestreo. Estos vectores son mostrados en la figura 4.10, denotándose por N_i^1 y N_i^2 los correspondientes a los parches $B1$ y $B2$ respectivamente.

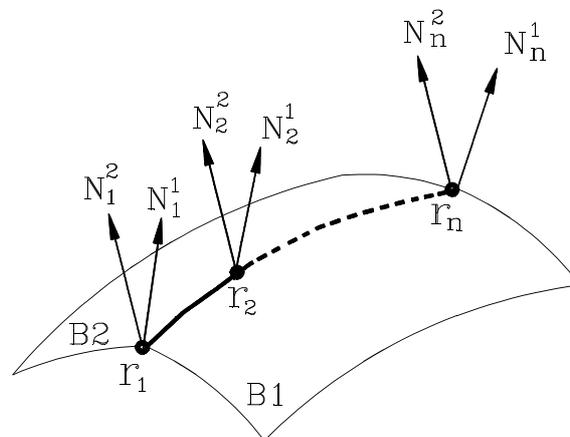


Fig.-4.10 Muestro de vectores normales sobre una arista.

■ *Vectores de Incidencia sobre una curva*

Conocido el centro de antena, los vectores de incidencia sobre la curva se definen como los vectores que unen el punto F , con cada uno de los puntos de muestreo r_i situados sobre la curva, denotándose por K^i . Estos vectores son mostrados en la figura 4.11, para una situación arbitraria.

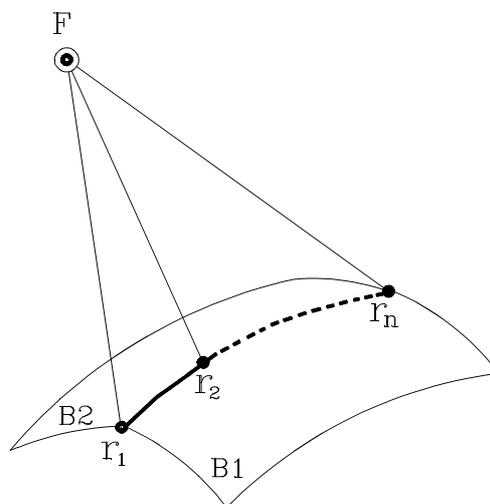


Fig.-4.11 Muestreo de vectores incidentes sobre una arista.

En resumen, han sido obtenidos una serie de vectores y parámetros a las curvas y parches de Bezier, con el fin de manipular de manera rápida dichas entidades a la hora de aplicar criterios de selección. El gasto computacional realizado aquí se rentabiliza de manera clara, ya que los vectores auxiliares facilitan la selección de la geometría iluminada desde la fuente, con lo que se evitan numerosos procesos iterativos realizados en regiones ocultas para la antena.

4.2 CRITERIOS INICIALES DE SELECCION

Una vez obtenidos los vectores asociados a cada curva y parche de Bezier, comienza la aplicación de los criterios rápidos, dependientes de la posición de la antena emisora, con el propósito de ir descartando regiones de la geometría no involucradas en el proceso de dispersión.

La aplicación de estos criterios supone la clasificación de los parches y curvas de Bezier en los siguientes grupos :

■ Parches y curvas de Bezier *ILUMINADOS* : Se denominarán así a los parches o curvas que por su posición respecto de la antena son visibles para la fuente.

■ Parches y curvas de Bezier *NO ILUMINADOS* : Serán todos aquellos parches o curvas que por su orientación o posición respecto de la antena, no pueden generar campo dispersado por iluminación directa desde la fuente.

El método de clasificación consiste en la aplicación de dos criterios de carácter vectorial de computación sencilla y rápida, favoreciendo la reducción del tiempo de selección. Estos criterios son :

► *CRITERIO I* : Análisis del producto escalar entre los vectores K^i y cada uno de los vectores normales obtenidos sobre los parches y curvas de Bezier. De este modo tendremos:

PARCHES DE BEZIER :

$$(K^i * N_i) \quad i = 1,2,3,4,\dots,n \quad (4.1)$$

Siendo N_i y K^i , los vectores mostrados en las figuras 4.4 y 4.5 respectivamente y n , el número de puntos de muestreo sobre el parche de Bezier.

El parche de Bezier será clasificado como iluminado cuando al menos uno de los productos escalares definidos presente un valor negativo.

CURVAS DE BEZIER :

$$(K^i * N_i^j) \quad i = 1,2,3,4,\dots,n \quad , \quad j = 1,2 \quad (4.2)$$

Siendo N_i^j y K^i , los vectores mostrados en las figuras 4.8 y 4.9 respectivamente y n , el número de puntos de muestreo sobre la curva de Bezier.

La curva o arista de Bezier será clasificada como iluminada cuando al menos uno de los productos escalares definidos presente un valor negativo.

► **CRITERIO II** : De entre todos los parches de Bezier iluminados, existe uno que tiene la particularidad de sostener físicamente a la antena emisora, a este parche se le denomina parche de ANTENA. Su importancia respecto a los demás se debe a su proximidad con la antena; este hecho origina que el campo dispersado por el parche sea por lo general muy importante y que además la sombra proyectada desde la fuente, a través del parche, pueda ocultar a otros parches y curvas de Bezier más alejados. Por esta razón este segundo criterio consiste en analizar si alguno de los parches o curvas iluminadas, se encuentran dentro de la región de sombra proyectada por el parche de antena. En la figura siguiente se muestra el parche de antena.

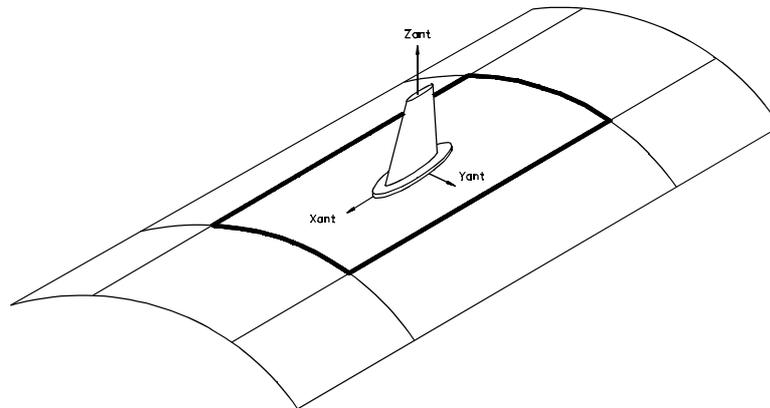


Fig.-4.12 Parche de ANTENA y sistema de coordenadas asociado a la antena con origen en el punto de contacto de la antena y el parche.

El resultado final, tras la aplicación de los criterios de selección iniciales, es un conjunto de parches y curvas de Bezier que definen las regiones de la estructura iluminadas desde la fuente, con lo que la reducción del número de entidades a procesar en adelante se reduce considerablemente. La siguiente figura muestra la parte iluminada de la geometría cuando se aplican los criterios de selección a la estructura presentada en la figura 4.1.

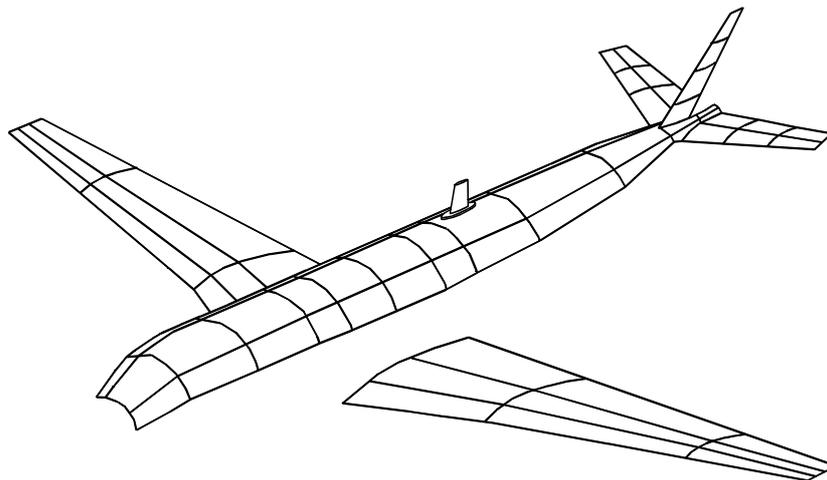


Fig.-4.13 Parches y curvas de Bezier iluminados para una posición de antena determinada.

4.3 ALTERNATIVAS DEL PROCESADO

Si se revisa la situación actual en cuanto a los datos de que disponemos en este momento para iniciar la simulación, se puede observar que se cuenta con la definición del sistema radiante y con la geometría iluminada dispuesta para ser procesada; sin embargo, no se ha hecho puntualización alguna de si se desean obtener resultados de campo para cualquier dirección del espacio o para determinados direcciones en forma de cortes. Cada una de las opciones anteriores implica tratamientos y procesos de selección diferentes, por lo que pueden entenderse como dos planteamientos distintos. Durante el desarrollo de la tesis ambas líneas de investigación fueron iniciadas y desarrolladas; la primera de ellas parecía atractiva ya que posibilitaba obtener resultados de campo dispersado para cualquier dirección del espacio con el coste computacional de una única simulación.

El hecho de iniciar el trazado de rayos, mediante la búsqueda de las interacciones con geometría de un barrido uniforme con origen en la fuente, supone obtener un pincel, de grosor dependiente de la geometría, de rayos dispersados para direcciones arbitrarias. A partir de la información contenida en cada rayo dispersado, podrán aplicarse técnicas de interpolación y así obtener el campo dispersado para barridos regulares.

Si consideramos las direcciones correspondientes a un barrido regular con origen en la fuente, las coordenadas esféricas definen un rectángulo como el que muestra la siguiente figura.

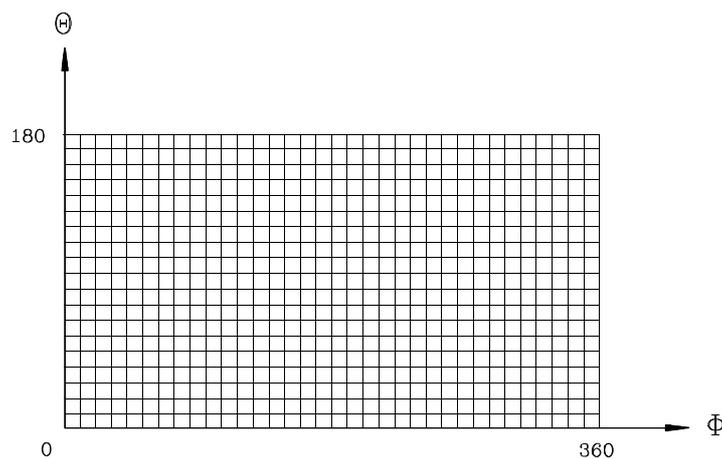


Fig.-4.14 Espacio de direcciones Θ y Φ

Para cada una de las direcciones representadas en la figura anterior, se analizará su interacción con la geometría. En el caso de que alguna dirección intersekte con la geometría, significará una ocultación para la dirección de incidencia y una dispersión con dirección

arbitraria. Este proceso puede ser representado sobre el espacio de direcciones del siguiente modo.

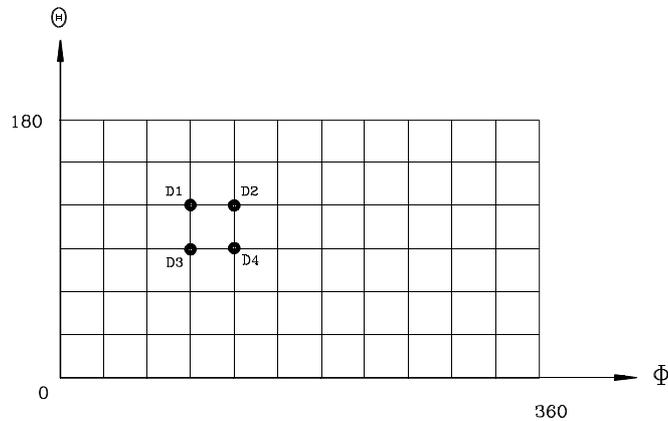


Fig.-4.15 Espacio de direcciones incidentes.

La figura 4.15 muestra el espacio de direcciones incidentes una vez analizadas las posibles intersecciones de los rayos incidentes con la geometría. De este modo las direcciones denotadas por $D1$, $D2$, $D3$ y $D4$, simbolizan las direcciones que han intersectado con la geometría. El campo directo puede obtenerse directamente analizando cada uno de los nudos de la malla representada en la figura 4.15 y que simbolizan las direcciones del barrido analizado.

Cada interacción rayo incidente-geometría obtenida anteriormente, genera una dirección reflejada que puede representarse en otro espacio de direcciones correspondiente al campo reflejado. En este caso, los puntos que definen cada dirección de reflexión se encontrarán dentro del rectángulo de direcciones, pero pueden no coincidir con los nudos del barrido original, dependiendo de la uniformidad de la superficie dispersora.

La siguiente figura muestra las direcciones de reflexión $R1$, $R2$, $R3$ y $R4$, correspondientes a las direcciones de incidencia $D1$, $D2$, $D3$ y $D4$, representadas en la figura 4.15. Como puede observarse las direcciones de reflexión no coinciden para este caso con las direcciones del barrido original; por ello, para calcular los valores de campo reflejado en direcciones coincidentes, es preciso emplear técnicas de interpolación. Así en la figura 4.14, se define un polígono de cuatro lados que encierra a una serie de direcciones regulares marcadas por una cruz y cuyo valor de campo reflejado, podrá ser calculado a partir de la información de los campos reflejados en cada uno de los vértices que forman el polígono.

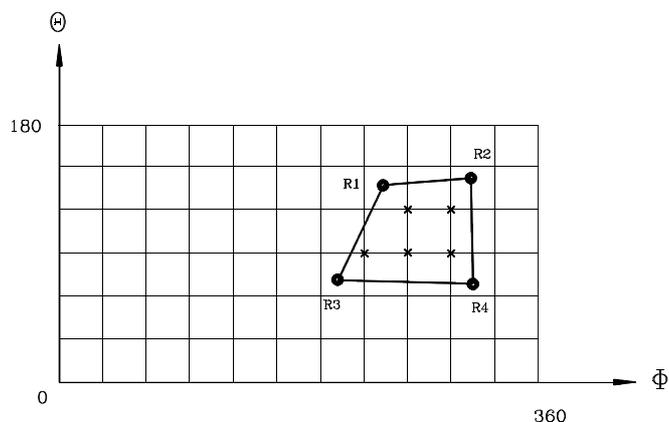


Fig.-4.16 Representación de las direcciones de reflexión sobre el espacio de direcciones.

El propósito de este planteamiento es disponer de los diferentes espacios de direcciones de cada uno de los efectos, con sus correspondientes valores de campo en cada uno de las direcciones calculadas. Esta información podría utilizarse para obtener valores de campo mediante interpolación, para cualquier corte en cada uno de los efectos considerados y aplicar el principio de superposición finalmente, obteniéndose el campo total para cualquier dirección del espacio.

Este procedimiento, aparentemente simple, conlleva gran cantidad de algoritmos asociados que aumentan considerablemente la complejidad del cálculo del campo final. Por otro lado existen ciertas limitaciones a la hora de establecer el barrido inicial, debido a que si la interpolación se realiza entre direcciones muy distantes angularmente se cometen errores, los cuales únicamente pueden solventarse recurriendo a un barrido de paso inferior, con lo que podemos aumentar los requerimientos de memoria y el tiempo de cálculo a límites intolerables.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios para el caso de simulaciones sobre geometrías sencillas; sin embargo, los algoritmos y criterios aplicados durante la interpolación, no parecían de fácil aplicación para el caso de una geometría arbitraria, con el agravante de que los requerimientos de memoria comenzaban a ser preocupantes para determinados barridos. Con esta serie de inconvenientes se planteó la duda de si seguir o cambiar de estrategia, optándose por un tratamiento diferente del problema, en el cual, como punto fundamental y diferenciador del anterior, está el hecho de que las direcciones del campo a calcular son prefijadas. En este caso el camino es opuesto y la búsqueda se centrará en obtener aquellos rayos incidentes radiados por la fuente que generan los rayos dispersados prefijados.

4.4 GENERACION DE LOS PARCHES DE PROPAGACION

Los elementos dispersores seleccionados hasta este momento han sido: las curvas y los parches de Bezier. Su descripción geométrica permite obtener de forma directa sobre dichas entidades, el campo directo, el campo reflejado y el campo difractado en aristas. Sin embargo, es muy complejo con la información geométrica de que se dispone, obtener el campo difractado por la onda de superficie. El carácter paramétrico de los parches de Bezier impide utilizar expresiones analíticas que evalúen las trayectorias de los rayos que se propagan por la superficie del modelo, por esta razón es preciso desarrollar un nuevo proceso, destinado a la generación de un soporte geométrico que facilite el cálculo del campo difractado en superficie. El tratamiento dedicado a la generación mediante interpolación, de lo que se denominarán parches de propagación, contempla diferentes pasos que van a ser desarrollados en los siguientes subapartados y que se presentan de manera esquemática a continuación:

- PASO A: Para diferentes posiciones del foco emisor, se procede a obtener una sucesión de puntos sobre la superficie de la estructura, que describen las curvas del horizonte.
- PASO B: Las curvas del horizonte son fraccionadas por sectores, de modo que cada uno de ellos describa una región regular de la superficie.
- PASO C: Obtención de las superficies paramétricas de cada uno de los sectores mediante interpolación, a partir de las curvas horizonte.
- PASO D: Cálculo de las curvas de propagación sobre las superficies interpoladas.
- PASO E: Nueva interpolación a partir de las curvas de propagación y obtención de las superficies finales.

4.4.1 CALCULO DE LAS CURVAS DEL HORIZONTE

Para entender el proceso geométrico aplicado, es preciso resaltar, que el inicio del recorrido de la onda de superficie se produce en el momento en que un rayo intersecciona con la superficie de forma tangente. Si se conoce la posición del foco emisor respecto de la geometría, podemos realizar un barrido desde la fuente y determinar las direcciones tangentes a la superficie. Este resultado puede ser observado, para el caso de una antena emisora montada

en la parte superior del fuselaje de un avión, en la siguiente figura.

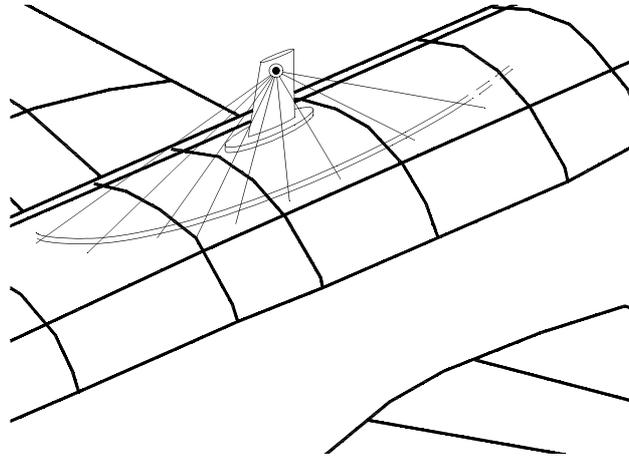


Fig.-4.17 Curva horizonte sobre el fuselaje de un avión.

En donde, el tramo de curva representado sobre la superficie define aquellas direcciones procedentes de la fuente, tangentes a la superficie. En realidad, esta curva puede denominarse curva horizonte y cada punto de la curva representa el arranque de un rayo que inicia la propagación por la superficie. Para obtener, lo que denominaremos la primera línea del horizonte, es preciso realizar un análisis entre los parches de Bezier y la posición del foco, sin embargo el proceso de búsqueda de puntos pertenecientes a la línea del horizonte, puede beneficiarse de la selección realizada sobre los parches de Bezier. Esto se debe a que la línea de horizonte se encontrará siempre definida dentro de la región iluminada de la geometría. Esto puede ser observado si se revisa la figura 4.2, ya que la línea correspondiente al límite de la iluminación, pertenece a la geometría seleccionada como iluminada.

Si definimos al rayo incidente como el vector que une el foco F con un punto perteneciente al parche de Bezier $P(u, v)$, la relación que puede determinar si el rayo intersecta tangente a la superficie, es la relación entre el vector incidente \vec{FP} y la normal al parche en el punto de búsqueda, \vec{N} . En la figura 4.18 se representa la condición de perpendicularidad para un punto arbitrario de la curva horizonte, sin embargo, podemos ver que cada curva horizonte, representa infinitos puntos que satisfacen la condición de perpendicularidad, en cada parche de Bezier situado en el horizonte.

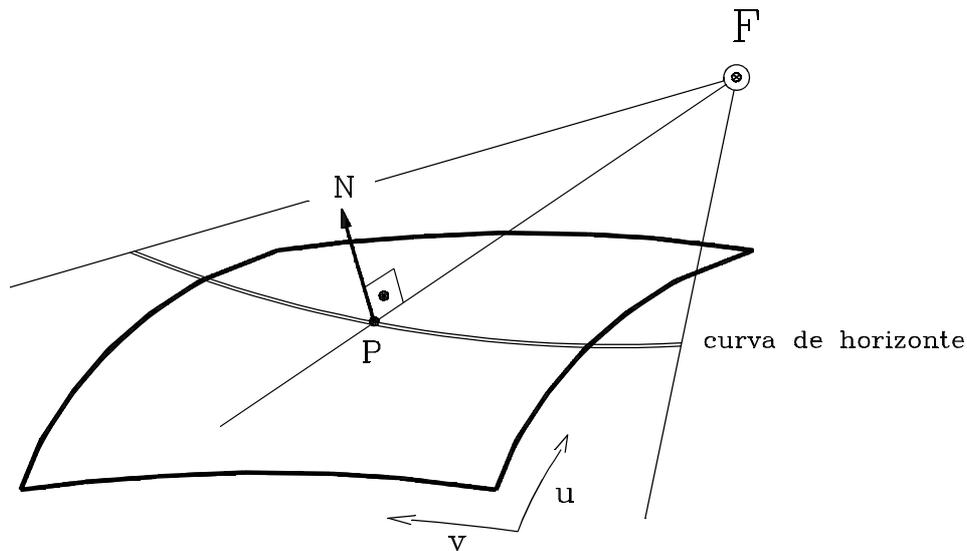


Fig.-4.18 Curva horizonte sobre un parche de Bezier.

Por esta razón es preciso realizar la búsqueda para un conjunto de puntos, y por ello el método se apoya en los dos tipos de curvas isoparamétricas de cada parche de Bezier.

En la figura 4.19, se muestra la técnica de búsqueda para el caso de curvas isoparamétricas a $u = cte.$, mostrándose la movilidad en ambas direcciones de los puntos pertenecientes a cada una de las curvas isoparamétricas. De este modo, la búsqueda se realizara para un número finito de posiciones.

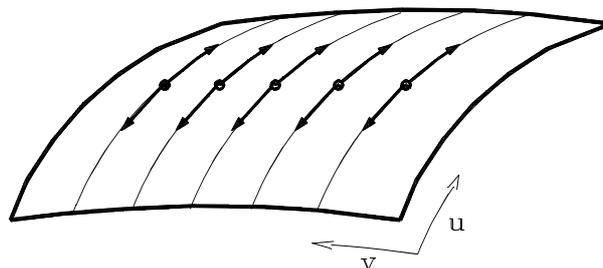


Fig.-4.19 Puntos de búsqueda sobre curvas isoparamétricas, con $v=cte.$

De forma idéntica, la figura 4.20, muestra la técnica de búsqueda para el caso de curvas isoparamétricas a $v = cte.$

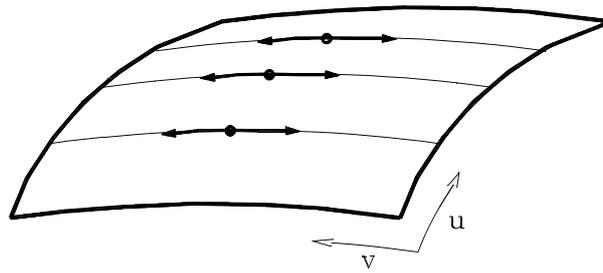


Fig.-4.20 Puntos de búsqueda sobre curvas isoparamétricas, con $u=cte$.

Con este proceso de búsqueda, se garantiza la obtención de una secuencia de puntos pertenecientes a la curva del horizonte y que abarcan la totalidad del parche de Bezier. El número de puntos obtenidos, dependerá de la densidad del muestreo de curvas isoparamétricas establecido durante la búsqueda, por lo que puede garantizarse en todo momento una buena descripción de la curva horizonte. El algoritmo específico empleado en la interacción rayo-curva isoparamétrica, será descrito mas adelante en el capítulo correspondiente a las interacciones rayo-geometría, debido a que en el mismo, se concentran las descripciones de los algoritmos empleados en cada una de las interacciones que se analizan.

Los puntos obtenidos una vez aplicado el algoritmo de interacción, para ambas direcciones de búsqueda, se muestran a continuación, en la figura 4.21.

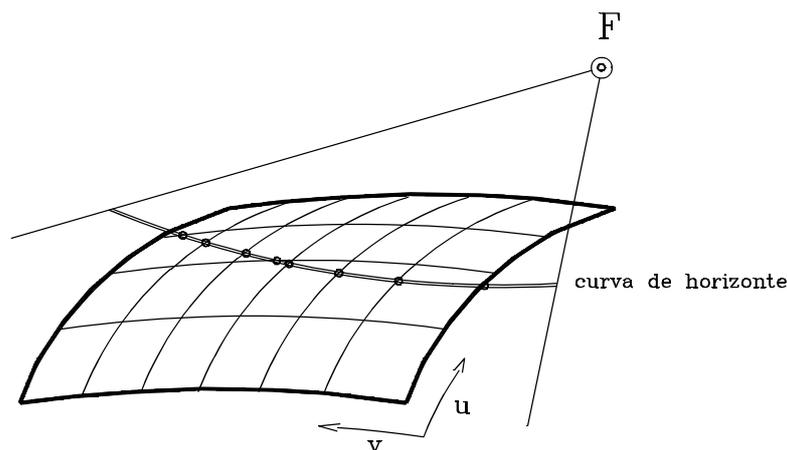


Fig.-4.21 Puntos pertenecientes a la curva horizonte.

Con este procedimiento queda definida una secuencia de puntos pertenecientes a la

superficie del modelo y que describen la línea del horizonte asociada a la posición de la antena. Sin embargo esta información es insuficiente para nuestros propósitos de generar una superficie de propagación y por ello el método realiza el mismo proceso descrito hasta ahora, pero con una nueva posición del foco más elevada con respecto a la geometría.

La dirección del desplazamiento del foco, es obtenida mediante el promediado de todos los vectores normales de cada uno de los parches de Bezier iluminados, de este modo se garantiza un desplazamiento de separación de la superficie iluminada. Como resultado, se generan tantas curvas horizontes como posiciones del foco hayan sido prefijadas, con lo que la información acerca de la región de propagación superficial aumenta. El resultado puede verse a continuación en la figura 4.22.

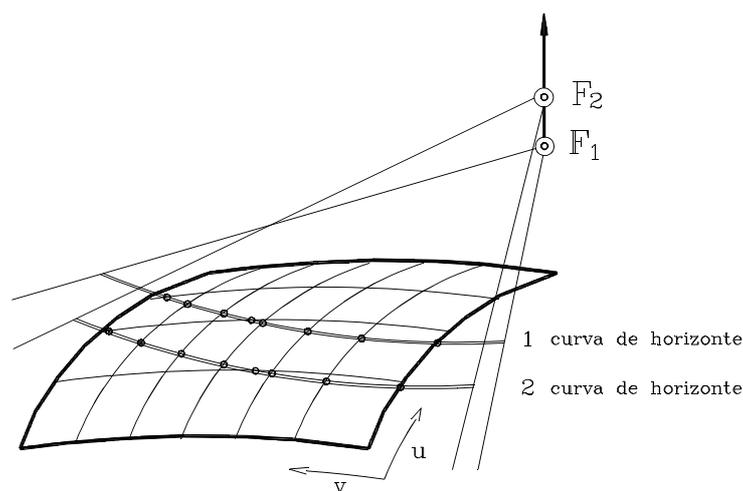


Fig.-4.22 Curvas horizonte para diferentes posiciones del foco.

Como se puede observar los diferentes focos generan sus respectivas curvas horizonte, por lo que pueden ser definidas ahora como: primera curva del horizonte, segunda curva del horizonte y así sucesivamente; teniendo presente en todo momento, que la primera curva define los verdaderos puntos de contacto de los rayos incidentes emitidos por la fuente, en su verdadera posición.

El cálculo de los puntos de cada curva horizonte, se realiza para cada parche y la

obtención de los mismos no presenta ordenación alguna; para resolver este problema, a cada punto se le asocian las coordenadas esféricas referidas al sistema absoluto del vector incidente que lo genera, con el fin de poder ser ordenados respecto a una de las coordenadas. Este tipo de ordenación facilitará la manipulación de los puntos que forman la curva, en procesos posteriores.

4.4.2 FRAGMENTACION DE LAS CURVAS DEL HORIZONTE

La figura 4.17 mostró un fragmento de la primera línea de horizonte, obtenida sobre el fuselaje del avión, sin embargo, las líneas del horizonte puede continuar su recorrido por otras partes de la estructura. Si analizamos la trayectoria de la primera curva de horizonte a lo largo de la superficie, se puede detectar, que al pasar, por ejemplo en un avión, del fuselaje al ala o al estabilizador vertical, la curva presenta un salto y que en general las direcciones de las normales durante el salto cambian bruscamente. Este tipo de discontinuidades, lo que advierten en realidad, es que las regiones de la geometría que separan tiene propiedades diferentes y que la posible propagación de la onda de superficie, puede diferir de una región a otra. Por lo tanto y para evitar este problema, una solución de aplicación directa es la de realizar la búsqueda de las curvas de horizonte para cada uno de los cuerpos independientes del modelo, que ya fueron mostrados en la figura 3.17 para el caso de un avión.

Por otro lado, la generación de curvas horizonte, lógicamente, se presenta con mayor facilidad en el cuerpo que soporta la antena, dada la proximidad de la misma, lo que se traduce en que el posible efecto de la difracción en superficie va a ser mucho mas intenso en esta región. Para no recurrir a la referencia continua del cuerpo que se este analizando, en adelante concentraremos la descripción sobre uno de los cuerpos, teniendo siempre presente que el tratamiento es aplicado de igual forma para cada uno de ellos.

Una vez obtenidas las diferentes líneas del horizonte, para cada una de las posiciones de los focos, es preciso analizarlas en profundidad, ya que van a constituir la información necesaria para generar mediante interpolación un nuevo parche. El análisis se realiza sobre la primera curva de horizonte y consiste en detectar nuevamente irregularidades en la trayectoria de la misma. En ocasiones, la curva de horizonte, aun perteneciendo a un único cuerpo, puede presentar saltos, que de no ser detectados pueden perjudicar a los procesos de interpolación. Este fenómeno, puede ser observado en la figura 4.23 para el caso de un simple cilindro.

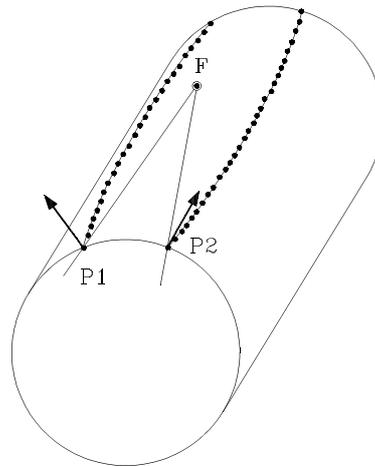


Fig.-4.23 Ruptura de la curva horizonte para un cilindro.

Como puede observarse, los puntos $P1$ y $P2$, pertenecen a la misma curva de horizonte, sin embargo, existe un salto espacial, así como una variación importante entre sus normales, por lo que es conveniente realizar una fragmentación de esta curva de horizonte en dos regiones correspondientes a los lados del cilindro y realizar un tratamiento individual. La detección de este tipo de fractura, no es fácil, sobre todo cuando la geometría es arbitraria, sin embargo se han desarrollado tres tipos de procedimientos, que son :

■ *Fragmentación automática* : Está basada en el cálculo del valor promedio del producto escalar entre normales de puntos adyacentes, para la primera curva del horizonte. Este valor servirá de criterio de fragmentación y una vez detectadas las posibles roturas de la curva, se fijan los márgenes angulares esféricos con origen en la antena para cada trozo de curva horizonte. Una vez realizado este proceso para la primera línea del horizonte, las demás líneas son fraccionadas por los márgenes angulares establecidos por la primera curva.

■ *Fragmentación por acotación angular* : Este tipo de fragmentación angular, está diseñada para realizar un estudio pormenorizado de una región de la superficie del modelo. Su funcionamiento consiste en la selección de los márgenes angulares esféricos referidos al sistema absoluto, con el fin de que únicamente aquellos puntos de la curva horizonte pertenecientes a los intervalos angulares, sean procesados. En la siguiente figura se muestra el efecto de este tipo de acotación para la primera curva del horizonte.

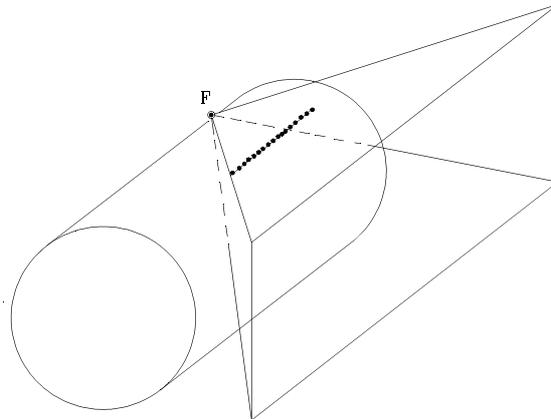


Fig.-4.24 Ventana angular de selección.

■ *Fragmentación por acotación espacial* : Para este tipo de acotación, los criterios de selección son espaciales y se basa en la fijación de valores máximos y mínimos para las tres coordenadas espaciales absolutas. El efecto de esta acotación es la creación de una caja tridimensional, a la que deberán pertenecer los puntos del horizonte. En la figura 4.25 se muestra este tipo de acotación para la primera curva del horizonte.

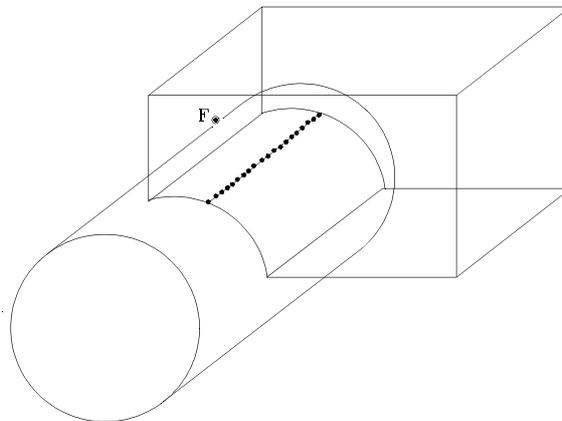


Fig.-4.25 Paralelepípedo de selección.

4.4.3 GENERACION POR INTERPOLACION DE LOS PARCHES DE HORIZONTE

Los procesos anteriores, garantizan que cada horizonte representa una región de la superficie regular del modelo, a partir del conjunto de las diferentes curvas horizonte calculadas.

Ahora, se procede a realizar la interpolación, con el fin de obtener una descripción geométrica de dichas regiones, para que puedan ser tratadas con independencia del modelo original.

Este procedimiento de acotar las regiones de estudio, para el caso del efecto de la onda de superficie, es un modo usual de resolver el problema del cálculo de las trayectorias geodésicas. Esto pudo verse en el capítulo 1, apartado 1.5, en donde la región de interés se aproximaba mediante la superposición de geometrías desarrollables.

La interpolación aplicada es del tipo B-Spline y requiere la parametrización respecto a dos coordenadas paramétricas u y v , de cada una de las coordenadas espaciales de los puntos que forman las curvas horizonte. Para describir el proceso se presenta la siguiente figura, en la que aparecen representadas las n curvas de horizonte.

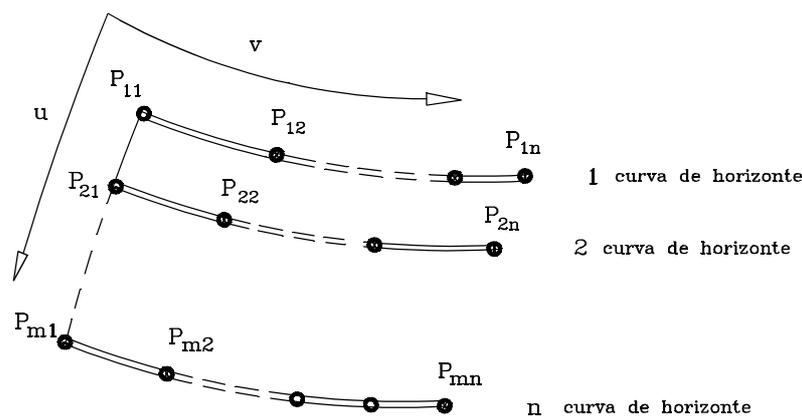


Fig.-4.26 Nomenclatura para las curvas horizonte.

La figura muestra a los puntos $P_{i,j}$, en donde i , es el subíndice que indica el número de curva al que pertenece y j el índice del punto dentro de la curva. Como puede observarse, se ha tomado la orientación paramétrica v , en la misma dirección que las curvas de horizonte. De este modo, la parametrización lleva a cabo las siguientes asociaciones entre los puntos extremos y su valores paramétricos en el futuro parche:

- Al punto $P_{1,1}$ se le asocia el valor paramétrico $u = 0, v = 0$.
- Al punto $P_{1,n}$ se le asocia el valor paramétrico $u = 0, v = 1$.
- Al punto $P_{m,1}$ se le asocia el valor paramétrico $u = 1, v = 0$.

Al punto $P_{m,n}$ se le asocia el valor paramétrico $u = 1, v = 1$.

Para los demás puntos, se aplica una parametrización dependiente de la distancia entre puntos, cuyas expresiones son :

$$u_{p,j} = \frac{\sum_{i=1}^p dd_i}{\sum_{i=1}^m dd_i} \quad (4.3)$$

$$v_{i,p} = \frac{\sum_{j=1}^p d_{i,j}}{\sum_{j=1}^n d_{i,j}} \quad (4.4)$$

En donde $d_{i,j}$, es el módulo del vector que une los puntos $P_{i,j}$ y $P_{i,(j+1)}$, mientras que dd_i , es el módulo del vector que une los puntos $P_{i,1}$ y $P_{(i+1),1}$. Como resultado final, dispondremos de tantos parches como horizontes hayan sido interpolados.

4.4.4 PROPAGACION SOBRE LOS PARCHES DE HORIZONTE

Los parches obtenidos mediante la interpolación, servirán de base geométrica para obtener las trayectorias geodésias. El procedimiento desarrollado para la evaluación de cada camino superficial, se basa en la aproximación de la geodésia mediante tramos rectos de corto recorrido, como se verá a continuación.

La siguiente figura muestra la secuencia de vectores que se definen sobre la superficie del parche, a modo de pequeños incrementos de avance.

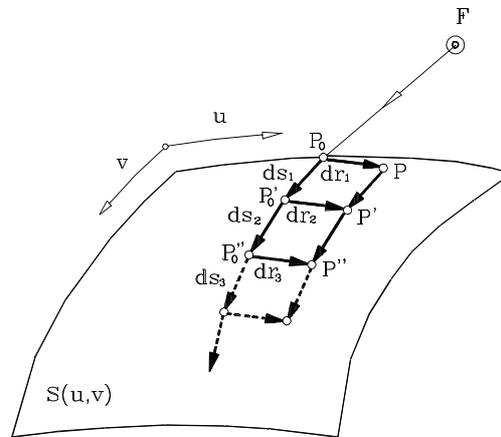


Fig.-4.27 Propagación superficial en un parche.

En donde P_0 representa el punto de arranque de la geodésia sobre el contorno $v = 0$, que se corresponde con la primera curva de horizonte, como ya se describió anteriormente. A partir de este punto, comienza a construirse una malla de puntos que avanza sobre la superficie, describiendo mediante tramos rectilíneos la trayectoria geodésica. Para ello se genera un punto de apoyo, denotado por P , que es obtenido aplicando un desplazamiento $d\vec{r}$ en dirección perpendicular al vector de incidencia $F\vec{P}_0$. Este desplazamiento vendrá dado por la siguiente expresión:

$$\left(\frac{\partial x}{\partial u} \cdot \Delta u + \frac{\partial x}{\partial v} \cdot \Delta v\right) \hat{e}_x + \left(\frac{\partial y}{\partial u} \cdot \Delta u + \frac{\partial y}{\partial v} \cdot \Delta v\right) \hat{e}_y + \left(\frac{\partial z}{\partial u} \cdot \Delta u + \frac{\partial z}{\partial v} \cdot \Delta v\right) \hat{e}_z \quad (4.5)$$

Si consideramos que el punto P_0 tiene de coordenadas paramétricas (u_0, v_0) , el punto P quedará definido por las coordenadas $(u_0 + \Delta u, v_0 + \Delta v)$. Los incrementos asociados al desplazamiento, se obtienen fijando un pequeño incremento de avance para la coordenada v y aplicando la condición de perpendicularidad para la coordenada u , tal y como define la siguiente expresión:

$$\vec{r} \cdot d\vec{r} = 0 \quad (4.6)$$

Con lo que el Δu queda definido por :

$$\Delta u = - \frac{\vec{r} \cdot \frac{\partial \vec{r}}{\partial v}}{\vec{r} \cdot \frac{\partial \vec{r}}{\partial u}} \cdot \Delta v \quad (4.7)$$

Una vez obtenido el punto de apoyo P en la dirección $d\vec{r}$, retornamos al punto P_0 , para realizar un nuevo desplazamiento en la dirección $d\vec{s}$, definida por la siguiente expresión:

$$\frac{\partial x}{\partial u_1} \cdot \Delta u_1 + \frac{\partial x}{\partial v} \cdot \Delta v_1) \hat{e}_x + \left(\frac{\partial y}{\partial u} \cdot \Delta u_1 + \frac{\partial y}{\partial v} \cdot \Delta v_1 \right) \hat{e}_y + \left(\frac{\partial z}{\partial u} \cdot \Delta u_1 + \frac{\partial z}{\partial v} \cdot \Delta v_1 \right) \hat{e}_z \quad (4.8)$$

El nuevo punto P'_0 tendrá de coordenadas paramétricas $(u_0 + \Delta u_1, v_0 + \Delta v_1)$, que pueden ser obtenidas fijando ahora un pequeño incremento para u y aplicando la condición de perpendicularidad definida por:

$$d\vec{r} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (4.9)$$

Con lo que se obtiene la siguiente expresión para Δv_1 :

$$\Delta v_1 = \frac{\left(dr_x \cdot \frac{\partial x}{\partial u} + dr_y \cdot \frac{\partial y}{\partial u} + dr_z \cdot \frac{\partial z}{\partial u} \right)}{\left(dr_x \cdot \frac{\partial x}{\partial v} + dr_y \cdot \frac{\partial y}{\partial v} + dr_z \cdot \frac{\partial z}{\partial v} \right)} \cdot \Delta u_1 \quad (4.10)$$

El punto P'_0 queda definido y el proceso continua retomando el punto P , para desplazarlo en dirección perpendicular a $d\vec{r}$, cuya expresión es:

$$\frac{\partial x}{\partial u} \cdot \Delta u_1' + \frac{\partial x}{\partial v} \cdot \Delta v_1') \hat{e}_x + \left(\frac{\partial y}{\partial u} \cdot \Delta u_1' + \frac{\partial y}{\partial v} \cdot \Delta v_1' \right) \hat{e}_y + \left(\frac{\partial z}{\partial u} \cdot \Delta u_1' + \frac{\partial z}{\partial v} \cdot \Delta v_1' \right) \hat{e}_z \quad (4.11)$$

Con lo que el punto P' , mostrado en la figura anterior, tendrá de coordenadas paramétricas $(u_0 + \Delta u + \Delta u_1', v_0 + \Delta v + \Delta v_1')$. El incremento para la coordenada v es obtenido a partir las condición:

$$d\vec{r} \cdot d\vec{s}' = 0 \quad (4.12)$$

Estableciéndose la relación siguiente:

$$\Delta v_1' = \frac{\left(dr_x \cdot \frac{\partial x}{\partial u} + dr_y \cdot \frac{\partial y}{\partial u} + dr_z \cdot \frac{\partial z}{\partial u} \right)}{\left(dr_x \cdot \frac{\partial x}{\partial v} + dr_y \cdot \frac{\partial y}{\partial v} + dr_z \cdot \frac{\partial z}{\partial v} \right)} \cdot \Delta u_1' \quad (4.13)$$

Por otro lado, el incremento para la coordenada u es fijado aplicando la siguiente condición :

$$|d\vec{s}| = |d\vec{s}'| \quad (4.14)$$

De este modo se ha completado un ciclo en el proceso de propagación, ahora puede ser definido un nuevo vector $d\vec{r}$ y proseguir la propagación a partir de los puntos P_0' , P' , para lograr las nuevas posiciones de avance definidas P_0'' , P'' , aplicándose de forma reiterada los pasos anteriormente descritos.

El proceso iterativo finalizará en el momento en que las coordenadas paramétricas del punto propagado, tomen valores fuera del intervalo de definición del parche. El proceso seguido para una geodésia que tiene como punto de arranque el P_0 , se repite para un número finito de puntos de arranque pertenecientes al contorno $u = 0$, con el propósito de obtener una nueva representación del parche base a través de las curvas de propagación.

4.4.5 GENERACION POR INTERPOLACION DE LOS PARCHES DE PROPAGACION

El proceso de interpolación B-Spline, se repite nuevamente, pero ahora los puntos describen las curvas de propagación sobre la superficie. En este caso es preciso parametrizar respecto a u y v , cada una de las coordenadas espaciales de los puntos que forman las curva de propagación. Para este caso, en la siguiente figura aparecen representadas las n curvas de propagación.

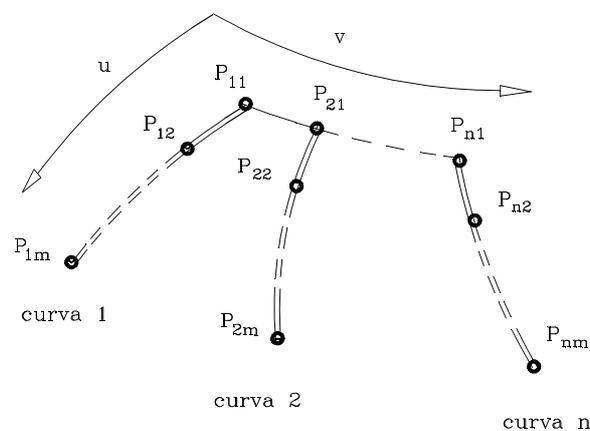


Fig.-4.28 Nomenclatura para las curvas de propagación.

La figura muestra a los puntos $P_{i,j}$, en donde i , es el subíndice que indica el número de curva al que pertenece y j el índice del punto dentro de la curva. Para este caso se ha tomado la orientación paramétrica u , en la misma dirección que las curvas de propagación, por lo que las curvas geodésias coincidirán con las curvas isoparamétricas a $v = cte.$. La parametrización aplicada, establece las siguientes asociaciones entre los puntos extremos y su valores paramétricos en el futuro parche de propagación:

Al punto $P_{1,1}$ se le asocia el valor paramétrico $u = 0, v = 0$.

Al punto $P_{n,1}$ se le asocia el valor paramétrico $u = 0, v = 1$.

Al punto $P_{1,m}$ se le asocia el valor paramétrico $u = 1, v = 0$.

Al punto $P_{n,m}$ se le asocia el valor paramétrico $u = 1, v = 1$.

Para los demás puntos, se aplica una parametrización dependiente de la distancia entre puntos, cuyas expresiones son :

$$u_{i,p} = \frac{\sum_{j=1}^p d_{i,j}}{\sum_{j=1}^m d_{i,j}} \tag{4.15}$$

$$v_{p,j} = \frac{\sum_{i=1}^p dd_i}{\sum_{i=1}^n dd_i} \tag{4.16}$$

En donde $d_{i,j}$, es el módulo del vector que une los puntos $P_{i,j}$ y $P_{i,(j+1)}$, mientras que dd_i , es el módulo del vector que une los puntos $P_{i,1}$ y $P_{(i+1),1}$. Como resultado final dispondremos de tantos parches, como horizontes hayan sido interpolados. La siguiente figura muestra el resultado final del proceso, denotándose por G_1, G_2, \dots, G_n las geodésias, que para este parche coinciden con las curvas isoparamétricas $v = cte$.

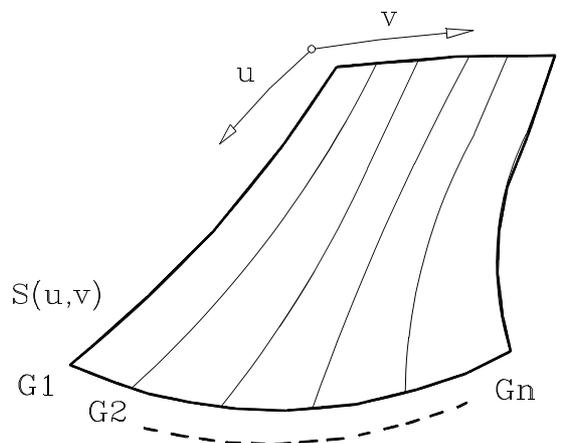


Fig.-4.29 Parche de propagación.

REFERENCIAS

- [1] G.Farin. "Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design". Academic Press. 1988.
- [2] M. E. Mortenson, " Geometric Modeling ", John Wiley & Sons.
- [3] David F. Rogers. "Procedural Elements for Computer Graphics". McGraw-Hill International Editions. 1985.
- [4] J.D. Foley, A, Van Dam, S.K. Feiner, J.F. Hughes. "Computer Graphics, principles and practice". Addison Wesley. 1990
- [5] R. E. Barnhill, R. F. Riesenfeld. "Computer Aided Geometric Desing". Academic Press 1974.

INTERACCIONES RAYO-GEOMETRIA

5.1 INTRODUCCION

En este capítulo desarrollaremos los diferentes algoritmos empleados para el análisis de las interacciones entre la geometría, los rayos incidentes y dispersados. La versatilidad que los parches de Bezier ofrecen a la hora de modelar una estructura tridimensional, es una de las mayores ventajas del método presentado; sin embargo, a la hora de analizar interacciones rayo-geometría ha sido preciso desarrollar una metodología propia, basada en el principio de Fermat en combinación con el método del gradiente conjugado como algoritmo de minimización.

Con la expresión interacción rayo-geometría, se pretende englobar a las diferentes intersecciones que es preciso calcular para obtener puntos sobre la superficie del modelo, en cada uno de los efectos considerados. Debido al carácter paramétrico de los parches y curvas de Bezier, para obtener los puntos es necesario recurrir a métodos iterativos.

Como ya se adelantó en el capítulo anterior, las direcciones de análisis son prefijadas al inicio de la simulación en forma de cortes para campo lejano. Por otro lado, si el análisis se realiza para campo cercano, la simulación contará con los puntos del espacio sobre los que se

desea conocer el campo electromagnético. Por lo tanto, al iniciarse el proceso iterativo se conoce la dirección de dispersión o el punto de test, la posición de la fuente y la descripción de la geometría.

La figura 5.1, muestra para cada efecto simple, el recorrido del rayo en sus dos etapas: la de incidencia, l_i ; y la de dispersión, l_s ; y en el caso del efecto correspondiente a la difracción en superficie, el camino recorrido sobre la superficie l_g .

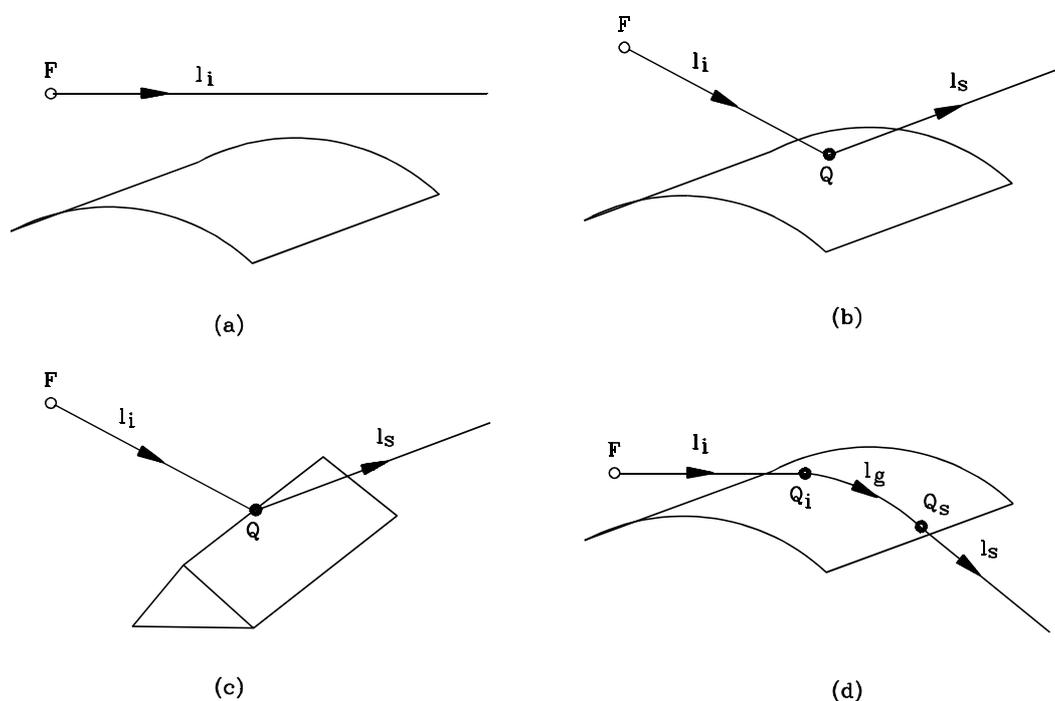


Fig.- 5.1 (a) Campo directo, (b) Campo reflejado, (c) Campo difractado en arista y (d) Campo difractado en superficie.

Para una dirección de análisis arbitraria se muestran los diferentes puntos de dispersión correspondientes a cada efecto; como puede apreciarse, los caminos ópticos l recorridos presentan características propias, sin embargo, tienen en común la propiedad de que el trayecto recorrido desde la fuente hasta el punto de observación es mínimo.

Esta característica favorece un planteamiento de resolución común a todos los efectos y por ello el método empleado consiste, básicamente, en definir una función para cada efecto y aplicar un algoritmo de minimización común, con lo que el problema se simplifica considerablemente. Por otro lado, discerniremos para cada efecto el caso de campo cercano y el

de campo lejano, debido a que para el primero, el campo resultante ha de obtenerse sobre un punto de observación próximo a la geometría, mientras que en el segundo, el campo ha de obtenerse para una dirección de observación. La definición y particularidades de las funciones aplicadas a cada efecto son descritas a continuación.

5.2 INTERACCIONES PARA LOS SIMPLES EFECTOS

5.2.1 ALGORITMOS DE INTERACCION RAYO-PARCHE

El análisis de la interacción puede ser requerido para el cálculo del campo directo con el fin de obtener la región de sombra que sobre este campo produce la geometría, o puede ser requerido por el campo reflejado con el fin de obtener el punto de reflexión sobre el parche. En ambas interacciones se ven involucrados una determinada dirección de propagación y un parche de Bezier. La diferencia estriba en que en la primera interacción, se desea conocer únicamente si un parche de Bezier se interpone en el camino de propagación de un rayo, mientras que en la segunda, se desea conocer si alguno de los puntos de la superficie de un parche de Bezier cumple la ley de Snell, dada la posición del foco y dada una dirección de dispersión.

■ Punto de intersección

El propósito del algoritmo implicado en el cálculo del campo directo es discernir si hay intersección entre un rayo y un parche de Bezier; por ello la función a minimizar puede ser definida como la función que describe la distancia entre un punto de la superficie del parche y la recta que describe la dirección de propagación del rayo.

» *Campo lejano* :

La siguiente figura muestra el planteamiento del problema, así como los vectores intervinientes en la función establecida para campo lejano.

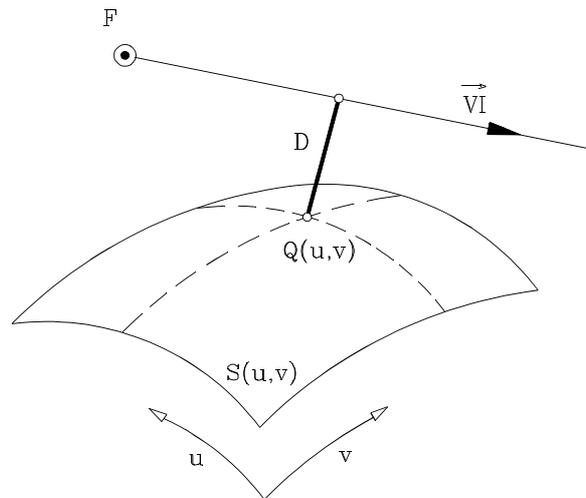


Fig.-5.2 Interacción rayo-parche de Bezier en el tratamiento de la ocultación para campo lejano.

El vector \vec{V}_I , que tiene por origen el punto F , define la semirecta representativa del rayo emitido por la fuente. Por otro lado, la distancia D representa la función distancia entre un punto de la superficie del parche de Bezier $Q(u,v)$ y la semirecta \vec{V}_I . En función de los vectores definidos en la figura 5.2, la expresión analítica que calcula la distancia D es:

$$D = \frac{|\vec{V}_I \times \vec{FQ}|}{|\vec{V}_I|} \quad (5.1)$$

La función anterior deberá ser minimizada mediante un método iterativo que contará con la movilidad del punto $Q(u,v)$ dentro del parche de Bezier; es decir, sus coordenadas paramétricas u y v deberán mantenerse dentro del intervalo $[0, 1]$. Una vez evaluado el mínimo de la función dentro del intervalo, su valor final indicará si el rayo ha interseccionado con el parche. Mediante este procedimiento se analiza cada una de las direcciones de interés con cada uno de los parches iluminados, obteniéndose la región de sombra producida por la geometría.

» *Campo cercano* :

Para el caso de campo cercano el procedimiento es similar, con la única diferencia de que la dirección de propagación quedará fijada mediante el vector que une el foco

emisor con el punto de test. La siguiente figura muestra el planteamiento del problema así como los vectores intervinientes en la función establecida en campo cercano.

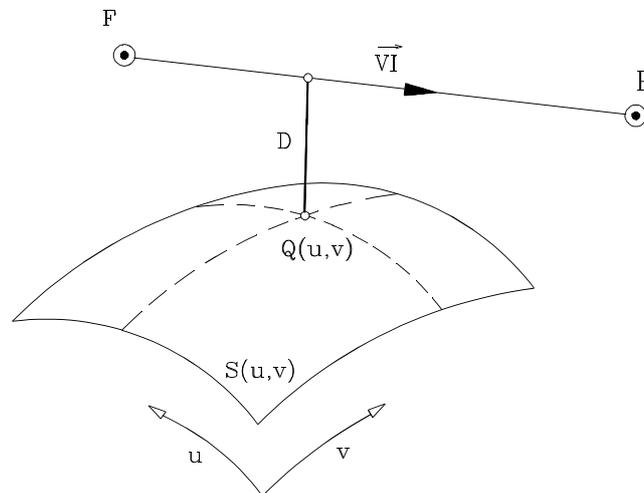


Fig.-5.3 Interacción rayo-parche de Bezier en el tratamiento de la ocultación en campo cercano.

En este caso la expresión analítica que calcula la distancia D es:

$$D = \frac{|\vec{FP} \times \vec{FQ}|}{|\vec{FP}|} \quad (5.2)$$

El procedimiento presentado para el cálculo de la región de sombra producida por la geometría sobre el campo directo, es aplicado de igual forma en la evaluación de posibles ocultaciones producidas a lo largo de las trayectorias de los rayos reflejados y difractados. En estos casos, la dirección de propagación \vec{V}_I estará definida por los vectores de propagación de los rayos dispersados previamente por la geometría.

■ Punto de reflexión

El propósito del algoritmo implicado en el cálculo del campo reflejado es la búsqueda del punto de reflexión sobre un parcho de Bezier. La función a minimizar, en este caso, representa la distancia recorrida por el rayo desde el foco emisor hasta el punto

de observación.

En la reflexión, la trayectoria del rayo puede descomponerse claramente en dos partes y por lo tanto la distancia total recorrida puede expresarse como suma de dos distancias del siguiente modo :

$$D = D1 + D2 \quad (5.3)$$

En donde $D1$ representará la distancia recorrida por el rayo antes de la reflexión y $D2$ la recorrida después de la reflexión. La metodología difiere sensiblemente para campo lejano y cercano en la definición y evaluación de la distancia tras la reflexión, como se vera a continuación.

» *Campo lejano* :

La siguiente figura muestra el planteamiento del problema así como los vectores intervinientes en la función establecida para campo lejano.

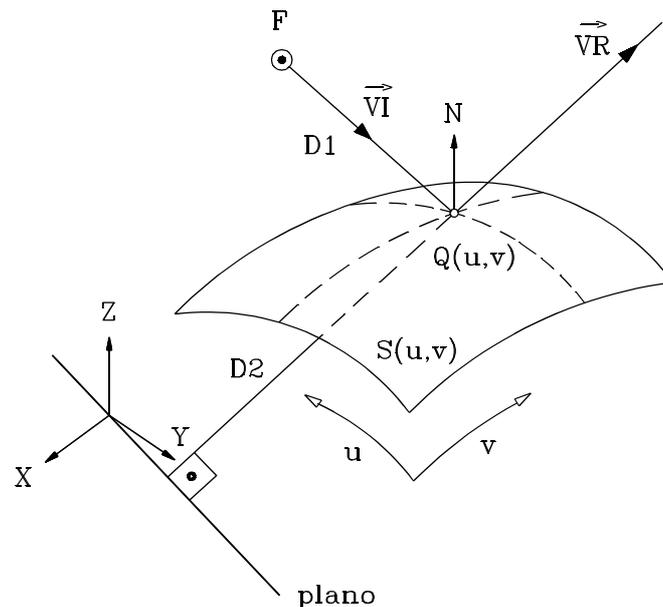


Fig.- 5.4 Interacción rayo-parche de Bezier en el tratamiento de la reflexión en campo lejano.

La figura anterior define al punto $Q(u, v)$ como punto de reflexión, que satisface la ley de Snell para la dirección de reflexión definida por \vec{VR} y para un foco emisor determinado y definido por F . La distancia $D1$, es la distancia entre los puntos F y $Q(u, v)$; por otro lado, la distancia $D2$ es la distancia recorrida por el rayo a partir de la reflexión. Sin embargo, por encontrarnos en el caso de campo lejano,

el punto de observación se sitúa en el infinito, lo que imposibilita la evaluación de esa distancia. Para evitar esta indeterminación se recurre a un plano de referencia perpendicular a la dirección de reflexión y que en todo momento contenga al origen de coordenadas sobre el que estamos trabajando. De este modo la distancia $D2$ queda definida como la distancia entre el punto de reflexión $Q(u, v)$ y el plano de referencia.

Las expresiones que definen ambas distancias son :

$$D1 = | F\vec{Q} | \quad (5.4)$$

$$D2 = \frac{\vec{VR} \cdot \vec{Q}}{|\vec{VR}|} \quad (5.5)$$

La función definida como la suma de ambas distancias debe ser minimizada mediante un método iterativo, que contará con la movilidad del punto $Q(u, v)$ a lo largo del parche de Bezier mediante la modificación de las coordenadas paramétricas u y v . La existencia de un mínimo para un punto del parche cuyas coordenadas paramétricas pertenezcan al intervalo $[0, 1]$, supone la existencia de un punto de reflexión cuyas características geométricas pueden ser calculada fácilmente, una vez fijadas las coordenadas paramétricas que definen el punto de reflexión.

» *Campo cercano* :

En el caso de campo cercano, el punto de observación está definido previamente y además es próximo a la geometría, por lo que no es preciso recurrir a planos de referencia, simplificandose considerablemente el planteamiento. La siguiente figura muestra el punto de reflexión obtenido sobre un parche de Bezier en campo cercano.

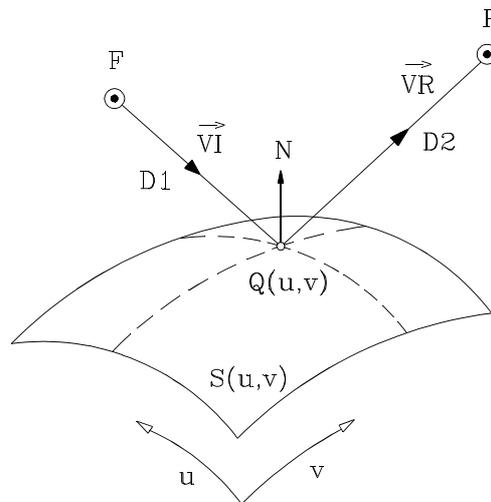


Fig.-5.5 Interacción rayo-parche de Bezier en el tratamiento del campo reflejado en campo cercano.

En este caso la dirección de reflexión vendrá fijada en cada iteración por el vector \vec{QP} . De este modo la distancia $D1$ será el modulo del vector \vec{FQ} y la distancia $D2$ será el modulo del vector \vec{QP} . Así, las expresiones que definen ambas distancias en campo cercano son:

$$D1 = | \vec{FQ} | \quad (5.6)$$

$$D2 = | \vec{QP} | \quad (5.7)$$

El procedimiento a seguir a continuación es similar al aplicado en campo lejano y, por lo tanto, la existencia de un mínimo para un punto situado sobre el parche cuyas coordenadas paramétricas pertenezcan al intervalo $[0, 1]$, supone la existencia de un punto de reflexión cuyas características geométricas pueden ser calculadas fácilmente, una vez fijadas las coordenadas paramétricas que definen el punto.

5.2.2 ALGORITMO DE INTERACCION RAYO-ARISTA

El planteamiento y metodología seguida en el caso de la interacción rayo-arista es similar a la empleada en el caso anterior.

■ Punto de difracción en aristas

Este algoritmo será utilizado para el cálculo de los puntos de difracción sobre las curvas de Bezier definidas como arista. Ahora la función a minimizar representa la distancia recorrida por el rayo desde el foco emisor hasta el punto de observación, pasando por el punto de difracción. De este modo, la trayectoria del rayo puede ser dividida en dos recorridos y por lo tanto, la distancia total puede expresarse como suma de dos distancias del siguiente modo:

$$D = D1 + D2 \quad (5.8)$$

En donde $D1$ representará la distancia recorrida por el rayo antes de la difracción y $D2$ la recorrida después de la difracción.

La geometría involucrada en este tipo de interacción son las curvas de Bezier seleccionadas como iluminadas o aristas, por esta razón el espacio paramétrico está representado por una única coordenada.

Al igual que ocurría en el caso del campo reflejado, el planteamiento debe ser diferenciado para campo lejano y cercano.

» *Campo lejano* :

A continuación se muestran los vectores y distancias definidas en la interacción rayo-arista en el caso de campo lejano.

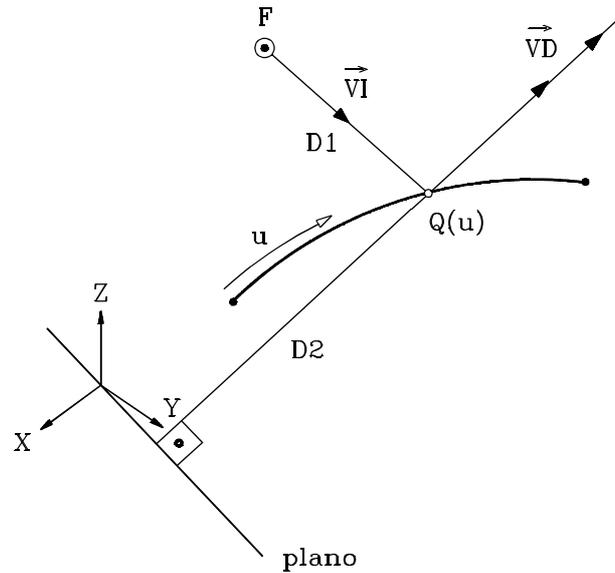


Fig.-5.6 Interacción rayo-curva de Bezier en el tratamiento de la difracción para campo lejano.

La figura anterior define un foco emisor F y un punto $Q(u)$ como punto de difracción para el que se genera un cono de rayos difractados, entre los que se encuentra el rayo cuya dirección de propagación coincide con la dirección de análisis \vec{V}_D . La distancia $D1$ es la distancia entre los puntos F y $Q(u)$, mientras que la distancia $D2$ es la distancia recorrida por el rayo a partir de la difracción. Para la evaluación de la distancia $D2$ se recurre, al igual que para el campo reflejado, a un plano de referencia perpendicular a la dirección de difracción que contenga al origen de coordenadas sobre el que estamos trabajando. De este modo, la distancia $D2$ queda definida como la distancia entre el punto de difracción $Q(u)$ y el plano de referencia. Las expresiones que definen ambas distancias son:

$$D1 = | \vec{FQ} | \tag{5.9}$$

$$D2 = \frac{\vec{V}_D \cdot \vec{Q}}{| \vec{V}_D |} \tag{5.10}$$

La función definida como la suma de ambas distancias debe ser minimizada mediante un método iterativo, que en este caso contará con la movilidad del punto

$Q(u)$ a lo largo de la curva de Bezier, mediante la modificación de la coordenada paramétrica u . La existencia de un mínimo para un punto de la curva cuyas coordenadas paramétricas pertenezcan al intervalo $[0, 1]$, supone la existencia de un punto de difracción. De este modo, las características geométricas pueden ser calculadas fácilmente, una vez fijada la coordenada paramétrica que definen el punto de difracción.

» *Campo cercano* :

En el caso de campo cercano, el punto de observación está definido previamente, por lo que la dirección de difracción estará definido por el vector \vec{QP} . Por otro lado, el punto de observación es próximo a la geometría, por lo que no es preciso recurrir a planos de referencia en el cálculo de la distancia $D2$, simplificandose considerablemente el planteamiento. La siguiente figura muestra el punto de difracción obtenido sobre una curva de Bezier en campo cercano.

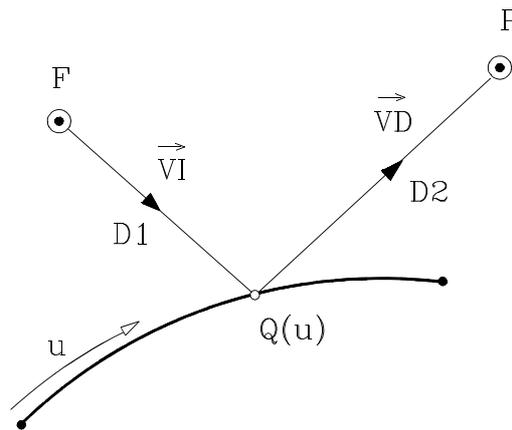


Fig.-5.7 Interacción rayo-curva de Bezier en el tratamiento de la difracción en campo cercano.

En este caso, la distancia $D1$ viene dada por el módulo del vector \vec{FQ} y la distancia $D2$ será el módulo del vector \vec{QP} . Así, las expresiones que definen ambas distancias en campo cercano son:

$$D1 = | \vec{FQ} | \quad (5.11)$$

$$D2 = | \vec{QP} | \quad (5.12)$$

El procedimiento a seguir a continuación es similar al aplicado en campo lejano y por lo tanto, la existencia de un mínimo para un punto situado sobre el parche cuyas coordenadas paramétricas pertenezcan al intervalo $[0, 1]$, supone la existencia de un punto de difracción cuyas características geométricas pueden ser calculadas fácilmente, una vez fijadas las coordenadas paramétricas que definen el punto.

5.2.3 ALGORITMO DE INTERACCION RAYO-CURVA ISOPARAMETRICA

Este algoritmo es aplicado durante el proceso de cálculo de las curvas horizonte en la etapa de generación de los parches de propagación. En este caso la interacción se produce entre el rayo incidente procedente del foco emisor y una curva isoparamétrica determinada. Este proceso es puramente geométrico y por lo tanto no es necesario distinguir entre campo cercano y lejano, sin embargo es preciso recordar que la búsqueda se realiza para diferentes posiciones del foco emisor, como ya se describió en el capítulo 4. En la siguiente figura se muestra la condición de perpendicularidad que ha de cumplir la normal N a la superficie en el punto P perteneciente a una curva isoparamétrica $u = cte.$, con respecto a la dirección de incidencia que él mismo define a través del vector \vec{FP} .

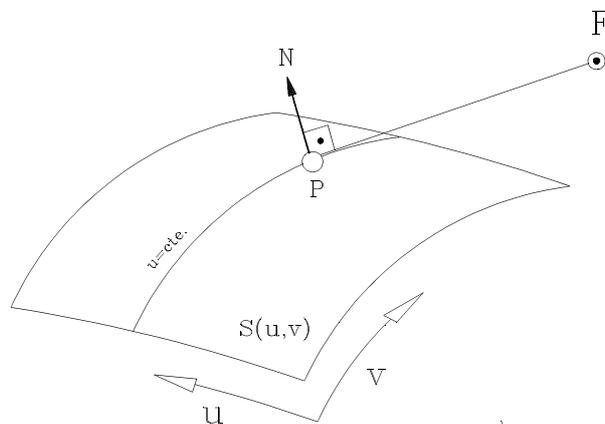


Fig.- 5.8 Interacción rayo-curva isoparamétrica $u=cte.$

La búsqueda se realiza para un número finito de curvas isoparamétricas, repartidas de manera uniforme dentro del intervalo $[0, 1]$. Análogamente, la siguiente figura muestra el proceso de búsqueda sobre el otro conjunto de curvas isoparamétricas que sobre un parche se definen.

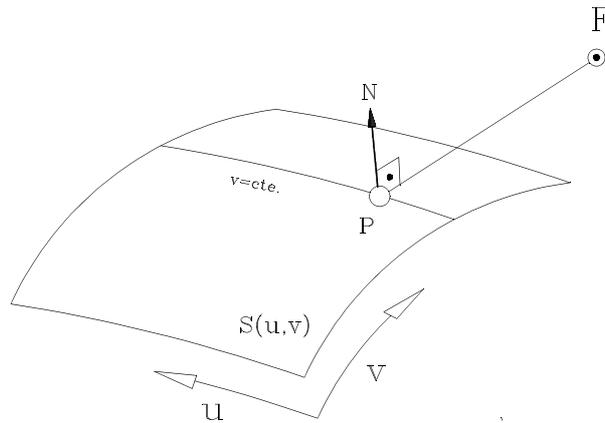


Fig.- 5.9 Interacción rayo-curva isoparamétrica $v=cte.$

En ambos casos, el proceso de búsqueda basa su algoritmo en la minimización de una función dependiente del producto escalar entre el vector normal N y la dirección de incidencia \vec{FP} .

$$F = (\vec{FP} * \vec{N}) \quad (5.13)$$

En donde el vector normal queda definido por :

$$\vec{N} = \frac{\vec{r}^u \times \vec{r}^v}{|\vec{r}^u \times \vec{r}^v|} \quad (5.14)$$

Siendo :

$$\vec{r}^u = \frac{\partial \vec{r}(u, v)}{\partial u}, \quad \vec{r}^v = \frac{\partial \vec{r}(u, v)}{\partial v} \quad (5.15)$$

La determinación del punto P se realizará a través de la minimización de la función F . En el caso representado en la figura 5.8, el punto estará sujeto a la curva isoparamétrica $u = cte.$ y por lo tanto sólo podrá modificar su posición modificando

el valor de la coordenada v . En la figura 5.9, el caso es el contrario ya que el punto deberá pertenecer a la curva isoparamétrica $v = cte$.

5.2.3 ALGORITMO DE INTERACCION RAYO-GEODESIA

En las descripciones de las interacciones rayo-parche y rayo-arista anteriormente expuestas, se ha visto involucrada la geometría en forma de parches y curvas de Bezier, obtenidos por la descomposición de los parches NURBS que originalmente modelan la estructura. A continuación, se describirá la interacción rayo-geodésia con el fin de explicar el procedimiento seguido en la obtención del efecto de la difracción en superficie, producido por la onda de superficie. Para ello es preciso conocer las trayectorias que sobre la superficie recorre el rayo; estos caminos, llamados geodésias, son de difícil obtención para geometrías arbitrarias debido a la imposibilidad de establecer expresiones analíticas.

Para entender la descripción de la interacción rayo-geodésia es preciso recordar que los parches de propagación, descritos en el capítulo 4, son superficies B-Spline, con la particularidad de que las curvas isoparamétricas $v = cte$, son curvas geodesias para todos aquellos rayos que inciden desde el foco emisor sobre cualquier punto de la curva $u = 0$. Estas características pueden observarse en la siguiente figura.

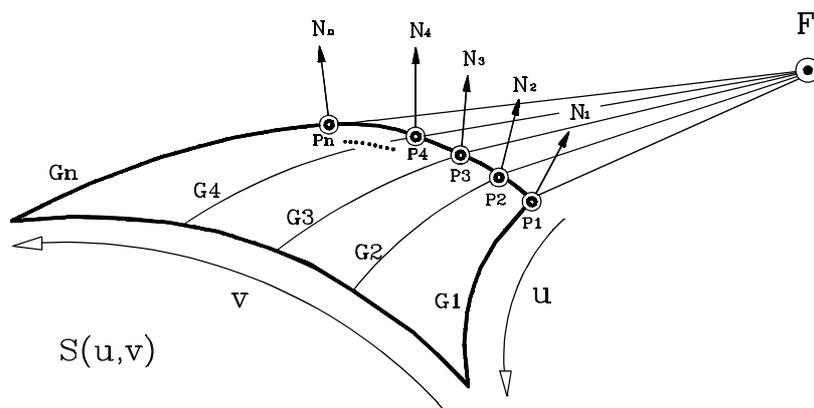


Fig.- 5.10 Parche de propagación empleado en el calculo del efecto de la onda de superficie.

El parche de la figura 5.10 tiene como particularidad que su contorno, $u = 0$,

representa una curva de horizonte para el foco emisor, F , ya que para cada punto, P_i , de dicha curva sus correspondientes normales, N_i , son perpendiculares a los vectores de incidencia, \vec{FP}_i . Por otro lado, de cada punto, P_i , nace una curva geodésica para la incidencia del vector, \vec{FP}_i , correspondiente. La característica principal de estas curvas, denotadas en la figura anterior por G_i , es que son, para el caso de un parche de propagación, curvas isoparamétricas, $v = cte.$. Así, la geodésica, G_1 , se corresponderá con la curva $v = 0$, la G_n con la curva $v = 1$ y entre ambas habrá infinitas curvas sobre las que podremos aplicar el algoritmo de interacción.

■ Punto de difracción en superficie

Una vez establecidas las características fundamentales de los parches de propagación, es conveniente entender a este tipo de parches como una sucesión de trayectorias superficiales ligadas a la posición del foco emisor y limitadas por los contornos del parche que las soporta.

La interacción rayo-geodésica, únicamente se analizará sobre los parches de propagación que previamente han sido calculados y que más adelante describiremos. Al igual que en todas las interacciones presentadas, será preciso diferenciar entre campo cercano y lejano.

» *Campo lejano* :

El planteamiento en el caso de la interacción rayo-geodésica para campo lejano consiste en la búsqueda de un punto, $Qd(u, v)$, sobre la superficie del parche de propagación por el que pase una curva isoparamétrica, $v = cte.$, tangente a la dirección de análisis. A continuación se muestran los vectores definidos en la interacción rayo-geodésica en el caso de campo lejano.

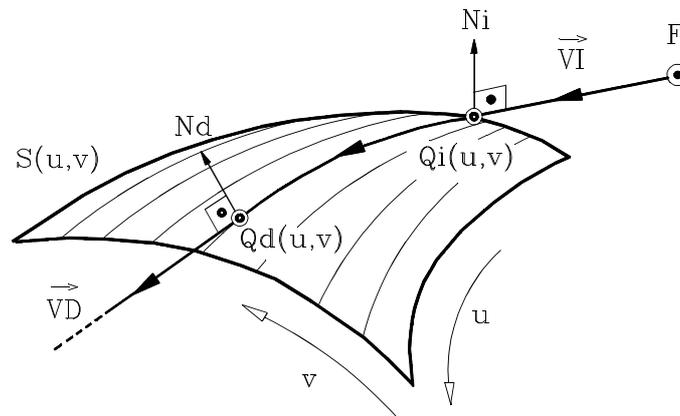


Fig.- 5.11 Interacción rayo-geodésia el tratamiento de la difracción en superficie para campo lejano.

En la búsqueda del punto $Qd(u, v)$ para una dirección de análisis \vec{VD} , se ven involucrados únicamente dos vectores, que son: el vector que describe la dirección de análisis y el vector tangente a la curva isoparamétrica que pase por el punto de coordenadas u y v que se esté analizando. Con estos dos vectores puede establecerse una función dependiente del producto escalar y, mediante su minimización, obtener el punto sobre el parche para el que la dirección de la tangente a la curva isoparamétrica, o lo que es lo mismo su derivada paramétrica, y la dirección de análisis coincidan. La expresión de esta función viene dada por:

$$F = (1 - \vec{VD} * \vec{r}^u) \tag{5.16}$$

En donde:

$$\vec{r}^u = \frac{\partial \vec{r}(u, v)}{\partial u} \tag{5.17}$$

La obtención del punto $Qd(u, v)$ para el cual la función F toma el valor cero, significará la fijación a través del valor paramétrico, v , de la geodésia que ha recorrido el rayo entre $Qi(u, v)$ y $Qd(u, v)$. Es decir, una vez conocido el punto $Qd(u, v)$, en el cual el rayo abandona la superficie, el recorrido superficial previo puede ser evaluado geoméricamente en todo momento, puesto que se desarrolla a lo largo la curva isoparamétrica que une los punto $Qi(u, v)$ y $Qd(u, v)$. Como puede observarse, no es preciso definir funciones a minimizar dependientes de las distancias de propagación, debido a que la trayectoria superficial que recorre el rayo es

dadas las propiedades del parche de propagación, una geodésia y por lo tanto, es un camino mínimo, al igual que el camino recorrido desde el foco F hasta el punto $Q_i(u, v)$.

» *Campo cercano* :

El planteamiento sigue siendo similar, con la salvedad de que en este caso la dirección de análisis es fijada para cada iteración por el vector que une los puntos $Q_d(u, v)$ y P , como puede observarse en la siguiente figura análisis.

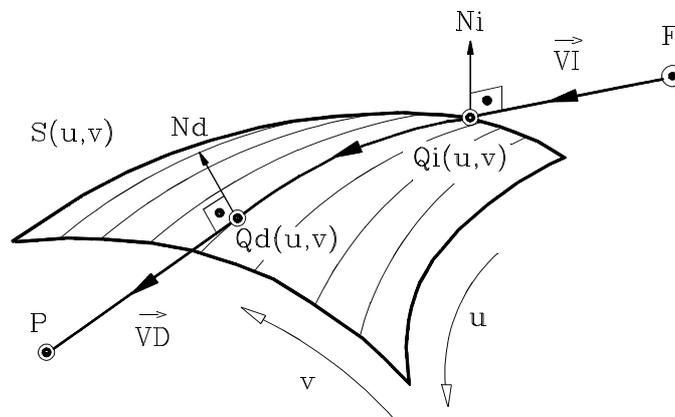


Fig.- 5.12 Interacción rayo-geodésica en el tratamiento de la onda de superficie para campo cercano.

La expresión aplicada para campo cercano es por lo tanto :

$$F = (1.0 - \overline{Qd P} * \vec{r}^u) \tag{5.18}$$

En donde :

$$\vec{r}^u = \frac{\partial \vec{r}(u, v)}{\partial u} \tag{5.19}$$

La función definida se minimizará mediante un método iterativo, que contará con la movilidad del punto $Q_d(u, v)$ a lo largo del parche de propagación, mediante la modificación de las coordenadas paramétricas u y v . La existencia de un mínimo para un punto del parche cuyas coordenadas paramétricas pertenezcan al intervalo $[0, 1]$, supone la existencia de un punto de difracción sobre la superficie.

5.3 INTERACCIONES PARA DOBLES EFECTOS

El tratamiento aplicado para el caso de los dobles efectos, es idéntico al aplicado en los efectos simples anteriormente expuestos. La diferencia fundamental consiste en que ahora la trayectoria del rayo interactuará con dos partes diferenciadas de la geometría. En la siguiente figura se muestran los dobles efectos considerados. Al igual que para los simples efectos, el camino recorrido por el rayo durante su dos interacciones es mínimo, tal y como se muestra en la siguiente figura.

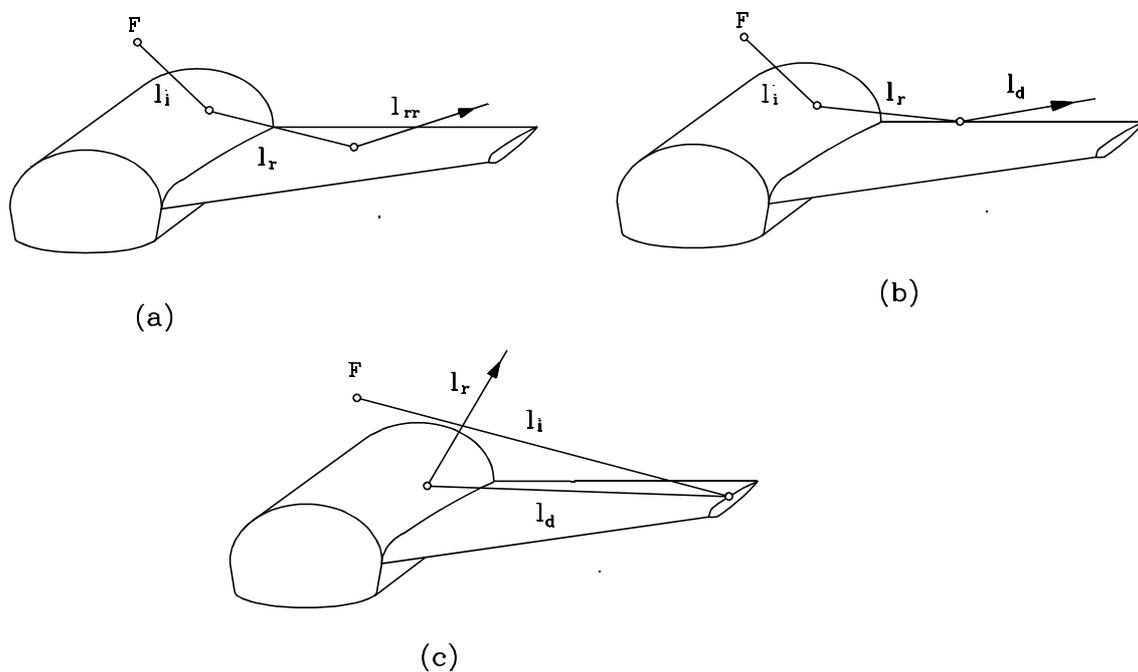


Fig.- 5.13 Caminos ópticos para los dobles efectos.

El procedimiento a seguir consistirá, por lo tanto, en definir una función a minimizar dependiente de tres distancias, que son: la distancia recorrida por el rayo desde el foco emisor hasta el punto correspondiente a la primera interacción, $D1$; la distancia entre este punto y el punto de la segunda interacción, $D2$; y la distancia final recorrida hasta el punto de observación, $D3$. Así pues, la función a minimizar se define del siguiente modo:

$$D = D1 + D2 + D3 \quad (5.20)$$

Los dobles efectos deben entenderse como simples combinaciones de efectos simples, por ello, los algoritmos descritos para las simples interacciones, pueden ser ampliados sin grandes complicaciones y ser aplicados de igual forma. De entre los diferentes dobles efectos

existentes, el código contempla tres tipos, considerados como los mas importantes, y que se describen a continuación.

5.3.1 ALGORITMO DE INTERACCION RAYO-PARCHE-PARCHE

Este tipo de doble efecto, puede producirse de manera importante en geometrías complejas. El tratamiento aplicado en esta tesis consiste en la búsqueda de parejas de parches diferentes $B1(u, v)$ y $B2(u, v)$, sobre los que el rayo procedente de la fuente se refleja de modo consecutivo.

» *Campo lejano* :

La siguiente figura muestra el planteamiento del problema para campo lejano.

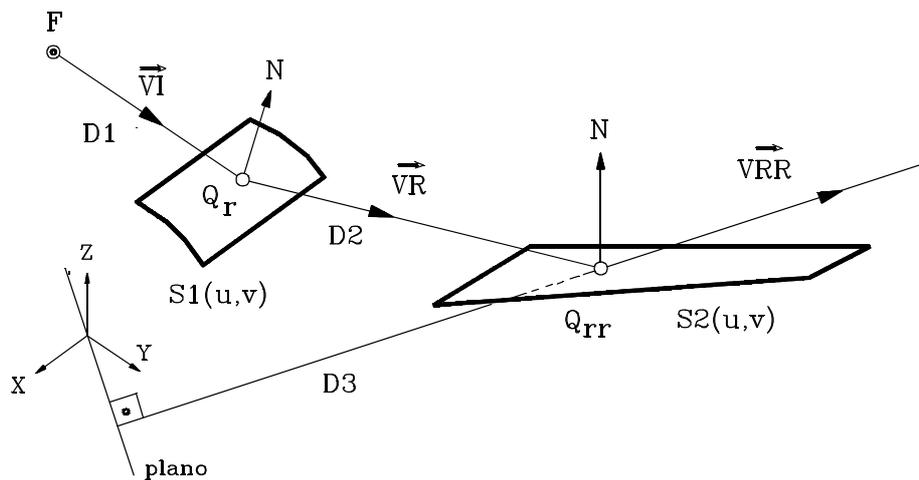


Fig.- 5.14 Doble interacción rayo-parche de Bezier, para campo lejano.

En donde Q_r representa el primer punto de reflexión y Q_{rr} el segundo. Para ambos puntos, la ley de Snell se cumplirá respecto a sus direcciones de incidencia y de reflexión correspondientes. De este modo las distancias $D1$, $D2$ y $D3$, respetando la nomenclatura establecida en la figura, vendrán dadas por las expresiones siguientes :

$$D1 = | \overline{FQ_r} | \tag{5.21}$$

$$D2 = | \overline{Q_r Q_{rr}} | \tag{5.22}$$

$$D3 = \frac{\vec{VRR} \cdot \vec{Q}_{rr}}{|\vec{VRR}|} \tag{5.23}$$

La función definida como la suma de las tres distancias deberá ser minimizada mediante un método iterativo que ahora contará con la movilidad de los puntos $Q_r(u, v)$ y $Q_{rr}(u, v)$, a lo largo de cada parche de Bezier. La existencia de un mínimo para la función, fijará dos puntos de reflexión a través de sus coordenadas paramétricas pertenecientes al intervalo $[0, 1]$ de cada uno de los parches.

» *Campo cercano* :

En este caso, la única modificación se presenta al calcular la distancia $D3$ recorrida por el rayo en su parte final. La siguiente figura muestra el planteamiento aplicado para campo cercano.

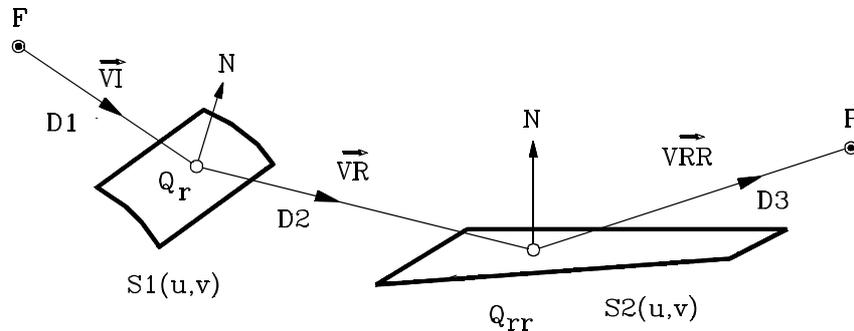


Fig.- 5.15 Doble interacción rayo-parche de Bezier, para campo cercano.

Y

de igual modo las expresiones empleadas en campo cercano son:

$$D1 = |\overline{FQ_r}| \tag{5.24}$$

$$D2 = |\overline{Q_rQ_{rr}}| \tag{5.25}$$

$$D3 = |\overline{Q_{rr}P}| \tag{5.26}$$

5.3.2 ALGORITMO DE INTERACCION RAYO-PARCHE-ARISTA

En este doble efecto intervienen un parche de Bezier $BI(u, v)$ y una curva de Bezier $C1(u)$, sobre los cuales, el rayo procedente de la fuente se refleja primero y se difracta después.

» *Campo lejano* :

La siguiente figura muestra el planteamiento del problema para campo lejano.

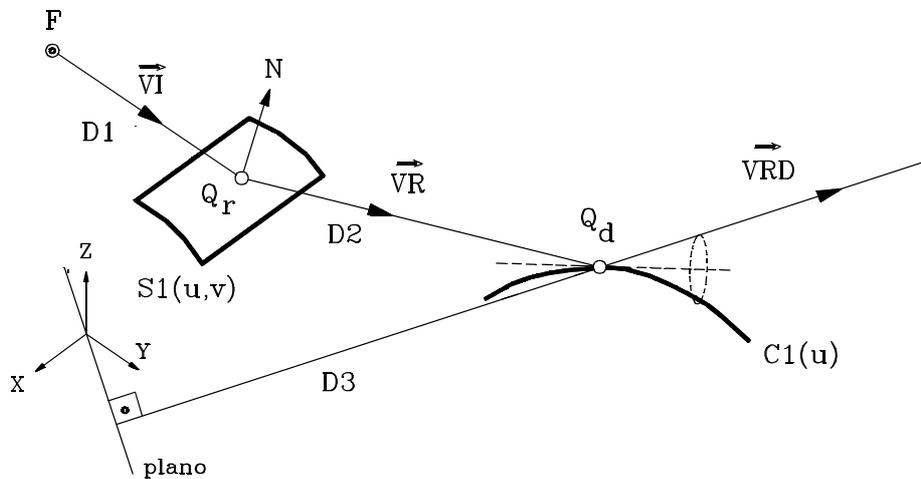


Fig.- 5.16 Doble interacción: rayo-parche, rayo-curva, para campo lejano.

En donde Q_r representa el punto de reflexión y Q_d el punto de difracción. De este modo las distancias $D1$, $D2$ y $D3$, respetando la nomenclatura establecida en la figura, vendrán dadas por las expresiones siguientes:

$$D1 = | \overline{FQ_r} | \tag{5.27}$$

$$D2 = | \overline{Q_rQ_d} | \tag{5.28}$$

$$D3 = \frac{\vec{VRD} \cdot \vec{Q_d}}{|\vec{VRD}|} \tag{5.29}$$

La función definida como la suma de las tres distancias deberá ser minimizada mediante un método iterativo, que ahora contará con la movilidad de los puntos $Q_r(u, v)$ y $Q_d(u)$, a lo largo del parche y curva de Bezier respectivamente. La existencia de un mínimo para la función, fijará los dos de interacción a través de sus coordenadas paramétricas pertenecientes al intervalo $[0, 1]$, de cada uno de los elementos de Bezier.

» *Campo cercano* :

De igual modo que en los casos anteriores, la modificación para campo cercano se presenta al calcular la distancia $D3$ recorrida por el rayo en su parte final. La siguiente figura muestra el planteamiento aplicado para campo cercano.

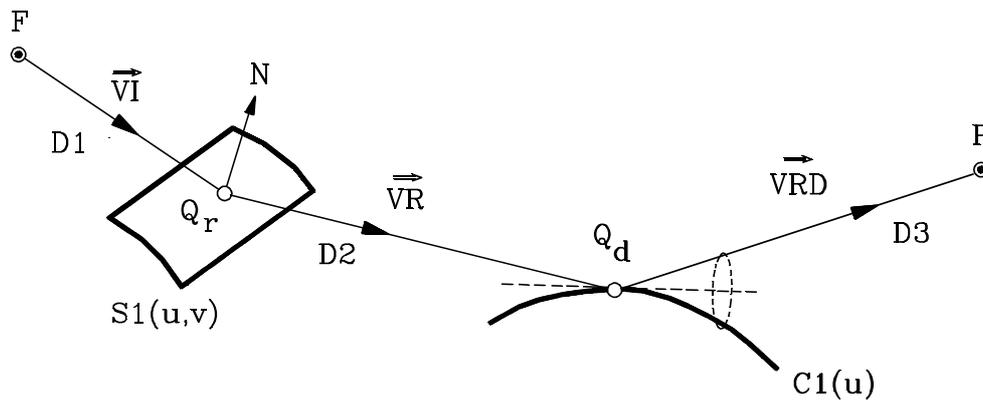


Fig.- 5.17 Doble interacción: rayo-parche, rayo-curva, para campo cercano.

Y de igual modo las expresiones empleadas en campo cercano son:

$$D1 = | \overline{FQ_r} | \tag{5.30}$$

$$D2 = | \overline{Q_rQ_d} | \tag{5.31}$$

$$D3 = | \overline{Q_dP} | \tag{5.32}$$

5.3.3 ALGORITMO DE INTERACCION RAYO-ARISTA-PARCHE

En este doble efecto, al igual que en el anterior, intervienen un parches de Bezier $BI(u, v)$ y una curva de Bezier $CI(u)$. Sin embargo, ahora el orden en la interacción se invierte y por ello en primer lugar el rayo procedente de la fuente se difracta y posteriormente se refleja.

» *Campo lejano* :

La siguiente figura muestra el planteamiento del problema para campo lejano.

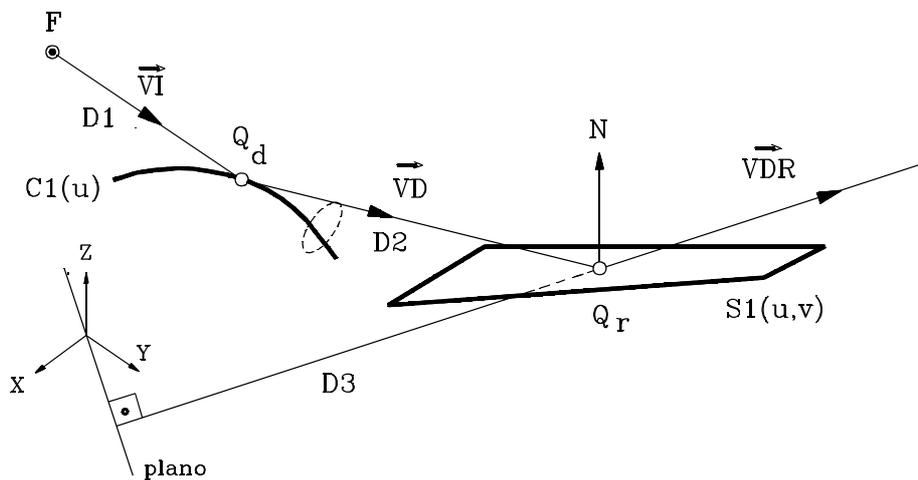


Fig.- 5.18 Doble interacción : rayo-curva, rayo-parche, para campo lejano.

En donde Q_d es el punto de difracción y Q_r representa el punto de reflexión. De este modo las distancias $D1$, $D2$ y $D3$, vendrán dadas por las expresiones siguientes:

$$D1 = | \overline{FQ_d} | \tag{5.33}$$

$$D2 = | \overline{Q_dQ_r} | \tag{5.34}$$

$$D3 = \frac{V\vec{DR} \cdot \vec{Q}_r}{|V\vec{DR}|} \tag{5.35}$$

La función definida como la suma de las tres distancias deberá ser minimizada mediante un método iterativo, que ahora contará con la movilidad de los puntos $Q_d(u)$ y $Q_r(u, v)$, a lo largo de la curva y del parche de Bezier respectivamente. La existencia de un mínimo para la función, fijará los dos de interacción a través de sus coordenadas paramétricas pertenecientes al intervalo $[0, 1]$ de cada uno de los elementos de Bezier.

» *Campo cercano* :

De igual modo que en los casos anteriores, la modificación para campo cercano se presenta al calcular la distancia $D3$ recorrida por el rayo en su parte final. La siguiente figura muestra el planteamiento aplicado para campo cercano.

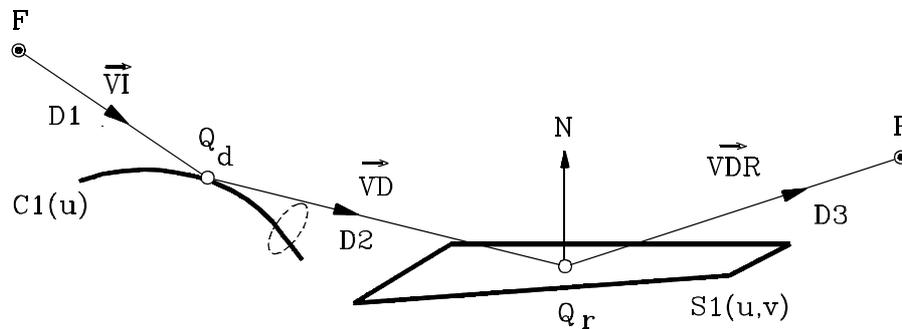


Fig.- 5.19 Doble interacción: rayo-curva, rayo-parche, para campo cercano.

Y de igual modo las expresiones empleadas en campo cercano son:

$$D1 = | \overline{FQ_d} | \tag{5.36}$$

$$D2 = | \overline{Q_dQ_r} | \tag{5.37}$$

$$D3 = | \overline{Q_rP} | \tag{5.38}$$

5.4 METODOS ITERATIVOS DE MINIMIZACION DE FUNCIONES : EL GRADIENTE CONJUGADO

Una vez definidas las funciones para cada uno de los efectos, se abordará el problema de la minimización con el fin de encontrar las posibles soluciones. Debido a la imposibilidad de expresar la solución mediante funciones elementales o funciones conocidas, es preciso recurrir a uno de los métodos de la matemática de cálculo más importante, que es el método de las interacciones o de las aproximaciones sucesivas. La esencia de un método iterativo puede describirse del siguiente modo [1].

Consideremos la ecuación :

$$f(x) = 0 \quad (5.39)$$

Supongamos que la función es continua sobre el intervalo $[a, b]$ y que se anula en el intervalo en al menos un punto ξ . El propósito del método será obtener como mínimo una de las raíces reales pertenecientes al intervalo $[a, b]$.

El primer paso consiste en reemplazar la expresión (5.39) por otra equivalente, cuyas raíces son las mismas y que tiene la forma:

$$x = \varphi(x) \quad (5.40)$$

El método iniciará su proceso de cálculo empleando cualquier valor $x_0 \in [a, b]$, como aproximación inicial. Si tomamos como valor inicial :

$$x_0 = \frac{(a + b)}{2} \quad (5.41)$$

Obtendremos para la primera aproximación:

$$x_1 = \varphi(x_0) \quad (5.42)$$

De igual modo la siguiente aproximación vendrá dada por:

$$x_2 = \varphi(x_1) \quad (5.43)$$

Continuando este proceso obtendremos la sucesión de números:

$$x_0, x_1, x_2, \dots, x_n \quad (5.44)$$

Definidos por las expresiones:

$$x_0 = \frac{(a+b)}{2} ; x_n = \varphi(x_{n-1}) \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (5.45)$$

Siendo la función $\varphi(x)$ continua, y si existe $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = \xi$, entonces podremos escribir:

$$\xi = \varphi(\xi) \quad (5.46)$$

Es decir, ξ es la solución de (5.39) y por lo tanto de (5.40).

La representación de la función $\varphi(x)$, puede realizarse por un conjunto infinito de procedimientos y su forma ejerce una influencia importante en la convergencia del método y en la velocidad de la misma. Por otro lado, la solución obtenida por un método numérico, suele ser aproximada y en general está acompañada de cierto error, originado por diferentes aspectos, que son [2]:

- La no correspondencia entre el problema matemático y el fenómeno real que se ha de estudiar. Este tipo de error se calibra comparando los resultados experimentales con las soluciones obtenidas y por su naturaleza suele caracterizarse como inevitable.
- El error correspondiente a los datos de entrada o parámetros iniciales. La influencia de este tipo de error suele estimarse modificando los parámetros de partida dentro de sus márgenes de error y fijando las soluciones.
- El error propio del método de solución. Este tipo de error se debe a que con un método numérico suele resolverse otro problema más simple que aproxima el problema inicial. Por otro lado, en la mayoría de casos los métodos numéricos se construyen a base de un proceso infinito que en el límite conduce a la solución buscada, sin embargo el proceso es interrumpido en un determinado paso que proporciona una solución aproximada.
- Los errores de redondeo en las operaciones aritméticas calculadas. En este caso el error es de tipo técnico y su magnitud va a depender de la exactitud numérica de la máquina empleada.

Todo método numérico debe asegurar una exactitud dada, como requisito fundamental; sin embargo, existen otro tipo de cualidades muy valoradas, que son: el número de operaciones realizadas es reducido, los requerimientos de memoria son pequeños y su simplicidad. Por lo general, estas condiciones no se cumplen simultáneamente y además varían dependiendo del

método aplicado. En la actualidad existen numerosos algoritmos numéricos y la elección de uno de ellos debe estar basada en las siguientes consideraciones:

■ Existen métodos que únicamente necesitan evaluar la función en el proceso iterativo de minimización (*métodos de búsqueda directa*), métodos que además requieren evaluar la primera derivada de la función (*métodos de gradiente*) y métodos que requieren además la evaluación de las segundas derivadas parciales (*métodos de Newton-Raphson*) [3]. En general, los algoritmos que emplean la derivada de la función son más potentes que los que no la utilizan, por ello es recomendable emplear este tipo de métodos. En ocasiones la diferenciación puede realizarse analíticamente y en otras es preciso recurrir a la diferenciación numérica con el consecuente error numérico añadido; en cualquier caso, es conveniente utilizar las propiedades de derivabilidad de la función siempre y cuando el esfuerzo requerido sea razonable.

■ Los requerimientos de memoria son dependientes del número de dimensiones N con que se esté trabajando [4]. Para valores de N moderados la memoria no plantea problemas, sin embargo es preciso escoger entre métodos que requieren almacenamientos del orden de N^2 y métodos que requieren N .

Si estas consideraciones las relacionamos con el problema de minimización de las funciones planteado en capítulos anteriores, se observará que todas ellas involucran vectores con superficies o curvas de Bezier derivables en todos sus puntos y por lo tanto, deberán ser utilizadas esta característica ya que su aplicación favorece su efectividad. El método del gradiente conjugado es el utilizado en esta tesis para la minimización de las funciones planteadas, y sus principales características son : requiere la primera derivada de la función, su almacenamiento es del orden de N , y precisa de un algoritmo de subminimización para una dimensión. En la actualidad existen diferentes variaciones sobre el algoritmo original, entre las que caben destacar el algoritmo de Fletcher-Reeves y el de Polak-Ribiere [4].

Para entender el funcionamiento del método del gradiente conjugado, debe considerarse que los métodos multidimensionales consisten en una secuencia de pasos, cada uno implicado en la búsqueda de un mínimo para una de las dimensiones. En la búsqueda unidimensional del mínimo de una función unimodal, es decir que presenta un único mínimo en el dominio de búsqueda, es preciso definir un plan de búsqueda consistente en ir reduciendo el dominio de búsqueda de manera secuencial.

Los planes de búsqueda iterativos de esta naturaleza deben moverse a lo largo de una línea desde un punto base x_0 hasta alcanzar una nueva posición base x_1 . Desde aquí se elige una dirección de avance y se determina una nueva base x_2 , y así hasta llegar al mínimo. El proceso matemático de forma genérica puede expresarse del siguiente modo [3]:

$$x_{k+1} = x_k + \lambda_k s \quad (5.47)$$

En donde x_k es el punto base inicial; x_{k+1} el siguiente punto base; λ_k , o paso, es un número real que hace a la función $f(x)$ mínima a lo largo de la línea $x = x_k + \lambda s$; y s es un vector que define la dirección del movimiento. Como puede apreciarse, el procedimiento iterativo debe resolver tres tipos de problemas, que son:

► *Determinación del punto de arranque o punto base inicial :*

En general no existen reglas establecidas para fijar este punto y por ello su determinación, en la mayor parte de los casos, está avalada por la práctica.

► *Fijación de la longitud del paso entre dos puntos base :*

Para la determinación del paso en la sucesiva obtención de los puntos base, pueden aplicarse métodos de búsqueda unidimensionales [3-5]. Estos métodos pueden ser agrupados dependiendo de la utilización de la derivada de la función. Entre los más importantes, que no requieren la derivada, destacan: el de Fibonacci, el de la sección dorada, y el de Rosenbrock. Por otro lado, entre los que precisan la derivada de la función, destacan: el de la bisección, el de la falsa posición, el de Newton-Raphson, y el de la Interpolación cuadrática.

► *La dirección de avance desde cada punto base :*

El tipo de dirección de avance caracteriza en gran medida al método, por ello, las propiedades de las direcciones conjugadas son las que determinan las características del método del gradiente conjugado. Existen diferentes tipos de direcciones de búsqueda para una función $f(X)$

con $X \in E_n$ y $n \geq 2$, entre las que pueden ser destacadas: direcciones axiales, dirección de descenso de máxima pendiente, dirección correspondiente al método de Newton-Raphson y direcciones conjugadas [3].

Los métodos definidos como "Métodos del gradiente conjugado" son comúnmente aceptados como los más eficaces debido a que su convergencia es rápida, la base de este tipo de métodos radica en las propiedades de las direcciones conjugadas. El algoritmo del gradiente conjugado en su forma original puede ser descrito en forma de pasos del siguiente modo:

Paso I

- Seleccionar el punto de arranque X_0 y obtener la dirección de búsqueda inicial (dirección de máxima pendiente)

$$s_0 = -g_0 = -\nabla f(X_0), \quad H_0 = H(X_0), \quad k = 0$$

Paso II

$$\lambda_k = \frac{-g_k' s_k}{s_k' H s_k}, \quad X_{k+1} = X_k + \lambda_k s_k \quad (5.48)$$

$$g_{k+1} = \nabla f(X_{k+1}), \quad H_{k+1} = H(X_{k+1}) \quad (5.49)$$

$$\beta_k = \frac{g_{k+1}' H_k s_k}{s_k' H s_k}, \quad s_{k+1} = -g_{k+1} + \beta_k s_k \quad (5.50)$$

Paso III

- Si $k < n - 1$, entonces se iguala $k = k + 1$ regresándose al paso II. Por otro lado, si $k = n - 1$, entonces $X_0 = X_n$ y se regresa la paso I

Esta secuencia de pasos deberá ir acompañada de la aplicación del test de parada, consistente en el cumplimiento de la igualdad $\nabla f(k) = 0$.

El método del gradiente conjugado presenta numerosas variedades, entre las que caben destacar la propuesta por Fletcher-Reeves y la de Polak-Ribiere [4][6]. La modificación fundamentalmente consiste en evaluar λ_k mediante la minimización de la función $f(X)$ a lo largo de una línea, evitándose el cálculo de H_k . Así, el proceso dividido en sus correspondientes pasos puede escribirse del siguiente modo :

Paso I

- Seleccionar el punto de arranque X_0 y obtener la dirección de búsqueda inicial (dirección de máxima pendiente) $s_0 = -\nabla f(X_0)$, $k = 0$.
- test de parada : ¿ $\nabla f(X_0) = 0$?
- Afirmativo : X_0 es el punto solución.
- Negativo : Continuar

Paso II

- Obtener λ_k tal que minimice la expresión $f(X_k + \lambda s_k)$ para $\lambda > 0$.

Paso III

- Se tomará $X_{k+1} = X_k + \lambda_k s_k$.
- test de parada : ¿ $\nabla f(X_{k+1}) = 0$?
- Afirmativo : X_{k+1} es el punto solución.
- Negativo : Continuar

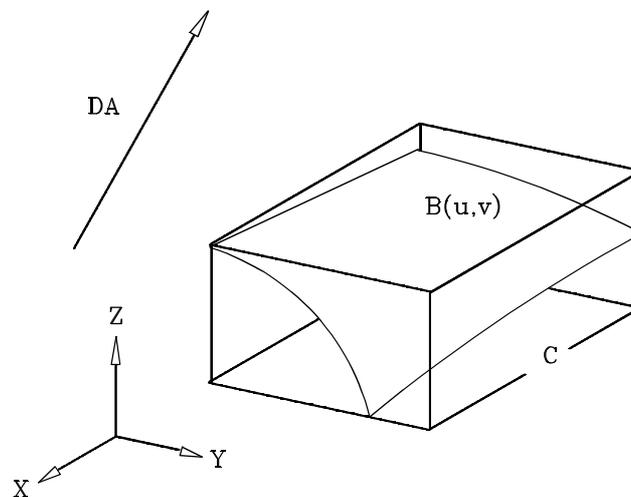
Paso III

- Siendo $g_k = \nabla f(X_k)$ y $g_{k+1} = \nabla f(X_{k+1})$, calcularemos s_{k+1} del siguiente modo :
 - Fletcher-Reeves : $s_{k+1} = -g_{k+1} + \frac{g_{k+1}' g_{k+1}}{g_k' g_k} s_k$
 - Polak-Ribiere : $s_{k+1} = -g_{k+1} + \frac{(g_{k+1}' g_k - g_k' g_{k+1})' g_{k+1}}{g_k' g_k} s_k$
- Actualizaremos $k = k + 1$ y regresaremos al Paso II.

Una vez repasados los conceptos básicos correspondientes al método del gradiente conjugado, así como sus variaciones más significativas, podemos caracterizar el método empleado en la minimización de las funciones expuestas en apartados anteriores del siguiente modo: Método del Gradiente Conjugado en la versión de Polak-Ribiere en combinación con el método de la interpolación cuadrática en la subminimización unidimensional.

5.5 INTERACCION RAYO-CAJA ENVOLVENTE

Las cajas envolventes, que fueron descritas anteriormente en el capítulo 4, desempeñan un papel importante en las técnicas de selección aplicadas durante todo el tratamiento geométrico. El método consiste en la sustitución del parche de Bezier por su correspondiente caja envolvente y realizar el análisis de la interacción entre la dirección de análisis y la caja [7]. El volumen definido por estas cajas en forma de paralelepípedo envolvente de cada parche de Bezier, sirve de descripción geométrica sobre la que puede ser aplicado un algoritmo de interacción de rápida ejecución y que no requiere de método iterativo para su resolución. En la siguiente figura se muestra el entorno geométrico de aplicación de este algoritmo.



El método basa su efectividad en el estudio de la intersección de una recta con cada uno de los planos paralelos a los coordenados que definen el paralelepípedo. Para ello se representa al rayo como la intersección de tres planos, cada uno de los cuales es paralelo a un eje coordenado del sistema de referencia. Cada uno de estos planos son denotados por:

$$\alpha : B y + C z + D = 0 \quad \text{Plano paralelo al eje X que contiene al rayo.}$$

$\beta : A'x + C'z + D' = 0$ Plano paralelo al eje Y que contiene al rayo.

$\gamma : A''x + B''y + D'' = 0$ Plano paralelo al eje Z que contiene al rayo.

Los coeficientes asociados a cada uno de los planos, podrán ser fijados a través del conocimiento de dos puntos pertenecientes a la recta que definen, siendo uno el foco emisor y otro un punto arbitrario en la trayectoria del rayo.

Una vez definido el rayo como intersección de tres planos, se procede a calcular la intersección del mismo con cada una de las caras que delimitan el parche de Bezier. Para ello y cuando se vayan a estudiar las intersecciones del rayo con los planos del paralelepípedo, consideramos para simplificar cálculos, las siguientes igualdades:

Caras con $X = cte.$: Rayo expresado como intersección del plano β y del plano γ .

Caras con $Y = cte.$: Rayo expresado como intersección del plano α y del plano γ .

Caras con $Z = cte.$: Rayo expresado como intersección del plano α y del plano β .

Una vez obtenido el punto de intersección entre el rayo y cualquiera de los planos, será comprobada la pertenencia del punto al espacio acotado por la cara. En caso afirmativo, el algoritmo habrá finalizado su tarea, indicando que el parche encerrado por la caja es un firme candidato a interactuar con la dirección de análisis. En caso de no haber habido intersección rayo-caja, el parche de Bezier no deberá ser considerado en adelante, por lo que será descartado.

REFERENCIAS

- [1] N.I. Danilina, N.S. Dubróvskaya, O.P. Kvashá, G.L. Smirnov. "Matemática de Cálculo", Editorial Mir Moscú. 1985.
- [2] E.A. Vólkov. "Métodos Numéricos", Editorial Mir Moscú. 1987.
- [3] K. V. Mital "Métodos de Optimización". Editorial Limusa, 1984.
- [4] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery. "Numerical Recipes in FORTRAN", Cambridge University Press. 1986.
- [5] A.M. Cohen. "Análisis Numérico", Editorial Reverte S.A. 1977
- [6] Eiselt. Pederzoli. Sandblom. "Continuous Optimization Models". W. de Gruyter, 1987.
- [7] Pizarroso M., Cátedra M.F., Gago E., "Programa de Interrogación Volumétrica de Geometrías Arbitrarias". Documentación del software /UPM/ETSIT/DSSR/7/91.

CAMPOS

6.1 INTRODUCCION

El campo resultante de la aplicación del método propuesto por esta tesis, es producto de la superposición de los diferentes efectos considerados. De entre todos ellos el más evidente es el campo directo con la sombra producida por la estructura que soporta la antena. El algoritmo encargado de discernir rigurosamente cuando un rayo intersecta con la geometría, ha sido descrito en capítulo anterior; sin embargo, para aquellos rayos libres de obstáculos en su trayectoria, es preciso evaluar el campo electromagnético. Para ello, es imprescindible poseer la información necesaria para simular el diagrama de radiación de la antena real, para cualquier dirección del espacio, de una manera sencilla.

6.2 CARACTERIZACION DE LA FUENTE

La información más común acerca del campo radiado de forma aislada por una antena, suele darse en forma de cortes esféricos con un muestreo angular de paso fijo; este tipo de información es obtenida a través de las medidas realizadas por el fabricante. El número de cortes facilitado, aun siendo los principales, no contienen todas las direcciones del espacio que un método como el propuesto por esta tesis requiere. Para resolver este inconveniente, pueden optarse por dos caminos: recurrir a técnicas de interpolación [1], y a partir del conocimiento de un número finito de cortes, obtener el campo para direcciones arbitrarias; o simular el diagrama de radiación de la antena real mediante una agrupación de elementos radiadores, de los que conocemos su comportamiento para cualquier dirección del espacio. A continuación desarrollaremos ambas técnicas de caracterización.

6.2.1 CARACTERIZACION DE LA FUENTE MEDIANTE CORTES ESFERICOS

Este tipo de caracterización de la fuente es común en cualquier software simulador, debido a que posibilita la utilización directa de una serie de cortes correspondientes a la antena emisora real, en aquellos casos en los que la síntesis de la antena real se hace complicada o desconocida. Sin embargo, tiene ciertos inconvenientes que pueden desaconsejar el empleo de este tipo de caracterización. Un diagrama de radiación tridimensional como el que muestra la siguiente figura, debe ser muestreado para cortes determinados con el fin de poder ser almacenado [2].

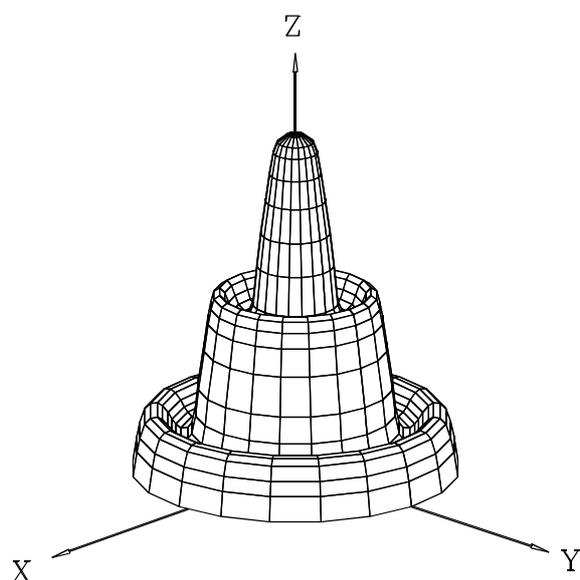


Fig.-6.1 Diagrama de radiación tridimensional con $\theta \in [0,90]$ y $\varphi \in [0,360]$.

La información del campo viene expresada en módulo y fase, para las dos componentes esféricas principales (θ, φ) correspondientes al sistema asociado a la antena. Para la obtención del campo radiado por la antena en una dirección arbitraria, se puede aplicar interpolación, tomándose como valores de apoyo los cuatro valores de campo conocidos, correspondientes a las direcciones más cercanas a la dirección arbitraria. Esto es mostrado en la siguiente figura, para dos cortes arbitrarios: uno a θ constante y otro a φ constante.

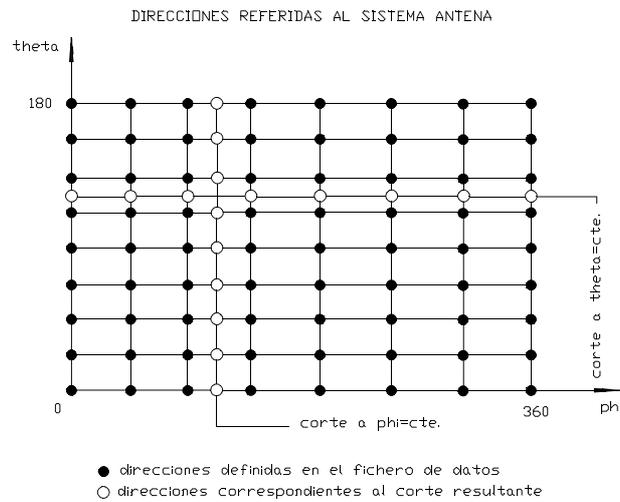


Fig.- 6.2 Plano de direcciones correspondientes a cortes esféricos.

Si tomamos un determinado valor indefinido, el proceso de interpolación es mostrado a continuación.

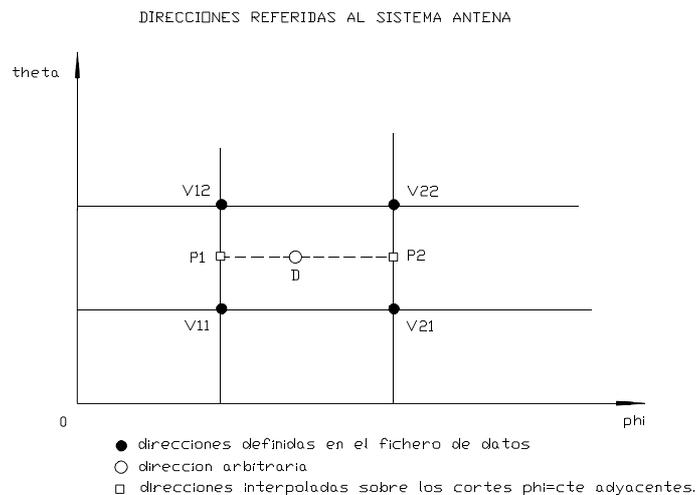
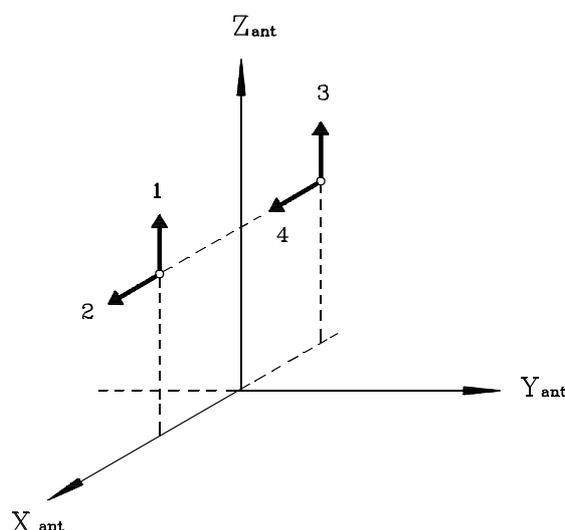


Fig.-6.3 Interpolación lineal aplicada para direcciones arbitrarias.

El valor del campo correspondiente a la dirección arbitraria representada por D , se obtiene tras haber interpolado los puntos $P1$ y $P2$ entre las direcciones $V11$, $V12$ y $V21$, $V22$, respectivamente. Para el caso de un diagrama con simetría de revolución, la interpolación se realizará directamente entre las direcciones $V11$, $V12$, puesto que ahora la dirección correspondiente a D estará contenida en uno de los cortes a ϕ constante.

6.2.2 CARACTERIZACION DE LA FUENTE MEDIANTE UNA AGRUPACION DE DIPOLOS ELEMENTALES

Este tipo de caracterización está basada en la posibilidad de sintetizar diagramas de radiación de antenas reales, mediante la fijación espacial de una agrupación de dipolos infinitesimales [3]. El proceso de síntesis consiste en la elección de los momentos dipolares para cada elemento así como de su posición y orientación, de tal forma que el campo obtenido por superposición, se ajuste con exactitud al verdadero diagrama de radiación. Este proceso no es sencillo y requiere de experiencia en la manipulación de este tipo de fuentes, ya que por lo general hay que recurrir al método de "prueba y error" para determinar la configuración dipolar óptima. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de una configuración dipolar común, acompañada de una tabla en la que se especifica la información necesaria, así como del sistema de coordenadas empleado en este tipo de descripción.



DIPOLO	TIPO	POSICION	ORIENTACION	MODULO	FASE
1	ELECTRICO	X_1, Y_1, Z_1	$\theta_1 \quad \phi_1$	M_1	F_1
2	MAGNETICO	X_2, Y_2, Z_2	$\theta_2 \quad \phi_2$	M_2	F_2
3	ELECTRICO	X_3, Y_3, Z_3	$\theta_3 \quad \phi_3$	M_3	F_3
4	MAGNETICO	X_4, Y_4, Z_4	$\theta_4 \quad \phi_4$	M_4	F_4

Fig.- 6.4 Agrupación dipolar característica.

En la configuración anterior, formada por cuatro dipolos infinitesimales, cada dipolo consta de un origen referido al sistema común de coordenadas denotado por X_{ant} , Y_{ant} y Z_{ant} , que denominaremos sistema de antena. El origen de este sistema servirá como punto de aplicación de la antena sobre la estructura. Por otro lado, la orientación de cada dipolo estará referida al mismo sistema y vendrá dada a través de su matriz de rotación correspondiente, con

lo que la configuración dipolar queda definida plenamente y puede ser montada en sustitución de la antena real, en cualquier posición de la superficie del modelo.

Para fijar la configuración dipolar completa sobre el modelo, bastará definir el punto de aplicación y la matriz de rotación del sistema antena con respecto al sistema absoluto. Con este procedimiento se permite orientar en cualquier dirección la configuración dipolar en conjunto. La figura siguiente muestra los diferentes tipos de sistemas de coordenadas establecidos durante el proceso de simulación. Todos ellos pueden relacionarse a través de sus correspondientes vectores de traslación y matrices de rotación.

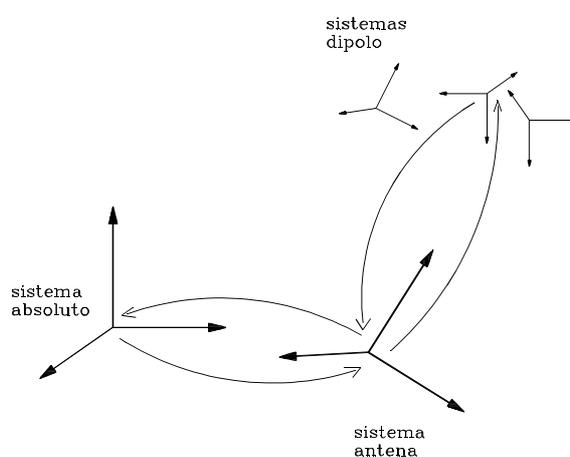


Fig.- 6.5 Sistemas de coordenadas empleados durante el proceso de simulación.

El número de sistemas dipolo se corresponderá con el número de dipolos que configuren la fuente y cada origen constituirá un foco emisor que será preciso tratar en la parte electromagnética de la simulación de forma independiente. Sin embargo, para tareas puramente geométricas relacionadas con la aplicación de criterios de selección de parches o curvas de Bezier, el conjunto de focos puede ser sustituido por un único foco obtenido promediando las posiciones de cada uno de los dipolos. Esta simplificación puede ser aplicada dada la reducida distancia que entre dipolos se establece para cualquier agrupación dipolar.

El campo electromagnético radiado por cada uno de los dipolos, es obtenido aplicando las expresiones correspondientes a las de un dipolo infinitesimal [2], como el que es mostrado en las siguientes figuras.

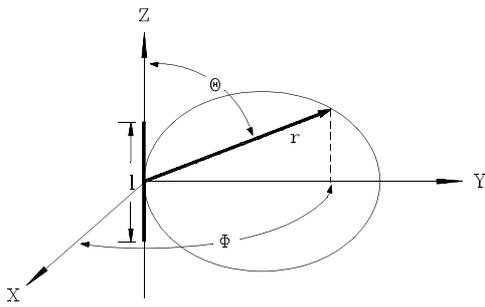


Fig.- 6.6 Sistema de coordenadas asociado a un dipolo infinitesimal ($l \ll \Lambda$).

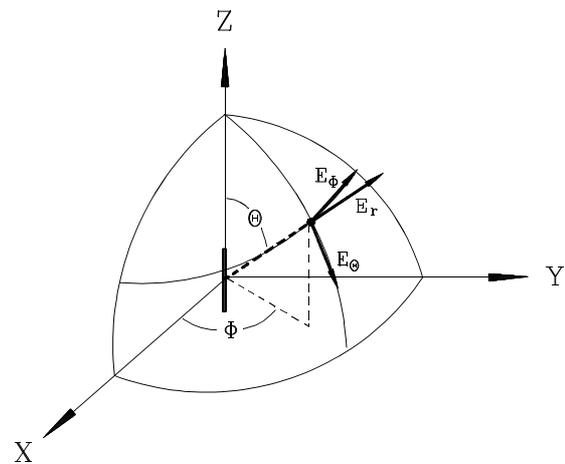


Fig.-6.7 Componentes esféricas del campo radiado por un dipolo infinitesimal.

Las expresiones correspondientes a un dipolo infinitesimal eléctrico en zona lejana $kr \gg 1$ son:

$$E_r = 0, \quad E_\theta \approx j \eta \frac{k I_0 l}{4 \pi r} \sin \theta e^{-jkr}, \quad E_\phi = 0 \quad (6.1)$$

$$H_r = 0, \quad H_\theta = 0, \quad H_\phi \approx j \frac{k I_0 l}{4 \pi r} \sin \theta e^{-jkr} \quad (6.2)$$

Por otro lado, el dipolo magnético infinitesimal, puede ser considerado como elemento equivalente a un pequeño lazo de corriente eléctrica de valor constante. Las expresiones que definen su campo de radiación, pueden ser obtenidas a partir de las de un dipolo eléctrico infinitesimal aplicando el principio de dualidad. Así, las expresiones del campo radiado por un dipolo infinitesimal eléctrico en zona lejana $kr \gg 1$ son:

$$E_r = 0, \quad E_\theta = 0, \quad E_\phi \approx -j \frac{k I_0 l}{4 \pi r} \sin \theta e^{-jkr} \quad (6.3)$$

$$\frac{I_0 l}{2 \pi \eta r^2} \cos \theta e^{-jkr} , \quad H_{\theta} \approx j \frac{k I_0 l}{4 \pi \eta r} \sin \theta e^{-jkr} , \quad E \quad (6.4)$$

Las relaciones anteriores son las aplicadas en la obtención del campo radiado por la agrupación de dipolos infinitesimales que conforman la antena. Los campos definidos están referidos a cada uno de los sistemas de coordenadas esférico asociado a cada uno de los dipolos. La variedad de sistemas de referencia ha de resolverse y para ello se centraliza el tratamiento de los campos refiriendolos a un sistemas de coordenadas común, que en este caso es el sistema absoluto. A continuación en la figura 6.8 se muestra la correspondencia de una dirección de propagación referida al sistema dipolo y absoluto.

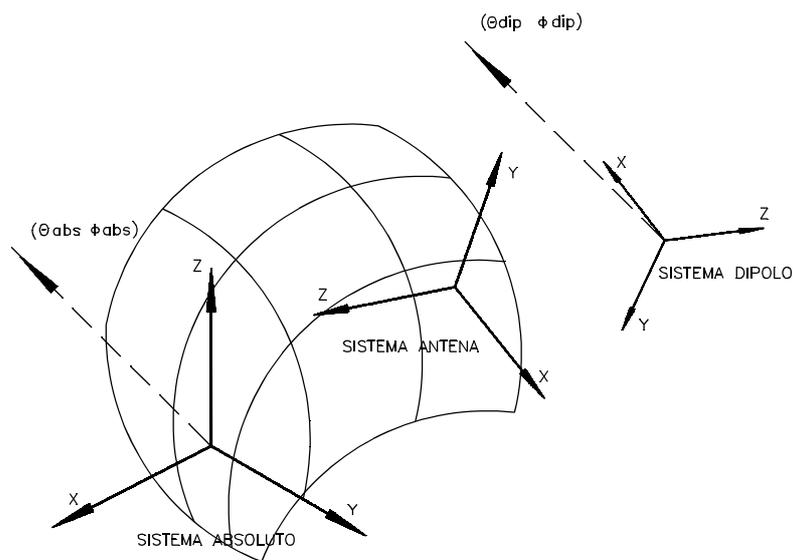


Fig.-6.8 Representación de la dirección de observación para diferentes sistemas de coordenadas.

Estos cambios de sistemas de coordenadas deben ser tenidos en cuenta en todo momento, ya que al coexistir tres sistemas ortogonales independientes, en ocasiones las componentes principales de los campos radiados originalmente por el dipolo puede cruzarse, producto de la desorientación de unos sistemas con otros. Por esta razón puede comprenderse que la referencia final de los campos sea el sistema absoluto, ya que por lo general está alineado con geometría, contiene los planos de simetría de la misma y su visualización es inmediata.

6.3 CAMPO DIRECTO

La evaluación del campo directo, consiste en la superposición de los campo radiados por cada uno de los dipolos. Para ello, es preciso analizar si alguna de las direcciones o los puntos próximos del análisis, son ocultados por la geometría y por lo tanto, el valor del campo directo es nulo.

La determinación de la región de sombra, se calcula de forma rigurosa aplicando los algoritmos de interacción rayo-geometría, descritos anteriormente. Sin embargo, antes de recurrir al proceso iterativo de intersección, se aplican una serie de criterios rápidos, para realizar una nueva selección sobre los parches de Bezier iluminados [4-6].

A diferencia de los criterios iniciales de selección, ahora el descarte se realiza en función de la dirección de propagación analizada, y por lo tanto los criterios serán aplicados para cada una de ellas. A continuación se describirán los diferentes criterios, que dependientes de la dirección de observación, son aplicados para reducir el numero de parches iluminados a evaluar por el método iterativo. Para cada uno de ellos será preciso realizar una división entre campo cercano y lejano, con el fin de especificar las particularidades existentes en cada caso.

CAMPO LEJANO

■ *Criterio I :*

Establecida la dirección de análisis, denotada por el vector \vec{DA} , el criterio realiza un barrido para todos los parches de Bezier iluminados, analizándose para cada uno de ellos el producto escalar del vector \vec{DA} por las normales \vec{N}_i . En la siguiente figura se muestra el parche de Bezier con sus correspondientes vectores normales en los puntos de muestreo y la dirección de análisis, que para este caso procede directamente del foco emisor.

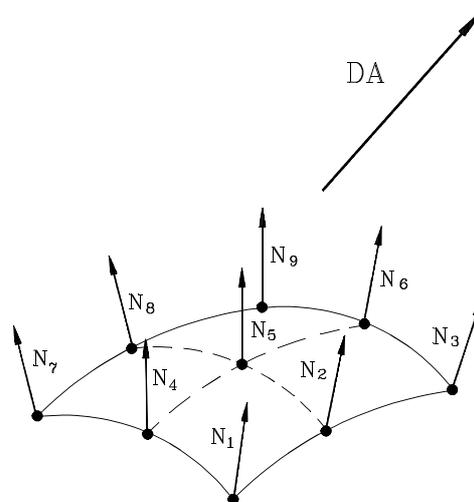


Fig.-6.9 Dirección de análisis, en relación con el muestreo de normales sobre un parche de Bezier.

El criterio basa su selección atendiendo a los signos del producto escalar, tal y como reflejan las siguientes expresiones:

$$\text{Si } \forall i \text{ con } i=1,\dots,9 \quad (\vec{DA} \cdot \vec{N}_i) > 0 \quad \text{parche descartado}$$

otro caso *parche seleccionado*

Por lo tanto, si alguno de los productos escalares para un parche de Bezier iluminado es negativo o nulo, el parche sobrepasará este criterio.

■ *Criterio II :*

En este caso, el criterio realiza un barrido para los parches de Bezier iluminados analizando, para cada uno de ellos, el producto escalar del vector \vec{DA} por los vectores \vec{Fr}_i , definidos para cada punto de muestreo. A continuación se muestran los vectores involucrados en la aplicación del criterio.

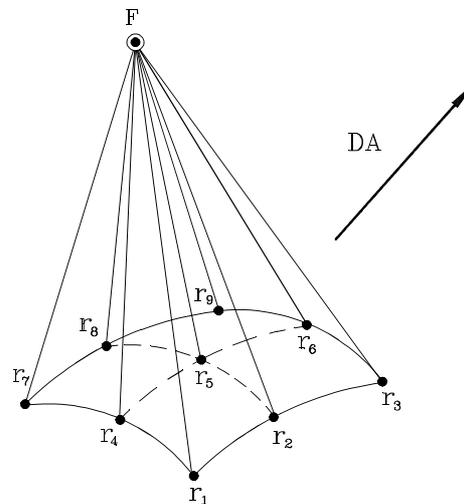


Fig.-6.10 Dirección de análisis en relación con el muestreo de vectores incidentes sobre un parche de Bezier.

El criterio basa su selección, nuevamente, atendiendo a los signos del producto escalar, tal y como reflejan las siguientes expresiones:

$$\text{Si } \forall i \text{ con } i=1,\dots,9 \quad (\vec{DA} \cdot \vec{Fr}_i) < 0 \quad \text{parche descartado}$$

otro caso

parche seleccionado

En este caso, si alguno de los productos escalares para un parche de Bezier iluminado es positivo o nulo, el parche sobrepasará el criterio.

■ *Criterio III:*

Por último y antes de realizar el análisis riguroso del posible punto de intersección, se analiza la intersección de la dirección de análisis con la caja envolvente que encierra al Bezier iluminado. Este algoritmo, que fue descrito en el capítulo 5, es de rápida evaluación y de gran efectividad, por lo que su aplicación reduce el número de parches candidatos a producir la ocultación en una dirección determinada. A continuación se representa el Bezier con su correspondiente caja envolvente de planos paralelos a los

coordenados del sistema absoluto.

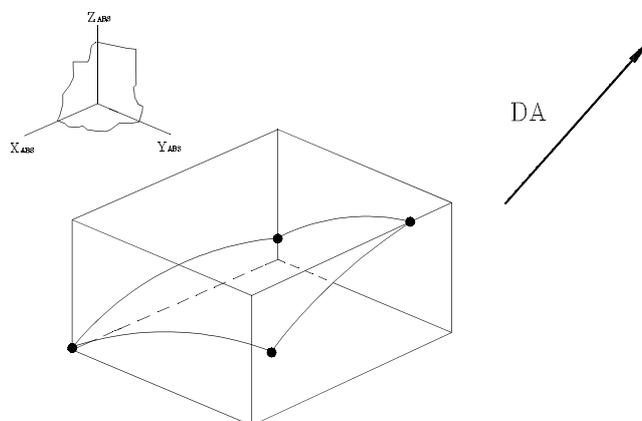


Fig.-6.11 Dirección de análisis en relación con la caja envolvente de un parche de Bezier.

CAMPO CERCANO

Los criterios aplicados para campo cercano son comunes a los de campo lejano, por lo que no es preciso describirlos nuevamente; sin embargo, hay que tener presente que para este caso la dirección de análisis queda definida por el segmento que une el foco y el punto de observación. Esta particularidad no tiene repercusión en la aplicación de los tres criterios anteriores, ya que trabajan únicamente con direcciones, sin embargo una vez obtenido el punto de intersección exacto sobre la geometría, será preciso evaluar la distancia de intersección. A continuación se muestra el problema planteado en el caso de que la intersección se produzca a mayor distancia que la que separa el foco y el punto de campo cercano.

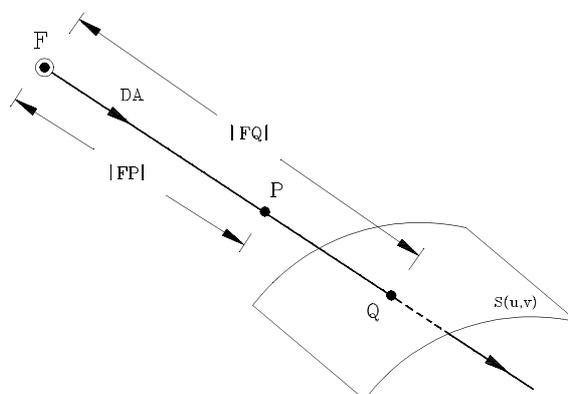


Fig.-6.12 Distancia de intersección, en el proceso de ocultación del rayo directo.

En estos casos bastará descartar aquellas ocultaciones producidas en puntos mas alejados de la fuente que el punto de campo cercano. Para ello se aplica el siguiente análisis vectorial :

$$\text{Si } |\vec{FP}| < |\vec{FQ}| \quad \text{punto de ocultación descartado}$$

otro caso

hay ocultación

Por otro lado, la validez del cualquier punto sobre la superficie que interfiera en la dirección de análisis deberá sobrepasar el criterio de la incidencia frontal, es decir que la dirección de intersección conecte con el parche por la cara activa del mismo, definida por sus normales. Otro de los problemas comunes en el análisis de las interacciones, está motivado por el carácter ilimitado de la recta que define el rayo. Este fenómeno se puede observar en la siguiente figura, en donde aparecen dos ocultaciones para la dirección de análisis y solo una de ellas es válida.

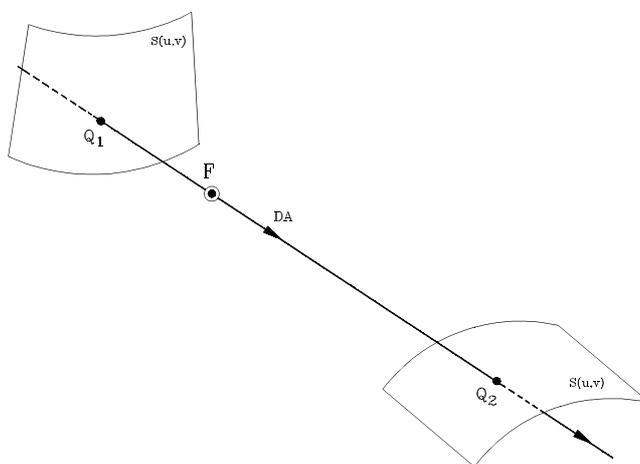


Fig.-6.13 Dobles intersecciones en la ocultación del rayo directo.

En este caso es preciso dividir la región del espacio en anterior y posterior al foco emisor. El plano perpendicular a la dirección de análisis y que pasa por el foco, define ambas regiones, y por lo tanto para conocer en que región se encuentra el punto de intersección puede aplicarse

el siguiente criterio vectorial:

$$\text{Si } (\vec{FQ} \cdot \vec{DA}) > 0 \quad \text{punto de ocultación válido}$$

otro caso *punto de ocultación descartado*

Este criterio aplicado al caso mostrado en la figura anterior resolvería el problema, ya que, descartaría al punto Q_1 , pero no al Q_2 .

El proceso correspondiente al campo directo habrá finalizado cuando hayan sido analizados todos y cada uno de los parches de Bezier iluminados. En aquellas direcciones o puntos del espacio para los que no haya habido ocultación será calculado el campo radiado por el dipolo sobre el que se esté trabajando y que es el que determina la posición del foco emisor. Este proceso habrá de realizarse para cada uno de los focos correspondientes a cada uno de los orígenes de los dipolos que constituyen la agrupación de antena, con el propósito de aplicar el principio de superposición y obtener finalmente el campo directo.

6.4 CAMPO REFLEJADO

Para el cálculo del campo reflejado partimos de las direcciones de reflexión, que se corresponden con las direcciones de observación y que denominaremos dirección de análisis. Dependiendo de la geometría, para una dirección de reflexión, podrán contribuir desde ningún parche a varios parches iluminados.

El procedimiento de búsqueda iterativa mediante el gradiente conjugado del punto de reflexión sobre un parche, supone un gasto computacional alto, por ello antes de entrar en él, es conveniente descartar aquellos parches de Bezier iluminados que no tengan posibilidad alguna de contribuir, por consiguiente, de forma análoga al campo directo se aplican una serie de criterios de selección, ahora dependientes de la dirección de reflexión [4-6]. Estos criterios podrán ser descritos para campo lejano y cercano.

CAMPO LEJANO

■ *Criterio I:*

Conocida la dirección de análisis \vec{DA} , que en este caso es la dirección de reflexión, el criterio realiza un barrido para todos los parches de Bezier iluminados, analizando para cada uno de ellos el producto escalar del vector \vec{DA} por las normales \vec{N}_i en los puntos de muestreo. La siguiente figura muestra el criterio de selección, en donde ahora la dirección de análisis es la dirección de reflexión.

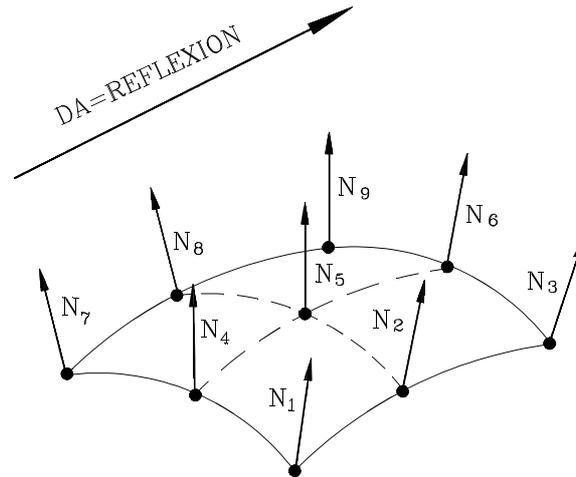


Fig.-6.14 Parche de Bezier y dirección de reflexión

E 1

criterio selecciona el parche según el siguiente criterio de signos del producto escalar:

*Si $\exists i$ con $i=1,\dots,9$ tal que $(\vec{DA} \cdot \vec{N}_i) > 0$ **parche seleccionado***

otro caso

parche descartado

Por lo tanto, si alguno de los productos escalares para un parche de Bezier iluminado es positivo, el parche sobrepasará este criterio.

■ **Criterio II :**

Cada parche de Bezier iluminado ha sido muestreado en nueve puntos de su superficie, sobre los que se conocen sus normales y vectores incidentes; esta información es muy útil para obtener directamente los vectores reflejados sobre los nueve puntos. Si se realiza esta operación y representamos a los vectores de reflexión, el resultado es el que se muestra a continuación:

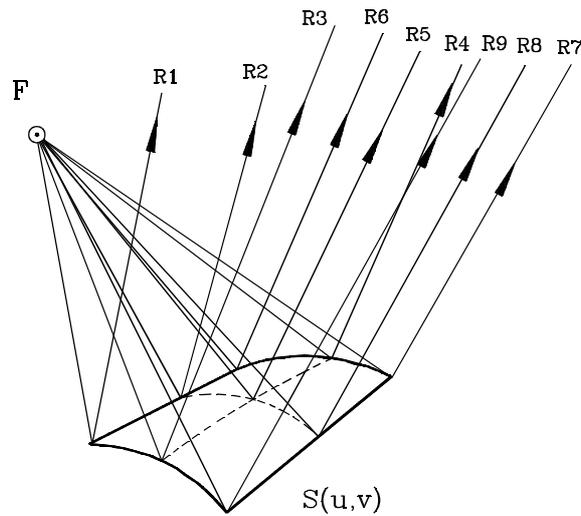


Fig.-6.15 Vectores de reflexión calculados sobre los puntos de muestreo.

Los vectores $\vec{R1}, \vec{R2}, \dots, \vec{R9}$, constituyen un muestreo de las direcciones de reflexión que el parche puede generar para las direcciones de incidencia procedentes del foco F . La información angular contenida por estos vectores reflejados, puede ser transformada en forma de un cono de rayos reflejados que contenga a todas las direcciones reflejadas. Para ello, se promedian los vectores $\vec{R1}, \vec{R2}, \dots, \vec{R9}$, obteniéndose un vector de reflexión \vec{RP} que constituirá el eje del cono de rayos reflejados, como se muestra a continuación.

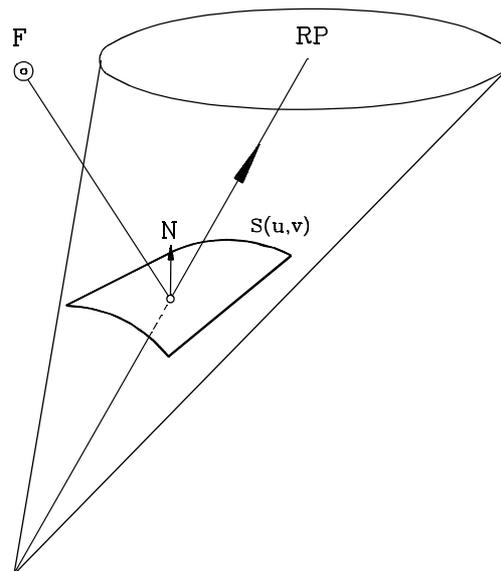


Fig.-6.16 Cono de reflexión para una parche de Bezier.

Para determinar la apertura angular del cono, se realiza un análisis entre cada uno de los vectores reflejados \vec{R}_i y el vector promedio \vec{R}_P . El que mayor ángulo de apertura determine definirá, el margen angular del cono.

Una vez determinado el vector promedio \vec{R}_P y el margen angular de apertura del cono ANG_{\max} , del parche de Bezier, el criterio de selección para una dirección de análisis \vec{D}_A determinada, analizará si está dentro del pincel de rayos reflejados del siguiente modo:

$$\vec{R}_P \equiv \text{Vector promedio} , \quad ANG_{\max} \equiv \text{Angulo de apertura}$$

$$ANGULO(\vec{R}_P, \vec{D}_A) < ANG_{\max} \quad \text{Parche seleccionado}$$

otro caso

Parche descartado

Este criterio es altamente selectivo, reduciendo el numero de parches, falsos candidatos a contribuir en una dirección determinada. Por esta razón su aplicación reduce muy notablemente el tiempo de cálculo del campo reflejado.

Una vez sobrepasados los criterios anteriores se procede a la búsqueda rigurosa, mediante el método iterativo, del punto de reflexión. En caso de no ser encontrado se procederá con otro bezier iluminado, pero en caso de existir un punto de reflexión sobre un Bezier y antes de pasar a realizar los cálculos electromagnéticos, es preciso realizar un estudio de la trayectoria completa del rayo, ya que pueden existir ocultaciones durante su recorrido, lo que anularía el punto de reflexión obtenido y su correspondiente contribución.

■ *Criterios de ocultación:*

La trayectoria del rayo para el campo reflejado puede ser descompuesta en dos recorridos bien diferenciados, que son :

RAYO INCIDENTE:

El recorrido de este rayo tiene su origen en el foco emisor y su final en el punto de reflexión, por lo tanto es un recorrido definido por un segmento. Para el estudio de la

ocultación de este rayo se aplican los siguientes criterios de intersección:

Interacción rayo-caja envolvente: Se analizan las posibles intersecciones del vector incidente con las cajas envolventes de los parches de Bezier iluminados, exceptuando claro está, la correspondiente al parche que ha producido la reflexión. En caso de haberse producido alguna intersección se procede con la siguiente interacción, para el parche encerrado en la caja interseccionada. Si por el contrario no ha habido interacción rayo-caja envolvente, significará la no ocultación del rayo incidente.

Interacción rayo-parche de Bezier: Se aplica el método iterativo de búsqueda del punto de intersección. En caso de haber punto de intersección para el parche seleccionado y dada la acotación de la trayectoria del rayo incidente, será preciso determinar si la intersección se ha producido en el segmento definido por el punto emisor y el punto de reflexión. De lo contrario la ocultación no será válida.

RAYO REFLEJADO:

El recorrido de este rayo tiene su origen en el punto de reflexión, y su final, por encontrarnos en campo lejano, en el infinito; por lo tanto, es un recorrido definido por una semirecta. Para el estudio de la ocultación de este rayo se aplican los siguientes criterios de intersección:

Interacción rayo-caja envolvente: Se analizan las posibles intersecciones del rayo reflejado con las cajas envolventes de los parches iluminados, exceptuando claro está, la correspondiente al parche que ha producido la reflexión. En caso de haberse producido alguna intersección se procede con la siguiente interacción, para el parche encerrado en la caja interseccionada. Si por el contrario no ha habido interacción rayo-caja envolvente, significará la no ocultación del rayo incidente.

Interacción rayo-parche de Bezier: Se aplica el método iterativo de búsqueda del punto de intersección. En caso de haber punto de intersección para el Bezier seleccionado y dada la acotación parcial de la trayectoria del rayo reflejado, será preciso determinar si la intersección se ha producido en la región definida por la semirecta. De lo contrario la ocultación no será válida.

CAMPO CERCANO

■ *Criterio I:*

El conocimiento previo del punto observación, diferencia al campo cercano del campo lejano y favorece una selección mas rigurosa en la etapa de iluminación. Esto se traduce en la aplicación de un nuevo proceso de selección por iluminación, pero ahora desde el punto de observación. Este criterio de selección se muestra en la siguiente figura.

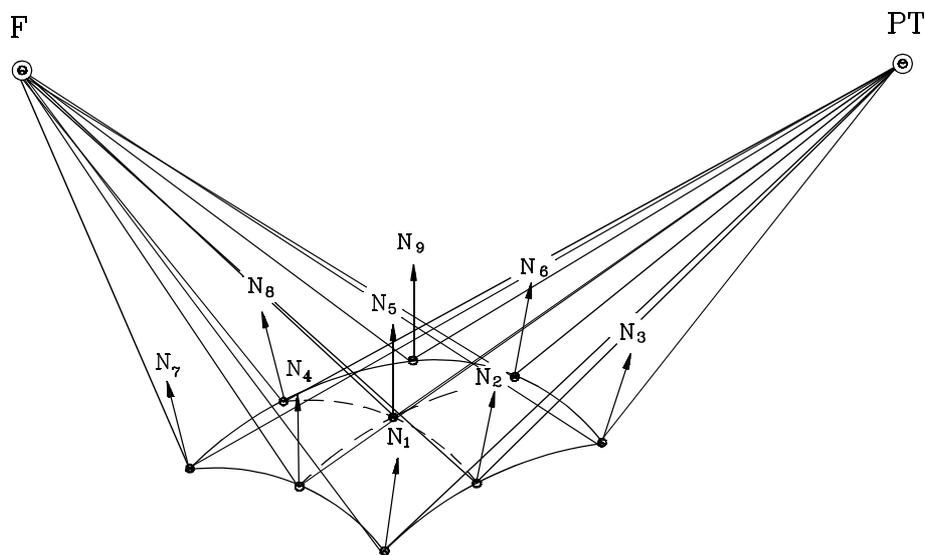


Fig.-6.17 Doble iluminación de una parche de Posar en campo cercano.

Como puede observarse, el criterio de iluminación descrito en el apartado 4.2 correspondiente al capítulo 4, se repite aquí, pero ahora considerando como punto emisor el punto de observación PT de campo cercano. El resultado es una nueva selección de entre los parches de Bezier iluminados por el foco emisor F . El criterio en este caso, empleará nuevamente a las normales \vec{N}_i , definidas sobre los nueve puntos de muestreo sobre el parche de Bezier para realizar el producto escalar de estas, con cada uno de los vectores incidentes definidos por $PT\vec{r}_i$.

Una vez seleccionados los parches iluminados desde el foco emisor y desde el punto de observación, se procede a la búsqueda rigurosa, mediante el método iterativo del punto de reflexión. El proceso se realizará con todos los parches doblemente iluminados y en caso de existir un punto de reflexión sobre un Bezier, y antes de pasar

a realizar los cálculos electromagnéticos, se procederá a realizar el estudio de la trayectoria completa del rayo.

■ *Criterios de ocultación:*

La trayectoria del rayo para el campo reflejado en campo cercano, puede ser descompuesta nuevamente en dos recorridos bien diferenciados, sin embargo sus características en este caso coinciden, ya que ambos recorridos están definidos por segmentos sobre la dirección de incidencia y la dirección de reflexión. Por lo tanto no es preciso realizar un estudio por separado de los criterios de ocultación aplicados, ya que son los mismos y únicamente lo que se modifica es la dirección de interrogación.

RAYO INCIDENTE Y RAYO REFLEJADO:

Para el rayo incidente la dirección quedará fijada a través del foco emisor y del punto de reflexión, mientras que para el rayo reflejado, vendrá dada por el punto de reflexión y el punto de observación. Para el estudio de la ocultación de ambos rayos se aplican los siguientes criterios de intersección:

Interacción rayo-caja envolvente: Se analizan las posibles intersecciones del vector incidente y reflejado con las cajas envolventes de los parches de Bezier iluminados, exceptuando claro está, la correspondiente al Bezier que ha producido la reflexión. En caso de haberse producido alguna intersección se procede con la siguiente interacción, para el Bezier encerrado en la caja interseccionada. Si por el contrario no ha habido interacción rayo-caja envolvente, significará la no ocultación del rayo.

Interacción rayo-parche de Bezier: Se aplica el método iterativo de búsqueda del punto de intersección. En caso de haber punto de intersección para el Bezier seleccionado y dada la acotación de la trayectoria del rayo incidente y reflejado, será preciso determinar si la intersección se ha producido en el segmento definido por cada rayo. De lo contrario la ocultación no será válida.

Una vez finalizado el proceso de ocultación de la trayectoria del rayo, se procede al cálculo del campo electromagnético para la dirección de análisis; en caso de existir diferentes puntos de reflexión para una misma dirección o punto de observación, se repetirán los cálculos electromagnéticos para cada uno de ellos, obteniéndose el campo final mediante la superposición de cada una de las contribuciones.

6.5 CAMPO DIFRACTADO EN ARISTAS

El cálculo del campo difractado toma como punto de partida la dirección de difracción o el punto de observación, buscando la dirección de incidencia procedente de la fuente y el punto de difracción en una arista iluminada, que genere el rayo difractado que estamos analizando. Dependiendo de la complejidad de la geometría para una dirección de difracción dada, podrán contribuir desde ninguna arista a varias aristas iluminadas.

Nuevamente se aplicarán criterios de selección para eliminar aquellas aristas que estén ocultas para la dirección del rayo difractado que estamos considerando [4-6]. Al igual que para el campo reflejado, pueden ser distinguidos procesos de selección para campo lejano y cercano.

CAMPO LEJANO

■ Criterio I:

Conocida la dirección de análisis \vec{DA} , que este caso es la dirección de difracción, el criterio realiza un barrido para todas las aristas iluminadas, analizando el producto escalar del vector \vec{DA} por las normales \vec{N}_i^1 y \vec{N}_i^2 asociadas a cada cara de la arista, en los punto de muestreo. La siguiente figura describe los vectores involucrados en el criterio.

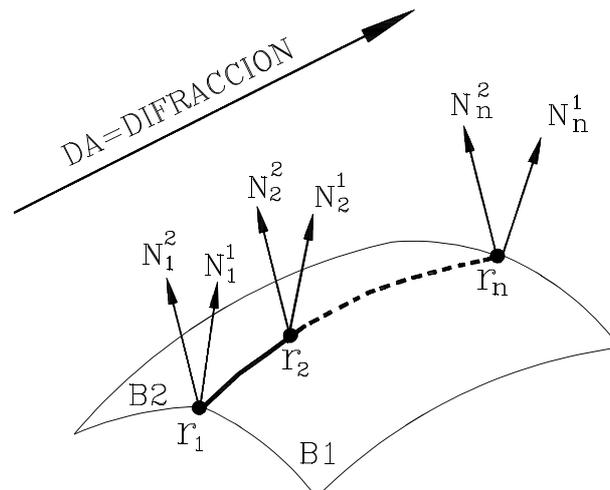


Fig.-6.18 Dirección de difracción en relación con una arista iluminada.

El proceso selecciona la arista según el siguiente criterio de signos del producto escalar:

Si $\exists i, j$ con $i=1, \dots, n$ y $j=1, 2$ tal que

$$(\vec{DA} \cdot \vec{N}_i^j) > 0 \quad \text{arista seleccionada}$$

otro caso

arista descartada

Por lo tanto, si alguno de los productos escalares para la curva de Bezier iluminada es positivo, la arista sobrepasará este criterio.

■ *Criterio II :*

Este criterio toma como referencia los vectores \hat{t}_i , tangentes a la arista en cada uno de los n puntos de muestreo. La siguiente figura muestra estos vectores en relación con la dirección de análisis.

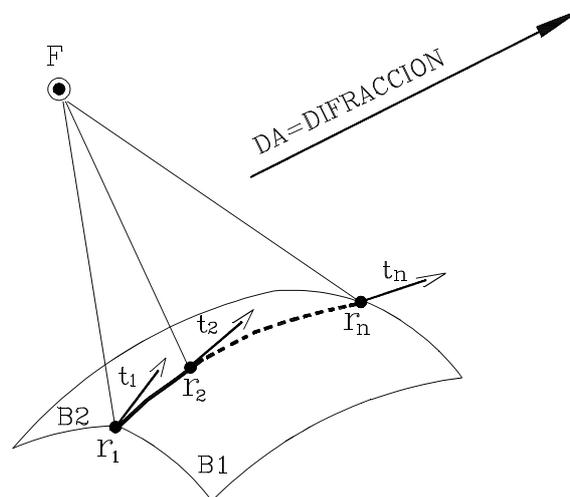


Fig.-6.19 Dirección de difracción y vectores tangentes a la arista.

En este caso el criterio selecciona la arista según la siguiente regla de signos del producto escalar:

Si $\exists i \quad i=1,\dots,n$ tal que

$$(\vec{DA} \cdot \hat{t}_i) * (\overline{Fr}_i \cdot \hat{t}_i) > 0 \quad \text{arista seleccionada}$$

otro caso

arista descartada

Por lo tanto, si alguno de los productos escalares para la curva de Bezier iluminada es positivo, la arista sobrepasará este criterio.

Una vez sobrepasados los criterios de selección I y II, se procede a la búsqueda iterativa del punto de difracción sobre la arista seleccionada. De encontrarse punto de difracción, será preciso evaluar la posible ocultación de la trayectoria del rayo. Nuevamente se aplican los criterios de ocultación, tal y como se describe a continuación.

■ *Criterios de ocultación:*

La trayectoria del rayo para el campo difractado se descompone en dos recorridos bien diferenciados, que son :

RAYO INCIDENTE:

El recorrido de este rayo tiene su origen en el foco emisor, y su final en el punto de difracción, por lo tanto es un recorrido definido por un segmento. Para el estudio de la ocultación de este rayo se aplican los siguientes criterios de intersección:

Interacción rayo-caja envolvente: Se analizan las posibles intersecciones del vector incidente con las cajas envolventes de los Bezier iluminados, exceptuando claro está, los parches de Bezier que forman la arista. En caso de haberse producido alguna intersección se procede con la siguiente interacción, para el Bezier encerrado en la caja interseccionada. Si por el contrario no ha habido interacción rayo-caja envolvente, significará la no ocultación del rayo incidente.

Interacción rayo-parche de Bezier: Se aplica el método iterativo de búsqueda del punto de intersección. En caso de haber punto de intersección para el Bezier seleccionado y dada la acotación de la trayectoria del rayo incidente, será preciso determinar si la intersección se ha producido en el segmento definido por el punto emisor y el punto de

difracción. De lo contrario la ocultación no será válida.

RAYO DIFRACTADO:

El recorrido de este rayo tiene su origen en el punto de difracción, y su final, por encontrarnos en campo lejano, en el infinito, por lo tanto es un recorrido definido por una semirecta. Para el estudio de la ocultación de este rayo se aplican los siguientes criterios de intersección:

Interacción rayo-caja envolvente: Se analizan las posibles intersecciones del rayo difractado con las cajas envolventes de los Beziers iluminados. En caso de haberse producido alguna intersección se procede con la siguiente interacción, para el Bezier encerrado en la caja interseccionada. Si por el contrario no ha habido interacción rayo-caja envolvente, significará la no ocultación del rayo difractado.

Interacción rayo-parche de Bezier: Se aplica el método iterativo de búsqueda del punto de intersección. En caso de haber punto de intersección para el Bezier seleccionado, nuevamente será preciso determinar si la intersección se ha producido en la región definida por la semirecta. De lo contrario la ocultación no será válida.

CAMPO CERCANO

■ Criterio I :

En este caso, al igual que para el campo reflejado, puede aplicarse una selección mas más rigurosa en la etapa de iluminación, teniendo en cuenta la posición del punto de observación. Este criterio de selección se muestra en la siguiente figura.

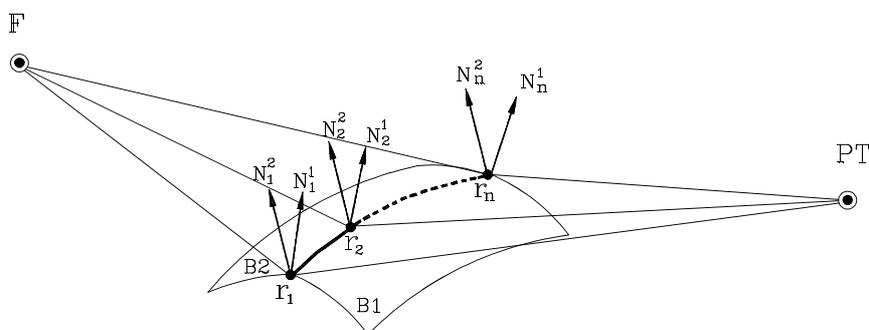


Fig.-6.20 Doble iluminación de una arista.

Como puede observarse, el criterio de iluminación descrito en el apartado 4.2 correspondiente al capítulo 4, se repite aquí, pero ahora considerando como punto emisor al punto de observación PT de campo cercano. El resultado es una mayor selección entre las aristas. El criterio en este caso, empleará nuevamente a las normales \vec{N}_i^1 y \vec{N}_i^2 , definidas sobre los n puntos de muestreo sobre la curva de Bezier para realizar el producto escalar de estas, con cada uno de los vectores incidentes que ahora estará definidos por $P\vec{T}r_i$.

Una vez seleccionadas las aristas iluminadas desde el foco emisor y desde el punto de observación, se procede a la búsqueda rigurosa, mediante el método iterativo, del punto de reflexión. El proceso se realizará con todas las aristas doblemente iluminadas. En caso de existir un punto de difracción, y antes de pasar a realizar los cálculos electromagnéticos, se procederá a realizar el estudio de la trayectoria completa del rayo.

■ *Criterios de ocultación:*

Las dos trayectorias del rayo para el campo difractado en campo cercano, presentan características coincidentes, ya que ambos recorridos están definidos por segmentos sobre la dirección de incidencia y la dirección de difracción. Por lo tanto no es preciso realizar un estudio por separado de los criterios de ocultación aplicados, ya que son los mismos y únicamente lo que se modifica es la dirección de interrogación.

RAYO INCIDENTE Y RAYO REFLEJADO:

Para el rayo incidente, la dirección quedará fijada a través del foco emisor y del punto de difracción, mientras que para el rayo difractado, vendrá dada por el punto de difracción y el punto de observación. Para el estudio de la ocultación de ambos rayos se aplican los siguientes criterios de intersección:

Interacción rayo-caja envolvente: Se analizan las posibles intersecciones del vector incidente y reflejado con las cajas envolventes de los Beziers iluminados, exceptuando claro está las correspondientes a los parches de Bezier que forman la arista. En caso de haberse producido alguna intersección se procede con la siguiente interacción, para el Bezier encerrado en la caja interseccionada. Si por el contrario no ha habido interacción rayo-caja envolvente, significará la no ocultación del rayo.

Interacción rayo-parche de Bezier: Se aplica el método iterativo de búsqueda del punto de intersección. En caso de haber punto de intersección para el Bezier seleccionado y

dada la acotación de la trayectoria del rayo incidente y difractado, será preciso determinar si la intersección se ha producido en el segmento definido por cada rayo. De lo contrario la ocultación no será válida.

Una vez finalizado el proceso de ocultación de la trayectoria del rayo, para los dos tipos de campo, se procede al cálculo del campo electromagnético para la dirección de análisis; en caso de existir diferentes puntos de difracción para una misma dirección o punto de observación, se repetirán los cálculos electromagnéticos para cada uno de ellos, obteniéndose el campo final mediante la superposición de cada una de las contribuciones.

6.6 CAMPO DIFRACTADO EN SUPERFICIE

La metodología en este tipo de efecto difiere notablemente de los simples efectos anteriormente expuestos. La diferencia radica en que ahora la búsqueda de puntos de difracción en superficie, se realiza sobre una serie de parches, denominados de propagación y que han sido generados a partir de la superficie original del modelo. Como ya se describió en el capítulo 4, la búsqueda de puntos de difracción sobre la superficie consiste en encontrar tangentes a las curvas isoparamétricas $v = cte.$ del parche de propagación que coincidan con la dirección de análisis. Este procedimiento, por lo tanto ignora la geometría seleccionada previamente como iluminada, lo que reduce considerablemente el tratamiento geométrico aplicado en este efecto. Es preciso remarcar que los parches de propagación sustituyen a la geometría original en aquellas regiones en donde el efecto de la onda de superficie se manifiesta con mayor intensidad.

El algoritmo de búsqueda iterativo vuelve a ser el proceso numérico más costoso computacionalmente, y por ello antes de recurrir a su evaluación, se aplica un criterio de selección sobre los parches de propagación para el caso de campo lejano, que depende de la dirección de análisis. En la siguiente figura se muestran los vectores auxiliares calculados para el parche de propagación [4-5].

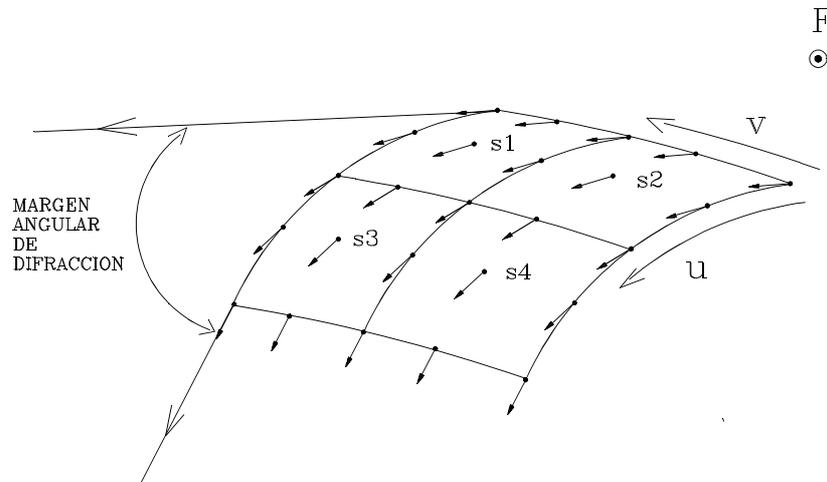


Fig.- 6.21 Muestreo de vectores tangente sobre un parche de propagación.

Como puede observarse, el muestreo de los vectores tangentes se realiza sobre cada Bezier $S1, S2, S3, S4$, que constituyen el parche de propagación. El conjunto de vectores tangentes serán promediados, con el fin de obtener el margen angular para el que el parche de propagación tratado genera campo difractado en superficie. El criterio basará su selección en el estudio de la inclusión de la dirección de análisis en el cono de rayos difractados en superficie, generado por cada uno de los parches de propagación.

Una vez finalizado el proceso de selección, se procede a calcular, mediante el método iterativo, el punto de difracción por el que rayo despegue de la superficie. Una vez obtenido este punto Q_d , será preciso conocer el punto Q_i por el que el rayo incidente \vec{V}_i , procedente de la fuente F , conecta con la superficie. Esta evaluación es inmediata ya que al conocer las coordenadas paramétricas del punto $Q_d(u_d, v_d)$ y conocidas las propiedades de los parches de propagación, las coordenadas paramétricas del punto Q_i serán $(0, v_d)$.

Finalizado el proceso de fijación de ambos puntos, los parámetros geométricos (curvaturas, planos principales, normales, etc.) que requiere la formulación electromagnética de la onda de superficie, podrán ser extraídos directamente de los parches de Bezier que los sostienen. El recorrido del rayo a través del parche de propagación puede ser observado en la siguiente figura:

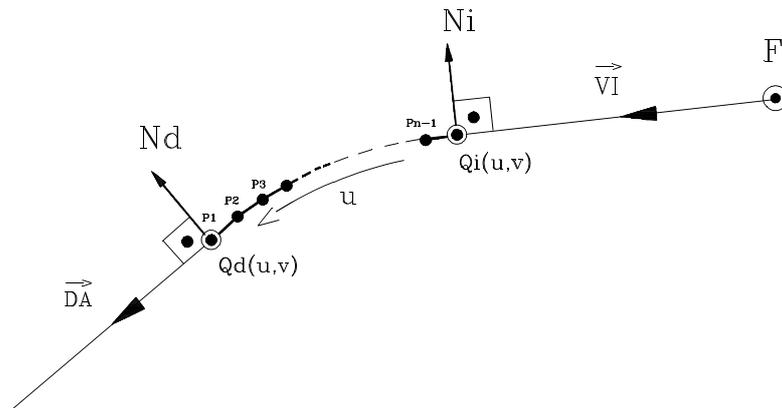


Fig.-6.22 Descomposición de la trayectoria superficial de la onda de superficie.

La trayectoria del rayo por la superficie, está acotada por el segmento de curva isoparamétrica que une los puntos Q_d y Q_i , para evaluar la longitud de dicho segmento se aproxima el segmento de curva mediante un polígono que une los P_1, P_2, \dots, P_n , puntos de muestreo calculados sobre la propia curva. Esto puede ser observado en la figura anterior, en donde el punto P_1 es coincidente con el punto Q_d y el punto P_n con Q_i . De este modo la suma de las longitudes de los tramos rectos obtenidos, aproximará el recorrido superficial del rayo.

El proceso correspondiente a la onda de superficie, concluye con la obtención de las contribuciones de cada uno de los parches de propagación obtenidos en la etapa del tratamiento geométrico.

6.7 DOBLES EFECTOS

La contribución al campo total de los fenómenos de segundo orden, por lo general no es fundamental para el conocimiento de los principales procesos de dispersión que se producen sobre la geometría; sin embargo, para geometrías complejas y en determinados márgenes angulares en donde los simples efectos no contribuyen, los dobles efectos pueden aparecer y complementar el diagrama final. El mayor problema que presentan este tipo de efectos, es el enorme gasto computacional que conllevan en la búsqueda de las parejas de puntos dispersores; es decir, en el tratamiento geométrico del problema ya que respecto al tratamiento electromagnético, la formulación empleada es una reiteración de la formulación empleada para

cada uno de los efectos simples correspondientes.

El abordar el problema de la búsqueda de parejas de puntos dispersores sobre una geometría arbitraria, es un problema complicado cuya resolución rigurosa puede suponer tiempos de cálculo extremadamente altos; por ello, durante la descripción de los dobles efectos considerados se verán numerosos criterios de selección, aplicados en todo momento con el fin de reducir los tiempos de cálculo. Sin embargo, antes de comenzar a describir cada efecto, es preciso reseñar que existe una selección de parches y curvas de Bezier común a todos ellos y por lo tanto, la búsqueda para los dobles efectos se realizará únicamente sobre la geometría iluminada por la fuente. Esta reducción, puede entenderse como demasiado restrictiva, sin embargo, contempla en todo momento las contribuciones por dobles efectos más importantes.

Por otro lado, en el capítulo 3, fue descrito el tipo de modelado utilizado por el método y de entre todas las características que posee, una de las más importantes a la hora de calcular los dobles efectos, es la agrupación de la geometría en cuerpos independientes. Aprovechando esta asociación evidente en geometrías con partes bien diferenciadas, el método impone la condición de que la pareja de entidades de Bezier que generen un doble efecto, deberán pertenecer a cuerpos diferentes. Esta condición es poco restrictiva si el modelo geométrico presenta una agrupación lógica y bien diferenciada. Es fácil entender que para el caso del avión mostrado en la figura 3.17, los dobles efectos se producirán en su mayor parte entre parches o curvas de Bezier pertenecientes a cuerpos diferentes, independientemente de la posición de la antena. Por otro lado el conocimiento previo de los diferentes cuerpos de que consta el modelo, permite fijar las parejas de cuerpos que se quieren evaluar en la simulación de los dobles efectos. De este modo, y con una selección de cuerpos dependiente del barrido de direcciones a calcular, el tiempo de ejecución se reduce considerablemente, sin pérdida de garantías en el resultado final.

6.7.1 CAMPO DOBLEMENTE REFLEJADO

El efecto debido al campo doblemente reflejado, es de entre los dobles efectos el que puede contribuir en mayor medida al campo total. Su evaluación consiste en la búsqueda de dos puntos de reflexión para los cuales un determinado rayo emitido por la fuente se refleje doblemente, de tal forma que su trayectoria tras la última reflexión coincida con la dirección de análisis. Como puede entenderse contamos con la información inicial de la posición del foco emisor, la dirección o el punto de observación y una serie de parches de Bezier iluminados.

El método iterativo de búsqueda rigurosa de la pareja de parches sobre la que produce la

doble reflexión, fue descrito anteriormente y al igual que todo proceso iterativo su ejecución supone un gasto computacional alto. Por ello es preciso recurrir a procesos de selección de parches de Bezier, pues de lo contrario el tiempo de cálculo sería prohibitivo. La primera premisa establecida en la evaluación del campo reflejado y que fue anunciada implícitamente durante la explicación del algoritmo iterativo, es que la doble reflexión siempre se producirá entre parches de Bezier diferentes, ya que como se ha comentado en numerosas ocasiones, los parches de Bezier deben modelar regiones de la superficie regulares, que impiden la aparición de dobles reflexiones para un único parche.

A continuación se describirán los diferentes procesos de selección aplicados sobre los parches de Bezier iluminados, realizándose un estudio para campo cercano y otro para campo del lejano. En ambos casos el resultado final de la selección, supondrá la fijación de una pareja de parches de Bezier, sobre los que se produce la doble reflexión. Para diferenciarlos en todo momento, se denotará como parche **A**, al parche sobre el que se produce la primera reflexión y como parche **B**, sobre el que se produce la segunda reflexión. El proceso de selección comienza su búsqueda entre parches de Bezier iluminados y pertenecientes a cuerpos diferentes, en forma de parejas de parches (**A,B**).

CRITERIOS DE SELECCION PARA CAMPO LEJANO Y CERCANO

■ *Criterio de selección I :*

Este criterio de carácter vectorial, realiza un estudio entre las normales de la pareja de parches candidata a generar dobles reflexiones. De cada parche iluminado se conocen los vectores normales calculados sobre los puntos de muestreo, así como las coordenadas espaciales de los puntos de muestreo. Esta información sirve de apoyo para la resolución de los criterios aplicados, sin embargo, para no realizar una descripción engorrosa de los criterios aplicados sobre los dobles efectos, reduciremos la información de los vectores normales y puntos de muestreo a uno solo, representativo del conjunto de los vectores muestreados, significando que la aplicación de los criterios siempre será desarrollada sobre el conjunto de vectores muestreados. Esto implicará respetar las posibles combinaciones entre los vectores del parche **A** y del **B**.

En este caso, el criterio I selecciona parejas de parches que tengan sus caras activas enfrentadas. Los vectores implicados en el mismo son mostrados a continuación.

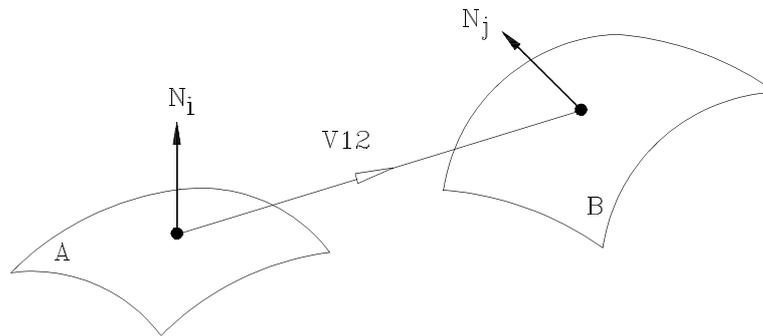


Fig.- 6.23 Pareja de parches de Bezier enfrentados.

En donde el $V\vec{I}2$, representa el vector que une los dos puntos de muestreo de cada uno de los parches. Las expresiones aplicadas para la selección son las siguientes:

Si $\exists i, j$ con $i = 1, \dots, n$ $j = 1, \dots, n$

tal que $(\vec{N}_i \cdot V\vec{I}2) > 0$ y $(N_j \cdot V\vec{I}2) < 0$ *pareja seleccionada*

otro caso

pareja descartada

En donde el subíndice i está referido al parche **A** y el j al parche **B**.

■ *Criterio de selección II :*

En este criterio, aparece involucrada la dirección de observación o dirección de análisis, de forma que el parche **B**, ha de estar iluminado por dicha dirección; el criterio de iluminación es similar al ya descrito en apartados anteriores, para una dirección determinada. En el caso de estar analizando campo cercano, la iluminación de este parche estará evaluada desde el punto de observación.

■ *Criterio de selección III :*

En este caso, se realiza un análisis de la reflexión sobre el parche **A**, para cada uno de los puntos de muestreo. En la siguiente figura se aprecia el vector reflexión $V\vec{R}$, obtenido sobre el punto de normal \vec{N}_i .

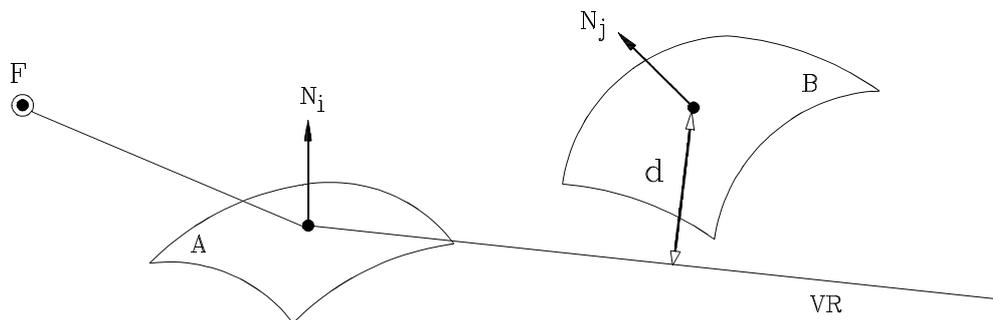


Fig.-6.24 Muestreo de la reflexión en una pareja de parches de Bezier enfrentados.

Una vez obtenida la dirección de reflexión se evaluarán las siguientes condiciones:

- Que la dirección de reflexión ilumine al parche **B** por su cara activa.
- Que la distancia de separación **d**, entre la dirección de reflexión y el parche **B**, sea menor que la suma de las diagonales de las cajas envolventes a cada parche.

En caso de cumplirse ambas condiciones la pareja de parches es seleccionada.

Una vez finalizado el proceso de selección de parejas de parches, se procede a la búsqueda rigurosa de los dos puntos de reflexión, aplicando el algoritmo de la doble reflexión. En el caso de haber obtenido un resultado afirmativo en la búsqueda, los puntos de reflexión \vec{N}_i y \vec{N}_j habrán sido fijados para el parche **A** y **B** respectivamente. El proceso ahora continúa con el análisis de la posible ocultación del rayo durante su trayectoria, desde el foco emisor hasta el punto de observación.

CRITERIOS DE OCULTACION PARA CAMPO LEJANO Y CERCANO

Los criterios de ocultación aplicados para este doble efecto no difieren de los aplicados en la ocultación de los efectos simples. Sin embargo, cabe destacar que en este caso el recorrido del rayo doblemente reflejado, puede ser descompuesto en tres trayectorias bien definidas, que son:

Rayo incidente: Definido por el segmento con origen en el foco emisor y con final en el

primer punto de reflexión.

Rayo reflejado: Definido por el segmento que va desde el primer punto de reflexión hasta el segundo punto de reflexión.

Rayo doblemente reflejado : Estará definido por una semirecta, en el caso de campo lejano, y por un segmento en el campo cercano; ambos con origen en el segundo punto de reflexión y con final para el campo cercano en el punto de observación.

En los tres tramos definidos será necesario aplicar los criterios de ocultación: interacción rayo-caja envolvente e interacción rayo-parche de Bezier, tal y como han sido aplicados en efectos anteriores.

El proceso finaliza una vez calculadas las contribuciones de todas las parejas que hayan sobrepasado los criterios, obteniéndose finalmente por superposición el campo doblemente reflejado para cada una de las direcciones de análisis.

6.7.2 CAMPO REFLEJADO Y DIFRACTADO

El tratamiento aplicado en la evaluación del campo debido a la reflexión-difracción, es muy similar al de la doble reflexión. En este caso la geometría involucrada serán los parches y curvas de Bezier iluminados. Su evaluación consiste en la búsqueda de dos puntos, uno de reflexión y otro de difracción, para los cuales un determinado rayo emitido por la fuente, se refleje primero y se difracte después, de tal forma que su trayectoria tras la difracción coincida con la dirección de análisis. En este caso la información de partida es la posición del foco emisor, la dirección o el punto de observación y una serie de parches de Bezier y curvas de Bezier iluminadas.

El método iterativo de búsqueda rigurosa de la pareja compuesta por un parche y una curva de Bezier, descrito anteriormente, supone un gasto computacional alto. Por ello, es preciso recurrir nuevamente a procesos de selección, que en este tipo de efecto son más necesarios, ya que la difracción aparece en el proceso y la dispersión del campo es mucho mayor que para la doble reflexión.

A continuación se describirán los diferentes procesos de selección aplicados sobre los parches y curvas de Bezier iluminados. El resultado final de la selección, supondrá la fijación de una pareja parche-curva de Bezier, sobre la que podrá producirse el doble efecto; para diferenciarlos en todo momento, se denotará con **A**, al parche sobre el que se produce la reflexión y con **B**, a la curva sobre la que se produce la difracción. El proceso de selección comienza su

búsqueda entre parches y curvas de Bezier iluminados y pertenecientes a cuerpos diferentes, en forma de parejas (**A**,**B**).

CRITERIOS DE SELECCION PARA CAMPO LEJANO Y CERCANO

■ *Criterio de selección I :*

Se realiza un estudio entre las normales de la pareja de parches candidata a generar la reflexión-difracción. En este caso, la arista iluminada consta de dos grupos de vectores normales, aplicados en puntos de muestreo comunes y cada uno de ellos asociado a una de las caras que forman la arista, por lo que el análisis deberá ser aplicado para ambos grupos, puesto que la incidencia sobre la arista puede producirse por ambas caras. A continuación se muestra la combinación parche-curva para este doble efecto.

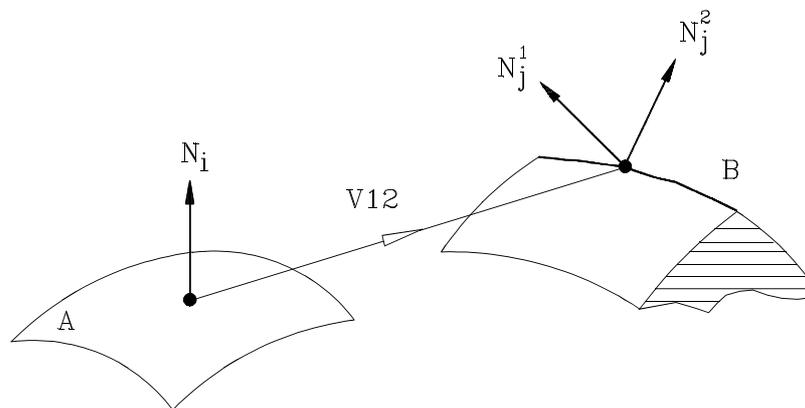


Fig.-6.25 Parche y curva de Bezier enfrentados.

En donde $\vec{V12}$, representa el vector que une dos puntos de muestreo de cada uno de los elementos de Bezier. Las expresiones aplicadas para la selección son las siguientes:

Si $\exists i,j,k$ con $i=1,\dots,n$ $j=1,\dots,m$ $k=1,2$

*tal que $(\vec{N}_i \cdot \vec{V12}) > 0$ y $(N_j^k \cdot \vec{V12}) < 0$ **pareja seleccionada***

*otro caso **pareja descartada***

En donde el subíndice i indica el punto de muestreo sobre el parche **A**, el j el índice del punto de muestreo en **B** y k indica la cara de la arista.

■ *Criterio de selección II :*

En este criterio, aparece involucrada la dirección de observación o dirección de análisis, de forma que la curva de Bezier **B**, ha de estar iluminada por dicha dirección; el criterio de iluminación es similar al ya descrito en apartados anteriores, para una dirección determinada. En el caso de estar analizando campo cercano, la iluminación de este parche estará evaluada desde el punto de observación.

■ *Criterio de selección III :*

En este caso, se realiza un análisis de la reflexión sobre el parche **A**, para cada uno de los puntos de muestreo. En la siguiente figura se aprecia el vector reflexión \vec{VR} , obtenido sobre el punto de normal \vec{N}_i .

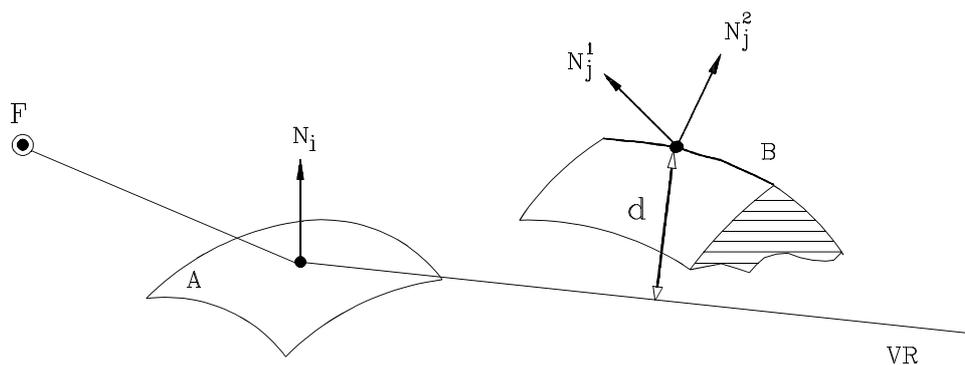


Fig.-6.26 Muestreo de la reflexión en la pareja parche-curva de Bezier.

Una vez obtenida la dirección de reflexión se evaluarán las siguientes condiciones:

- Que la dirección de reflexión ilumine a la curva **B**, o lo que es lo mismo que ilumine a uno de los parches de Bezier que forman la arista.
- Que la distancia de separación **d**, entre la dirección de reflexión y la arista **B**, sea menor que la suma de las diagonales de las cajas envolventes a cada parche.

En caso de cumplirse ambas condiciones la pareja es seleccionada.

Una vez finalizado el proceso de selección de parejas de parche-curva, se procede a la

búsqueda rigurosa de los puntos de reflexión y difracción, aplicando el algoritmo correspondiente descrito anteriormente. En el caso de haber obtenido un resultado afirmativo en la búsqueda, los puntos de Q_r y Q_d habrán sido fijados para los elementos **A** y **B** respectivamente. El proceso ahora continúa con el análisis de la posible ocultación del rayo durante su trayectoria, desde el foco emisor hasta el punto de observación.

CRITERIOS DE OCULTACION PARA CAMPO LEJANO Y CERCANO

Los criterios de ocultación aplicados para este doble efecto no difieren de los aplicados en la ocultación de los efectos simples. Sin embargo; cabe destacar que en este caso el recorrido del rayo doblemente reflejado, puede ser descompuesto en tres trayectorias bien definidas, que son :

Rayo incidente: Definido por el segmento con origen en el foco emisor y con final en el punto de reflexión.

Rayo reflejado: Definido por el segmento que va desde el punto de reflexión hasta punto de difracción.

Rayo reflejado-difractado: Estará definido por una semirecta, en el caso de campo lejano, y por un segmento en el campo cercano, ambos con origen en el punto de difracción y con final para el campo cercano en el punto de observación.

En los tres tramos definidos será necesario aplicar los criterios de ocultación: interacción rayo-caja envolvente e interacción rayo-parche de Bezier, tal y como han sido aplicados en efectos anteriores.

El proceso finaliza una vez calculadas las contribuciones de todas las parejas que hayan sobrepasado los criterios, obteniéndose finalmente por superposición el campo reflejado-difractado para cada una de las direcciones de análisis.

6.7.3 CAMPO DIFRACTADO Y REFLEJADO

El efecto en este caso es de idénticas características al anterior, la única modificación apreciable es que ahora el elemento **A** será una arista y el elemento **B** será un parche de Bezier, con lo que se producirá primero una difracción y posteriormente una reflexión. La información de partida nuevamente es la posición del foco emisor, la dirección o el punto de observación y

una serie de parches y curvas de Bezier iluminadas.

El método iterativo de búsqueda rigurosa de la pareja de curva-parche, fue descrito anteriormente y al igual que todo proceso iterativo su ejecución supone un gasto computacional alto. Por ello se recurrirá nuevamente a procesos de selección.

A continuación se describirán los diferentes procesos de selección aplicados sobre los parches y curvas de Bezier iluminados. El resultado final de la selección supondrá la fijación de una pareja, que ahora será curva-parche de Bezier, sobre la que se produce el doble efecto. El proceso de selección comienza su búsqueda entre parches y curvas de Bezier iluminados y pertenecientes a cuerpos diferentes, en forma de parejas (**A,B**).

CRITERIOS DE SELECCION PARA CAMPO LEJANO Y CERCANO

■ Criterio de selección I :

Se realiza un estudio entre las normales de la pareja de parches candidata a generar la difracción-reflexión. Ahora, el criterio I selecciona parejas curva-parche que tengan sus caras activas enfrentadas. En este caso, la arista iluminada consta de dos grupos de vectores normales, aplicados en puntos de muestreo comunes y cada uno de ellos asociado a una de las caras que forman la arista, por lo que el análisis deberá ser aplicado para ambos grupos, puesto que la incidencia sobre la arista puede producirse por ambas caras. A continuación se muestra la combinación curva-parche para este doble efecto.

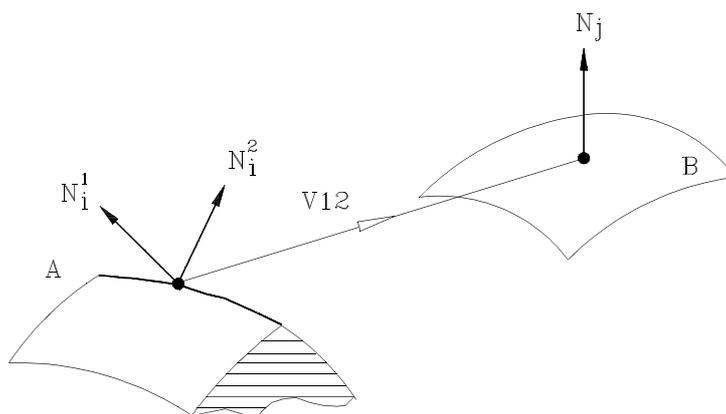


Fig.-6.27 Pareja curva-parche de Bezier enfrentados.

En donde $\vec{V12}$, representa el vector que une dos puntos de muestreo de cada uno de los elementos de Bezier. Las expresiones aplicadas para la selección son las

siguientes:

Si $\exists i, j, k$ con $i=1, \dots, n$ $j=1, \dots, m$ $k=1, 2$

tal que $(\vec{N}_i \cdot \vec{V}l_2) > 0$ y $(N_j^k \cdot \vec{V}l_2) < 0$ *pareja seleccionada*

otro caso *pareja descartada*

En donde el subíndice i indica el punto de muestreo sobre la curva **A**, el j el índice del punto de muestreo en **B** y k indica la cara de la arista.

■ *Criterio de selección II :*

En este criterio, aparece involucrada la dirección de observación o dirección de análisis, de forma que el parche de Bezier **B**, ha de estar iluminado por dicha dirección; el criterio de iluminación es similar al ya descrito en apartados anteriores, para una dirección determinada. En el caso de estar analizando campo cercano, la iluminación de este parche estará evaluada desde el punto de observación.

■ *Criterio de selección III :*

En este caso, se realiza un análisis de la reflexión sobre el parche **B**, para cada uno de los puntos de muestreo, pero tomando como dirección de incidencia la dirección de observación. En la siguiente figura se aprecia el vector reflexión $\vec{V}R$, obtenido sobre el punto de normal \vec{N}_j .

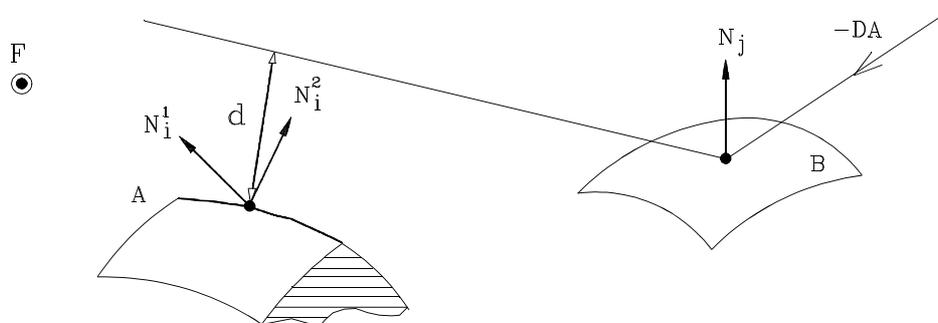


Fig.-6.28 Muestreo de la reflexión en la pareja curva-parche de Bezier.

Una vez obtenida la dirección de reflexión se evaluarán las siguientes condiciones:

- Que la dirección de reflexión ilumine a la curva **A**, o lo que es lo mismo que ilumine a uno de los parches de Bezier que forman la arista.
- Que la distancia de separación **d**, entre la dirección de reflexión y la arista **A**, sea menor que la suma de las diagonales de las cajas envolventes a cada parche.

En caso de cumplirse ambas condiciones la pareja es seleccionada.

Una vez finalizado el proceso de selección de parejas de parche-curva, se procede a la búsqueda rigurosa de los puntos de reflexión y difracción, aplicando el algoritmo correspondiente descrito anteriormente. En el caso de haber obtenido un resultado afirmativo en la búsqueda, los puntos de Q_d y Q_r habrán sido fijados para los elementos **A** y **B** respectivamente. El proceso ahora continúa con el análisis de la posible ocultación del rayo durante su trayectoria, desde el foco emisor hasta el punto de observación.

CRITERIOS DE OCULTACION PARA CAMPO LEJANO Y CERCANO

Los criterios de ocultación aplicados para este doble efecto no difieren de los aplicados en la ocultación de los efectos simples. Sin embargo, cabe destacar que en este caso el recorrido del rayo doblemente reflejado, puede ser descompuesto en tres trayectorias bien definidas, que son:

Rayo incidente: Definido por el segmento con origen en el foco emisor y con final en el punto de difracción.

Rayo difractado: Definido por el segmento que va desde el punto de difracción hasta punto de reflexión.

Rayo difractado-reflejado: Estará definido por una semirecta, en el caso de campo lejano, y por un segmento en el campo cercano; ambos con origen en el punto de reflexión y con final para el campo cercano en el punto de observación.

En los tres tramos definidos será necesario aplicar los criterios de ocultación: interacción rayo-caja envolvente e interacción rayo-parche de Bezier, tal y como han sido aplicados en efectos anteriores.

El proceso finaliza una vez calculadas las contribuciones de todas las parejas que hayan sobrepasado los criterios, obteniéndose finalmente por superposición el campo reflejado-difractado para cada una de las direcciones de análisis.

REFERENCIAS

- [1] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery. "Numerical Recipes in FORTRAN", Cambridge University Press. 1986.
- [2] C. A. Balanis, " Antenna theory, analysis and design ", John Wiley & Sons.
- [3] M. Domingo, R.P. Torres, M.F. Cátedra. "On board using simple radiating elements". EURO ELECTROMAGNETICS, Bourdeaux, France, Junio 1994
- [4] G.Farin. "Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design". Academic Press. 1988.
- [5] M. E. Mortenson, " Geometric Modeling ", John Wiley & Sons.
- [6] David F. Rogers. "Procedural Elements for Computer Graphics". McGraw-Hill International Editions. 1985.

ELECTROMAGNETISMO-----

- [] W. D. Burnside, R. J. Marhefka and C. L. Yu " Roll-Plane Analysis of Aircraft Antennas ", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-21, no. 6, pp. 780-786, Nov 1973.
- [] C. L. Yu, W. D. Burnside and M. C. Gilreath, " Volumetric pattern analysis of airborne antennas ", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-26, no. 5, pp. 6363-641, Sept. 1978.
- [] W. D. Burnside, M. C. Gilreath, R. J. Marhefka and C. L. Yu " A study of KC-135 aircraft antenna patterns ", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-23, no. 3, pp. 309-316, May 1975.
- [] W. D. Burnside, N. Wang, and E. L. Pelton, " Near-field pattern analysis of airborne antennas ", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-28, no. 3, pp. 318-327, May 1980.
- [] J. J. Kim and W. D. Burnside, " Simulation and Analysis of antennas radiating in a complex enviroment ", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-34, no. 4, pp. 554-562, April 1986.
- [] R.G.Kouyoumjiam, P.H.Pathak. "A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a perfectly Conducting Surface". Proc. IEEE, November, 1974, pp. 1448-1461.
- [] P.H.Pathak, W.D.Burnside, R.J.Marhefka. " A Uniform GTD analysis of the Diffraction of Electromagnetic Waves by a Smooth Convex Surface". IEEE Trans. on Ant. and Prop. Vol. AP-28, No. 5, September 1980, pp. 631-642.
- [] J.Perez, M.F. Catedra. "RCS of Electrically Large Targets Modelled with NURBS surfaces". Electronic Letters. Vol. 28, No. 12, june 1992, pp.1119-1121
- [] J. Perez, M.F. Catedra. "Application of Physical Optics to the RCS Computation of Bodies Modelled with NURBS Surfaces". IEEE Trans. on Antennas and Propagation. To be published.
- [] V. Valle, F.Rivas, M.F. Catedra. "Combining The Moment Method with Geometrical Modelling by NURBS Surfaces and Bezier Patches". IEEE Trans. on Ant. and Prop. Vol.

- 42, No. 3, March 1994 pp. 373-381.
- [] P.Martínez, M.Domingo, R.Torres, M.F.Cátedra. " Development of numerical methods to obtain radiation patterns of on board antennas". VII Symposium Nacional URSI 1993. Vol.2, pp. 733-737.
 - [] R.G. Kouyoumjian. "Asymptotic High-Frequency Methods", Proc IEEE, Vol.53, Aug. 1965, pp. 864-876.
 - [] R.F. Harrington, " Matrix Methods for Field Problems", Proc IEEE, vol 55, pp. 136-149, Feb 1967.
 - [] J.H. Richmond, " A wire-grid Model for Scattering by Conducting Bodies". IEEE, trans. Antennas Propagat., vol AP-14, pp. 782, 1966.
 - [] J.H. Richmond, " Digital computer Solutions of the Rigorous Equations for Scattering Problems". Proc. IEEE, , vol 53, pp. 796, 1965.
 - [] T.K. Sarkar, " The Application of the Conjugate Gradient Method for the solution of Operator Equations Arising in Electromagnetic Scattering from WWire Antennas", Radio Science, vol 19, n°5, Sept.-Oct. 1984.
 - [] T.K. Sarkar, K.R. Siarkiewicz, R.F. Stratton, " Survey of Numerical Methods for Solution of Large System of Linear Equations for Electromagnetic Field Problems," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol AP-29, pp. 847-856, Nov 1981.
 - [] A. Taflove, " Application of the Finite-Difference time domine Method to Sinusoidal Steady-State Electromagnetic-Penetration Problems", IEEE Trans. Electr. Compt. vol EMC-22, pp 191-202, Aug. 1980.

GEOMETRIA-----

- [] W.Tiller. "Rational B-Splines for Curve and Surface Representation". IEEE Computer Graphics Appl. 3, pp. 61-69. 1983.
- [] Chang-Gui Yang. "On speeding up ray tracing of B-Spline surfaces". Computed-Aided Design, vol.19, No.3. April 1987.

BIBLIOGRAFIA

ELECTROMAGNETISMO-----

- [] D. A. McNamara, C. W. I. Pistorius, J. A. G. Malherbe, " Introduction to the uniform geometrical theory of diffraction ", Artech House.
- [] C. A. Balanis, " Antenna theory, analysis and design ", John Wiley & Sons.
- [] C. A. Balanis, " Advanced Engineering Electromagnetics", John Wiley & Sons.
- [] W.H.Press, B.P.Flannery, S.A.Teukolsky, W.T.Vetterling. "Numerical recipes". Cambridge University Press. 1987.
- [] R. H. Clarke, J. Brown, "Diffraction Theory and Antennas". John Wiley & Sons.
- [] Graeme L. James. "Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves". IEE Electromagnetic Waves Series 1. 1986.
- [] Richard C. Booton, Jr. " Computational Methods for Electromagnetics and Microwaves." John Wiley & Sons, INC, 1992.
- [] Tatsuo Itoh " Numerical Techniques for Microwave and Millimeter-Wave Passive Structures" John Wiley & Sons, INC.
- [] W.L. Stutzman, G.A. Thiele. " Antenna Theory and Design ". John Wiley & Sons.
- [] V.A. Borovikov, B. Ye. Kinber. " Geometrical Theory of Diffraction". The Institution of Electrical Engineers. IEE. 1994.
- [] A. Cardama. LL. Jofre. J.M. Rius. J. Romeu. S. Blanch. " Anetnas". Ediciones UPC, Area de comunicaciones. 1993.
- [] O.L. Zienkiewichz, " The Finite Element Method", Mc. Graw-Hill, 3rd ed. 1979.
- [] C. L. Britt, " Solution of Electromagnetic Scattering Problems Using Time Domain Techniques", IEEE Trans.AP, vol37, pp 1181-1192, 1989.

- [] R.F. Harrington, " Field Computation by Moment Methods", Macmillan, New York 1968.
- [] J. Casas " Optica". 1985.

GEOMETRIA-----

- [] G.Farin. "Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design". Academic Press. 1988.
- [] M. E. Mortenson, " Geometric Modeling ", John Wiley & Sons.
- [] J.D. Foley, A. Van Dam, S.K. Feiner, J.F. Hughes. "Computer Graphics, principles and practice". Addison Wesley. 1990
- [] R. E. Barnhill, R. F. Riesenfeld. "Computer Aided Geometric Desing". Academic Press 1974.
- [] David F. Rogers. "Procedural Elements for Computer Graphics". McGraw-Hill International Editions. 1985.

METODOS NUMERICOS-----

- [] Eiselt. Pederzoli. Sandblom. "Continuous Optimization Models". W. de Gruyter, 1987.
- [] A.M. Cohen. "Análisis Numérico", Editorial Reverte S.A. 1977
- [] K. V. Mital "Métodos de de Optimización". Editorial Limusa, 1984.
- [] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery. "Numerical Recipes in FORTRAN", Cambridge University Press. 1986.

CODIGOS-----

- [] R.J. Marhefka, W.D. Burnside, " Nuemrical Electromagnetic Code-Basic Scattering Code NEC-BSC (V2). User's Manual, " Thechnical Report 712242-14, The Ohio State University ElectroScience Laboratory., Dec. 1982.

-
- [] R.C. Ruddck and Y.C. Chang, " Nuemrical Electromagnetic Code-Reflector Antenna code NEC-REF Scattering Code (V2). User's Manual, " Thechnical Report 712242-16, The Ohio State University ElectroScience Laboratory., Dec. 1982.

RESULTADOS

7.1 INTRODUCCION

Este capítulo esta dedicado por entero a presentar los resultados obtenidos mediante la aplicación del método propuesto por esta tesis. Las geometrías utilizadas han sido modeladas mediante un número variable de parches NURBS, que simularán una superficie con características de conductor perfecto. Dependiendo de su complejidad pueden ser divididas en tres grupos:

- *Geometrías simples*: Definiremos así a las estructuras constituidas por un único cuerpo, modelado por un numero reducido de parches NURBS.
- *Geometrías compuestas*: En este caso, la estructura estará formada por la unión de geometrías sencillas, con lo que el grado de complejidad aumenta.
- *Geometrías complejas*: Son aquellas en las que la superficie de la estructura se aleja de aquellas generadas por cuerpos canónicos. En este tipo de estructuras se diferencian por lo general diferentes cuerpos, producto de un diseño por bloques, por lo que todos los efectos suelen estar presentes de manera relevante.

Los resultados presentados han sido obtenidos mediante un programa escrito en lenguaje FORTRAN, que será denotado por GONURBS. Estos resultados serán contrastados con los obtenidos por otros programas, como el NEC-BSC [1], el BAFRE [2] y el BOR [3]. El primero

de ellos aplica la UTD sobre geometrías sencillas o compuestas, este último aspecto limita considerablemente el espectro de resultados ya que la geometría ha de ser modelada mediante planos y cilindros. El programa BAFRE emplea el método de los momentos y el BOR esta basado en el método del CG-FFT, aplicado sobre cuerpos conductores con simetrías de revolución, su capacidad de análisis esta asociada al tamaño eléctrico del cuerpo.

7.2 GEOMETRIAS SENCILLAS

En las primeras simulaciones han sido empleadas diversas geometrías sencillas. A continuación, serán presentadas acompañadas del sistema de coordenadas de referencia absoluto empleado para la polarización del campo resultante en cada caso y que servirá de referencia para situar a la antena emisora sobre la estructura.

■ PLACA PLANA

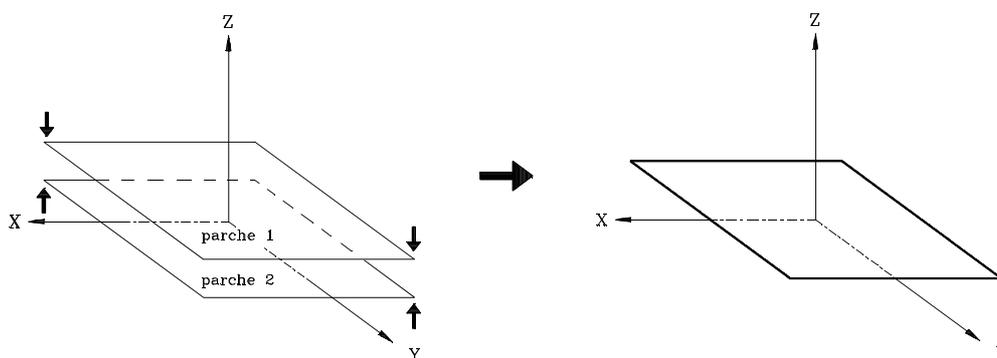


Fig.- 7.1 Placa plana conductora modelada por 2 parches NURBS.

Para modelar este tipo de estructura, es preciso emplear dos parches NURBS, que unidos entre sí, definirán los contornos de la placa. El contorno, como puede observarse, esta formado por cuatro tramos que representaran las aristas de la geometría.

■ CILINDRO

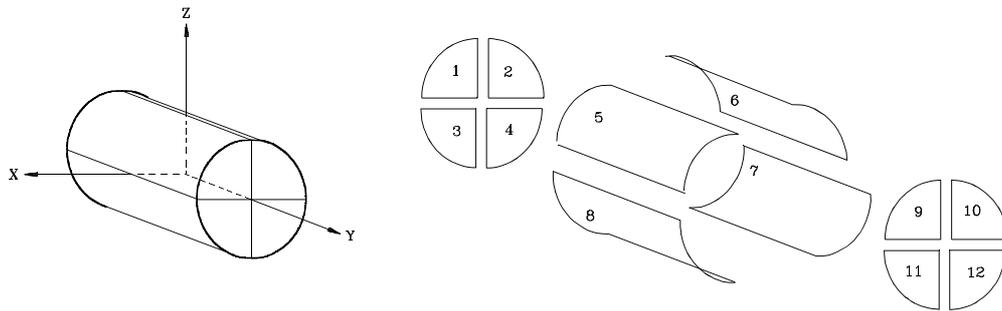


Fig.- 7.2 Cilindro de sección circular modelado por 12 parches NURBS.

En este caso la estructura, consta de 12 superficies NURBS, cuatro para cada uno de los discos que forman las bases y los cuatro restantes, para la superficie lateral del cilindro. La división de cada uno de los parches es representada en la figura anterior, en donde se indica por trazo grueso las aristas generadas en los contornos de ambas bases.

■ ESFERA

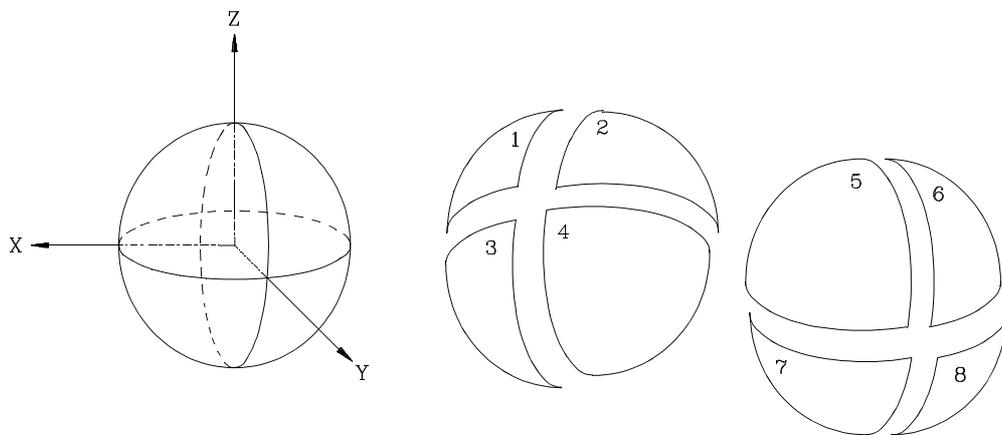


Fig.- 7.3 Esfera centrada en el origen modelada por 8 parches NURBS.

La esfera mostrada en la figura 7.3 esta modelada con 8 superficies NURBS, una por cuadrante. Las uniones entre cada uno de los parches se representa mediante curvas superficiales, observándose la inexistencia de aristas para esta geometría.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las geometrías simples analizadas.

■ SIMULACION RES/1 (CAMPO LEJANO)

Los parámetros de entrada correspondientes a la simulación RES/1, así como las características de la simulación son descritos a continuación.

GEOMETRIA:		PLACA CUADRADA (1X1) mts.				
FRECUENCIA:		1.075 GHz.				
CORTE:		$\Theta \in [0,360]$ $\Phi = 90$				
EFECTOS CONSIDERADOS						
Directo	Reflexión	Difracción en aristas	Difracción en superficie	Doble Reflexión	Reflexión - Difracción	Difracción - Reflexión
SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO
POSICION Y ORIENTACION DE LA ANTENA EMISORA						
Origen del SISTEMA ANTENA (Sistema absoluto)		0.000000	0.000000	0.000000		
Cosenos directores del eje X (Sistema absoluto)		1.000000	0.000000	0.000000		
Cosenos directores del eje Y (Sistema absoluto)		0.000000	1.000000	0.000000		
Cosenos directores del eje Z (Sistema absoluto)		0.000000	0.000000	1.000000		
CONFIGURACION DIPOLAR DE LA ANTENA EMISORA						
Nº Dipolo	Orientación (θ, ϕ) (Sistema Antena)	Origen (X, Y, Z) (Sistema Antena)		Momento dipolar (modulo, fase)		
1 (eléctrico)	(0.0,0.0)	(0.000000,0.000000, $\lambda/8$)		(0.8,0.0)		
CARACTERISTICAS DEL PROCESO GEOMETRICO						
Nº de parches de Bezier del modelo				2		
Nº de cuerpos del modelo				1		
Nº de parches de Bezier iluminados				1		
Nº de curvas de Bezier iluminadas				4		

La figura 7.4 muestra el resultado obtenido para el corte analizado en este caso. Los resultados son presentados en forma de diagrama de radiación polares, normalizados en todo momento al máximo del corte presentado. Por otro lado, los cortes y polarizaciones estarán siempre referidas al sistema de coordenadas presentado en la descripción de las geometrías empleadas.

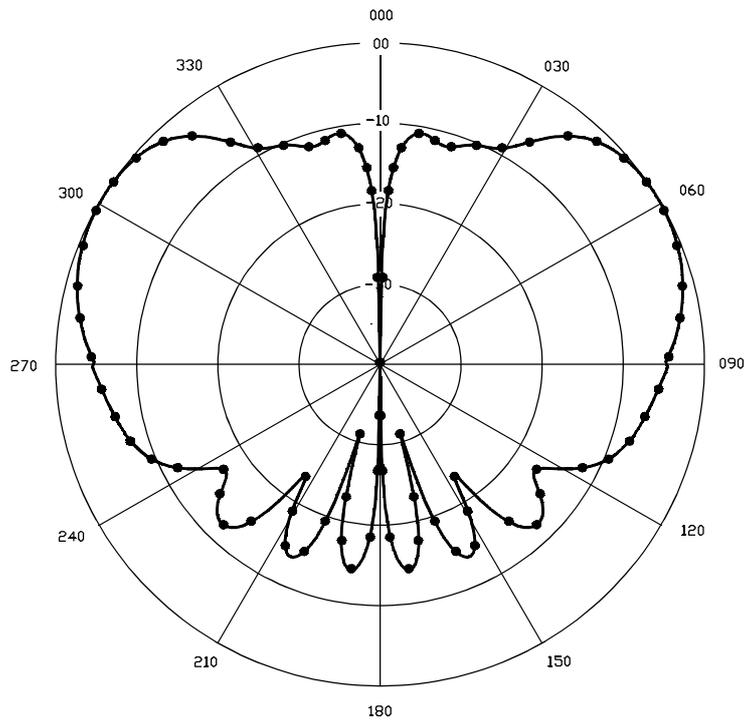


Fig.- 7.4 Componente E_{θ} , para el corte $\phi=90$ de la simulación **RES/1**. Línea continua = GONURBS, Línea de puntos = NEC-BSC

■ **SIMULACION RES/2 (CAMPO LEJANO)**

Los parámetros de entrada correspondientes a la simulación RES/2, así como las características de la simulación son descritas a continuación.

GEOMETRIA:	PLACA CUADRADA (3X3) mts.					
FRECUENCIA:	0.3 GHz.					
CORTES:	$(\Theta \in [0,180], \Phi=0) (\Theta=45, \Phi \in [0,180]) (\Theta=90, \Phi \in [0,180])$					
EFECTOS CONSIDERADOS						
Directo	Reflexión	Difracción en aristas	Difracción en superficie	Doble Reflexión	Reflexión - Difracción	Difracción - Reflexión
SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO

POSICION Y ORIENTACION DE LA ANTENA EMISORA			
Origen del SISTEMA ANTENA (Sistema absoluto)	0.000000	0.000000	0.000000
Cosenos directores del eje X (Sistema absoluto)	1.000000	0.000000	0.000000
Cosenos directores del eje Y (Sistema absoluto)	0.000000	1.000000	0.000000
Cosenos directores del eje Z (Sistema absoluto)	0.000000	0.000000	1.000000
CONFIGURACION DIPOLAR DE LA ANTENA EMISORA			
Nº Dipolo	Orientación (θ, ϕ) (Sistema Antena)	Origen (X, Y, Z) (Sistema Antena)	Momento dipolar (modulo, fase)
1 (eléctrico)	(0.0,0.0)	(0.000000,0.000000, $\lambda/4$)	(1.0,0.0)
CARACTERISTICAS DEL PROCESO GEOMETRICO			
Nº de parches de Bezier del modelo			2
Nº de cuerpos del modelo			1
Nº de parches de Bezier iluminados			1
Nº de curvas de Bezier iluminadas			4

Las figuras 7.5-7.8 muestran los resultados obtenidos para los tres cortes analizados. En este caso el parche iluminado se corresponde con el parche 1 de la figura 7.1, y las curvas de Bezier iluminadas son los cuatro contornos del citado parche.

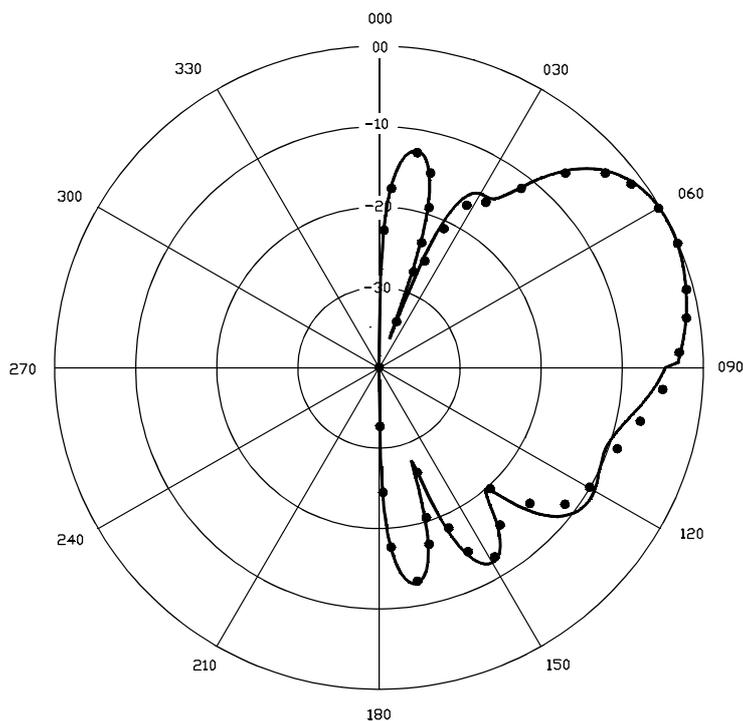


Fig.- 7.5 Componente E_{θ} para el corte $\phi=0$ de la simulación **RES/2**. Línea continua = GONURBS, Línea de puntos = BAFRE.

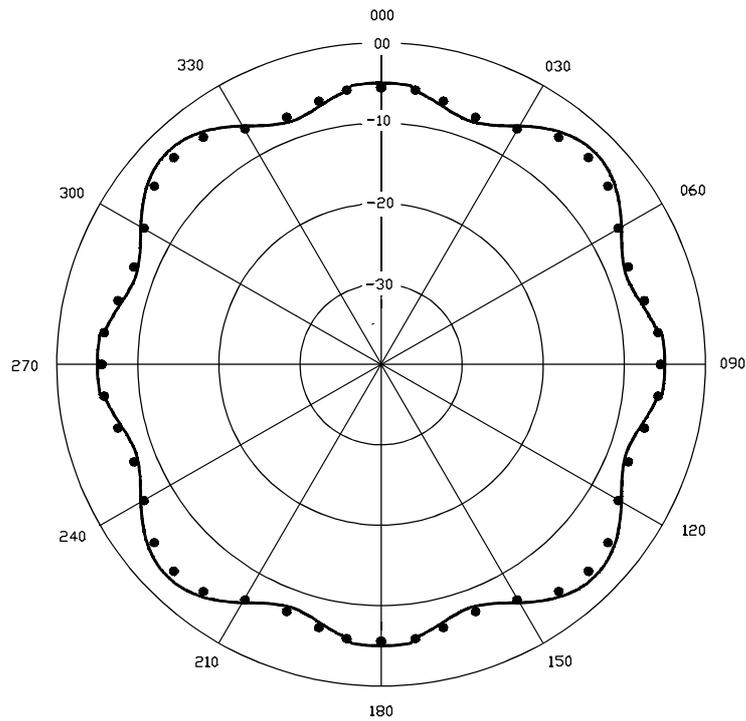


Fig.- 7.6 Componente E_{θ} para el corte $\Theta=45$ de la simulación **RES/2**. Línea continua = GONURBS, Línea de puntos = BAFRE.

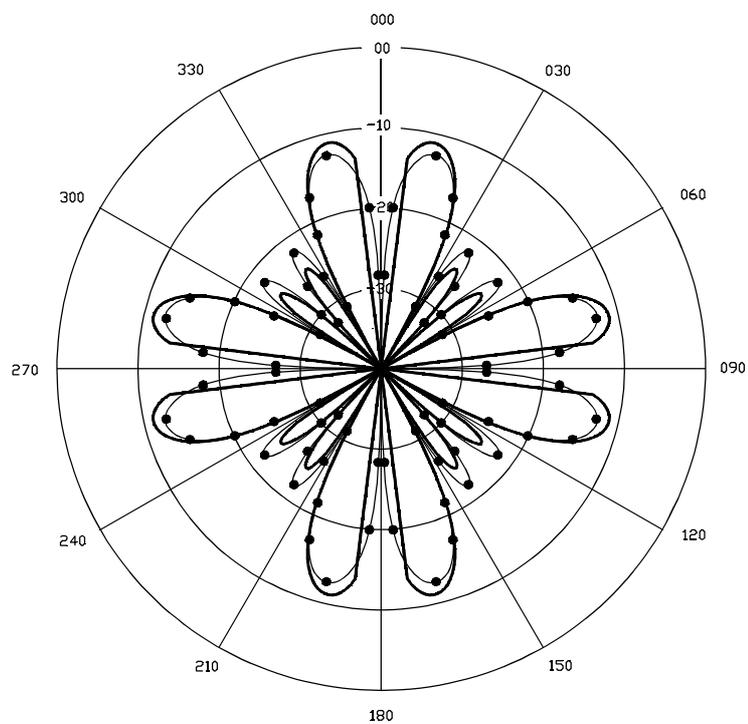


Fig.- 7.7 Componente E_{ϕ} para el corte $\Theta=45$ de la simulación **RES/2**. Línea continua=GONURBS, Línea de puntos=BAFRE

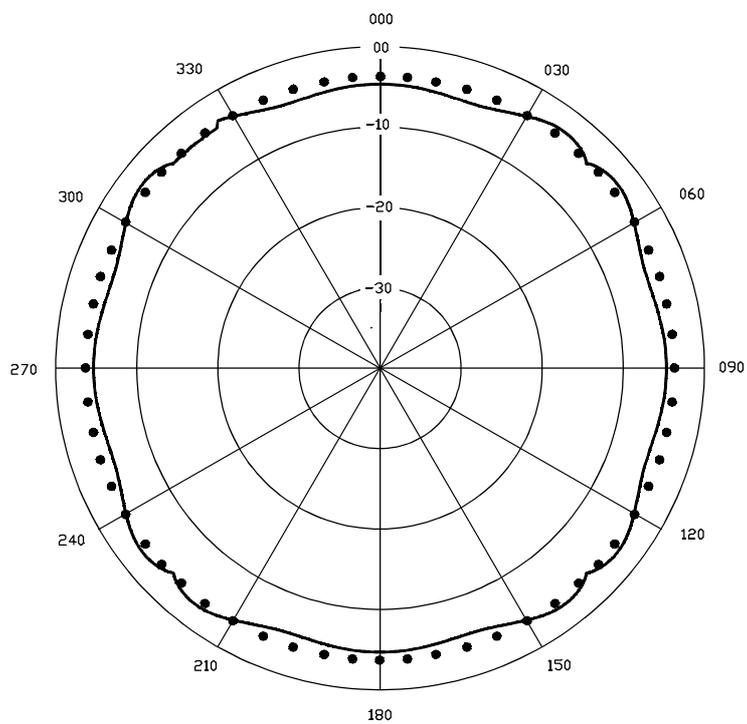


Fig.- 7.8 Componente E_{θ} para el corte $\Theta=90$ de la simulación **RES/2**. Línea continua=GONURBS, Línea de puntos=BAFRE.

■ SIMULACION RES/3 (CAMPO LEJANO)

En este caso la geometría soporte es un cilindro cuyas dimensiones son: 0.25 mts. de radio y 1.0 mts. de altura, orientado con respecto al sistema absoluto tal y como muestra la figura 7.2. Las características de la simulación realizada se describen a continuación.

GEOMETRIA:		CILINDRO				
FRECUENCIA:		3.0 GHz.				
CORTES:		$(\Theta=45, \Phi \in [0,360])$ $(\Phi=0, \Theta \in [0,180])$ $(\Phi=30, \Theta \in [0,180])$				
EFECTOS CONSIDERADOS						
Directo	Reflexión	Difracción en aristas	Difracción en superficie	Doble Reflexión	Reflexión - Difracción	Difracción - Reflexión
SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO
POSICION Y ORIENTACION DE LA ANTENA EMISORA						
Origen del SISTEMA ANTENA (Sistema absoluto)			0.000000	0.000000	0.250000	
Cosenos directores del eje X (Sistema absoluto)			1.000000	0.000000	0.000000	
Cosenos directores del eje Y (Sistema absoluto)			0.000000	1.000000	0.000000	
Cosenos directores del eje Z (Sistema absoluto)			0.000000	0.000000	1.000000	
CONFIGURACION DIPOLAR DE LA ANTENA EMISORA						
Nº Dipolo	Orientación (θ, ϕ) (Sistema Antena)		Origen (X, Y, Z) (Sistema Antena)		Momento dipolar (modulo, fase)	
1 (eléctrico)	$(0.0, 0.0)$		$(0.000000, 0.000000, 0.250000)$		$(0.8, 0.0)$	
CARACTERISTICAS DEL PROCESO GEOMETRICO						
Nº de parches de Bezier del modelo					12	
Nº de cuerpos del modelo					1	
Nº de parches de Bezier iluminados					4	
Nº de curvas de Bezier iluminadas					4	

Los diagramas de radiación correspondientes a los tres cortes establecidos en la tabla anterior son mostrados a continuación. Para la posición de la antena fijada en este caso, los parches de Bezier iluminados son 2 que se corresponden con los denotados por 5 y 6 de la figura 7.2. Por otro lado las aristas consideradas son cuatro y están definidas por las curvas de contorno pertenecientes a las uniones de los parches: 1-5, 2-6, 9-5, y 10-6, todos ellos definidos en la figura 7.2.

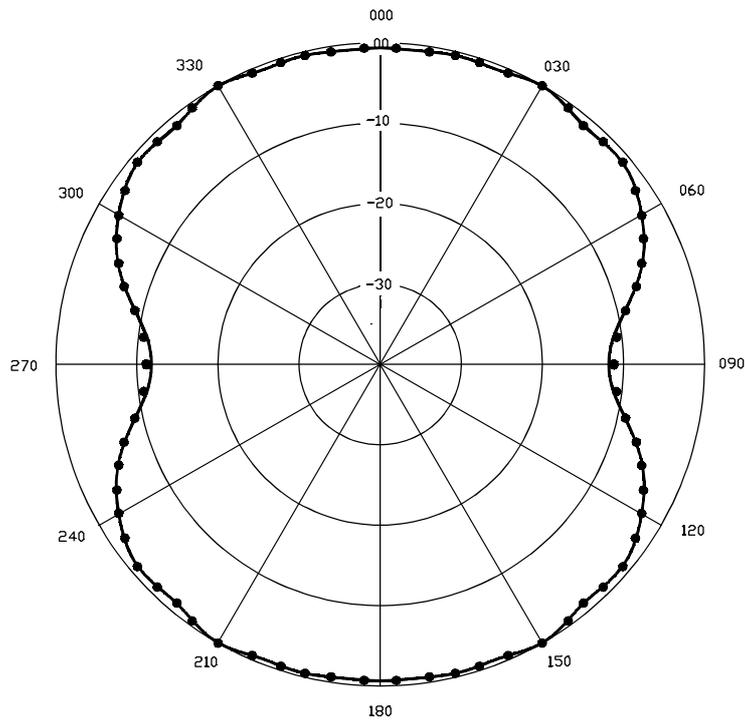


Fig.- 7.9 Componente E_{Θ} para el corte $\Theta=45$ de la simulación **RES/3**. Línea continua = GONURBS, Línea de puntos = NEC-BSC.

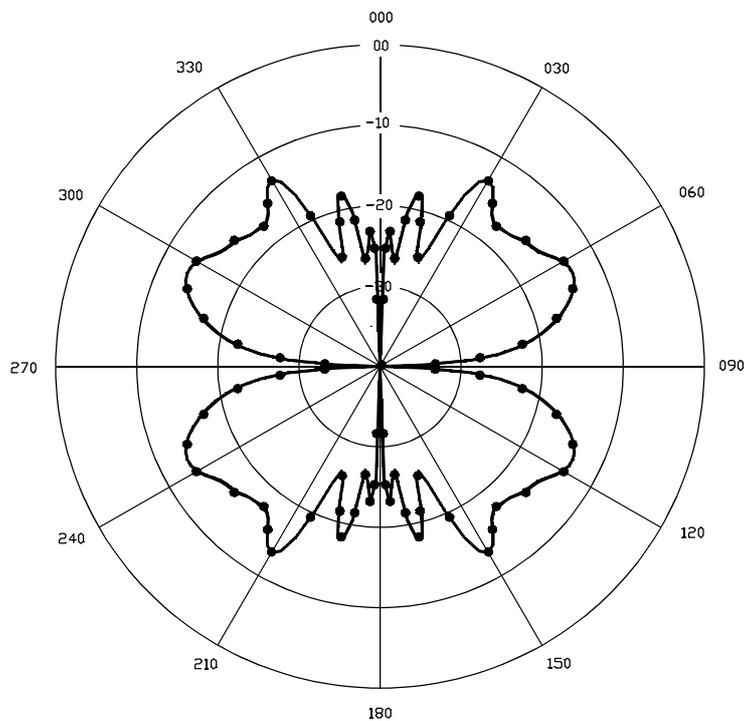


Fig.- 7.10 Componente E_{ϕ} para el corte $\Theta=45$ de la simulación **RES/3**. Línea continua = GONURBS, Línea de puntos = NEC-BSC.

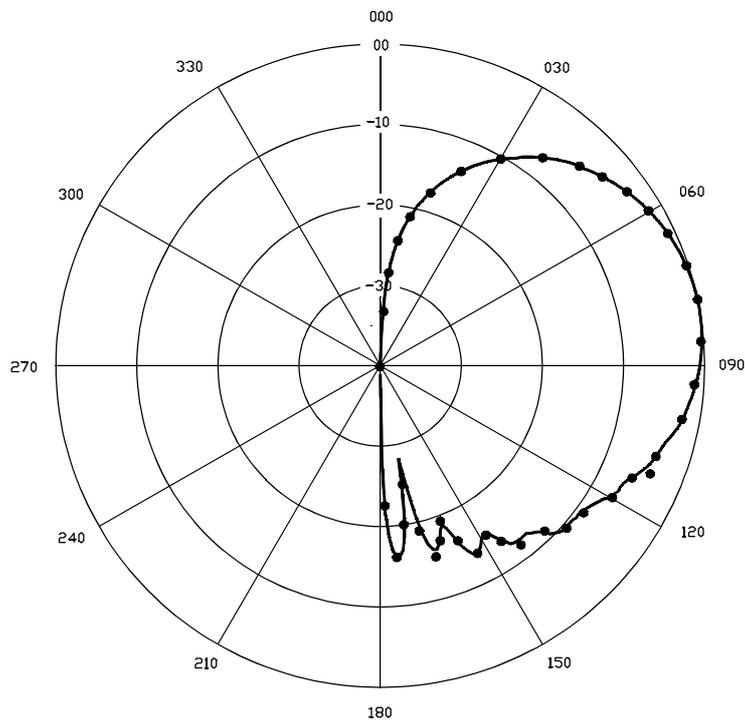


Fig. -7.11 Componente E_θ para el corte $\varphi=0$, de la simulación **RES/3**. Línea continua = GONURBS, Línea de puntos = NEC-BSC.

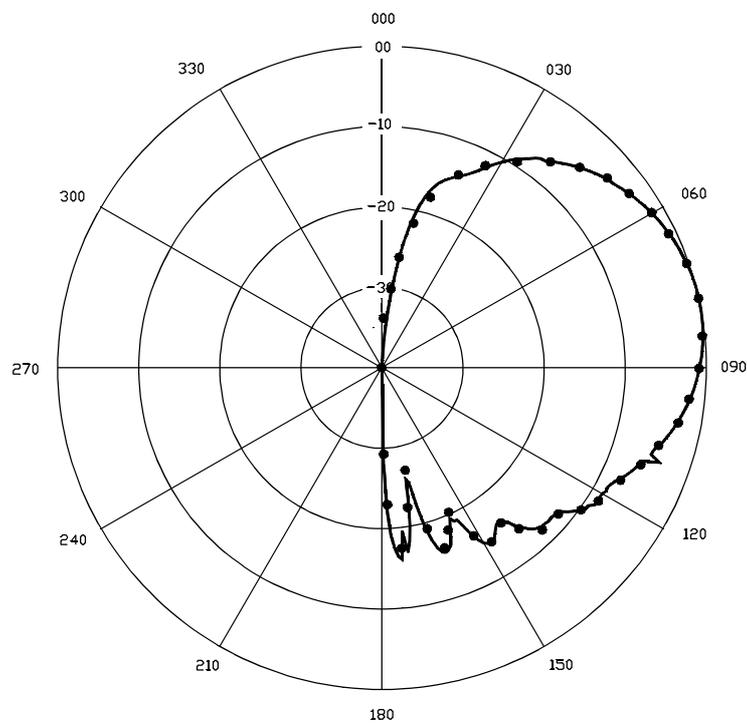


Fig.- 7.12 Componente E_θ para el corte $\varphi=30$ de la simulación **RES/3**. Línea continua = GONURBS, Línea de puntos = NEC-BSC.

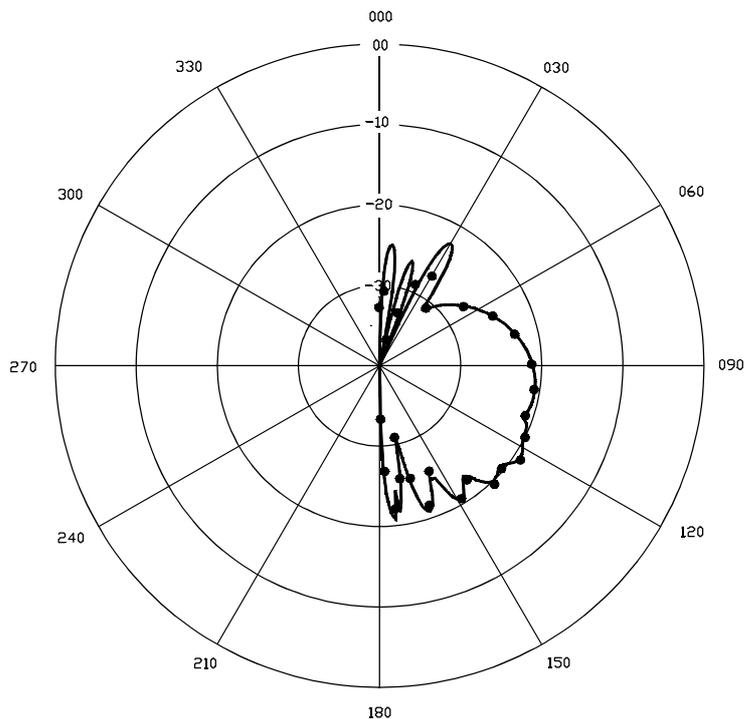


Fig.- 7.13 Componente E_ϕ para el corte $\phi=30$ de la simulación **RES/3**. Línea continua = GONURBS, Línea de puntos = NEC-BSC.

■ **SIMULACION RES/4 (CAMPO LEJANO)**

El análisis que a continuación se presenta ha consistido en la simulación de un dipolo eléctrico vertical situado sobre una esfera conductora de radio 1 mts. y modelada por 8 parches NURBS tal y como se describe en la figura 7.3. Los datos de entrada establecidos para esta simulación se muestran a continuación.

GEOMETRIA:		ESFERA (Radio=1 mts.)				
FRECUENCIA:		0.449 GHZ.				
CORTES:		$(\Phi=0, \Theta \in [0,180])$				
EFECTOS CONSIDERADOS						
Directo	Reflexión	Difracción en aristas	Difracción en superficie	Doble Reflexión	Reflexión - Difracción	Difracción - Reflexión
SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO
POSICION Y ORIENTACION DE LA ANTENA EMISORA						
Origen del SISTEMA ANTENA (Sistema absoluto)		0.000000	0.000000	1.000000		
Cosenos directores del eje X (Sistema absoluto)		1.000000	0.000000	0.000000		
Cosenos directores del eje Y (Sistema absoluto)		0.000000	1.000000	0.000000		

Cosenos directores del eje Z (Sistema absoluto)		0.000000	0.000000	1.000000
CONFIGURACION DIPOLAR DE LA ANTENA EMISORA				
Nº Dipolo	Orientación (θ, ϕ) (Sistema Antena)	Origen (X, Y, Z) (Sistema Antena)		Momento dipolar (modulo, fase)
(magnético)	(0.0, 0.0)	(0.000000, 0.000000, 0.111111)		(1.0, 0.0)
CARACTERISTICAS DEL PROCESO GEOMETRICO				
Nº de parches de Bezier del modelo				8
Nº de cuerpos del modelo				1
Nº de parches de Bezier iluminados				4
Nº de curvas de Bezier iluminadas				0

En este caso, los campos directo, reflejado y difractado en superficie son los que contribuyen al campo total. El campo difractado en aristas no existe ya que la superficie no presenta curvas de Bezier que puedan ser consideradas como aristas por el método. Por otro lado los cuatro parches seleccionados como iluminados se corresponden con los parches 1,2,5,6 de la figura 7.3.

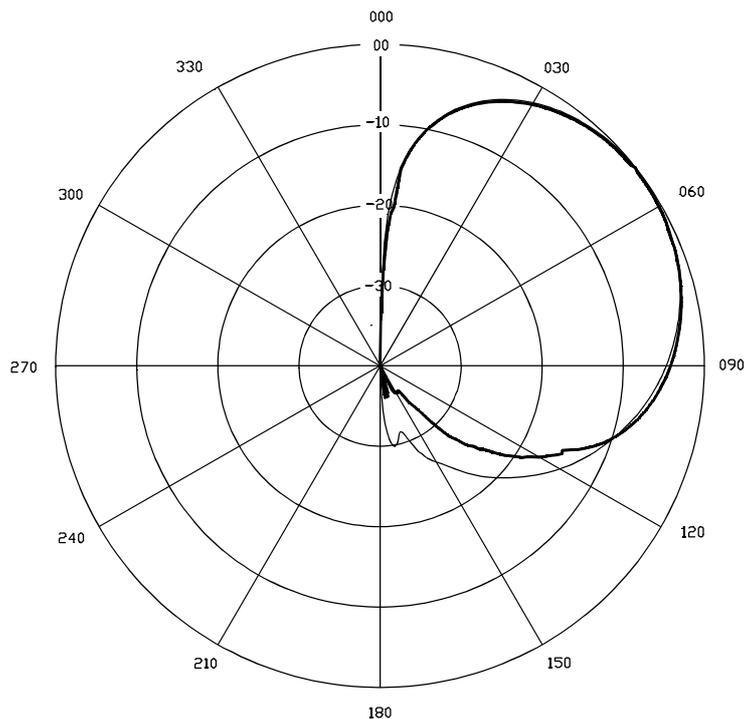


Fig.- 7.14 Componente E_ϕ para el corte $\phi=0$ de la simulación RES/4. Línea gruesa = GONURBS, Línea fina = BOR.

7.3 GEOMETRIAS COMPUESTAS

En este apartado se presentaran los resultados obtenidos sobre estructuras modeladas por la unión de geometrías sencillas. De esta forma aumenta el numero de parches y curvas de Bezier implicadas en los procesos de dispersión calculados por el método.

■ CILINDRO-PLACA PLANA

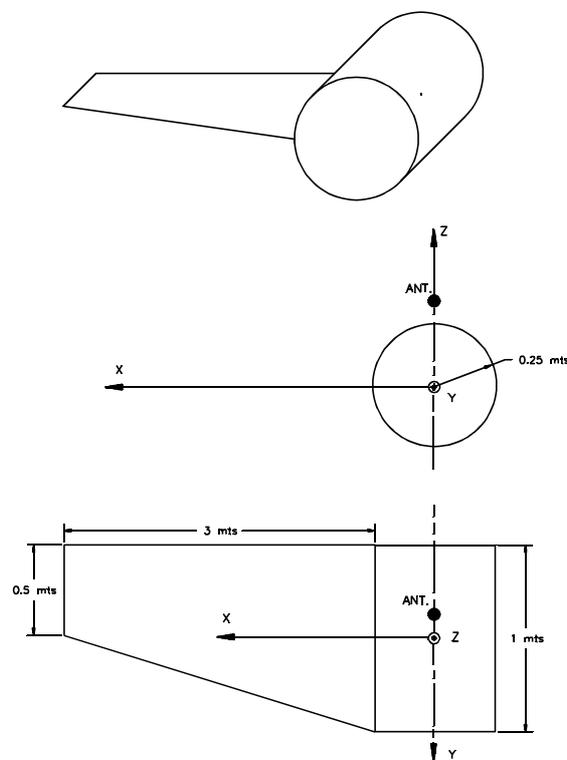


Fig.- 7.15 Estructura compuesta modelada por un cilindro (12 NURBS) y una placa plana (2 NURBS).

En el modelo esta formado por 14 superficies NURBS, que ha sido dispuestas siguiendo el mismo criterio de modelización que el empleado para las geometrías mostradas en las figuras 7.1 y 7.2. Por lo tanto, de los 14 parches NURBS, 12 corresponderán a la parte cilíndrica, constituyendo el cuerpo **C1** y 2 a la estructura plana, formando el cuerpo **C2**.

El análisis ha sido realizado para las localizaciones de la antena mostradas en la figura 7.15, cuya posición exacta será descrita en la tabla correspondiente a la simulación.

■ AVION SIMPLIFICADO

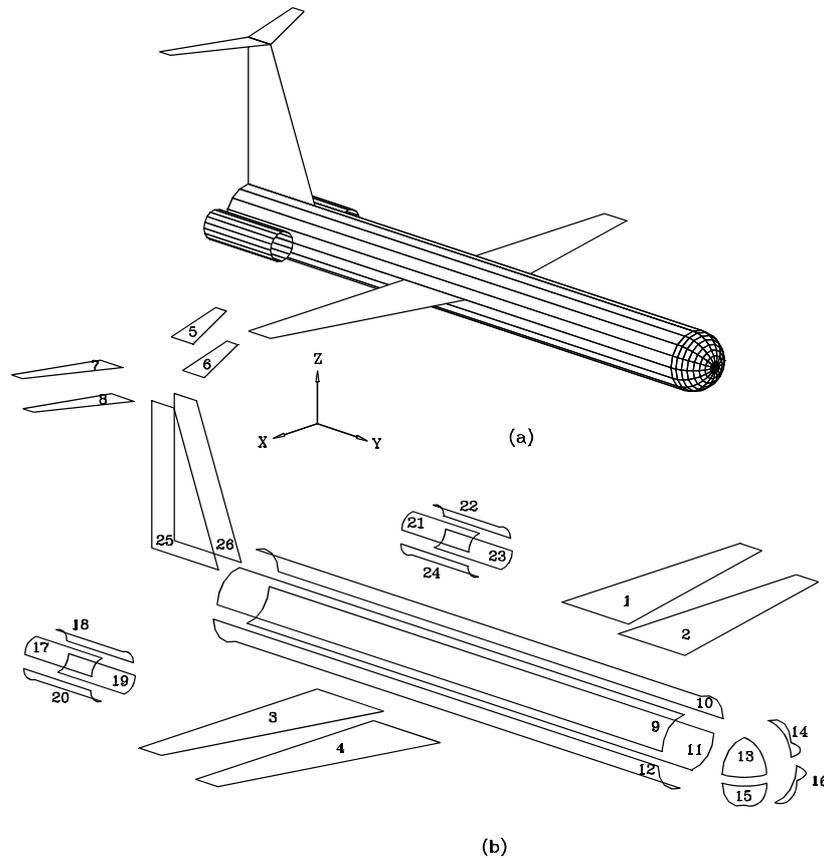


Fig.- 7.16 Avión simplificado modelado por 26 parches NURBS.

La figura 7.16(a), muestra la estructura completa y la figura 7.16(b) la descomposición de la misma en parches NURBS. Como puede observarse, consta de 26 superficies que dan forma a una geometría similar a la de un avión común cuyas dimensiones son: 21 metros de largo (eje Y), 16 metros de ancho (eje X) y 7 metros de alto (eje Z). El análisis sobre esta estructura ha sido realizado para dos posiciones de la antena emisora que son mostradas a continuación, en la figura 7.17, denotadas por ANT-1 y ANT-2.

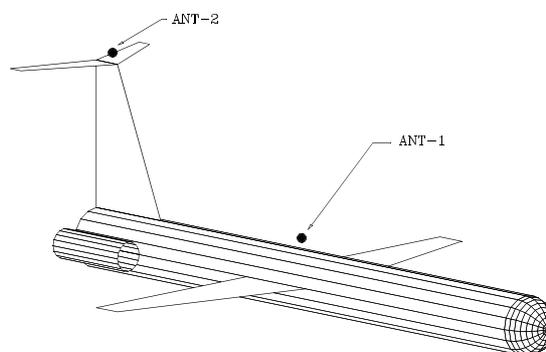


Fig.- 7.17 Localización de las antenas emisoras analizadas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el análisis de geometrías compuestas.

■ SIMULACION RES/5 (CAMPO LEJANO)

La geometría mostrada en la figura 7.15 ha sido empleada como estructura soporte de un dipolo eléctrico vertical. A continuación se describen los parámetros de entrada y características de la simulación realizada.

GEOMETRIA:		CILINDRO-PLACA PLANA				
FRECUENCIA:		6.0 GHz.				
CORTES:		$(\Phi=0, \Theta \in [0,180])$, $(\Phi=180, \Theta \in [0,180])$				
EFECTOS CONSIDERADOS						
Directo	Reflexión	Difracción en aristas	Difracción en superficie	Doble Reflexión	Reflexión - Difracción	Difracción - Reflexión
SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
POSICION Y ORIENTACION DE LA ANTENA EMISORA						
ANT-1 Origen del SISTEMA ANTENA (Sistema absoluto)			0.000000	-0.100000	0.250000	
ANT-2 Origen del SISTEMA ANTENA (Sistema absoluto)			0.500000	-0.100000	0.100000	
Cosenos directores del eje X (Sistema absoluto)			1.000000	0.000000	0.000000	
Cosenos directores del eje Y (Sistema absoluto)			0.000000	1.000000	0.000000	
Cosenos directores del eje Z (Sistema absoluto)			0.000000	0.000000	1.000000	
CONFIGURACION DIPOLAR DE LA ANTENA EMISORA						
Nº Dipolo	Orientación (θ, ϕ) (Sistema Antena)		Origen (X, Y, Z) (Sistema Antena)		Momento dipolar (modulo, fase)	
D-1 (eléct.)	$(0.0, 0.0)$		$(0.000000, 0.000000, 0.100000)$		$(1.0, 0.0)$	
CARACTERISTICAS DEL PROCESO GEOMETRICO						
Nº de parches de Bezier del modelo					14	
Nº de cuerpos del modelo					2	
Nº de parches de Bezier iluminados. (ANT-1)(D-1)					3	
Nº de parches de Bezier iluminados. (ANT-2)(D-1)					2	
Nº de curvas de Bezier iluminadas. (ANT-1)(D-1)					7	
Nº de curvas de Bezier iluminadas. (ANT-2)(D-1)					5	

■ POSICION DE LA ANTENA: ANT-1, DIPOLO: D-1.

Los diagramas de radiación resultantes como superposición de los simples efectos, son mostrados a continuación para los dos cortes establecidos.

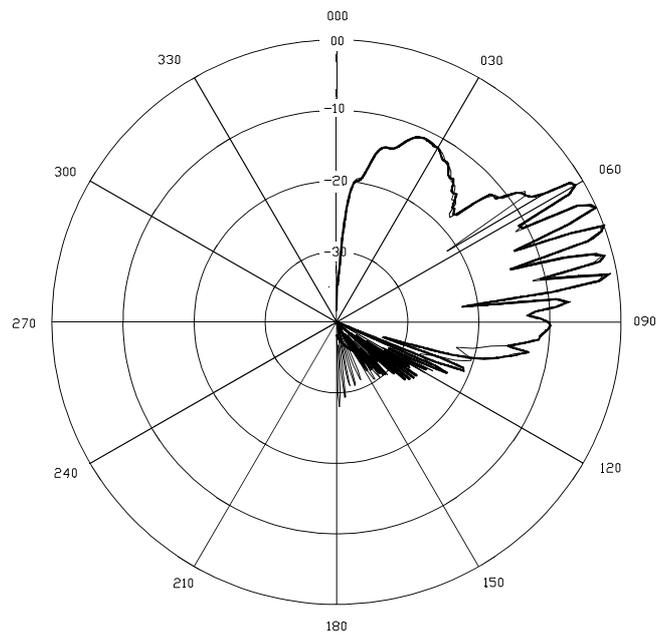


Fig.- 7.18 Componente E_{θ} para el corte $\varphi=0$ de la simulación **RES/5**. Línea gruesa = GONURBS, Línea fina = NEC-BSC.

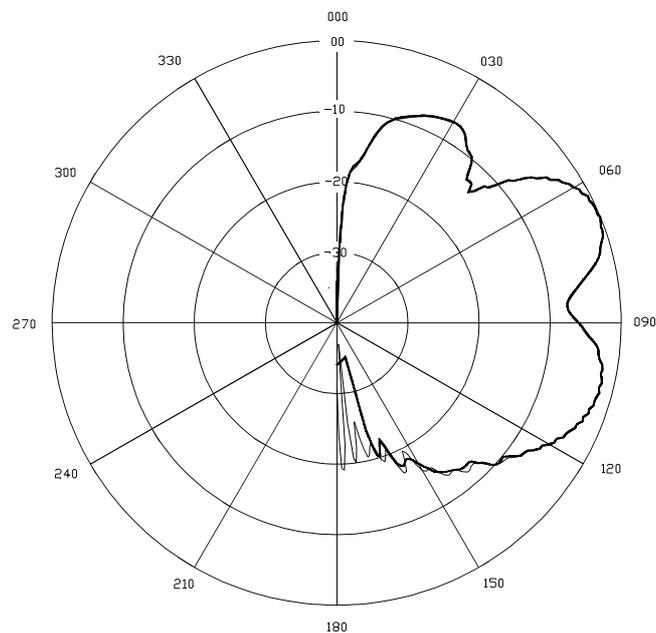


Fig.- 7.19 Componente E_{θ} para el corte $\varphi=180$ de la simulación **RES/5**. Línea gruesa = GONURBS, Línea fina = NEC-BSC.

■ POSICION DE LA ANTENA: **ANT-2**, DIPOLO: **D-1**.

En esta simulación se desglosan los diferentes efectos considerados, para ambas polarizaciones. Con esto puede observarse la contribución de cada uno de ellos al diagrama

resultante.

La geometría empleada mostrada en la figura 7.15, ha sido construida mediante dos cuerpos el **C1** (cilindro) y **C2** (placa plana), por lo que los dobles efectos se deberán a dispersiones entre ambos. Al ser una estructura pequeña el numero de parches de Bezier y de aristas iluminadas es reducido, tal y como se muestra en la figura 7.20.

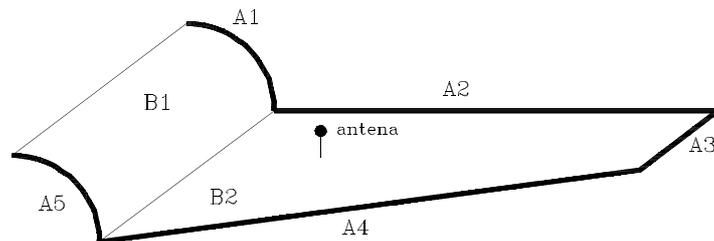


Fig.- 7.20 Geometría iluminada en la simulación RES/5/ANT-2/D-1. Parches iluminados: **B1** y **B2**. Aristas iluminadas: **A1,A2,A3,A4** y **A5**.

El parche **B1** y las aristas **A1** y **A5**, pertenecen al cuerpo **C1**, mientras que las restantes entidades pertenecen al cuerpo **C2**. El numero de entidades es reducido por lo que, podrán ser identificadas fácilmente las partes de la geometría intervinientes en cada uno de los efectos considerados a continuación.

COMPONENTE $E\Theta$

CAMPO DIRECTO: La ocultación para el corte analizado se debe al parche **B2**. Los diagramas de radiación correspondiente a cada uno de los efectos estarán normalizados con respecto al máximo del campo total. Para el campo directo el resultado se muestra a continuación.

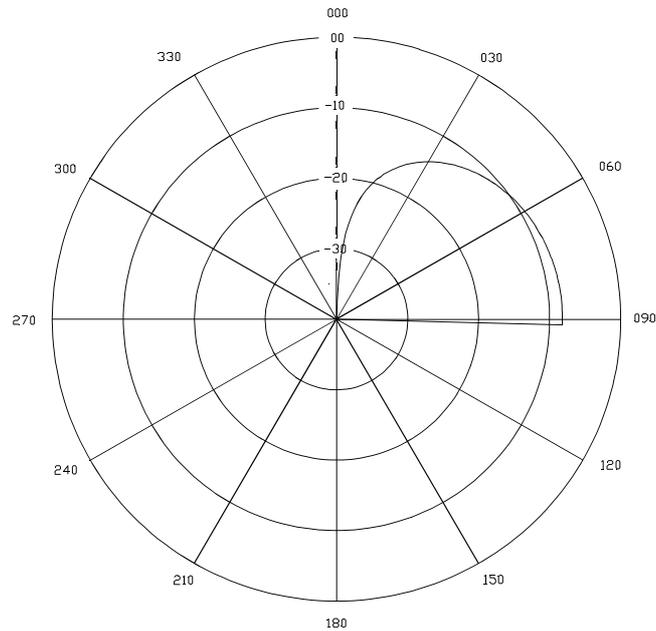


Fig.- 7.21 Componente E_θ del campo directo para el corte $\phi=0$ de la simulación **RES/5/ANT-2/D-1**.

CAMPO REFLEJADO: En este caso son los parches **B1** y **B2** los causantes de la reflexión.

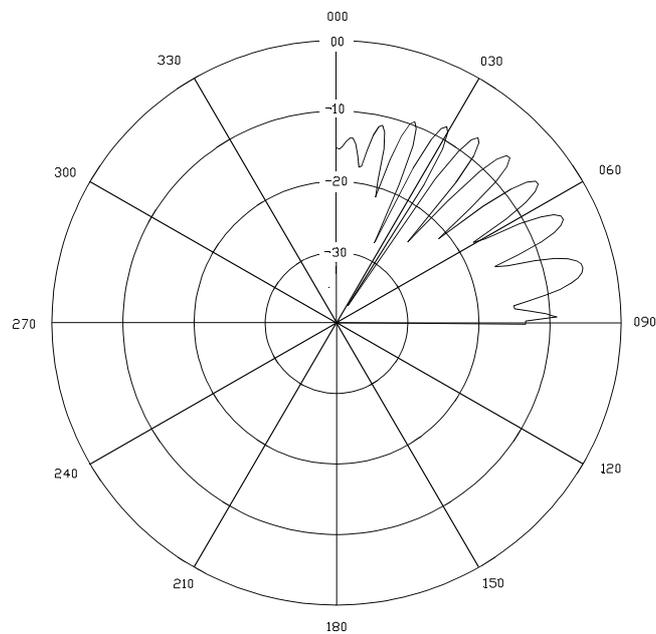


Fig.- 7.22 Componente E_θ del campo reflejado para el corte $\phi=0$ de la simulación **RES/5/ANT-2/D-1**.

CAMPO DIFRACTADO: Las aristas difractoras serán las denotadas por **A1,A2,A3,A4** y **A5** en la figura 7.20.

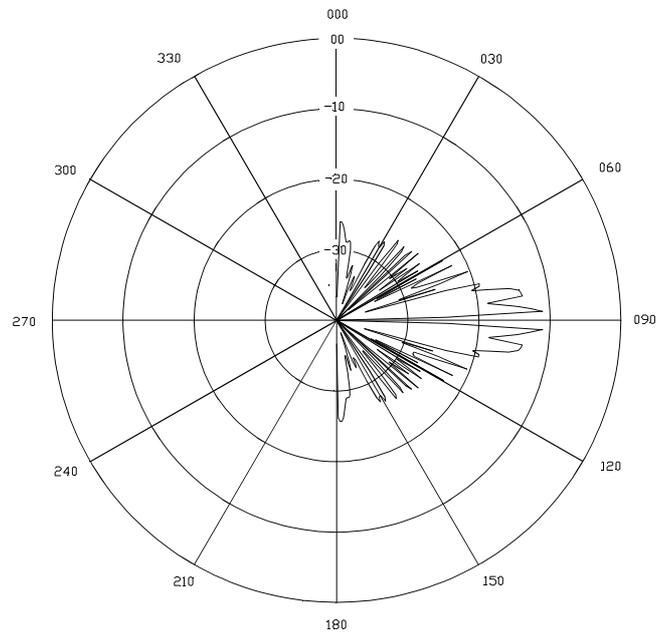


Fig.- 7.23 Componente E_{θ} del campo difractado para el corte $\varphi=0$ de la simulación **RES/5/ANT-2/D-1**.

CAMPO DOBLEMENTE REFLEJADO: En este caso las combinaciones entre los parches **B1** y **B2** generan este doble efecto.

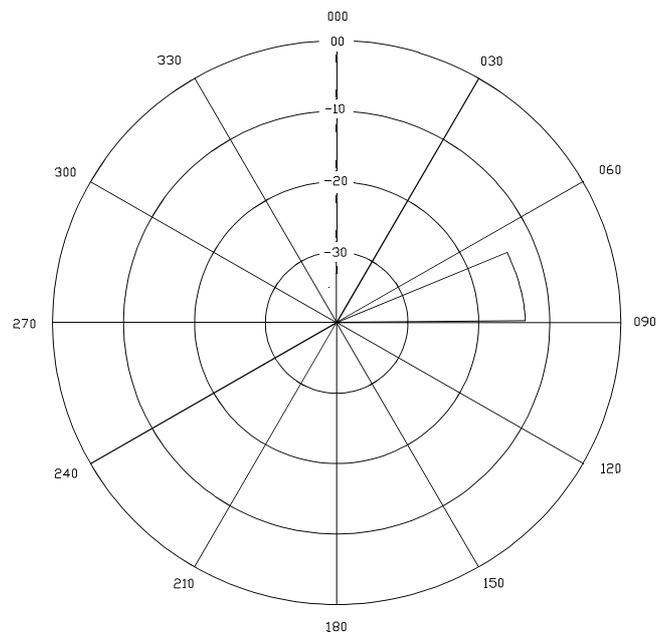


Fig.- 7.24 Componente E_{θ} del campo doblemente reflejado para el corte $\varphi=0$ de la simulación **RES/5/ANT-2/D-1**.

CAMPO REFLEJADO-DIFRACTADO: En este efecto intervienen aristas y parches en forma de parejas por lo que las combinaciones son abundantes.

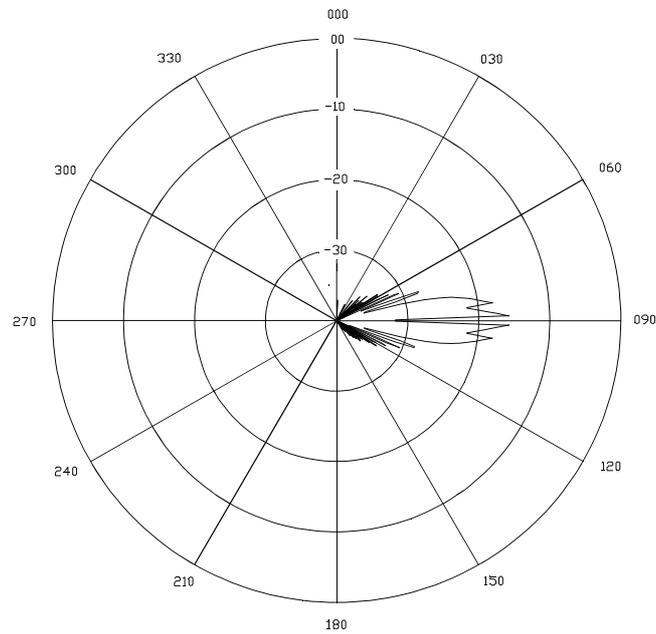


Fig.- 7.25 Componente E_{θ} del campo reflejado-difractado para el corte $\varphi=0$ de la simulación **RES/5/ANT-2/D-1**.

CAMPO TOTAL: Calculado como superposición de los efectos anteriormente expuestos.

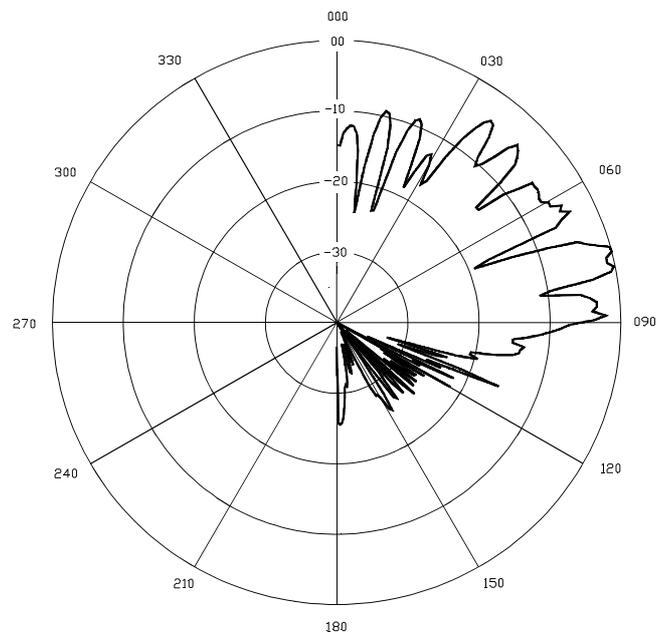


Fig.- 7.26 Componente E_{θ} del campo total para el corte $\varphi=0$ de la simulación **RES/5/ANT-2/D-1**.

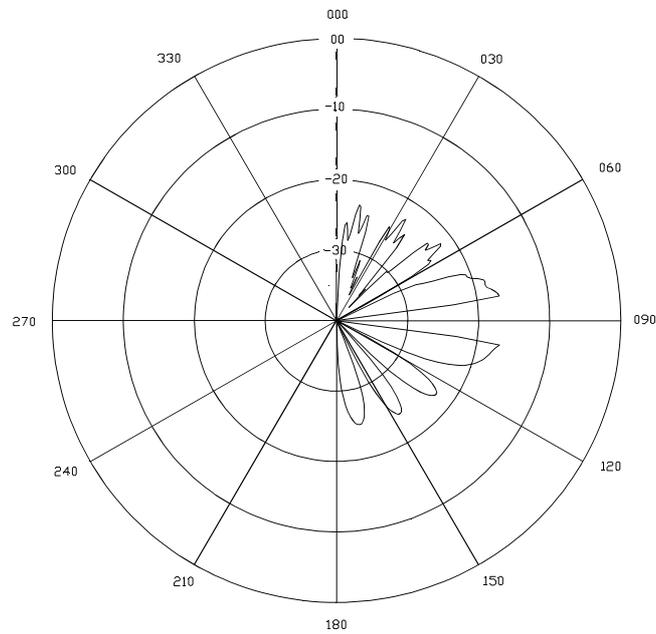
COMPONENTE E_{θ} *CAMPO DIFRACTADO*

Fig.- 7.27 Componente E_{θ} del campo difractado para el corte $\phi=0$ de la simulación **RES/5/ANT-2/D-1**.

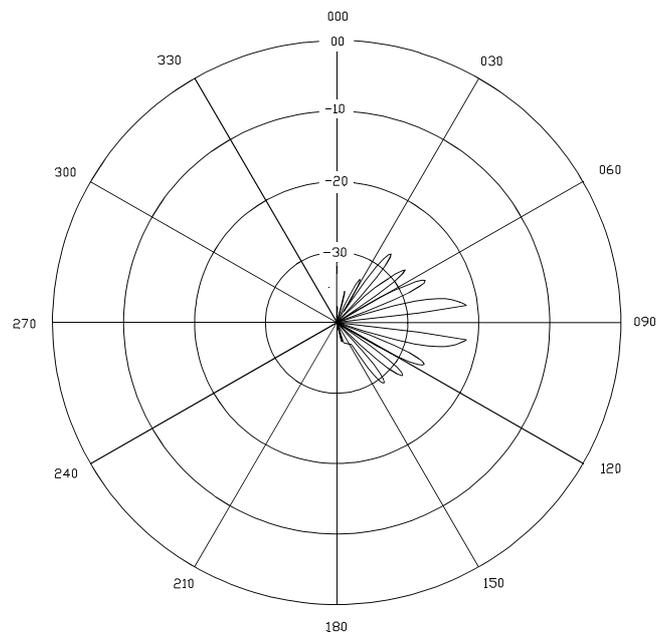
CAMPO REFLEJADO-DIFRACTADO

Fig.- 7.28 Componente E_{θ} del campo reflejado-difractado para el corte $\phi=0$ de la simulación **RES/5/ANT-2/D-1**.

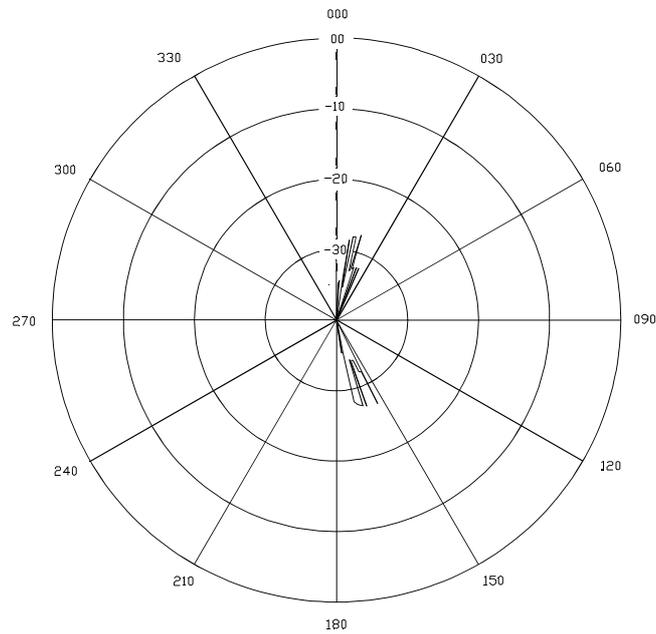
CAMPO DIFRACTADO-REFLEJADO

Fig.- 7.29 Componente E_ϕ del campo difractado-reflejado para el corte $\phi=0$ de la simulación **RES/5/ANT-2/D-1**.

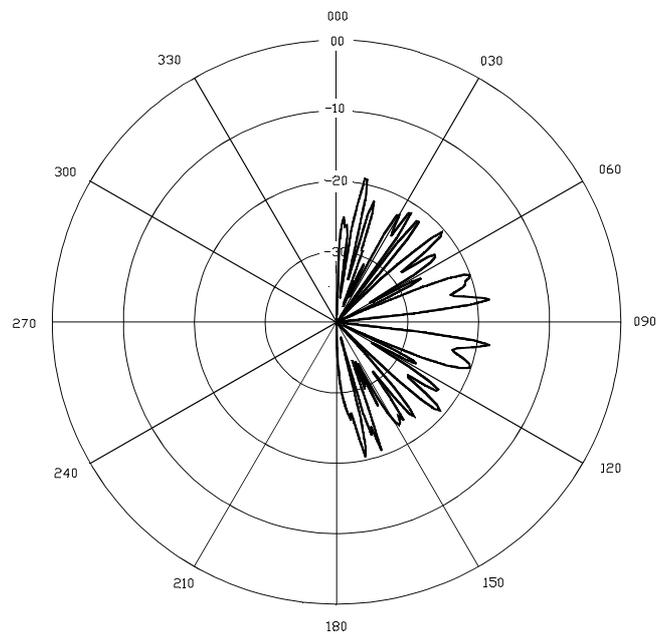
CAMPO TOTAL

Fig.- 7.30 Componente E_ϕ del campo total para el corte $\phi=0$ de la simulación **RES/5/ANT-2/D-1**.

■ SIMULACION RES/6 (CAMPO LEJANO)

En este caso la geometría soporte ha sido la correspondiente al avión simplificado mostrado en la figura 7.16. Esta estructura aumenta el grado de complejidad con respecto a la anterior y por ello el estudio realizado ha sido mas intenso. A continuación se muestran los parámetros de entrada asociados a esta simulación.

GEOMETRIA:		AVION-SIMPLIFICADO				
FRECUENCIA:		3.0 GHz.				
CORTES:		$(\Theta=90, \Phi \in [0,360]), (\Theta=45, \Phi \in [0,360]), (\Phi=0, \Theta \in [0,360])$				
EFECTOS CONSIDERADOS						
Directo	Reflexión	Difracción en aristas	Difracción en superficie	Doble Reflexión	Reflexión - Difracción	Difracción - Reflexión
SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO
POSICION Y ORIENTACION DE LA ANTENA EMISORA						
ANT-1 Origen del SISTEMA ANTENA (Sistema absoluto)			0.000000	-0.500000	1.000000	
ANT-2 Origen del SISTEMA ANTENA (Sistema absoluto)			0.000000	-9.000000	6.000000	
Cosenos directores del eje X (Sistema absoluto)			1.000000	0.000000	0.000000	
Cosenos directores del eje Y (Sistema absoluto)			0.000000	1.000000	0.000000	
Cosenos directores del eje Z (Sistema absoluto)			0.000000	0.000000	1.000000	
CONFIGURACION DIPOLAR DE LA ANTENA EMISORA						
Nº Dipolo (eléctrico)	Orientación (θ, ϕ) (Sistema Antena)		Origen (X, Y, Z) (Sistema Antena)		Momento dipolar (modulo, fase)	
	$(0,0,0,0)$		$(0,0000,0,0000,0,0500)$		$(1,0,0,0)$	
CARACTERISTICAS DEL PROCESO GEOMETRICO						
Nº de parches de Bezier del modelo					26	
Nº de cuerpos del modelo					1	
Nº de parches de Bezier iluminados (ANT-1)					10	
Nº de parches de Bezier iluminados (ANT-2)					16	
Nº de curvas de Bezier iluminadas (ANT-1)					14	
Nº de curvas de Bezier iluminadas (ANT-2)					16	

El numero posiciones de la antena emisora para este caso han sido dos, denotadas por ANT-1 y ANT-2, por lo que los diagramas de radiación que a continuación se presentan definirán la posición de la antena empleada mediante la siguiente nomenclatura RES/6/ANT-1 y RES/6/ANT-2.

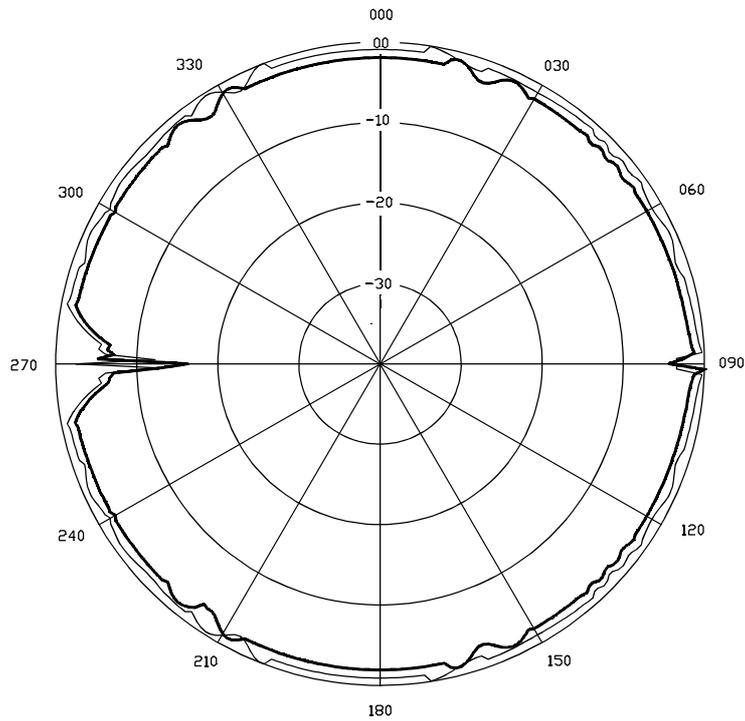


Fig.- 7.31 Componente E_{Θ} para el corte $\Theta=90$ de la simulación **RES/6/ANT-1**. Línea gruesa = GONURBS, Línea fina = NEC-BSC.

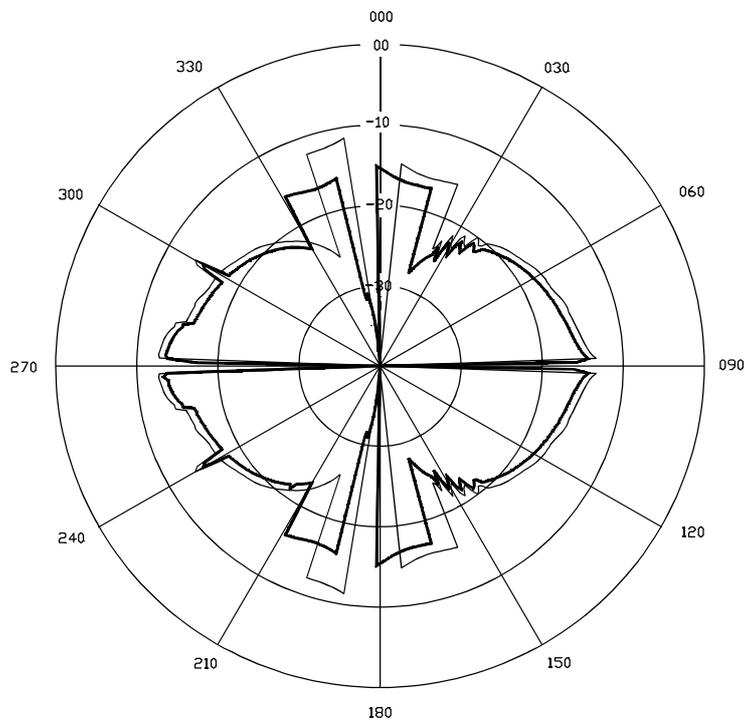


Fig.- 7.32 Componente E_{ϕ} para el corte $\Theta=90$ de la simulación **RES/6/ANT-1**. Línea gruesa = GONURBS, Línea fina = NEC-BSC.

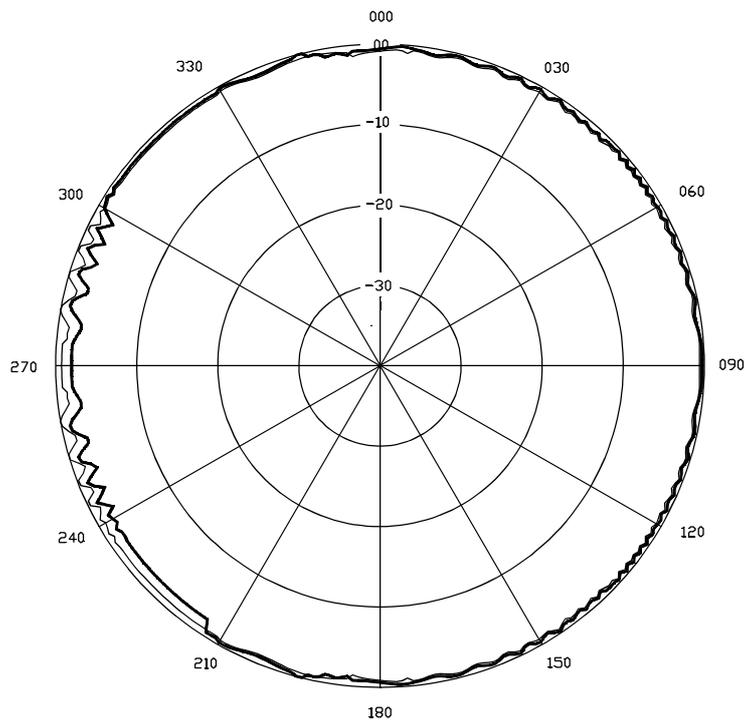


Fig.- 7.33 Componente E_{Θ} para el corte $\Theta=45$ de la simulación **RES/6/ANT-1**. Línea gruesa = GONURBS, Línea fina = NEC-BSC.

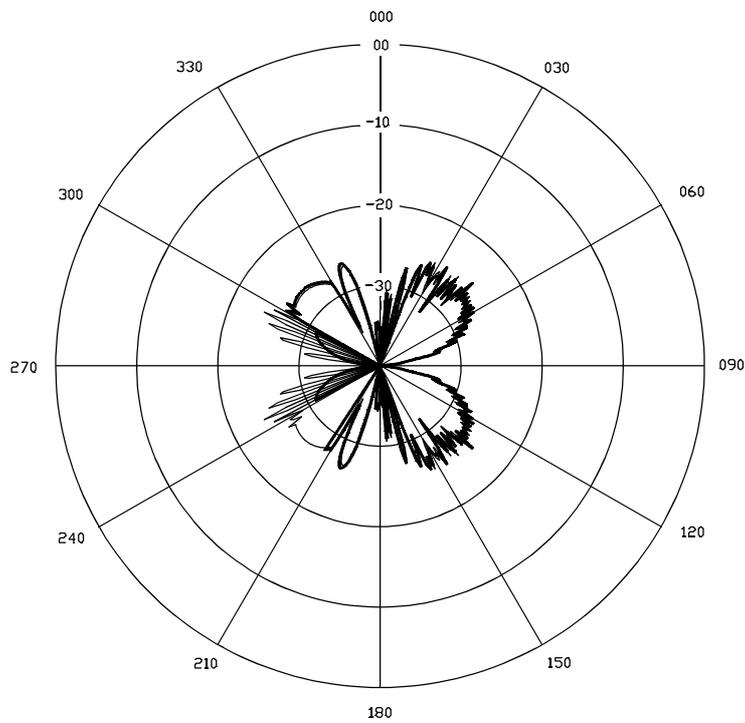


Fig.- 7.34 Componente E_{ϕ} para el corte $\Theta=45$ de la simulación **RES/6/ANT-1**. Línea gruesa = GONURBS, Línea fina = NEC-BSC.

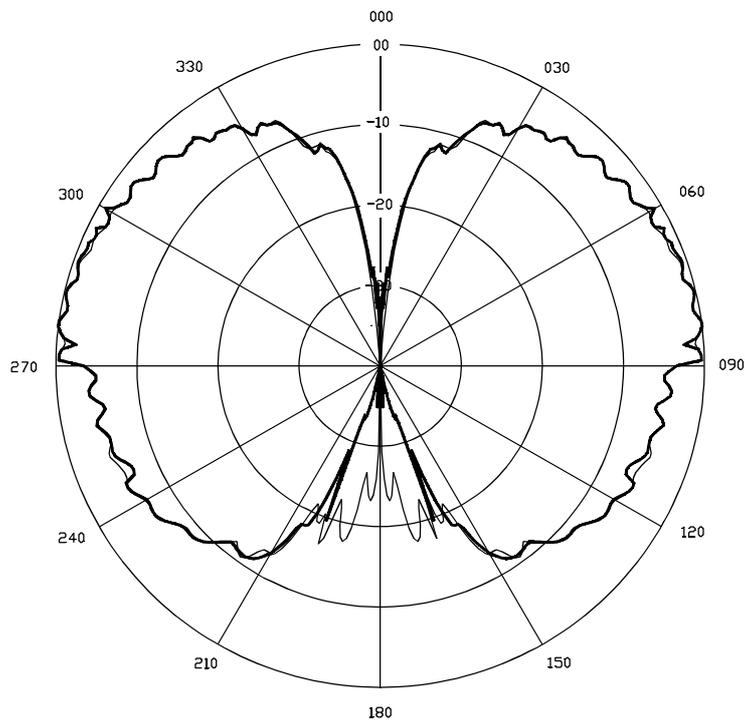


Fig.- 7.35 Componente E_{θ} para el corte $\varphi=0$ de la simulación RES/6/ANT-2. Línea gruesa = GONURBS, Línea fina = NEC-BSC.

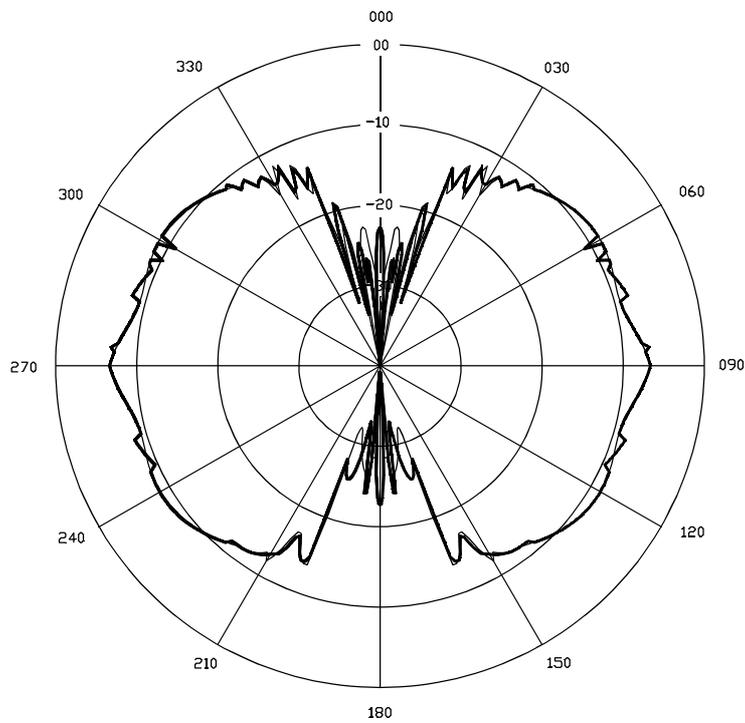


Fig.- 7.36 Componente E_{φ} para el corte $\varphi=0$ de la simulación RES/6/ANT-2. Línea gruesa = GONURBS, Línea fina = NEC-BSC.

■ RES/7 (CAMPO CERCANO)

En esta simulación se empleará nuevamente la estructura del avión simplificado, para realizar un análisis de campo cercano. Para ello se establecen una serie de puntos de muestreo en las proximidades del la estructura y se evalúa el campo total sobre cada uno de ellos. A continuación, en la figura 7.37 se muestra la localización de los puntos de muestreo sobre los que se ha calculado el campo electromagnético, así como la posición de la antena emisora. El numero de puntos ha sido 80, comenzado en el punto $(-8.0,0.0,1.2)$ y finalizando en el punto $(+8.0,0.0,1.2)$, con una separación entre puntos de 0.2 metros. Este muestreo realiza un barrido transversal al avión simplificado, abarcando diferentes regiones del campo dispersado.

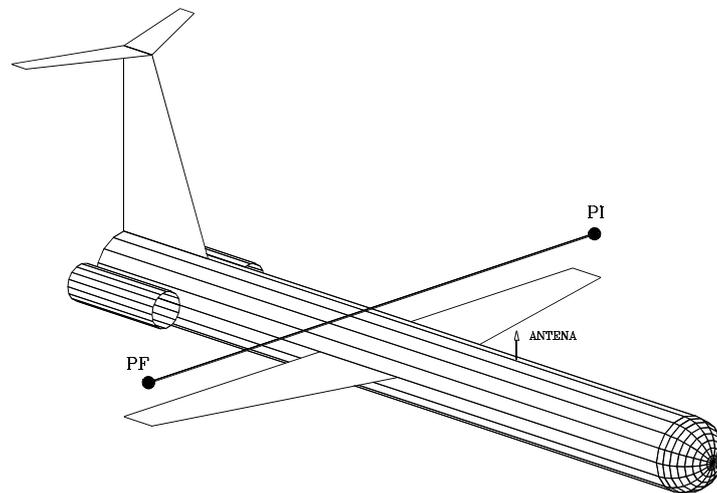


Fig.- 7.37 Línea de puntos de muestreo con origen en **PI** y final en **PF** y posición de la antena emisora.

Por otro lado los parámetros de entrada y las características de la simulación se describen a continuación.

GEOMETRIA:	AVION SIMPLIFICADO
FRECUENCIA:	3.0 GHZ.
PUNTOS DE MUESTREO:	Pto. inicial $(-8.0,0.0,1.2)$ Pto. final $(8.0,0.0,1.2)$ Vector incremento $(0.2,0.0,0.0)$

EFECTOS CONSIDERADOS						
Directo	Reflexión	Difracción en aristas	Difracción en superficie	Doble Reflexión	Reflexión - Difracción	Difracción - Reflexión
SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO
POSICION Y ORIENTACION DE LA ANTENA EMISORA						
Origen del SISTEMA ANTENA (Sistema absoluto)	0.000000		0.000000		1.000000	
Cosenos directores del eje X (Sistema absoluto)	1.000000		0.000000		0.000000	
Cosenos directores del eje Y (Sistema absoluto)	0.000000		1.000000		0.000000	
Cosenos directores del eje Z (Sistema absoluto)	0.000000		5.000000		1.000000	
CONFIGURACION DIPOLAR DE LA ANTENA EMISORA						
Nº Dipolo	Orientación (θ, ϕ) (Sistema Antena)	Origen (X, Y, Z) (Sistema Antena)			Momento dipolar (modulo, fase)	
1 (Eléctrico)	(0.0,0.0)	(0.000000,0.000000,0.05)			(1.0,0.0)	

A continuación, se presentan los resultados obtenidos sobre cada uno de los puntos de muestreo, para cada una de las componentes cartesianas del sistema de referencia absoluto.

Componente X
(sistema absoluto)

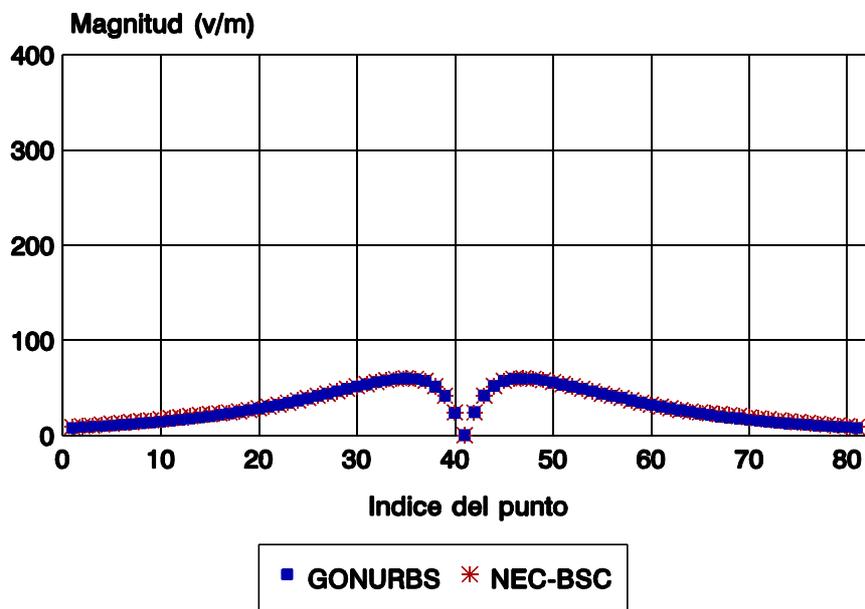


Fig.- 7.38 Componente E_x del campo eléctrico calculado sobre 80 puntos de muestreo correspondiente a la simulación RES/7.

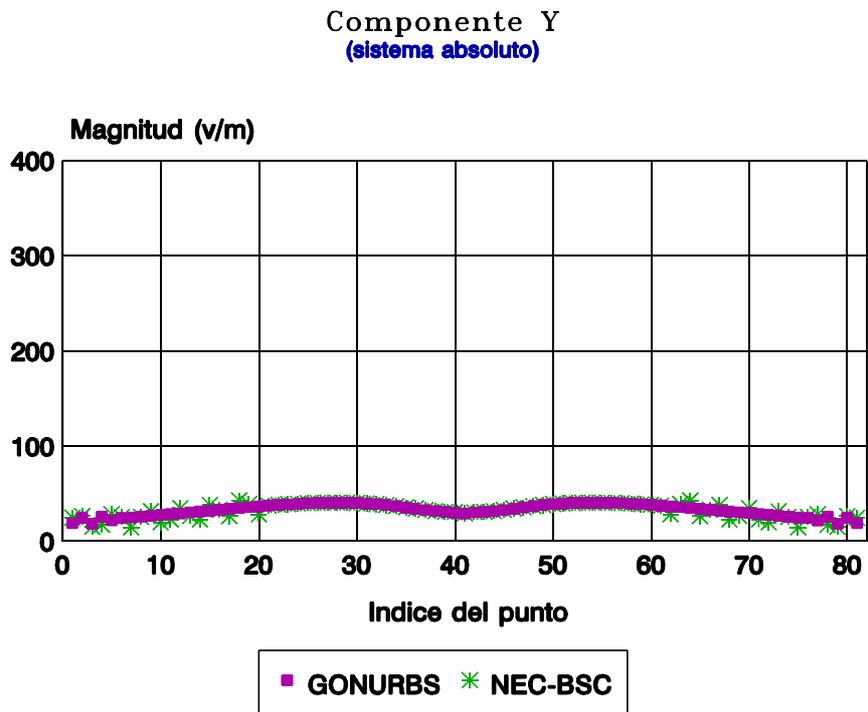


Fig.- 7.39 Componente E_y del campo eléctrico calculado sobre 80 puntos de muestreo correspondiente a la simulación **RES/7**.

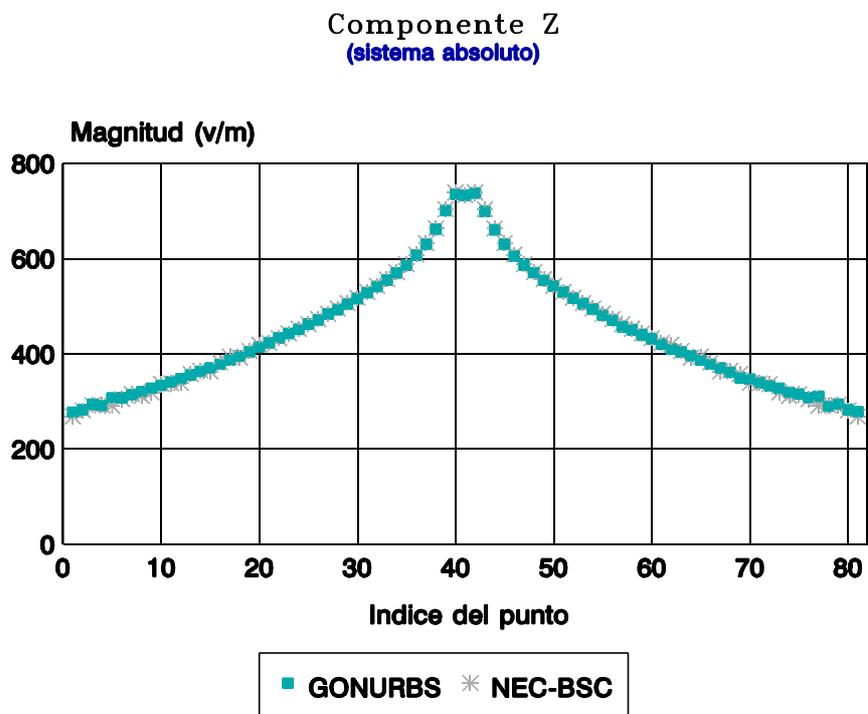


Fig.- 7.40 Componente E_z del campo eléctrico calculado sobre 80 puntos de muestreo correspondiente a la simulación **RES/7**.

7.4 GEOMETRIAS COMPLEJAS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos sobre un misil modelado por 57 superficies NURBS, que generan por descomposición, 83 parches de Bezier. Los parches Bezier pueden ser agrupados del siguiente modo: 13 parches poligonales planos, 46 parches simple curvos y 24 parches doble curvos. La figura 7.41, muestra una vista general de la estructura.

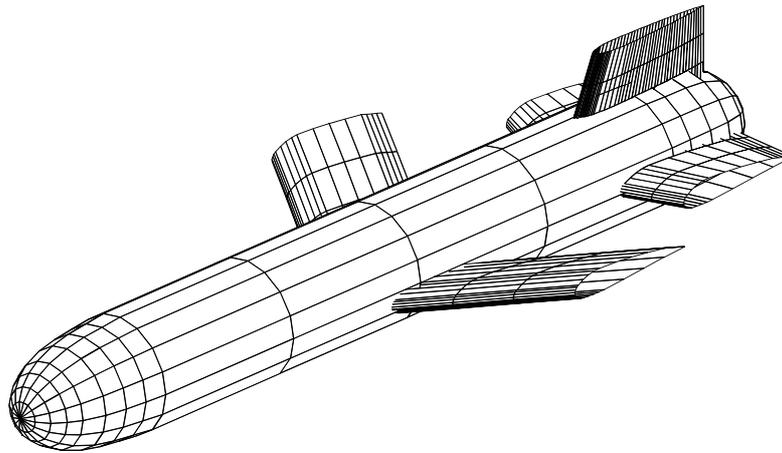


Fig.- 7.41 Vista del misil desde el eje X. (M=0.19mts)

Las dimensiones del modelo empleado y la agrupación establecida para cada uno de los cuerpos, son mostradas a continuación en las figuras 7.42, 7.43 y 7.44.

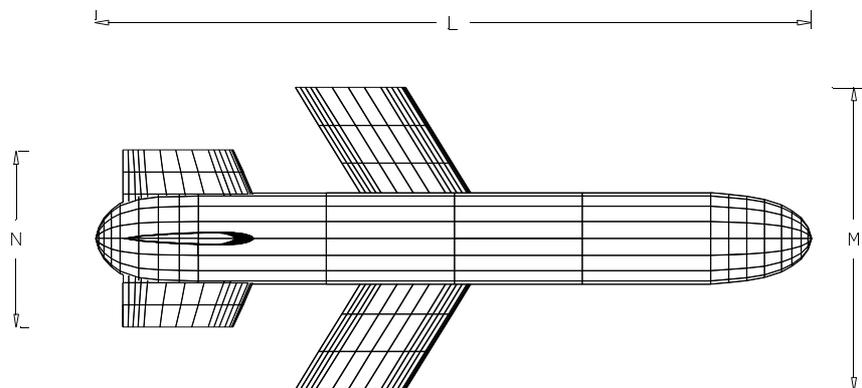


Fig.- 7.42 : Vista del misil desde el eje Z. (L=0.98mts., M=0.42mts., N=0.24mts.)

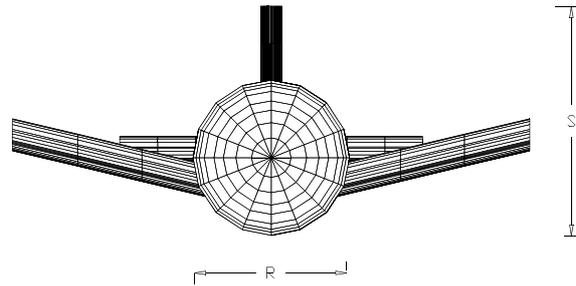


Fig.- 7.43 Vista del misil desde el eje X.
($R=0.12\text{mts.}$, $S=0.18\text{mts.}$)

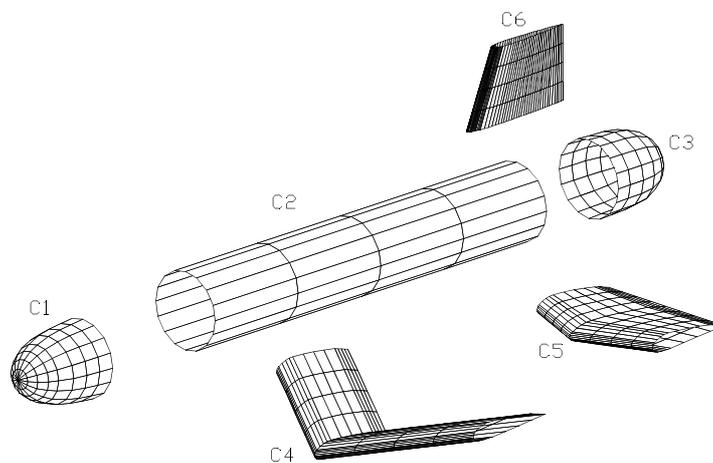


Fig.- 7.44 Vista del misil desde el eje X. ($R=0.12\text{mts.}$,
 $S=0.18\text{mts.}$)

El análisis ha sido realizado para diferentes posiciones de la antena emisora, que son mostradas a continuación en la figura 7.45. La posición exacta será descrita en la tabla correspondiente a la simulación.

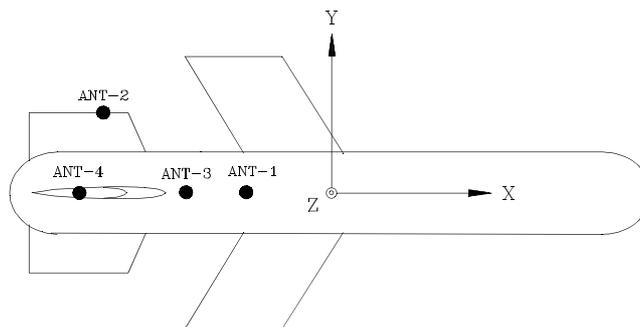


Fig.- 7.45 Posiciones de la antena emisora.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el análisis de geometrías compuestas.

■ SIMULACION RES/8 (CAMPO LEJANO)

La geometría mostrada en la figura 7.41 ha sido empleada como estructura soporte de un dipolo eléctrico vertical. A continuación se describen los parámetros de entrada y características de las simulaciones realizadas sobre el misil.

GEOMETRIA:		MISIL				
FRECUENCIA:		10.0 GHz.				
CORTES:		$\Phi=Cte.$ y $\Theta=Cte.$				
EFECTOS CONSIDERADOS						
Directo	Reflexión	Difracción en aristas	Difracción en superficie	Doble Reflexión	Reflexión - Difracción	Difracción - Reflexión
SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
POSICION Y ORIENTACION DE LA ANTENA EMISORA						
ANT-1 Origen del SISTEMA ANTENA (Sistema absoluto)			-0.130000	0.000000	0.06350	
ANT-2 Origen del SISTEMA ANTENA (Sistema absoluto)			-0.343000	0.123000	0.01740	
ANT-3 Origen del SISTEMA ANTENA (Sistema absoluto)			-0.220000	0.000000	0.06350	
ANT-4 Origen del SISTEMA ANTENA (Sistema absoluto)			-0.323000	0.000000	0.12410	
Cosenos directores del eje X (Sistema absoluto)			1.000000	0.000000	0.000000	
Cosenos directores del eje Y (Sistema absoluto)			0.000000	1.000000	0.000000	
Cosenos directores del eje Z (Sistema absoluto)			0.000000	0.000000	1.000000	
CONFIGURACION DIPOLAR DE LA ANTENA EMISORA						
Nº Dipolo	Orientación (θ, ϕ) (Sistema Antena)	Origen (X, Y, Z) (Sistema Antena)	Momento dipolar (modulo, fase)			
D-1 (eléctr.)	(0.0,0.0)	(0.000000,0.000000,0.00	(1.0,0.0)			
D-2 (eléctr.)	(0.0,0.0)	5000) (0.000000,0.000000,0.010000)	(1.0,0.0)			
CARACTERISTICAS DEL PROCESO GEOMETRICO						
Nº de parches de Bezier del modelo					57	
Nº de cuerpos del modelo					6	
Nº de parches de Bezier iluminados (ANT-1)(D-1)					22	
Nº de parches de Bezier iluminados (ANT-1)(D-2)					28	
Nº de parches de Bezier iluminados (ANT-2)(D-2)					31	
Nº de parches de Bezier iluminados (ANT-3)(D-1)					20	
Nº de parches de Bezier iluminados (ANT-4)(D-2)					18	
Nº de curvas de Bezier iluminadas (ANT-1)(D-1)					24	
Nº de curvas de Bezier iluminadas (ANT-1)(D-2)					30	
Nº de curvas de Bezier iluminadas (ANT-2)(D-2)					31	
Nº de curvas de Bezier iluminadas (ANT-3)(D-1)					22	
Nº de curvas de Bezier iluminadas (ANT-4)(D-2)					44	

Los diagramas de radiación resultantes son mostrados a continuación para diferentes cortes. El estudio se ha centrado en el análisis de los dobles efectos y su influencia sobre los resultados obtenidos por los simples efectos. La simulación ha sido realizada para diferentes posiciones de la antena emisora por lo que los resultados quedan agrupados del siguiente modo.

■ POSICION DE LA ANTENA: ANT-1, DIPOLO: D-1, CORTE: $\Theta=90$, $\Phi \in [0,360]$

En este caso las parejas de objetos empleadas para el calculo de los dobles efectos han sido las siguientes y pueden ser reconocidas observando la figura 7.44.

DOBLE REFLEXION: (C2,C4),(C2,C5),(C2,C6)

REFLEXION \Leftrightarrow DIFRACCION: (C2,C4),(C2,C5),(C2,C6),(C4,C2),(C5,C2),(C6,C2)

A continuación se muestra una descripción de los tiempos empleados por la simulación en cada una de sus etapas. Es notorio que el tiempo empleado en las etapas en las que se calculan los dobles efectos suponen un gasto computacional alto; sin embargo, este incremento es lógico debido a que la búsqueda de parejas de puntos dispersores requiere un mayor esfuerzo por parte de los algoritmos de búsqueda.

Nº	BLOQUE	CARACTERISTICAS	MINUTOS
1	INICIAL	LECTURA Y PREPROCESOS GEOMETRICOS	0.212
2	CAMPO DIRECTO	OCULTACION Y CAMPO	0.007
3	CAMPO REFLEJADO	OCULTACION Y CAMPO	2.950
4	CAMPO DIFRACTADO	OCULTACION Y CAMPO	6.850
5	DOBLE REFLEXION	OCULTACION Y CAMPO	8.183
6	REFLEXION \Leftrightarrow DIFRACCION	OCULTACION Y CAMPO	54.71
7	TOTAL		72.70

Los procesos de selección de la geometría iluminada reducen considerablemente el numero de parches de Bezier a tratar, traduciéndose en una disminución del tiempo de cálculo muy importante. El efecto de la selección de la geometría iluminada, puede ser contemplado para este caso, en la siguiente figura.

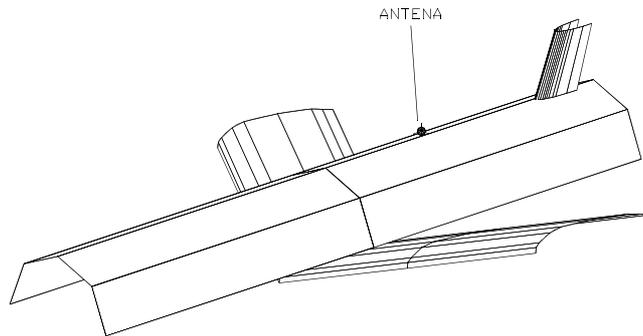


Fig.- 7.46 Geometría iluminada correspondiente a la simulación **RES/8/ANT-1/D-1**. efectos.

Como puede observarse en la figura 7.46, la porción de la geometría seleccionada como iluminada es reducida, no considerando la mayor parte de la estructura por estar oculta para la posición de la antena emisora. Los 22 parches seleccionados como iluminados, se reparten entre los cuerpos C2, C4 y C6, quedando sin efecto restantes cuerpos. A continuación se muestran los diagramas de radiación resultantes.

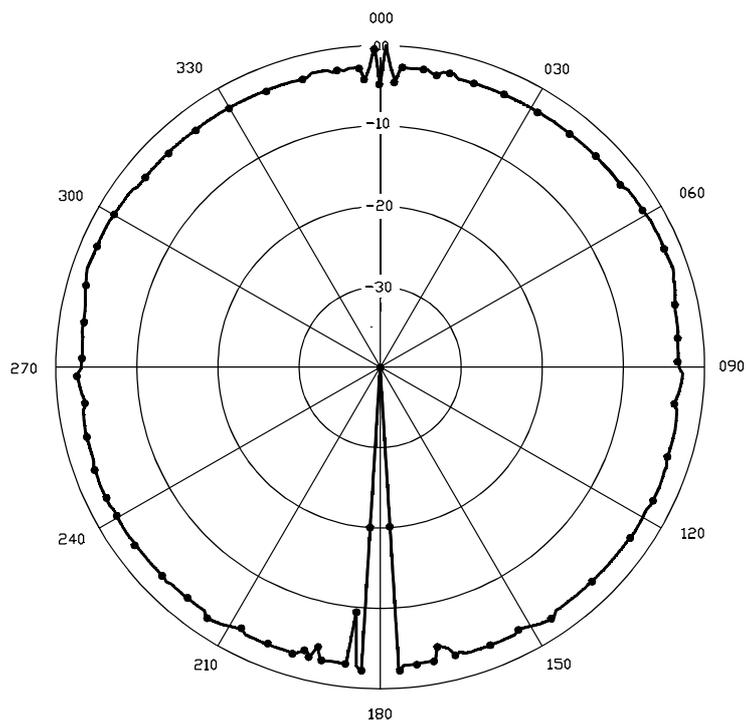


Fig.- 7.47 Componente E_{Θ} para el corte $\Theta=90$ de la simulación **RES/8/ANT-1**. Línea gruesa = Suma de los simples efectos, Línea de puntos = Suma de los simples y dobles efectos.

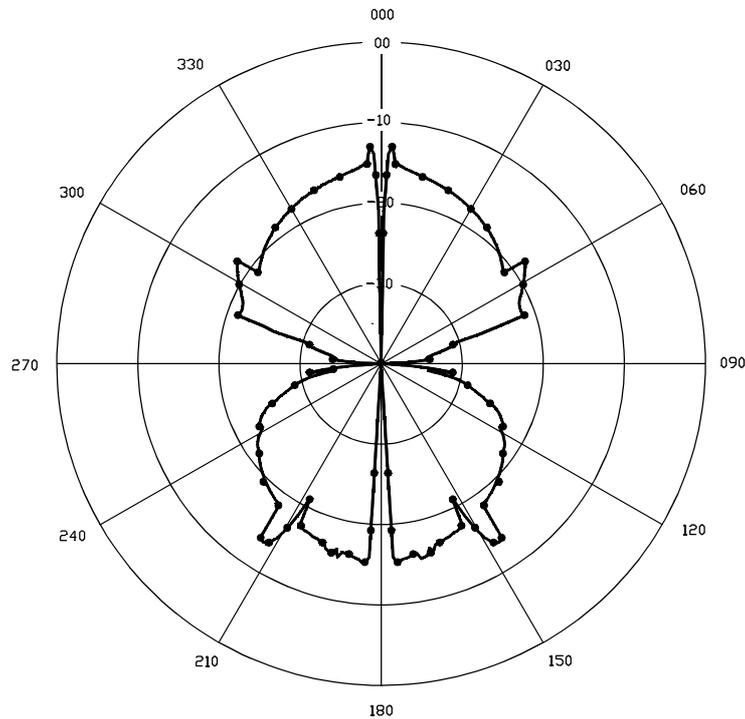


Fig.- 7.48 Componente E_{ϕ} para el corte $\Theta=90$ de la simulación **RES/8/ANT-1**. Línea gruesa = Suma de los simples efectos, Línea de puntos = Suma de los simples y dobles efectos.

Este caso no presenta diferencias significativas entre los resultados obtenidos una vez incluidos los dobles efectos, debido fundamentalmente a que las direcciones de observación pertenecientes al corte analizado, no presentan dobles contribuciones generadas entre los cuerpos C2, C4 y C6.

■ POSICION DE LA ANTENA: **ANT-1**, DIPOLO: **D-2**, CORTE: $\Phi=90$, $\Theta \in [0,180]$

En este caso las parejas de cuerpos empleadas para el calculo de los dobles efectos han sido las siguientes y pueden ser reconocidas observando la figura 7.44:

DOBLE REFLEXION: (C2,C4),(C2,C5),(C2,C6)

REFLEXION \Leftrightarrow DIFRACCION: (C2,C4),(C2,C5),(C2,C6),(C4,C2),(C5,C2),(C6,C2)

A continuación se muestra una descripción de los tiempos empleados por la simulación en cada una de sus etapas.

Nº	BLOQUE	CARACTERISTICAS	MINUTOS
1	INICIAL	LECTURA Y PREPROCESOS GEOMETRICOS	0.216
2	CAMPO DIRECTO	OCULTACION Y CAMPO	0.028
3	CAMPO REFLEJADO	OCULTACION Y CAMPO	1.800
4	CAMPO DIFRACTADO	OCULTACION Y CAMPO	4.100
5	DOBLE REFLEXION	OCULTACION Y CAMPO	12.98
6	REFLEXION \Leftrightarrow DIFRAC CION	OCULTACION Y CAMPO	51.00
7	TOTAL	PROCESO COMPLETO	70.40

A continuación se muestran los diagramas de radiación resultantes.

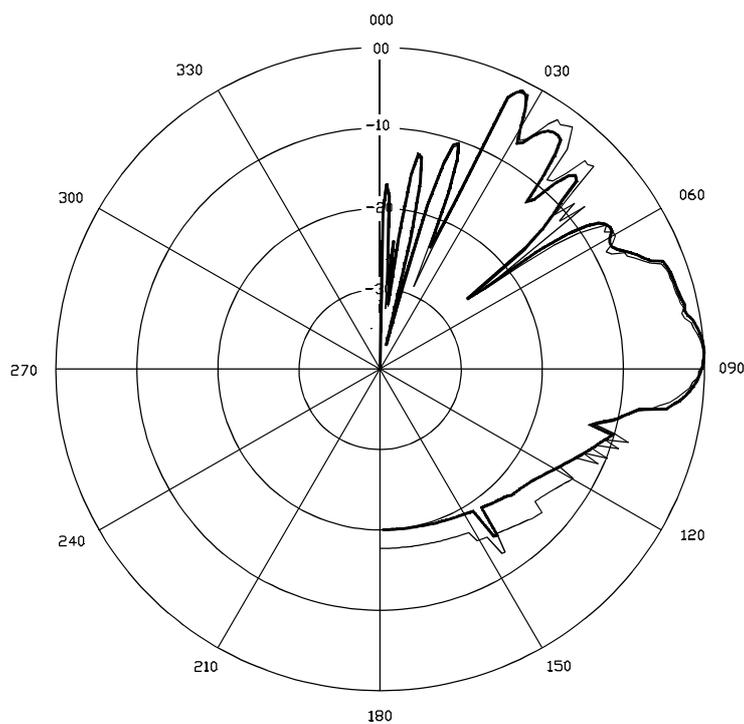


Fig.- 7.49 Componente E_{θ} para el corte $\varphi=90$ de la simulación **RES/8/ANT-1/D-2**. Línea gruesa = Suma de los simples efectos, Línea fina = Suma de los simples y dobles efectos.

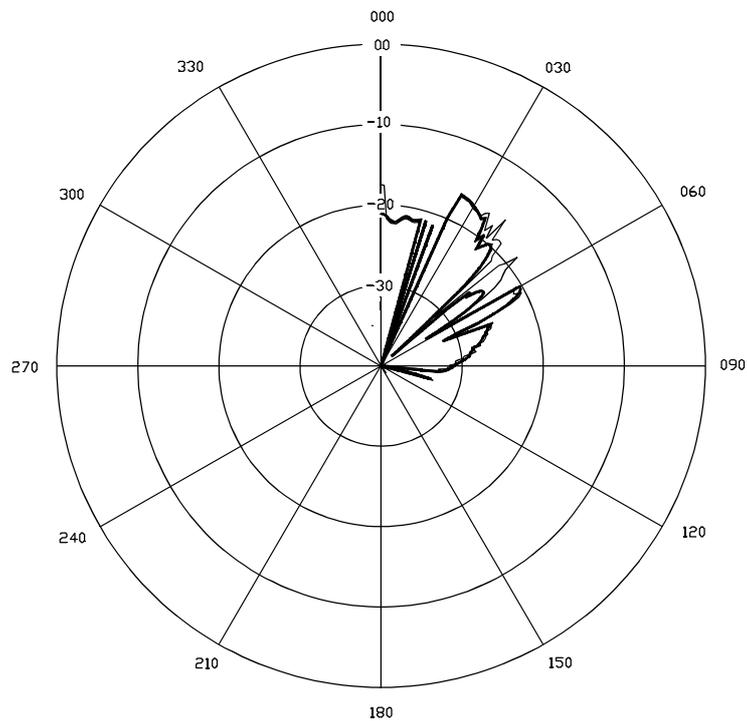


Fig.- 7.50 Componente E_ϕ para el corte $\phi=90$ de la simulación **RES/8/ANT-1/D-2**. Línea gruesa = Suma de los simples efectos, Línea de puntos = Suma de los simples y dobles efectos.

En este caso, el efecto producido por las dobles contribuciones comienza a notarse en determinados márgenes angulares en los que el campo dispersado proviene de la doble interacción entre los cuerpos C2 y C4.

■ POSICION DE LA ANTENA: ANT-2, DIPOLO: D-2, CORTE: $\Phi=90$, $\Theta \in [0,180]$

En este caso las parejas de objetos empleadas para el cálculo de los dobles efectos han sido las siguientes, y pueden ser reconocidas observando la figura 7.44:

DOBLE REFLEXION: (C2,C4),(C2,C5),(C2,C6)

REFLEXION \Leftrightarrow DIFRACCION: (C2,C4),(C2,C5),(C2,C6),(C4,C2),(C5,C2),(C6,C2)

A continuación se muestra la tabla de tiempos empleados en cada una de sus etapas.

Nº	BLOQUE	CARACTERISTICAS	MINUTOS
1	INICIAL	LECTURA Y PREPROCESOS GEOMETRICOS	0.230
2	CAMPO DIRECTO	OCULTACION Y CAMPO	0.003
3	CAMPO REFLEJADO	OCULTACION Y CAMPO	1.809
4	CAMPO DIFRACTADO	OCULTACION Y CAMPO	2.150
5	DOBLE REFLEXION	OCULTACION Y CAMPO	13.28
6	REFLEXION \Leftrightarrow DIFRACCION	OCULTACION Y CAMPO	35.01
7	TOTAL	PROCESO COMPLETO	52.53

En este caso, la geometría iluminada queda reflejada en la figura 7.51. La selección difiere considerablemente de la obtenida en la simulación anterior, dada la posición lateral de la antena emisora para esta simulación.

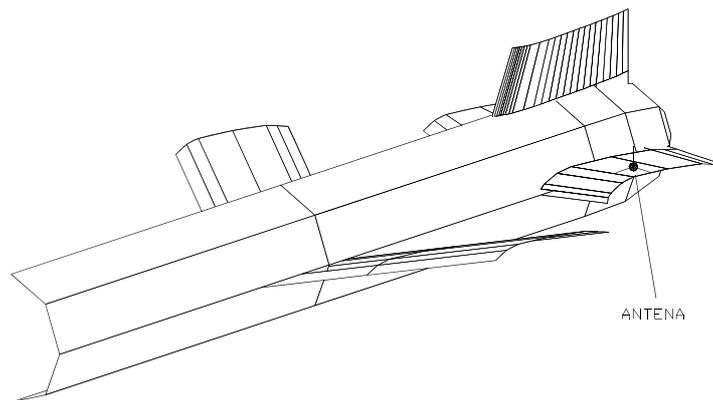


Fig.- 7.51 Geometría iluminada correspondiente a la simulación RES/8/ANT-2/D-2.

A continuación se muestran los diagramas de radiación resultantes.

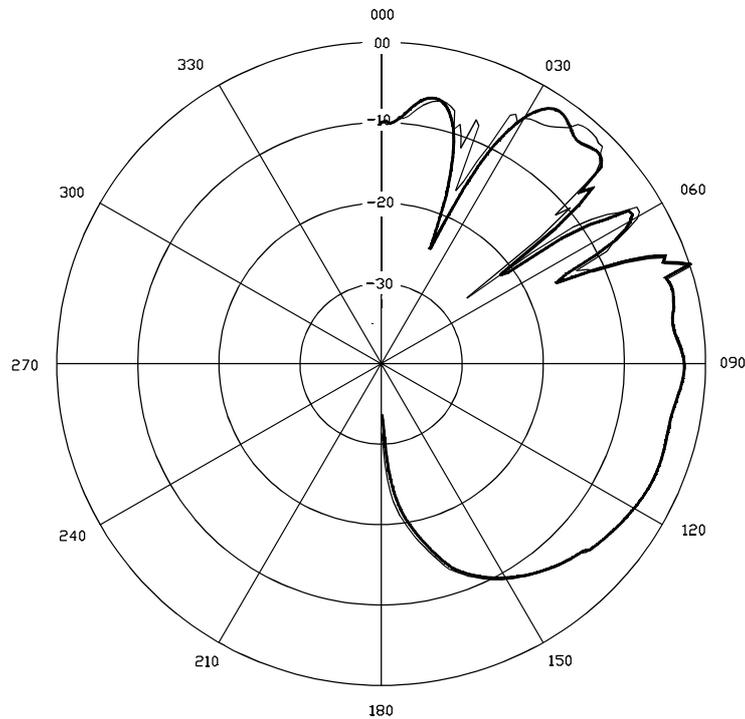


Fig.- 7.52 Componente E_{Θ} para el corte $\varphi=90$ de la simulación **RES/8/ANT-2/D-2**. Línea gruesa = Suma de los simples efectos, Línea fina = Suma de los simples y dobles efectos.

En este caso, es claro el efecto producido por la inclusión de los dobles efectos en el margen angular de $\Theta \in [0,60]$. Esto se debe, a que en estas direcciones las dobles interacciones entre los cuerpos C5, C3 y C6, son importantes, por lo que el diagrama correspondiente a los simples efectos difiere sensiblemente del obtenido con la inclusión de los dobles efectos.

■ POSICION DE LA ANTENA: ANT-3, DIPOLO: D-1, CORTE: $\Theta=60$, $\Phi \in [0,360]$

La posición de la antena, en este caso, es similar a la fijada por ANT-1; sin embargo, ahora esta un poco mas retrasada y el corte analizado es diferente. Las parejas de objetos empleadas para el cálculo de los dobles efectos han sido las siguientes:

DOBLE REFLEXION: (C2,C4),(C2,C5),(C2,C6)

REFLEXION \Leftrightarrow DIFRACCION: (C2,C4),(C2,C5),(C2,C6),(C4,C2),(C5,C2),(C6,C2)

La tabla de tiempos de cada una de sus etapas, se muestra a continuación.

N°	BLOQUE	CARACTERISTICAS	MINUTOS
1	INICIAL	LECTURA Y PREPROCESOS GEOMETRICOS	0.209
2	CAMPO DIRECTO	OCULTACION Y CAMPO	0.131
3	CAMPO REFLEJADO	OCULTACION Y CAMPO	5.108
4	CAMPO DIFRACTADO	OCULTACION Y CAMPO	8.846
5	DOBLE REFLEXION	OCULTACION Y CAMPO	27.98
6	REFLEXION \Leftrightarrow DIFRACCION	OCULTACION Y CAMPO	85.89
7	TOTAL	PROCESO COMPLETO	128.2

La geometría iluminada es mostrada en la figura 7.41, a continuación.

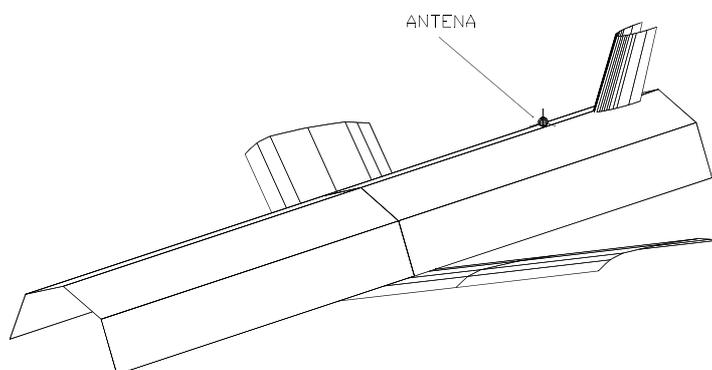


Fig.- 7.53 Geometría iluminada correspondiente a la simulación RES/8/ANT-3/D-1.

Como es de esperar, la geometría seleccionada no difiere en gran medida de la mostrada en la figura 7.46.

A continuación se muestran los diagramas de radiación resultantes, en los que no se contempla la simulación particularizada para los simples efectos, debido a que la concordancia es plena.

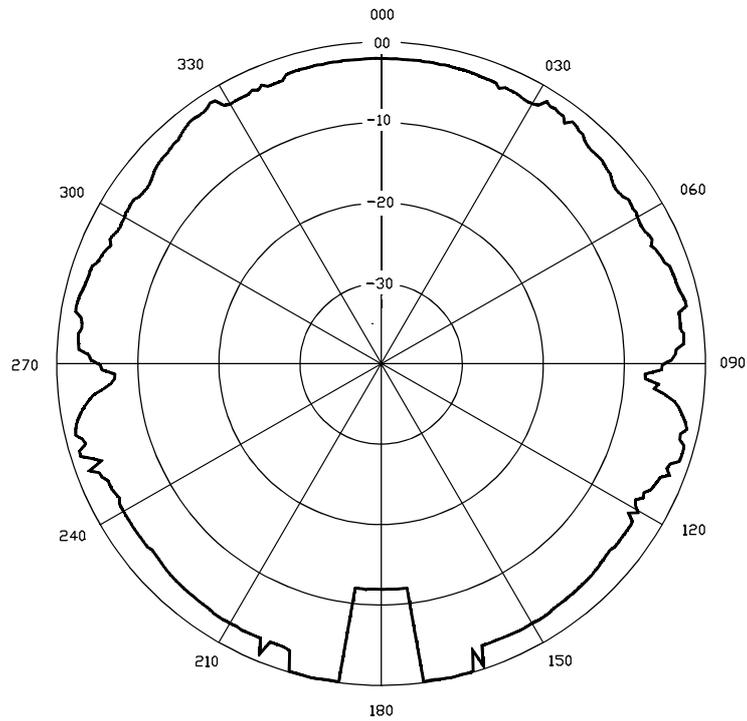


Fig.- 7.54 Componente E_θ para el corte $\Theta=60$ de la simulación **RES/8/ANT-3/D-1**.

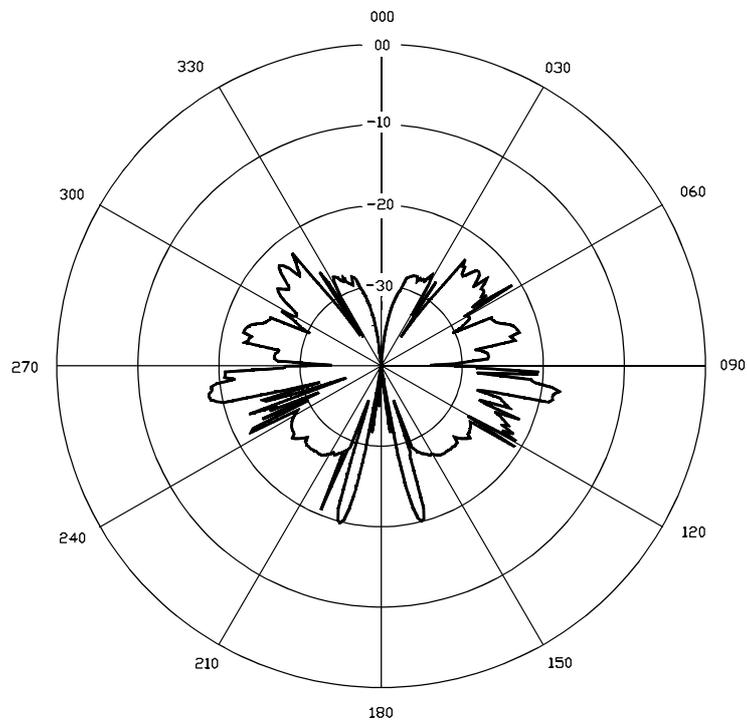


Fig.- 7.55 Componente E_ϕ para el corte $\Theta=60$ de la simulación **RES/8/ANT-3/D-1**.

■ POSICION DE LA ANTENA: ANT-4, DIPOLO: D-2, CORTE: $\Theta=45$, $\Phi \in [0,360]$

En este caso las parejas de objetos empleadas para el cálculo de los dobles efectos han sido las siguientes:

DOBLE REFLEXION: (C2,C4),(C5,C4)

REFLEXION \Leftrightarrow DIFRACCION: (C6,C4),(C6,C5),(C6,C3),(C4,C5)

A continuación se muestra una descripción de los tiempos empleados por la simulación en cada una de sus etapas.

N°	BLOQUE	CARACTERISTICAS	MINUTOS
1	INICIAL	LECTURA Y PREPROCESOS GEOMETRICOS	0.298
2	CAMPO DIRECTO	OCULTACION Y CAMPO	0.062
3	CAMPO REFLEJADO	OCULTACION Y CAMPO	3.686
4	CAMPO DIFRACTADO	OCULTACION Y CAMPO	9.640
5	DOBLE REFLEXION	OCULTACION Y CAMPO	21.81
6	REFLEXION \Leftrightarrow DIFRACCION	OCULTACION Y CAMPO	290.0
7	TOTAL	PROCESO COMPLETO	326.0

La geometría iluminada por la antena emisora para este caso es mostrada a continuación.

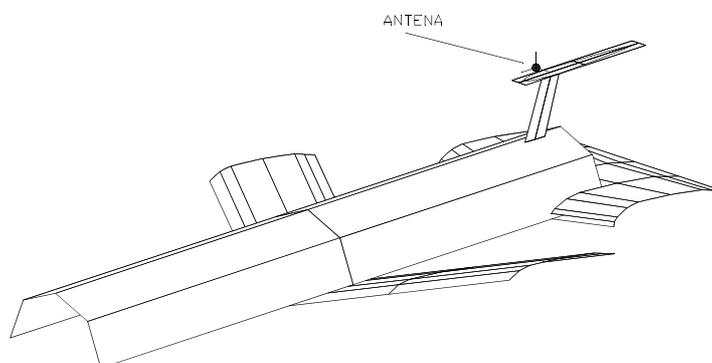


Fig.- 7.56 Geometría iluminada correspondiente a la simulación RES/8/ANT-4/D-2.

Los dobles efectos en este caso vuelven a ser de poca importancia, debido fundamentalmente a que la posición de la antena obliga a que se produzcan en regiones alejadas de la fuente y, por lo tanto, su magnitud no influye en los campos obtenidos como suma de los efectos de primer orden. A continuación se muestran los diagramas de radiación resultantes.

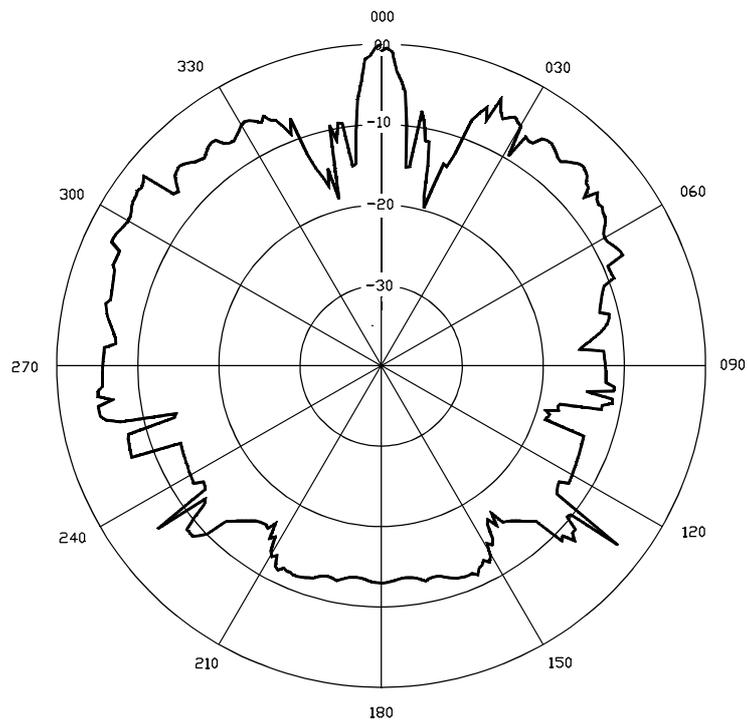


Fig.- 7.57 Componente E_{θ} para el corte $\Theta=45$ de la simulación **RES/8/ANT-4/D-2**.

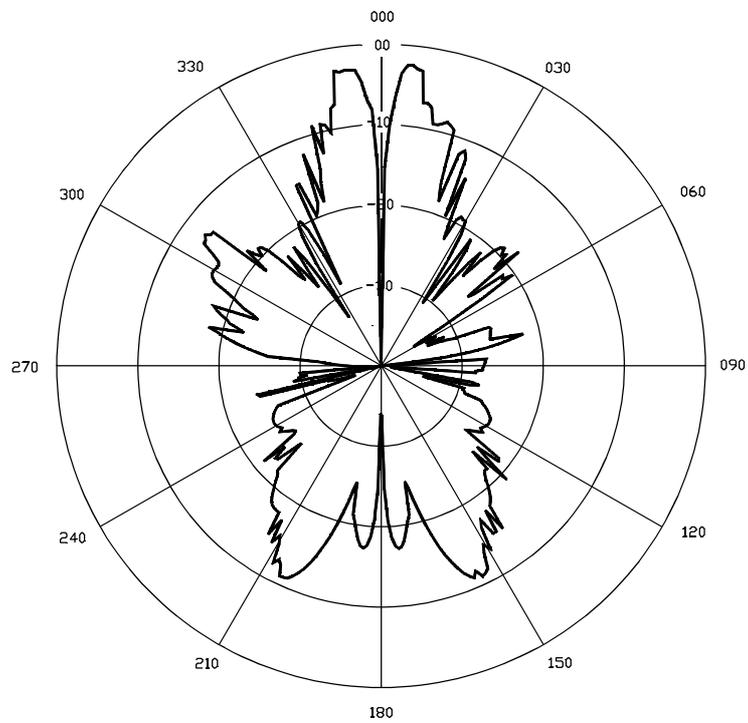


Fig.- 7.58 Componente E_{ϕ} para el corte $\Theta=45$ de la simulación **RES/8/ANT-4/D-2**.

REFERENCIAS

- [1] R.J. Marhefka, W.D. Burnside. " Numerical Electromagnetic Code-Basic Scattering Code NEC-BSC (V2) ". The Ohio State University ElectroScience Laboratory., Dec 1982.
- [2] L. Valle, F. Rivas, M.F. Cátedra. "Combining the Moment Method with Geometrical Modelling by NURBS Surfaces and Bézier Patches". IEEE Trans. on Antennas and Propagation., vol 42, March 1994, pp. 373-381
- [3] J.C. Redondo, F. Ruiz, M.F. Cátedra. " Analysis of scattering from arbitrary metallic surfaces conformed to a body of revolution". Journées Internationales de Nice sur les Antennes, JINA 90, 1990 pp. 104-107.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE TRABAJO

CONCLUSIONES

- La aportación mas importante y novedosa presentada en esta tesis consiste en la combinación establecida entre la Optica Geométrica, la Teoría Uniforme de la Difracción y la utilización de superficies paramétricas en la descripción de la estructura.

- El empleo de un modelado expresado en superficies NURBS, ha permitido asumir las principales características de las superficies paramétricas en el planteamiento del problema, por lo que el método electromagnético se ha visto potenciado en gran medida. De entre todas sus cualidades caben destacar:
 - Posibilidad de simular cualquier tipo de geometría, con la garantía de que el volumen de datos empleado en su descripción es reducido. Esta cualidad, evita una de las principales limitaciones que presentan otro tipo de modelados.

 - El modelado por superficies paramétricas permite una gran aproximación al modelo real, por lo que los resultados pueden ser de interpretados con independencia del modelo geométrico utilizado.

 - El volumen, ordenación y tipo de datos que describen la geometría, presentan un

formato compatible con la mayoría de los paquetes de software gráficos presentes en el mercado.

- La descripción geométrica empleada por el método, ha implicado desarrollar nuevos algoritmos y estrategias a la hora de procesarla. Este desarrollo se ha reflejado en el proceso global en diferentes etapas, que son:
 - Posibilidad de una selección inicial previa a la simulación de las regiones de interés de la estructura. Esta cualidad permite realizar estudios particularizados, sin modificar el modelado.
 - El parcheado resultante de la descomposición de los parches NURBS en parches de Bezier, ha permitido la aplicación de numerosos criterios de selección diseñados con el propósito de reducir al máximo el número de parches tratados innecesariamente por estar ocultos para la antena emisora.
 - En el cálculo del efecto de la onda de superficie en el que intervienen regiones de la geometría ocultas para la antena emisora, ha sido desarrollado un proceso específico basado en las propiedades de las superficies paramétricas. En él, las regiones de la superficie del modelo afectadas por este efecto son sustituidas por parches sobre los que previamente han sido calculadas las geodesias. Este tratamiento supone un avance importante, puesto que permite abordar geometrías arbitrarias directamente.
 - La resolución de las numerosas interacciones rayo-geometría ha sido resuelta conjugando el principio de Fermat, el método de minimización del gradiente conjugado y la descripción paramétrica de una superficie. Lo más sobresaliente de este planteamiento es su simplicidad y generalidad, aplicándose indistintamente a todas las interacciones evaluadas durante la simulación.

- El método propuesto en el que se combinan la Óptica geométrica, la Teoría uniforme de

la difracción y las superficies paramétricas, obtiene el campo resultante de la superposición de los siguientes efectos:

SIMPLES EFECTOS

- Campo directo
- Campo reflejado
- Campo difractado en aristas
- Campo difractado en superficie

DOBLES EFECTOS

- Campo doblemente reflejado
- Campo reflejado-difractado

- El método presentado ha sido implementado en código FORTRAN, dando como resultado un programa de aplicación industrial, denominado GONURBS (GO+NURBS). Sus principales cualidades son: los reducidos tiempo de CPU y los bajos requerimientos de memoria empleados en el análisis de sistemas radiantes soportados por geometrías complejas.

FUTURAS LINEAS DE TRABAJO

- Evitar la descomposición de los parches NURBS en parches de Bezier y trabajar directamente en formato NURBS. Este cambio supondría una reducción de los requerimientos de memoria y de los tiempo de calculo, debido a que la cantidad de parches a tratar sería menor. Para realizar esta modificación, sería preciso desarrollar nuevas subrutinas dedicadas a extraer los parámetros geométricos de la superficie definida en formato NURBS, que trabajarían con las bases B-Spline.
- Aplicar el método desarrollado al análisis de antenas en situaciones o entornos de características diferentes a las expuestas en esta tesis. Dada la flexibilidad de la descripción geométrica y su fácil tratamiento, pueden abordarse problemas de radiación electromagnética en entornos urbanos, regiones con orografía irregular y otros emplazamientos en los que la predicción mediante simulación del comportamiento de una antena emisora puede ser de gran ayuda.

- Combinación del método electromagnético elegido con otros métodos, para lograr no solo la resolución de los problemas que plantea la GO y la UTD en determinadas regiones del espacio sino para ampliar el rango de frecuencias de validez del método. Este desarrollo tiene una gran proyección debido a que todos los métodos podrían compartir la descripción geométrica por superficies paramétricas y beneficiarse de sus cualidades. Todo esto nos llevaría a un método híbrido de gran capacidad.

- Dada la relación tan estrecha de la descripción geométrica empleada con la mayoría de los programas gráficos y los bajos tiempos de cálculo empleados en la simulación, un aspecto a desarrollar, sería dotar al proceso de un software gráfico específico dedicado a la visualización en tiempo real de los diferentes efectos calculados, así como de un carácter interactivo, mediante el cual el usuario maneje las herramientas de diseño sin mucho esfuerzo.