

PARTE II

MODELADO Y VISUALIZACION DE BLANCOS RADAR

CAPITULO 6

MODELADO GEOMETRICO TRIDIMENSIONAL

La aplicación a blancos reales de las técnicas de predicción de sección recta radar precisa de un modelo realista del blanco, para poder imponer las condiciones de contorno del problema electromagnético sobre la superficie del mismo. Para generar dicho modelo existe una gran diversidad de técnicas de modelado geométrico, que son más o menos adecuadas a un problema concreto en función de las características del objeto a modelar. Este capítulo se inicia con una breve revisión de las diferentes técnicas de modelado de sólidos, y se estudia su posible aplicación al modelado de blancos radar y cálculo de sección recta. Se finaliza con un pequeño resumen de la teoría matemática en que se basa el método de modelado utilizado en esta tesis.

Dadas las grandes dificultades que conlleva la implementación de una herramienta software potente para el modelado geométrico de cuerpos y formas totalmente arbitrarias, se ha adquirido el paquete comercial "*Integrated Design Engineering Analysis Software (I-DEAS)*" de "*Structural Dynamics Research Corporation (SDRC)*". Dicho paquete permite el modelado de sólidos mediante fronteras, tanto con facetas planas como con superficies paramétricas. La primera técnica es la más utilizada en la actualidad para el modelado de blancos radar y cálculo de sección recta, mientras que la aplicación de la segunda al cálculo de sección recta radar presenta algunas ventajas y constituye una de las innovaciones introducidas en esta tesis, juntamente con otros grupos de trabajo españoles [Hermida'90], [Pizarroso'90], [Rius'89], [Rius'90 Jina].

6.1 MODELADO GEOMETRICO DE SÓLIDOS

El objetivo final de las técnicas de modelado de sólidos es la generación de un modelo matemático de un objeto real, tal que la simulación de un proceso físico sobre dicho modelo proporcione los mismos resultados que el proceso a simular sobre el objeto real.

Dado que no es posible simular exactamente la realidad, deben definirse unos criterios de error en el resultado obtenido, que se traducirán en unos ciertos márgenes de precisión en el modelo geométrico. Para validar directamente el modelo, sin necesidad de simular el proceso y comprobar los resultados, existen una serie de técnicas de "interrogación", que permiten descubrir imperfecciones en la superficie del modelo geométrico.

El error en el resultado final será debido a:

- Hipótesis y aproximaciones en la realización del modelo matemático a partir del objeto físico.
- Errores de discretización, truncamiento y redondeo en la simulación por ordenador del proceso físico.

El proceso global de modelado geométrico es iterativo en el sentido de que habitualmente se parte de un modelo grosero y, si el proceso físico simulado o bien la interrogación directa no proporcionan un resultado satisfactorio, se refina progresivamente el modelo hasta obtener un error final dentro de las especificaciones.

6.1.1 Propiedades de los modelos geométricos

El modelo geométrico de un cierto objeto real debe cumplir las siguientes propiedades [Brunet'89]:

- **No ambigüedad:** El modelo debe corresponder a un solo objeto real.
- **Unicidad:** A cada objeto real le debe corresponder un solo modelo.
- **Dominio:** Debe permitir representar una variedad de objetos reales lo más amplia posible.
- **Validez:** Sólo debe permitir representar objetos existentes en la realidad.

Además, es conveniente optimizar los siguientes aspectos:

- **Concisión:** La cantidad de información necesaria para la descripción del modelo debe ser mínima.

- **Facilidad de diseño** de objetos y formas arbitrarios.
- **Facilidad de interrogación** para validar el modelo.

6.1.2 Clasificación de modelos

Los diferentes métodos de modelado de sólidos pueden clasificarse de una forma muy general según el tipo de elementos constitutivos de que están formados. En la figura 6-1 se muestra una posible clasificación de este tipo [Brunet'89].

Dimension de los elementos basicos

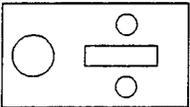
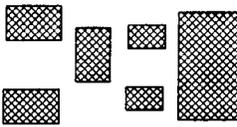
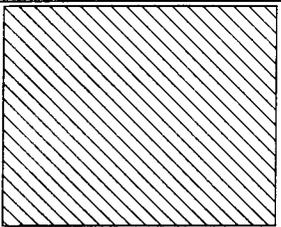
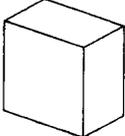
	1 D 	2 D 	3 D 
modelos 2 D	2D Drafting 	Trazado de paneles 	
modelos 3 D	modelado alambrico 	superficies 	solidos 

Figura 6-1: Clasificación de los modelos geométricos según el tipo de elementos constitutivos

La casilla negra de la derecha significa que no es posible representar objetos de dos dimensiones mediante elementos tridimensionales.

Para el modelado de blancos radar, vamos a considerar únicamente los modelos tridimensionales de la fila inferior. Las dos primeras columnas corresponden al llamado "modelado por fronteras", en que los elementos constitutivos son líneas o superficies. La tercera columna corresponde a los métodos que utilizan sólidos, como, por ejemplo, los de "geometría constructiva de sólidos" y "árboles octales".

6.1.3 Modelado por fronteras

En los métodos de modelado por fronteras, el tipo de información almacenada para describir al sólido corresponde a los elementos geométricos que definen su frontera exterior. Como se muestra en la figura 6-2, estos últimos pueden ser adimensionales (vértices), lineales (aristas) o superficiales (parches).

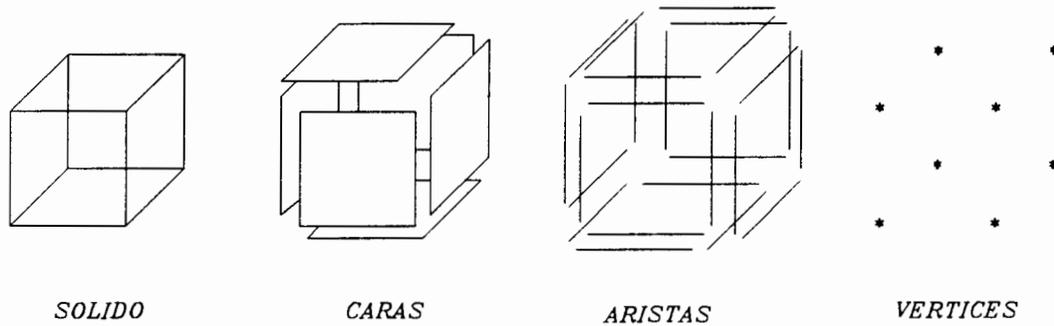


Figura 6-2: Distintas posibilidades de modelado por fronteras

Es importante tener en cuenta que la representación alámbrica (mediante aristas) de objetos tridimensionales es ambigua, es decir, un modelo puede corresponder a varios objetos reales que tengan las mismas aristas y distintas superficies. Por el mismo motivo, el método no es capaz de discernir entre un objeto real y un objeto imposible con las mismas aristas. Por todo ello, no es el método más adecuado para el modelado geométrico de sólidos.

Otra forma de modelar objetos de tres dimensiones es mediante parches superficiales. Para ello es posible utilizar parches planos (facetas), o bien parches curvos (superficies paramétricas). En la figura 6-3 se muestra una superficie modelada con 100 facetas planas y en la 6-4, la misma superficie modelada con una sola superficie paramétrica.

- **Modelado por facetas:** Los elementos constitutivos son superficies planas triangulares y/o cuadrangulares.
- **Modelado mediante parches curvos:** Los modelos matemáticos que pueden utilizarse para modelar parches curvos son superficies paramétricas (ver 6.3.3) o superficies algebraicas (ver 6.3.6).

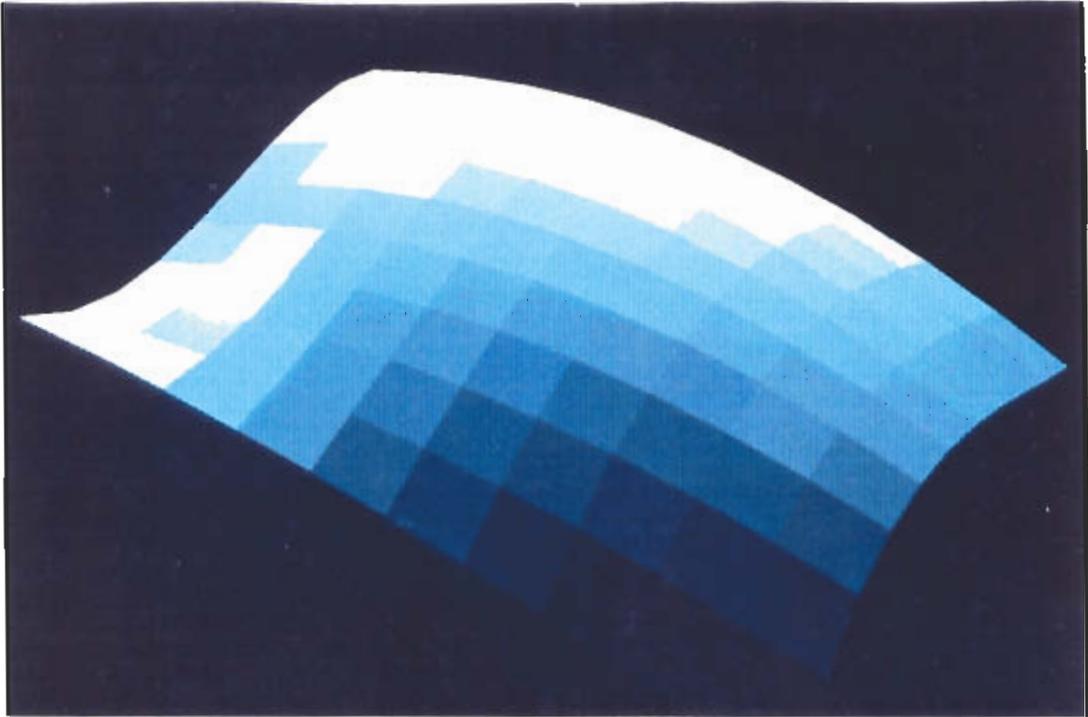


Figura 6-3: Superficie modelada mediante facetas

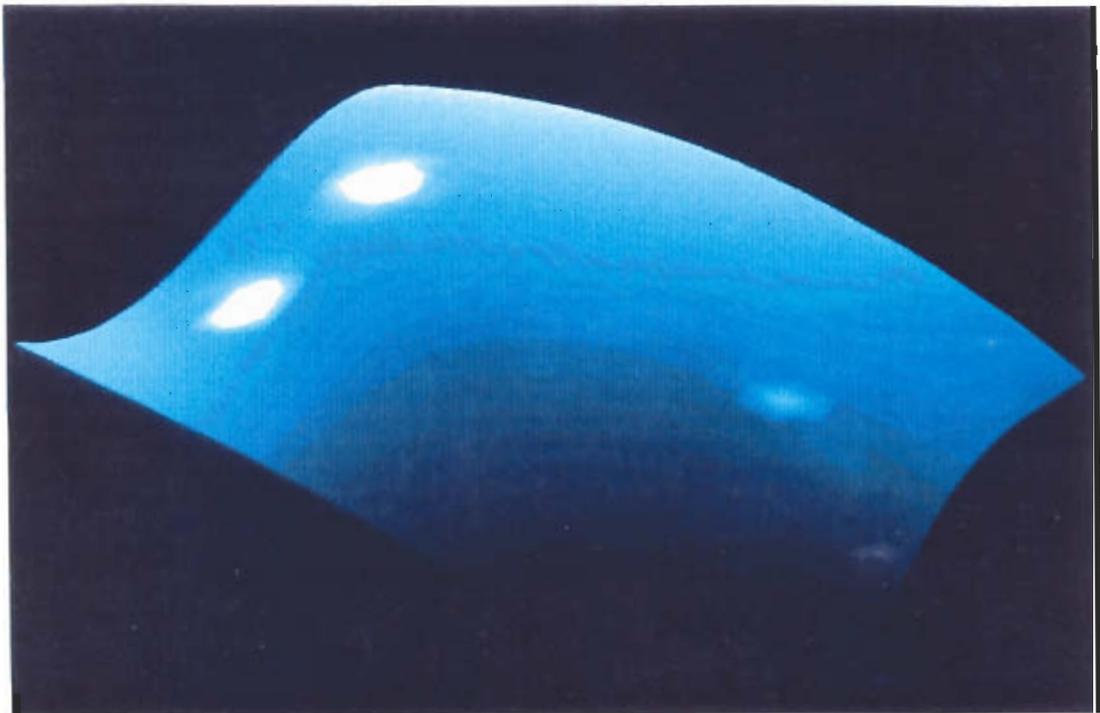


Figura 6-4: Parche superficial curvo

La principal ventaja de los parches curvos reside en que el modelo se aproxima con gran precisión al objeto real con un número de parches muy reducido, mientras que las facetas planas pueden aproximarse a la superficie real tanto como sea necesario a costa de elevar el número de facetas utilizado. Por ello, al simularse un proceso físico con un modelo geométrico, la cantidad de información a procesar en la base de datos que define el objeto es mucho menor con parches curvos que con facetas planas, con todas las ventajas que ello conlleva.

El método de modelado por fronteras tiene ciertas ventajas sobre otros métodos de modelado de sólidos:

- Facilidad en la realización de traslaciones y rotaciones del modelo.
- Facilidad en la realización de cálculos geométricos.
- Rapidez en la visualización realista tridimensional.

Los principales inconvenientes son:

- Poco conciso: se precisa una gran cantidad de información para definir el objeto.
- Dificultad en la realización de operaciones de intersección entre dos sólidos.

6.1.4 Geometría constructiva de sólidos

En el método de geometría constructiva de sólidos (CSG) los elementos constitutivos del modelo son objetos tridimensionales sencillos, como, por ejemplo, esferas, paralelepípedos, conos, cilindros, etc. Estos sólidos primitivos son parametrizables: pueden especificarse sus dimensiones, posición y orientación.

Un cuerpo complejo se forma a partir de una serie de operaciones booleanas (uniones, intersecciones, sustracciones, etc.) de los sólidos primitivos, de forma que la base de datos del modelo geométrico está formada por el árbol de operaciones booleanas que ha dado lugar al objeto complejo.

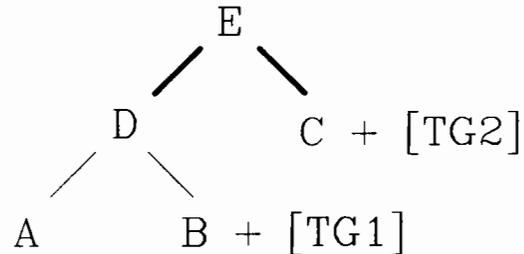
El esquema siguiente representa un ejemplo de modelado por este método.

Las operaciones A,B, y C corresponden a la creación de un paralelepípedo, un cono y una esfera, respectivamente. Los números entre paréntesis son las dimensiones de los objetos, mientras que [TG1] y [TG2] indican que se ha realizado una transformación geométrica (traslación o rotación) del objeto creado con aquellas dimensiones. Las operaciones booleanas D y E definen el objeto complejo a partir de los sólidos primitivos creados en A,B, y C.

Las principales ventajas de la geometría constructiva de sólidos son:

OPERACIONES

A: PARAL (5,10,3)
 B: CONO (2,6)+[TG1]
 C: ESFERA (10)+[TG2]
 D: A-B
 E: D-C

ARBOL DE OPERACIONES

- Concisión: basta muy poca información para definir el objeto.
- Gran sencillez en la realización de operaciones booleanas entre objetos.
- Facilidad en la realización de transformaciones geométricas.

Los mayores inconvenientes residen en:

- Dificultad en el modelado de formas complejas.
- Cálculos geométricos sobre el objeto muy costosos.
- Dibujo bidimensional y visualización realista tridimensional difíciles.

6.1.5 Árboles octales

El método de los árboles octales ("*octrees*") se basa en la descomposición celular de un universo -un cubo en el caso tridimensional o un cuadrado en dos dimensiones- que contiene el objeto a generar. Se va a considerar únicamente el caso 3-D porque es el que se utiliza para la generación de sólidos, siendo el caso 2-D paralelo, con cuadrados en lugar de cubos.

Se divide el cubo en ocho cubos iguales. Se interroga cada uno de los cubos generados: Si el cubo está totalmente fuera o dentro del objeto se le llamará *octree* homogéneo, blanco si está totalmente fuera y negro si está totalmente dentro, y en caso contrario, no homogéneo (gris). Estos cubos no homogéneos se vuelven a dividir en ocho, y se repite el proceso de selección de *octrees* homogéneos y no homogéneos. Con los nuevos cubos no homogéneos se realiza nuevamente el proceso de división y clasificación, y así sucesivamente. El proceso finaliza cuando quedan totalmente definidas las zonas interior y exterior del cuerpo con una cierta cota de error.

Este método es adaptativo en el sentido de que las zonas de formas más complicadas quedan más divididas y las de formas más suaves menos, con lo que se optimiza la cantidad de información necesaria para modelar con precisión un objeto muy complejo.

Este método presenta las siguientes ventajas:

- Muy adecuado para el modelado de objetos extraordinariamente complejos.
- Cálculo de volúmenes y áreas trivial: Adición del volumen o área de cada uno de los *octrees* homogéneos negros (cubos que están dentro del volumen del objeto).
- Operaciones booleanas muy sencillas.

Sin embargo, también tiene algunos inconvenientes:

- Para modelar objetos sencillos, como una esfera, precisa mucha mayor cantidad de información que los demás métodos.
- Las transformaciones geométricas (traslaciones, rotaciones) son lentas, pues deben tratarse gran cantidad de primitivas (cubos).
- Visualización realista tridimensional complicada.

Por ello, el método de árboles octales sólo se suele utilizar para modelar objetos con superficies de complejidad extrema. Un ejemplo típico de aplicación en medicina es el modelado del cerebro.

Recientemente se han desarrollado los "métodos de *octrees* extendidos" [Brunet'90], que en algunos casos son más apropiados que el método clásico.

6.2 MODELADO DE BLANCOS RADAR COMPLEJOS

Antes de que se desarrollara el software actual de diseño gráfico y modelado geométrico, existían técnicas de modelado en las que se hacía uso del método de geometría constructiva de sólidos para aproximar un avión mediante primitivas básicas de construcción (esferas, cilindros, paralelepípedos, etc.), generando modelos muy simplificados que proporcionaban una cierta aproximación de la sección recta [Crispin'65], [Crispin'68].

El método más utilizado en la actualidad es el de modelado por fronteras mediante facetas planas, con lo que la superficie modelada se asemeja mucho más a la real y se obtienen resultados de predicción muy superiores [Klement'88], [Youssef'89], [Domingo'90], [Abad'90].

El principal inconveniente del modelado con facetas planas reside en que la realización del modelo resulta difícil cuando el blanco radar presenta superficies de forma muy compleja. Para conseguir un modelo preciso deben aproximarse las facetas a la superficie real tanto como sea necesario a costa de elevar el número de facetas utilizado. El gran número de facetas, caracterizada cada una de ellas por las coordenadas espaciales de sus vértices, constituye una cantidad muy elevada

de información a procesar, requiriendo un esfuerzo computacional considerable incluso con técnicas de alta frecuencia, aunque muy inferior al requerido por la discretización con métodos de baja frecuencia.

Por ello, para obtener resultados con blancos radar arbitrariamente complejos, de tamaño eléctrico muy grande y en un tiempo razonablemente reducido, suelen utilizarse procesadores vectoriales trabajando en paralelo, cuyo coste económico es muy elevado.

Por el contrario, el modelado a base de parches curvos no precisa almacenar gran cantidad de datos y permite aproximar la superficie del blanco real con gran precisión. De esta forma, se reduce en varios órdenes de magnitud la cantidad de información a procesar, con lo que pueden analizarse con un esfuerzo computacional no muy elevado objetos de mayor tamaño eléctrico.

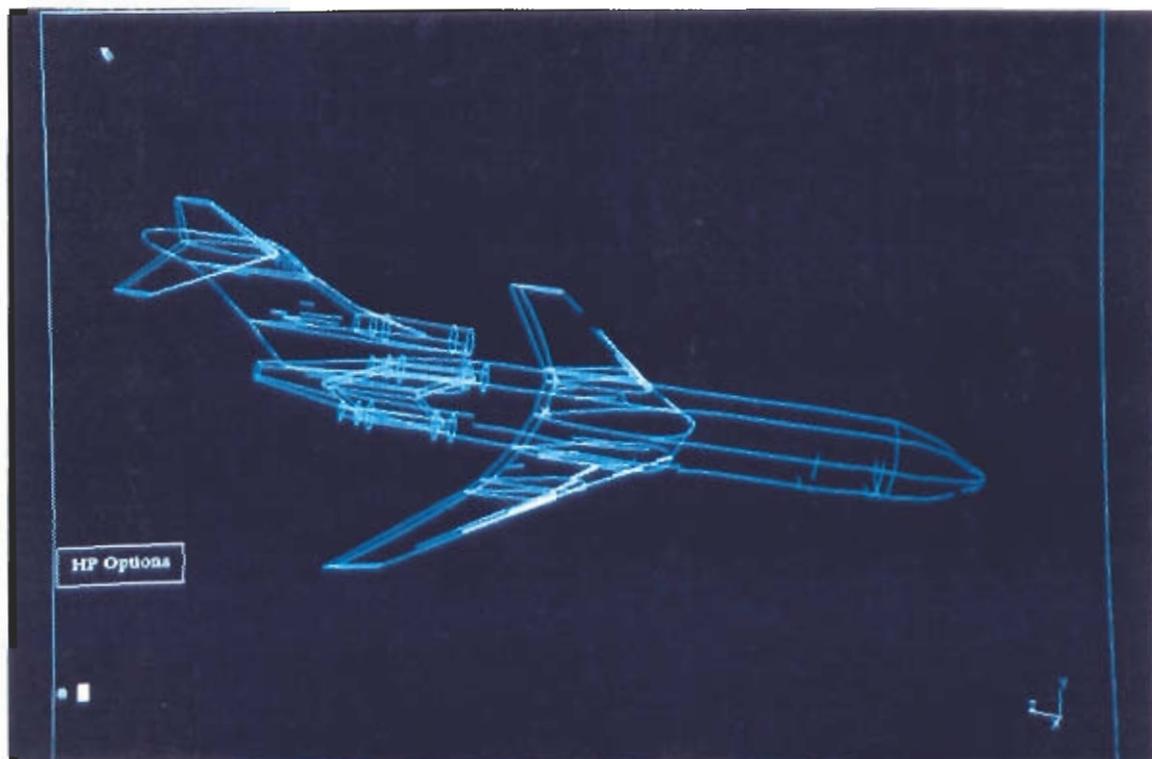
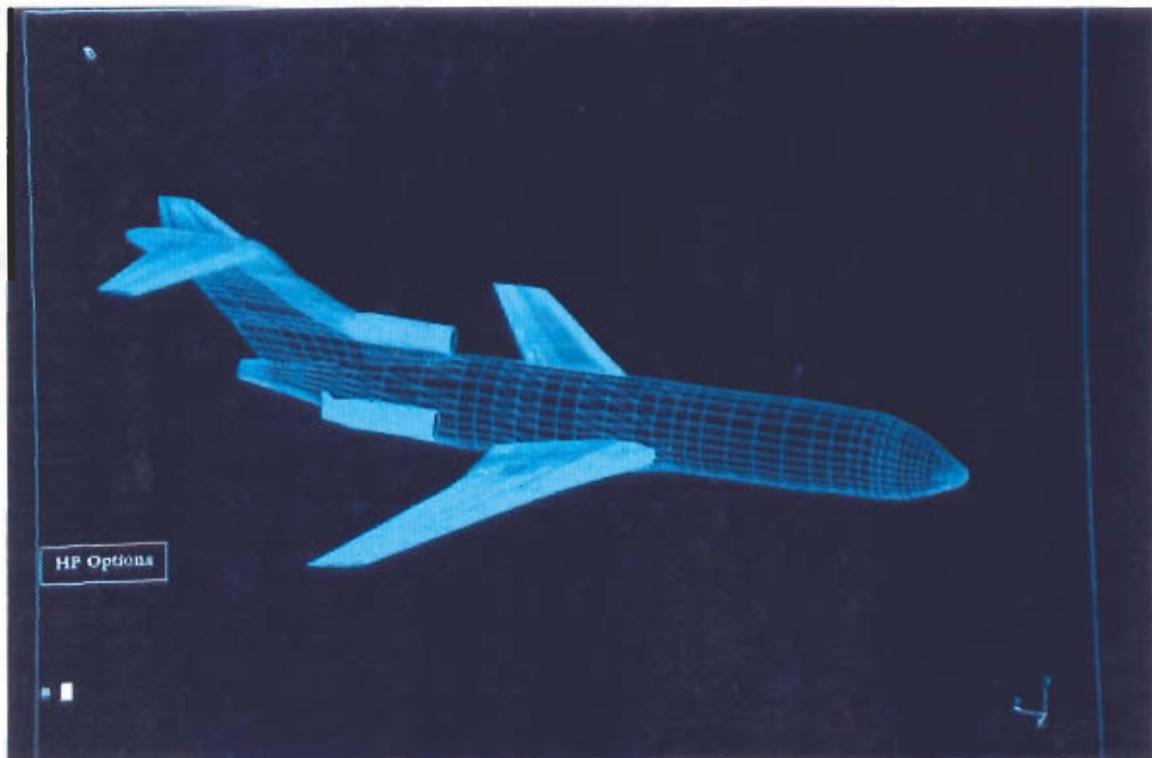
La aplicación del modelado mediante parches curvos al cálculo de sección recta radar constituye, juntamente con el procesado gráfico en tiempo real, una de las innovaciones introducidas en esta tesis [Rius'89], [Rius'90 Dallas], [Rius'90 Jina]. Simultáneamente, otros grupos de trabajo españoles han estudiado la aplicación de técnicas electromagnéticas de alta frecuencia al cálculo de sección recta de cavidades [Hermida'90] o aviones [Pizarroso'90], modelados con parches curvos.

Entre los dos tipos de modelos matemáticos de parches curvos, superficies paramétricas y superficies algebraicas, las últimas son de muy reciente desarrollo y presentan algunas ventajas sobre las primeras. Sin embargo, el hardware de las estaciones gráficas disponibles en la actualidad sólo permite representar en tiempo real objetos modelados por superficies paramétricas de tipo "B-spline racional no uniforme (NURB)" (ver capítulo 7), por lo que las superficies algebraicas no se utilizan todavía en la práctica.

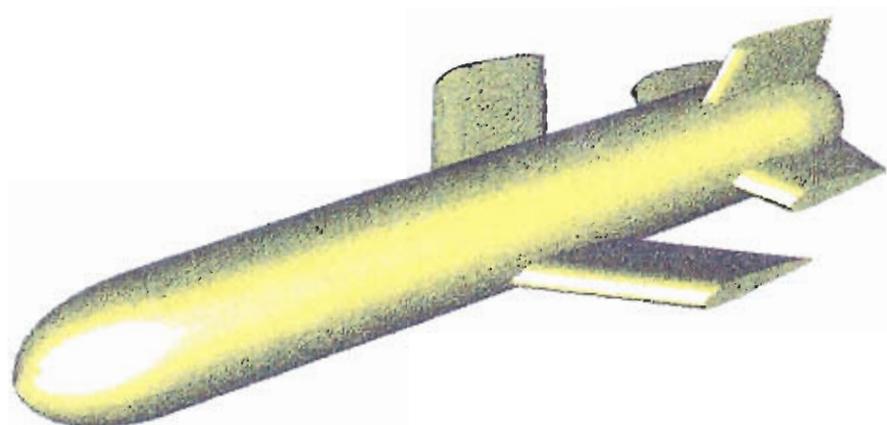
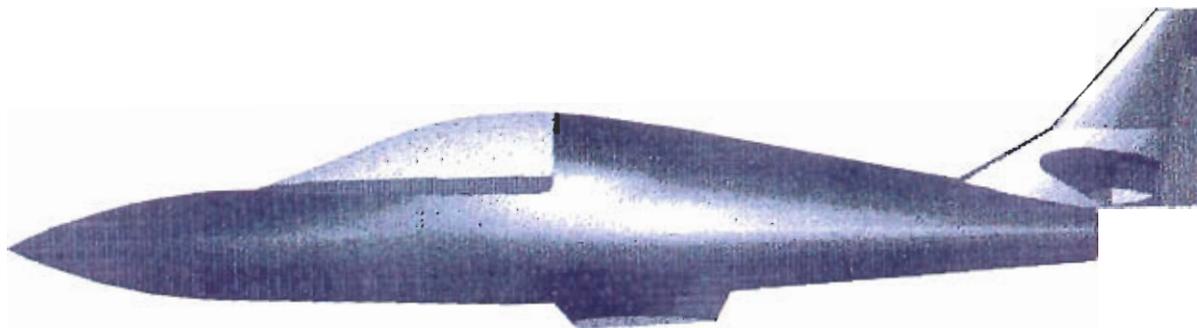
En este punto reside una ventaja adicional de las superficies paramétricas NURB sobre las facetas: la visualización realista tridimensional en tiempo real en una estación gráfica equipada con el hardware adecuado. La representación de un modelo con superficies paramétricas es aproximadamente un orden de magnitud más rápida que la de un modelo con facetas planas, debido principalmente a la menor cantidad de información a procesar.

Dado que el método utilizado en esta tesis para el cálculo de sección recta se basa en el procesado gráfico de una imagen fotorrealista del blanco (ver parte III), y considerando además que es un objetivo prioritario la obtención de resultados en tiempo real, se ha decidido la utilización de superficies paramétricas NURB, pues son éstas las que permiten la visualización tridimensional más rápida del blanco en la pantalla de la estación gráfica.

En las siguientes figuras pueden observarse blancos radar modelados con el paquete software I-DEAS: en las 6-5 y 6-6 se compara el modelado con facetas planas y con superficies paramétricas de un Boeing 727, mientras que las 6-7 y 6-8 muestran visualizaciones realistas de un avión y un misil genéricos, respectivamente.



Figuras 6-5 y 6-6: Boeing 727 modelado con facetas planas y con superficies paramétricas



Figuras 6-6 y 6-7: Visualización realista de un avión y un misil genéricos

6.3 MODELOS MATEMATICOS PARA CURVAS Y SUPERFICIES

Para llevar a cabo el modelado de sólidos mediante el método de fronteras son necesarios modelos matemáticos de curvas y superficies. Las dos formas matemáticas no lineales más comunes en el modelado geométrico para representación de curvas y superficies son las formas polinomiales paramétricas y las implícitas o algebraicas. Estas últimas son de muy reciente desarrollo y tienen la ventaja de que los círculos, cónicas y cuádricas pueden ser representados exactamente y de forma muy concisa. Sin embargo, las curvas y superficies de formas arbitrarias -tan importantes en modelado geométrico- son representadas más fácilmente mediante polinomios paramétricos a trozos.

6.3.1 Curvas paramétricas B-spline no racionales

La formulación matemática utilizada para representar curvas y superficies debe cumplir una serie de propiedades básicas:

- **Flexibilidad:** Debe adaptarse con facilidad a curvas arbitrarias muy complejas.
- **Intuitividad:** A partir de los parámetros que definen una curva, debe poderse intuir su forma.

La primera exigencia -flexibilidad- descarta los métodos de interpolación lineal y de Lagrange, ya que precisarían polinomios de grado muy elevado. Uniendo polinomios de grado reducido, puede conseguirse una curva polinomial a trozos con una gran flexibilidad, adaptable a formas arbitrariamente complejas sin elevar el grado de los polinomios. Este tipo de curvas se denomina "*B-spline*".

La intuitividad se consigue expresando los coeficientes de los "*B-splines*" en función de las coordenadas espaciales de unos "puntos de control", que son los vértices de una poligonal cuya forma es similar a la curva descrita por los polinomios.

En la figura 6-9 se representan dos ejemplos de curva polinómica a trozos, "*B-spline*", con las correspondientes poligonales definidas por los puntos de control. Obsérvese que la curva "*B-spline*" queda siempre dentro de la poligonal.

Recientemente se han desarrollado varios métodos, además de los *B-splines*, para generar polinomios paramétricos con gran intuitividad. Entre ellos destacan: los γ -*splines*, V^2 -*splines*, β -*splines*, ν -*splines*, etc. [Brunet'90]. Sin embargo, se ha decidido utilizar los "*B-splines*" para modelar blancos radar por ser una

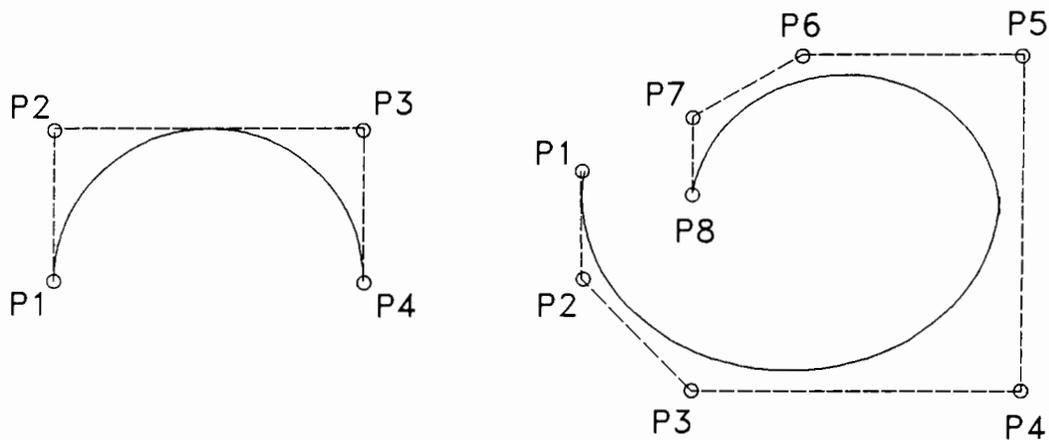


Figura 6-9: Curvas B-spline, puntos de control y poligonal.

herramienta de modelado clásica, sólidamente establecida, que se encuentra implementada en muchos sistemas CAD/CAM, en las librerías gráficas software y en el hardware de los aceleradores gráficos de las estaciones de trabajo actuales.

Además, los "*B-splines*" poseen muchas propiedades interesantes, que los hacen muy atractivos para el modelado geométrico:

- Son muy flexibles con polinomios de grado reducido y pocos puntos de control: Los *B-splines* modelan una curva arbitraria a trozos utilizando polinomios con parámetros distintos en cada uno de ellos.
- La suavidad de las transiciones entre trozos se controla definiendo el número de derivadas respecto al parámetro continuas. Como máximo, éste es igual al grado de los polinomios menos uno, y puede reducirse tanto como se desee.
- No interpolan los puntos de control (no pasan por ellos). La curva está contenida en una poligonal convexa cuyos vértices son los puntos de control.
- Permiten el control local: el modificar la posición de un punto de control sólo modifica la forma de la curva en las proximidades de dicho punto, quedando el resto inalterado.
- Puede variarse la proximidad de la curva a los puntos de control modificando el grado de los polinomios paramétricos o utilizando puntos de control múltiples.

- Una representación *B-spline* no racional permanece invariante ante transformaciones lineales: para trasladar o rotar toda la curva basta hacerlo con los puntos de control.

Actualmente existe una teoría matemática muy rica y elegante para describir las curvas polinomiales a trozos [De Boor'78], [Farin'88]. Dado que la exposición de dicha teoría se sale del ámbito de esta tesis doctoral, nos vamos a limitar a definir las curvas *B-spline* y sus parámetros:

Una curva *B-spline* polinomial $C(t)$ está definida en función del parámetro t mediante una combinación lineal de n polinomios de Bernstein de orden k , $B_{i,k}(t)$:

$$C(t) = \sum_{i=1}^n B_{i,k}(t) P_i \tag{6-1}$$

$$B_{i,k}(t) = \binom{k}{i} t^i (1-t)^{k-i} \tag{6-2}$$

donde

- P_i son los puntos de control, definidos por sus tres componentes euclídeas. Actúan como pesos de la combinación lineal.
- t es el parámetro, que varía entre unos valores fijos, $a \leq t \leq b$, con $0 \leq a \leq b$.
- $B_{i,k}(t)$ son polinomios escalares en los que t es la variable, k el orden y $k-1$ el grado.

Los polinomios de Bernstein $B_{i,k}(t)$ están completamente definidos por el orden k y un vector de nodos $\{t_j\}_{j=1}^{n+k}$ en el que los valores t_j son los valores del parámetro en la transición entre segmentos de polinomio, y cumplen:

$$a = t_1 = t_2 = \dots = t_k < t_{k+1} \leq t_{k+2} \leq \dots \leq t_n < t_{n+1} = \dots = t_{n+k} = b \tag{6-3}$$

Si existe un número real positivo d , tal que $t_{l+1} - t_l = d$ para todo $k \leq l \leq n$, entonces se dice que $\{t_j\}$ es un vector de nodos uniforme; en caso contrario, será no uniforme. Dada su mayor flexibilidad, habitualmente se utilizan los *B-splines* no uniformes.

6.3.2 Curvas paramétricas B-spline racionales

El principal problema de los polinomios paramétricos no racionales (ver 6.3.1) reside en que no son capaces de representar exactamente curvas o superficies

implícitas, como las cónicas o las cuádricas, aunque son muy apropiados para representar curvas arbitrarias. Para evitar la implementación de un método mixto que combine formas matemáticas implícitas con polinomiales, se desarrollaron a mediados de los 70 las formas polinomiales racionales [Tiller'83], capaces de representar exactamente tanto curvas arbitrarias como cónicas y cuádricas. Versprille fue el primero en investigar sobre ellas, y su trabajo constituye una excelente introducción al tema [Versprille'75].

Aunque menos conocidos que los *B-splines* no racionales, los *B-splines* racionales no uniformes ("NURBS") están adquiriendo una importancia creciente, y ya son muchas las estaciones gráficas con hardware dedicado que son capaces de visualizarlos en tiempo real (HEWLETT-PACKARD, SILICON GRAPHICS, etc.), así como los paquetes software de modelado geométrico que incorporan los NURBS: I-DEAS, CATIA, ALIAS, etc. (los dos primeros muy extendidos entre la industria aeronáutica). Precisamente el paquete I-DEAS es el adquirido para el modelado de blancos radar en la presente tesis.

Veamos la definición matemática de los *B-splines* racionales:

Los *B-splines* racionales se definen en el sistema de coordenadas homogéneo: si $P = (x, y, z)$ es un punto en el espacio euclídeo de tres dimensiones, se define un punto correspondiente a aquel, en el espacio homogéneo de 4 dimensiones como, $P^h = (hx, hy, hz, h)$, donde $h > 0$. A h se la conoce como la coordenada homogénea. Al proyectar el espacio homogéneo de 4 dimensiones en el euclídeo de 3, $P^h = (hx, hy, hz, h)$ se transforma en $P = (x, y, z)$.

La definición de una curva *B-spline* polinomial en el espacio homogéneo se hace de forma paralela al caso de los *B-splines* no racionales en el espacio euclídeo:

$$C^h(t) = \sum_{i=1}^n B_{i,k}(t) P_i^h \quad (6-4)$$

donde $B_{i,k}(t)$ son las mismas funciones base polinomiales de orden k que en el caso de los *B-splines* no racionales, y P_i^h son los puntos de control en el espacio homogéneo. También queda implícito en la definición un vector de nodos $\{t_j\}_{j=1}^{n+k}$ como en el caso de los *B-splines* no racionales.

La coordenada homogénea h de cada punto de control define cuánto afecta éste a la forma de la curva. En los *B-splines* no racionales todos los puntos de control influyen por igual sobre la forma de la curva, salvo los puntos de control múltiples que "atraen" hacia sí la curva.

Para $\alpha \leq t \leq b$, la curva $C^h(t)$ es un conjunto de puntos en el espacio homogéneo 4-D. La proyección de $C^h(t)$ en el espacio euclídeo 3-D es la curva *B-spline* racional $C(t)$, que se obtiene por división de cada una de las tres primeras coordenadas de cada punto de $C^h(t)$ por la coordenada homogénea.

$$C(t) = \frac{\sum_{i=1}^n B_{i,k}(t)h_i P_i}{\sum_{i=1}^n B_{i,k}(t)h_i} \tag{6-5}$$

La ecuación (6.5) es una forma polinomial racional a trozos, con nodos en $\{t_j\}$. Recordemos que los nodos son los valores del parámetro en los que se produce la transición entre diferentes polinomios. La curva polinomial tiene la máxima flexibilidad cuando el vector de nodos es no uniforme (ver 6.3.1). En este caso la forma matemática recibe el nombre de *B-spline* racional no-uniforme (NURB).

Comparando las expresiones obtenidas para *B-splines* no racionales con respecto a los racionales se observa:

- Para mismos valores de n y k y el mismo vector de nodos $\{t_j\}$ el conjunto de curvas *B-spline* no racionales son un subconjunto del conjunto de *B-splines* racionales, en el que la coordenada homogénea de los puntos de control vale uno. Esto es debido a que los polinomios de Bernstein son los términos del binomio de Newton, y por tanto cumplen la propiedad:

$$\sum_{i=1}^n B_{i,k}(t) = (t + 1 - t)^k = 1 \tag{6-6}$$

para todo t , por lo que para $h_i = 1$ (6-5) se reduce a (6-1).

- Las propiedades anteriormente mencionadas para los *B-splines* no racionales se siguen cumpliendo, excepto que los *B-splines* racionales no pueden ser rotados o trasladados aplicando la transformación geométrica únicamente a los puntos de control, sino que se debe aplicar a todos los puntos de la curva.
- La definición de los *B-splines* racionales en un espacio homogéneo de cuatro dimensiones permite representar exactamente las cónicas y las cuádricas como proyecciones de formas polinomiales sobre el espacio euclídeo.

6.3.3 Superficies paramétricas B-spline

Una superficie *B-spline* se define de forma análoga a las curvas *B-spline*. Para ello se utilizan dos familias de curvas *B-spline* que recorren la superficie en

direcciones perpendiculares. El diseño de superficies requiere dos vectores de nodos, uno para cada familia de curvas, y una matriz rectangular de puntos de control. Los dos vectores de nodos son necesarios para recorrer las dos dimensiones perpendiculares de la matriz rectangular de puntos de control.

En la figura 6-10 se representa una superficie *B-spline*, las dos familias de curvas que la definen y la poligonal bidimensional correspondiente a la matriz de puntos de control.

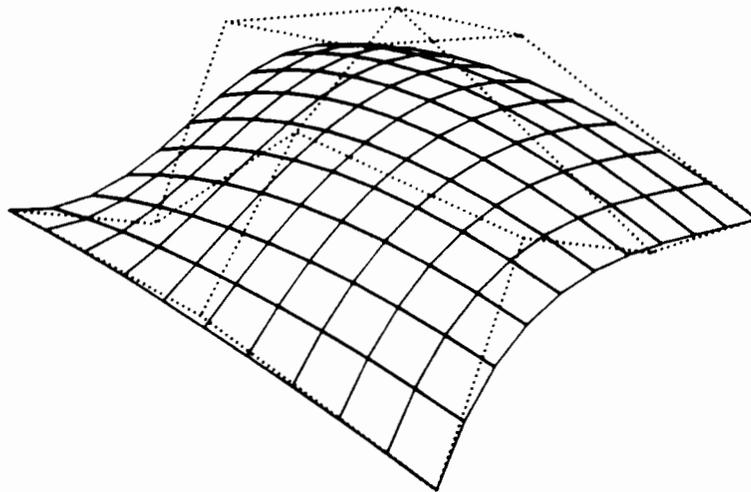


Figura 6-10: Superficie *B-spline*

La forma matemática de las superficies *B-spline* es un producto tensorial de dos parámetros s y t . Para el caso no racional tenemos:

$$S(s, t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m B_{i,k}(s) B_{j,l}(t) P_{ij} \quad (6-7)$$

donde

- $P_{i,j}$ es una matriz ($n \times m$) de puntos de control.
- $B_{i,k}(s)$ es el polinomio de Bernstein de orden k definido por el vector de nodos $\{s_p\}_{p=1}^{n+k}$

- $B_{j,l}(t)$ es el polinomio de Bernstein de orden l , definido por el vector de nodos $\{t_q\}_{q=1}^{n+l}$

Para el caso racional se obtiene una expresión, paralela a la anterior, en coordenadas homogéneas:

$$S^h(s, t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m B_{i,k}(s) B_{j,l}(t) P_{ij}^h \tag{6-8}$$

Al proyectar en el espacio euclídeo se obtiene la forma polinómica racional equivalente:

$$S(s, t) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m B_{i,k}(s) B_{j,l}(t) h_{ij} P_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m B_{i,k}(s) B_{j,l}(t) h_{ij}} \tag{6-9}$$

6.3.4 Curvas definidas sobre superficies B-spline

Para modelar agujeros en las superficies *B-spline*, los límites externos de las mismas, o bien líneas de intersección entre superficies, es necesario utilizar curvas definidas sobre la propia superficie. A estas curvas se les denomina *trimming curves*.

Para asegurar que todos los puntos de las *trimming curves* pertenezcan realmente a la superficie sobre la que éstas están definidas, se expresan en coordenadas paramétricas de la superficie. Para ello, basta expresar los puntos de control de las *trimming curves* en coordenadas paramétricas de la superficie *B-spline*, iguales al valor de los dos parámetros de la superficie en estos puntos.

En la figura 6-11 se muestra un ejemplo de definición de una *trimming curve* sobre una superficie *B-spline* para recortar un agujero en la misma. Obsérvese que la superficie resultante puede ser tanto la exterior como la interior a la *trimming curve*.

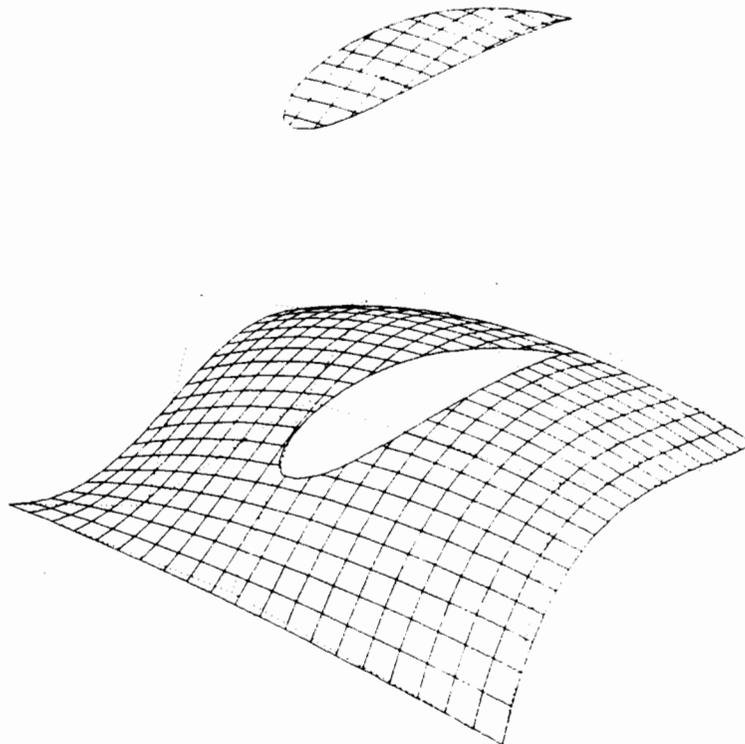


Figura 6-11: Trimming curves definidas sobre superficies B-spline.

6.3.5 Continuidad entre superficies paramétricas

Como se ha indicado anteriormente, las curvas y superficies *B-spline* son polinomiales paramétricas a trozos. Al dividir los polinomios en segmentos, cada uno de ellos con distintos coeficientes, se consigue que los *B-spline* se adapten a formas muy complejas utilizando polinomios de grado reducido.

Para conseguir superficies de formas suaves, es necesario un cierto orden de continuidad en las transiciones entre segmentos. En general, pueden distinguirse dos tipos de continuidad:

- **Continuidad visual:** Continuidad de las derivadas de la función explícita asociada a la superficie. Si la continuidad es visual de orden cero, VC^0 (función explícita continua y derivadas discontinuas), la superficie presenta uniones abruptas. Si la continuidad es visual de primer orden, VC^1 , la primera derivada, y por tanto la pendiente de la superficie, es continua. Si es de orden dos, habrá continuidad de la curvatura en las uniones.

- **Continuidad paramétrica:** Continuidad de las derivadas de los polinomios respecto al parámetro en el punto de transición. Se dice que hay continuidad paramétrica de orden C^n cuando las n primeras derivadas respecto al parámetro son continuas. Con las curvas y superficies *B-spline* se puede conseguir cualquier orden de continuidad paramétrica entre cero y el grado de los polinomios menos uno.

En general, un tipo de continuidad no implica el otro. Para aplicaciones de modelado geométrico es más interesante la continuidad visual que la paramétrica, pero mucho más difícil de conseguir con *B-splines*. Por ello, actualmente se están desarrollando nuevos métodos de generación de splines, en los que la propia definición de los mismos asegura una cierta continuidad visual. La tabla siguiente muestra el tipo de continuidad asegurada por algunos tipos de curvas introducidas recientemente [Brunet'90].

FORMA MATEMATICA	CONTINUIDAD
<i>B-splines</i>	C^n
$V C^1$ parches racionales de Bézier	$V C^1$
V^2 - <i>splines</i>	$V C^2$
γ - <i>splines</i>	$V C^2$
β - <i>splines</i>	$V C^n$

Con objeto de validar los modelos geométricos, se han desarrollado varios métodos de interrogación del grado de continuidad de la curvas o superficies [Hagen'89].

Uno de los métodos más utilizados es el estudio de las líneas de reflexión en la superficie producidas por la incidencia de frentes de onda cilíndricos, producidos por fuentes luminosas lineales. De esta forma pueden detectarse pequeñísimas irregularidades en la superficie.

Otro método es el de las isofotas (líneas de puntos de igual iluminación). Consiste en estudiar las líneas de separación entre la luz y la sombra cuando el cuerpo se ilumina con una luz puntual. Se detectan fácilmente discontinuidades visuales en la superficie, que se traducen en discontinuidades de un orden inferior en las líneas de sombra: si la superficie tiene discontinuidad de la pendiente (primera derivada), hay discontinuidad en la línea de sombra; si la superficie tiene discontinuidad de la curvatura, la línea de sombra tiene discontinuidad de la pendiente, etc.

6.3.6 Superficies algebraicas

De desarrollo reciente, las formas matemáticas algebraicas se basan en una formulación implícita de las superficies en un espacio dividido en sub-espacios, cambiando la formulación en cada subespacio [Brunet'90], [Sederberg'84].

Las superficies algebraicas presentan las siguientes ventajas sobre las paramétricas:

- Formulación matemática más sencilla.
- Representación trivial de funciones implícitas, como, por ejemplo, cónicas y cuádricas.
- Discriminación muy sencilla de puntos exteriores e interiores a la superficie.

Por otra parte, también tienen serios inconvenientes:

- Formulación relativamente rígida.
- Las operaciones entre superficies requieren procesado simbólico.
- Sólo se ha conseguido continuidad visual de orden uno ($V C^1$), utilizando superficies algebraicas cuadráticas [Dahmen'89].
- Dificultades para el modelado de curvas y superficies arbitrarias.

Este último aspecto se ha mejorado muy recientemente con el desarrollo de herramientas matemáticas y algoritmos para el modelado de formas complejas con superficies algebraicas cúbicas a trozos [Sederberg'90].

Aunque todavía no se ha popularizado el uso de superficies algebraicas para el modelado geométrico de sólidos, éstas tienen un gran futuro si se utilizan en métodos mixtos algebraicos-paramétricos. Un método mixto sería capaz de solucionar de forma trivial el problema de la intersección entre superficies, tan difícil de resolver si se utilizan únicamente superficies paramétricas o algebraicas [Brunet'90].

CAPITULO 7

VISUALIZACION REALISTA PARA PROCESADO GRAFICO

La solución original adoptada en esta tesis para el cálculo de sección recta radar consiste en el procesado gráfico de una imagen realista del blanco. Para ello, el primer paso es el modelado geométrico del blanco, al que se ha dedicado el capítulo 6. El segundo paso, al que se dedica el presente capítulo, consiste en generar la imagen del blanco en la pantalla de la estación gráfica, utilizando la información almacenada en la base de datos de modelado geométrico. El último paso, al que se dedica la parte III, consiste en la detección gráfica de superficies y aristas en el dibujo del blanco, y el cálculo de integrales de superficie o de línea sobre las mismas. Los pasos segundo y tercero de este proceso pueden realizarse en tiempo real si la estación de trabajo dispone de un acelerador gráfico hardware.

Para llevar a cabo las dos últimas fases del proceso, es decir, acceso a la base de datos de modelado geométrico, generación de la imagen realista del blanco y procesado gráfico, ha sido necesario:

- Estudiar la estructura de la base de datos de modelado geométrico, para poder extraer la información de las curvas paramétricas del modelo: puntos de control, vector de nodos, *trimming curves*, etc.
- Estudiar los métodos de visualización realista tridimensional.
- Conocer a fondo el software gráfico, para poder llevar a cabo la implementación de un programa que, a partir de la información de las superficies paramétricas del modelo, fuera capaz de generar una imagen del blanco adecuada para el procesado gráfico.

- Conocer la estructura del hardware del acelerador gráfico y su funcionamiento, con objeto de utilizar al máximo los recursos hardware disponibles, y, de esta forma, acelerar el procesamiento gráfico y conseguir calcular la sección recta en tiempo real.

Dada la extensión del trabajo realizado, imposible de reflejar en este documento, nos vamos a limitar a una breve exposición de la metodología de visualización realista tridimensional, cómo se encuentra ésta implementada en software y repasar brevemente el funcionamiento del hardware gráfico a nivel de diagrama de bloques. El único objetivo perseguido en este resumen es presentar la terminología gráfica y unos conocimientos básicos mínimos. De esta forma, se establecen los fundamentos para el cálculo de sección recta por procesamiento gráfico.

7.1 VISUALIZACION GRAFICA REALISTA

En el campo del diseño gráfico con ordenador se han desarrollado numerosas técnicas de visualización gráfica realista de objetos situados en un determinado entorno. Para ello es necesario determinar la posición y orientación de todos y cada uno de los objetos que intervienen en la escena, definir la iluminación y los coeficientes de reflectividad luminosa de sus superficies, eliminar las partes ocultas que quedan eclipsadas, etc. De esta forma se obtienen imágenes de gran realismo, en las que incluso se llega a simular la textura de los diversos materiales que componen los objetos.

En este apartado comentaremos brevemente los métodos utilizados para la generación de imágenes de blancos radar. En primer lugar introduciremos el diagrama de bloques del proceso global de visualización gráfica realista, basado en el acelerador gráfico hardware que permite la obtención de la imagen en tiempo real.

Posteriormente comentaremos, uno por uno, los diferentes bloques del proceso: representación de objetos tridimensionales, cálculo del coloreado y sombreado de superficies en función de la iluminación, y eliminación de partes ocultas. Se dedicará particular atención a dos conceptos básicos para la teoría del cálculo de sección recta por procesamiento gráfico: la memoria de pantalla o *frame-buffer* y la memoria-z o *z-buffer*.

7.1.1 Generación de imágenes realistas

La generación de una imagen realista requiere la especificación de una escena tridimensional completa (ver figura 7-1), incluyendo:

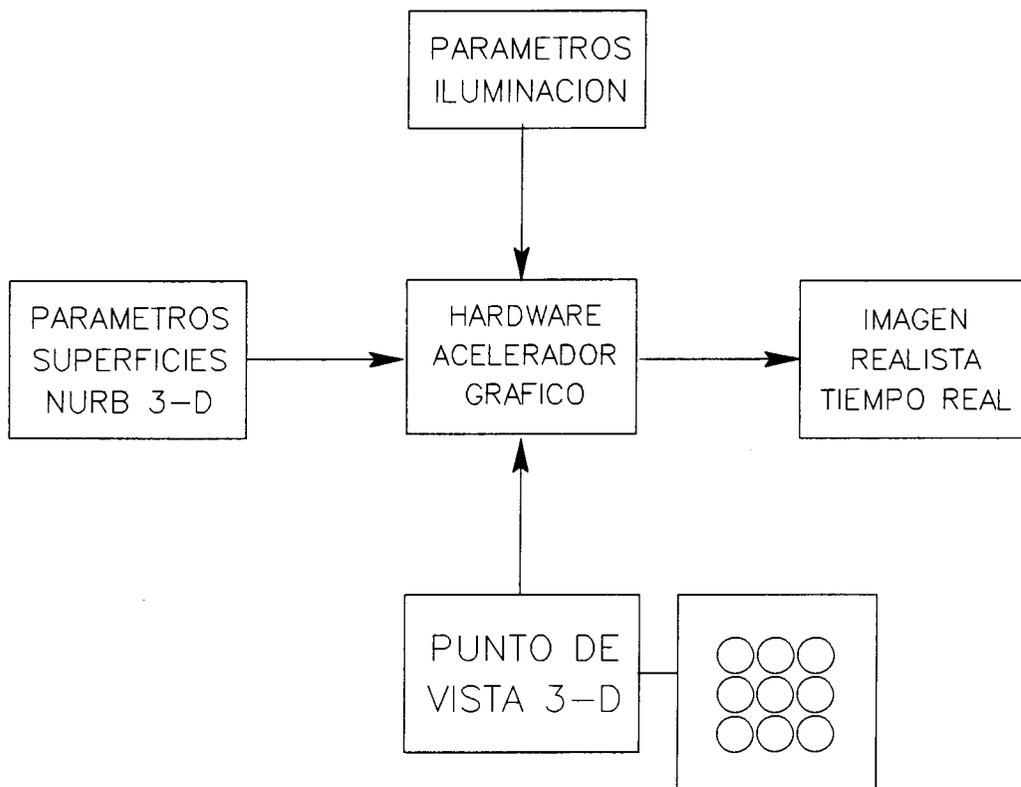


Figura 7-1: Visualización realista de una escena tridimensional

- **Observador:** Posición, dirección de observación y ángulo de visión. Utilizando el hardware y software adecuados, el punto de vista puede variarse con ayuda de una botonera de mando, observándose en tiempo real cómo se actualiza la escena para cada punto de vista.
- **Modelado geométrico de los objetos:** El método utilizado es el de modelado por fronteras, por lo que debe definirse la superficie de cada objeto, bien aproximándola con facetas planas, o bien de forma precisa con superficies paramétricas racionales NURB. En este último caso deben especificarse:
 - a) Parámetros de la superficies: matriz de puntos de control, vectores de nodos y orden de los polinomios.
 - b) Parámetros de las *trimming curves* o curvas de intersección entre superficies: vector de puntos de control en coordenadas paramétricas de la superficie a la que pertenece la curva, vector de nodos y orden del polinomio. Todas las curvas deben expresarse por separado para cada una de las superficies que se intersectan en ellas, utilizando cada vez las coordenadas paramétricas adecuadas.

- **Reflectividad de las superficies:** Especificación de las propiedades físicas de la superficie de los objetos: coeficientes de reflexión para cada color de la luz, parámetros de dispersión de la energía luminosa incidente, etc.
- **Escena:** Situación de los objetos tridimensionales en la escena y orientación de los mismos relativa al observador.
- **Iluminación:** Parámetros de las fuentes luminosas de la escena: posición, dirección de iluminación, diagrama y directividad del haz luminoso, etc.

El resultado es una imagen bidimensional correspondiente a la visión del observador de la escena 3-D original, en la cual se han suprimido las superficies ocultas o eclipsadas y se muestran las superficies visibles con el coloreado y sombreado correspondientes a las condiciones de iluminación. Todo este proceso puede realizarse en tiempo real con ayuda de un acelerador gráfico hardware, capaz de representar, instantáneamente y de forma realista, superficies NURB de hasta grado 6 a partir de los parámetros que las definen.

7.1.2 Representación tridimensional

Para representar una escena tridimensional en un espacio de dos dimensiones, como la pantalla de la estación gráfica, deben realizarse una serie de operaciones y transformaciones geométricas con cada uno de los puntos, líneas y polígonos de los objetos que forman la escena (ver figura 7-2):

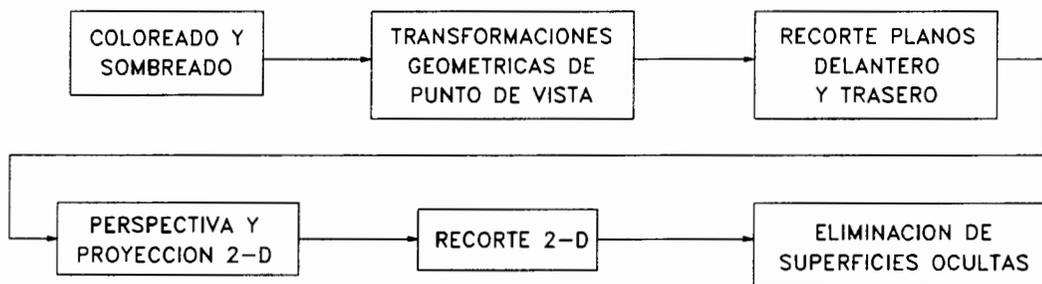


Figura 7-2: Representación tridimensional

- **Coloreado y sombreado:** La primera operación a realizar es el cálculo del color y la luminosidad de cada punto de las superficies. A este aspecto se dedica la sección 7.1.3.
- **Transformaciones geométricas de punto de vista:** En un cierto sistema de coordenadas 3-D está definida la posición del punto de vista y la dirección de observación. Para proyectar todos los puntos de la escena en un plano perpendicular a la dirección de observación, deben realizarse una serie de transformaciones geométricas (rotaciones y traslaciones) de los diversos

objetos. Como interesa realizar todo tipo de transformaciones mediante productos de matrices por los puntos a transformar, se utiliza un sistema de coordenadas homogéneo de cuatro dimensiones [Dewey'88].

El resultado de las transformaciones es una escena 3-D con el eje Z en la dirección del punto de vista y los ejes X e Y sobre el plano perpendicular a la dirección de observación. En este nuevo sistema de coordenadas de pantalla, el valor de Z representa la distancia de cada punto al observador y X e Y equivalen a las coordenadas 2-D de cada punto sobre la pantalla de la estación gráfica.

- **Recorte de planos delantero y trasero:** Se eliminan todos los puntos que quedan detrás del observador, y por tanto no deben ser visibles, así como aquellos cuya distancia al punto de vista es mayor que un valor predeterminado.
- **Perspectiva y proyección 2-D:** Se sitúa cada punto sobre la pantalla en función de sus coordenadas X e Y. En el caso de proyección con perspectiva, las coordenadas X e Y se dividen por un valor proporcional a la coordenada Z, con lo que aparecen más pequeños los objetos más alejados del observador.
- **Recorte 2-D (*clipping*):** Se eliminan los objetos cuyas coordenadas X o Y se encuentren fuera de los límites de la pantalla. Esta operación, que es trivial con los puntos, requiere algoritmos especiales con líneas o polígonos que se encuentran parcialmente fuera de la pantalla [Dewey'88].
- **Eliminación de superficies ocultas:** Sólo deben representarse aquellos objetos que no se encuentren eclipsados por otros y, en cada objeto, únicamente las superficies visibles. Para ello existen multitud de algoritmos [Dewey'88], siendo los más utilizados el del *Z-buffer*, la partición binaria del espacio y la cola ordenada de objetos. El primero de ellos es el que se ha utilizado para representar blancos radar, y se encuentra detallado en la sección 7.1.5.

7.1.3 Modelos de iluminación local

Una de las técnicas más efectivas para dar realismo a las imágenes de ordenador es la inclusión de iluminación en las escenas. Sin embargo, el modelado de la energía electromagnética y su interacción con el ojo humano no es un problema sencillo de tratar. La psicología y la fisiología de la percepción visual han sido estudiadas con mucho detalle, y se ha llegado a la conclusión de que hacer un modelo exacto sería demasiado complejo y representaría un coste computacional excesivo.

Por ello, los modelos matemáticos de iluminación utilizan ciertas simplificaciones que permiten obtener efectos suficientemente realistas en tiempo real utilizando técnicas de aceleración gráfica hardware. Uno de los modelos más populares es el de iluminación local de Phong [Phong'73].

En los modelos de iluminación local, la simplificación más importante que se introduce es considerar únicamente las reflexiones de primer orden de la luz en las superficies. La principal consecuencia es que se desprecian las reflexiones múltiples entre superficies, de forma que la luminosidad de cada una depende sólo de su orientación relativa respecto a la dirección de iluminación. Otra simplificación muy habitual es el uso de fuentes luminosas puntuales y direccionales, en lugar de fuentes superficiales como existen en la realidad física.

Cuando el realismo de la imagen es de importancia primordial, se utilizan modelos de iluminación globales, de coste computacional mucho más elevado y que, por tanto, no pueden proporcionar resultados en tiempo real. En este tipo de modelos también se tiene en cuenta la luz que incide sobre los objetos proveniente de reflexión en otras superficies o transmisión a través de materiales semitransparentes, así como fuentes de luz superficiales.

Para el cálculo de sección recta radar mediante procesado gráfico de una imagen del blanco, se obtiene la contribución de primer orden utilizando un modelo de iluminación local para generar la imagen, y la contribución de reflexiones múltiples con un modelo de iluminación global. Los modelos de iluminación local, por ser la técnica básica más popularizada para la visualización de objetos tridimensionales, se comentan en el presente capítulo, mientras que los modelos de iluminación global se presentarán en el capítulo 11, dedicado a las reflexiones múltiples.

7.1.3.1 Fuentes de luz

Los modelos de iluminación local consideran dos tipos básicos de fuentes de luz:

- **Fuente direccional:** Es una fuente de luz puntual localizada en un punto infinitamente lejano, situado en una dirección conocida. Por tanto, los rayos que emite dicha fuente son paralelos, de forma que la dirección de la luz incidente es la misma para todos los objetos de la escena, independientemente de su posición. El frente de onda es plano, por lo que la luz no sufre atenuación en su trayecto de la fuente al objeto.
- **Fuente puntual:** Está situada relativamente cerca del volumen en el que se encuentra la escena, por lo que los rayos que emite no son paralelos y el ángulo con el que un rayo de luz llega a la superficie de un objeto depende

de la posición del objeto con respecto a la fuente de luz. El frente de onda es esférico, con lo que la luz sufre atenuación inversamente proporcional al cuadrado de la distancia recorrida por el rayo.

Las fuentes puntuales pueden definirse con un diagrama de radiación isotrópico, cónico, o bien de la forma $\cos^n \theta$.

En la realidad física, la luz sufre una atenuación que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Sin embargo, en los modelos de iluminación local es habitual utilizar un coeficiente de atenuación de la luz con la distancia de la forma

$$\alpha = \frac{1}{c_1 + c_2 r + c_3 r^2} \quad (7-1)$$

con lo que se puede simular una variedad más amplia de efectos luminosos.

7.1.3.2 Reflexión de la luz en las superficies

Cuando la luz incide sobre la superficie de un objeto, puede ser absorbida, transmitida o reflejada. Las técnicas de visualización gráfica por ordenador se interesan únicamente por la parte transmitida y la reflejada, ya que son las que hacen visible al objeto. La intensidad de la luz reflejada y de la transmitida por un objeto depende de la longitud de onda y de los ángulos de incidencia y observación respecto a la normal a la superficie. Utilizando coeficientes de reflexión distintos para cada longitud de onda incidente, puede simularse con gran realismo la coloración y textura de distintos materiales que componen los objetos.

Los modelos de iluminación local consideran tres tipos básicos de reflexión en la superficie de los objetos: ambiental, debida a la luz que recibe un objeto proveniente del entorno que le rodea; difusa o independiente de la dirección de observación, que proporciona una apariencia mate a las superficies; y especular o direccional, que proporciona una apariencia brillante. La luminosidad total de la superficie es igual a la suma de los tres tipos de reflexión y se calcula por separado para cada color, consiguiéndose efectos de gran realismo.

Luz ambiental

La luz ambiental es la luz que recibe un objeto por dispersión de todo el entorno que le rodea, tanto proveniente de las fuentes de luz como de las demás superficies. En realidad, es una fuente de luz distribuida, y un modelo exacto sería extremadamente complejo y computacionalmente muy costoso. Por eso, la luz ambiental se suele modelar como una reflexión difusa y constante en todas las superficies de la escena, independientemente de su posición y orientación respecto a las fuentes de luz puntuales.

La energía reflejada de la luz ambiental L_a suele calcularse como el producto de la intensidad de luz presente en la escena L , debida a las fuentes de iluminación, por el coeficiente de reflexión difusa de cada superficie ρ_d :

$$L_a = \rho_d L \quad (7-2)$$

Para acentuar el realismo de la imagen, la energía reflejada se calcula por separado para cada una de las componentes espectrales de la luz ambiental.

Reflexión difusa

Se dice que hay reflexión difusa cuando la luz es reflejada en todas direcciones con la misma intensidad, proporcionando una apariencia mate a las superficies. El fenómeno físico correspondiente a la reflexión difusa es la reemisión de la luz absorbida por la superficie del objeto.

La intensidad de la luz que llega al observador por reflexión difusa es independiente de la dirección de observación, y se calcula como el producto de la luminosidad incidente L , el coeficiente de reflexión difusa de la superficie ρ_d y el coseno del ángulo de incidencia respecto a la normal a la superficie θ_i , teniendo en cuenta el factor de atenuación por propagación α :

$$L_d = \rho_d \alpha L \cos \theta_i \quad (7-3)$$

Este tipo de dependencia con el ángulo de incidencia se debe a que la potencia incidente interceptada por la superficie, y reradiada por la misma, es proporcional a la proyección del área de la superficie en un plano perpendicular a la dirección de incidencia y, por tanto, proporcional a $\cos \theta_i$.

También la reflexión difusa se calcula por separado para cada componente espectral de luz incidente.

Reflexión especular

Al contrario que la reflexión difusa, la reflexión especular está caracterizada por una fuerte dependencia con la dirección de observación, por lo que produce puntos brillantes sobre superficies pulimentadas. La reflexión especular se produce en aquellas superficies en las que no penetra la energía electromagnética. Sobre una superficie plana infinita, toda la energía se refleja en un ángulo de reflexión igual al de incidencia, según la ley de Snell. Sobre superficies planas finitas, aparece un cierto diagrama de reflexión, con el máximo en la dirección de reflexión especular dada por la ley de Snell.

El modelo de reflexión especular más utilizado es el debido a Phong [Phong'73], según el cual la intensidad de luz especular es proporcional a $\cos^n \theta$,

donde θ es el ángulo que forman la dirección de observación y la de reflexión especular, y el exponente n un parámetro de direccionalidad: cuanto mayor es n , más directiva es la reflexión y menor el área del punto brillante en la imagen.

$$L_e = \rho_e \alpha L \cos^n \theta \quad (7-4)$$

Como en el caso de reflexión difusa, L es la luminosidad incidente y α el factor de atenuación de la luz en el medio. En el caso de la luz especular, se definen diferentes coeficientes de reflexión ρ_e para cada componente espectral, y, como en los casos anteriores, se calcula la luz reflejada por separado para cada una de ellas.

Suma de reflexiones

La luz reflejada por una superficie para cada componente espectral, y por tanto su coloración, es la suma de la reflexión de luz ambiental y de las reflexiones difusa y especular debidas a cada una de las N fuentes de luz presentes en la escena:

$$L_{TOTAL} = L_a + \sum_{i=1}^N L_{d_i} + \sum_{i=1}^N L_{e_i} \quad (7-5)$$

7.1.3.3 Suavizado de la imagen

Las superficies curvadas son dibujadas por el acelerador gráfico aproximándolas mediante una malla de facetas poligonales planas (ver 7.2.2). La calidad de la imagen aumenta con el número de facetas empleado, pero también lo hace el coste computacional. Por el contrario, una superficie aproximada con un número de polígonos reducido presenta una apariencia "facetizada", debido a los saltos bruscos de luminosidad entre polígonos adyacentes.

El método de suavizado de la imagen [Gouraud'71] soluciona el problema de las transiciones bruscas de luminosidad con un sombreado progresivo de los polígonos, calculado por medio de interpolación bilineal. De esta forma se consigue una imagen de calidad sin incrementar excesivamente el número de facetas en que se discretiza la superficie.

7.1.4 Memoria de pantalla (Frame-Buffer)

La memoria de pantalla -o *frame-buffer*- contiene la información de color de capa punto -o *pixel*- de la pantalla de la estación gráfica. Se define el número de planos -o profundidad- del *frame-buffer* como el número de bits que se utilizan

para representar el color de cada *pixel*. Si la profundidad del *frame-buffer* es n , el máximo número de colores que se pueden visualizar simultáneamente en la pantalla es 2^n .

Todos los colores visualizables se encuentran definidos, por medio de sus componentes verde, azul y roja, en una tabla de colores que contiene 2^n elementos. La información almacenada en el *frame-buffer* no es directamente el color del *pixel*, sino el índice del elemento de la tabla de colores que contiene el color del *pixel*.

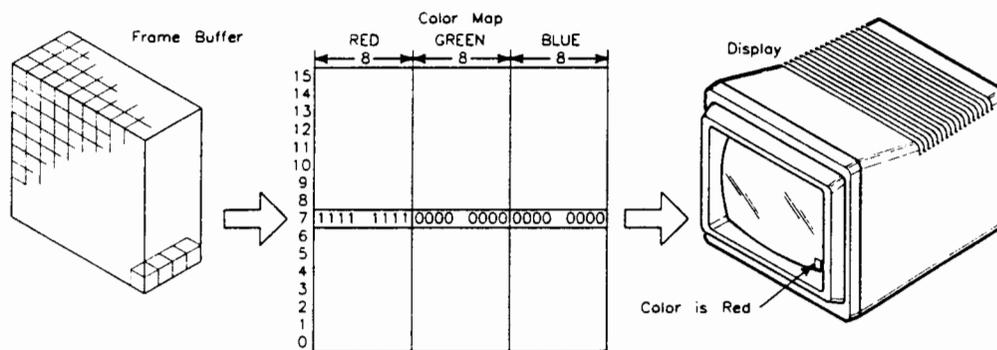


Figura 7-3: *Frame-buffer* y tabla de colores

Las profundidades -o número de planos- de *frame-buffer* más habituales son 1 bit (pantalla monocroma), 4 bits (16 colores), 6 bits (64 colores) y 8 bits (256 colores). Algunos sistemas gráficos poseen dos *frame-buffer* de 8 bits: en un momento dado sólo puede visualizarse el contenido de uno de ellos, mientras en el otro se renueva la imagen. Cambiando alternativamente el *frame-buffer* visualizado, se consigue presentar de forma instantánea imágenes completas, generadas en el *frame-buffer* oculto. Esta técnica se denomina "*double-buffering*".

7.1.5 Eliminación de partes ocultas (Z-Buffer)

Una fase muy importante en la generación de imágenes realistas es la eliminación de las partes ocultas o eclipsadas de los objetos.

La eliminación de las caras ocultas de los objetos -que se encuentran en la parte trasera, y por tanto no visible, de los mismos- se realiza dibujando únicamente aquellas facetas poligonales tales que el producto escalar de la normal exterior al polígono por la dirección de observación sea positivo.

La eliminación de las superficies eclipsadas por otros objetos es más complicada, y requiere algoritmos especializados. Estos se dividen en dos clases, según sean independientes o dependientes del dispositivo de salida. Los primeros eliminan las partes ocultas en el espacio objeto, antes de generar la imagen, mientras que los segundos trabajan sobre la propia imagen [Brunet'90]. Estos últimos, al ser dependientes del dispositivo de salida, optimizan los recursos disponibles y son más eficientes que los primeros.

La mayoría de los algoritmos se basan en una ordenación de todos los polígonos en que se descompone la escena según su distancia al observador: la imagen se genera dibujando en primer lugar los polígonos más alejados, y sobre ellos los más cercanos ("algoritmo del pintor").

El método que se ha utilizado en esta tesis para la visualización gráfica de blancos radar, y que contribuye de forma decisiva al cálculo de sección recta por procesado gráfico, es el denominado "algoritmo del *z-buffer*".

El *z-buffer* es una zona de memoria de pantalla que contiene la coordenada *Z* -o distancia al observador- de cada pixel. El proceso de eliminación de superficies eclipsadas es el siguiente: Para cada punto a dibujar en la pantalla, se compara el valor de la coordenada *Z* del nuevo punto con la del ya existente, almacenada en el *z-buffer*. Si la nueva *Z* es menor que la antigua, el nuevo punto está más cerca del observador, y se dibuja actualizando los valores del *frame-buffer* -color- y *z-buffer* -profundidad-. Si la nueva *Z* es mayor que la antigua, el nuevo punto está más lejos del observador y se descarta.

Dado que trabaja en el espacio de la imagen, el algoritmo del *z-buffer* es fuertemente dependiente del dispositivo de representación gráfica. La principal ventaja de este algoritmo frente a otros algoritmos independientes del dispositivo de salida es que no precisa una ordenación previa de los polígonos y superficies de la escena, pudiendo dibujarse éstos en cualquier orden. Por ello, el coste computacional del algoritmo del *z-buffer* es mucho menor, especialmente cuando el número de facetas en el modelado de los objetos es elevado.

Por otra parte, este algoritmo padece un serio inconveniente: la gran cantidad de memoria que requiere. Por ejemplo, un *z-buffer* con 16 bits para almacenar la información de profundidad de todos los pixels de una pantalla de 1024 x 1024 puntos ocupa 2 Megabytes de memoria.

7.2 GENERACION DE LA IMAGEN POR HARDWARE GRAFICO

Para el cálculo de sección recta en tiempo real es imprescindible generar una imagen del blanco de forma casi instantánea, lo cual se consigue mediante un

acelerador gráfico hardware. Para el desarrollo de esta tesis se ha utilizado la estación de trabajo HEWLETT-PACKARD 370 TURBO SRX. Sus características principales son:

- Hasta 3 *frame-buffer* de 1280 x 1024 pixels y 8 planos de profundidad, más 4 planos adicionales, que se utilizan como pantalla de texto con 16 colores disponibles superpuesta a la pantalla gráfica.
- *Z-buffer* de 1280 x 1024 pixels y 16 bits.
- Representación tridimensional en tiempo real de NURBS de hasta grado seis con *trimming curves*.
- Cálculo por hardware del modelo de iluminación local de Phong con sobreado de Gouraud, y reflexiones ambiental, difusa y especular, permitiendo definir hasta 16 fuentes luminosas puntuales o direccionales.

En esta sección se va a exponer el funcionamiento a nivel de diagrama de bloques del acelerador gráfico TURBO SRX de HEWLETT-PACKARD. El proceso de generación de los pixels del *frame-buffer* a partir de las primitivas de dibujo de la librería gráfica se muestra en la figura 7-4.

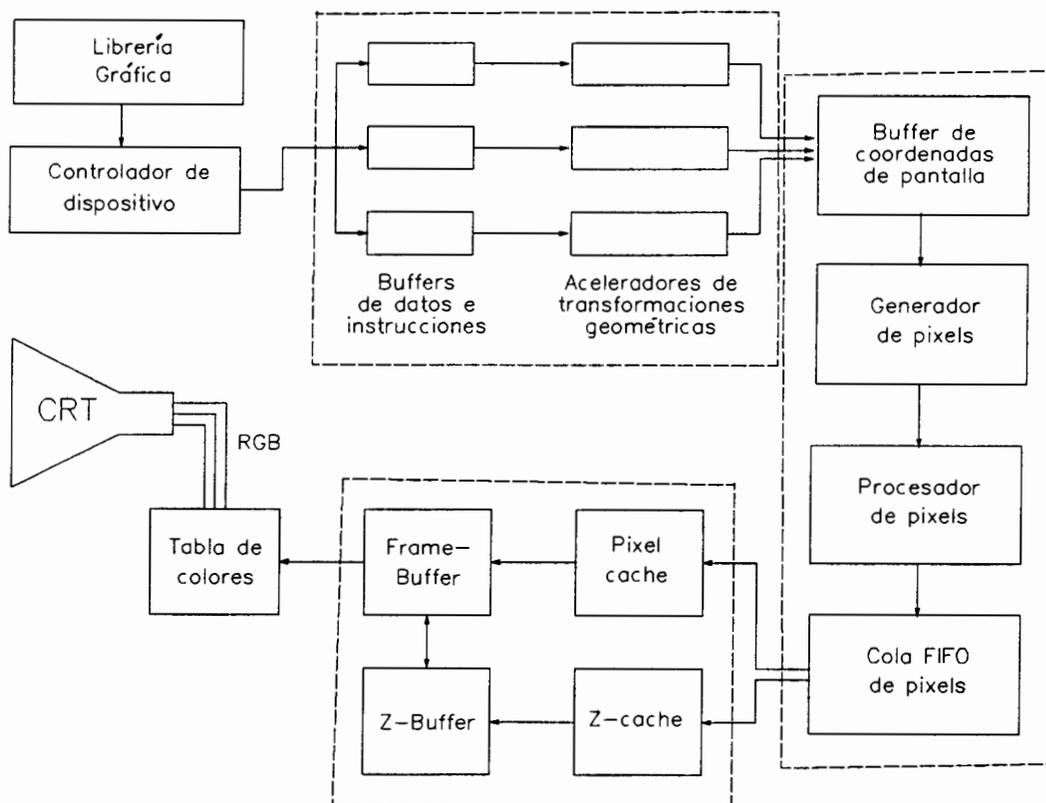


Figura 7-4: Generación de imágenes con hardware gráfico

El proceso se divide en tres partes claramente diferenciadas, que en la figura se encuentran enmarcadas con una línea de trazos:

- **Transformaciones geométricas:** Traducción de las instrucciones y datos expresados en coordenadas 3-D del objeto, proporcionados por la librería gráfica, en líneas y polígonos con coloreado y sombreado expresados en coordenadas 3-D de pantalla.
- **Generación de pixels:** Conversión de las líneas y polígonos en una lista de pixels.
- **Representación de los pixels:** Actualización de la información del *frame-buffer*, utilizando el *z-buffer* para eliminación de superficies ocultas.

7.2.1 Librería gráfica y controlador de dispositivo

La librería gráfica común a todas las estaciones de trabajo HEWLETT-PACKARD es la Librería Gráfica Starbase. Basada en los standards ANSI CGI y PHIGS, proporciona un lenguaje gráfico de alto nivel independiente del dispositivo de salida. Se incluyen primitivas avanzadas como NURBS, mallados, iluminación, imágenes realistas, visualización tridimensional, etc.

El lenguaje de programación utilizado para la implementación del software desarrollado en esta tesis es el lenguaje C, en el entorno HP-UX (UNIX), propio de las estaciones de trabajo HEWLETT-PACKARD.

Las primitivas de dibujo de la librería starbase, independientes del dispositivo de salida, son traducidas por un controlador de dispositivo en instrucciones propias del dispositivo gráfico utilizado. Estas pueden entrar directamente en el buffer de datos e instrucciones, o bien acumularse en una lista de visualización para su posterior procesado.

7.2.2 Transformaciones geométricas

El sub-sistema de transformaciones geométricas recibe los datos e instrucciones de la librería gráfica, utilizando un formato de coma flotante de 32 bits en el sistema de coordenadas 3-D definido por el programa de aplicación. Las superficies paramétricas NURB son convertidas en mallas de facetas poligonales planas, sobre las que realiza las transformaciones geométricas de punto de vista y calcula el coloreado y sombreado según el modelo de iluminación local de Phong. La información de salida corresponde a vértices de líneas y polígonos, con el color correspondiente, representados en formato entero de 16 bits, en el sistema de coordenadas 3-D de pantalla.

El acelerador de transformaciones geométricas propiamente dicho está constituido por 3 procesadores en coma flotante, que trabajan en paralelo controlados por una CPU microprogramada. Para cada uno de los tres aceleradores existe un buffer de entrada de datos e instrucciones. De esta forma, minimizando los tiempos de espera se garantiza el máximo paralelismo de los tres procesadores, entre sí y con el ordenador principal.

7.2.3 Generación de pixels

El hardware de generación de pixels transforma las líneas y polígonos, expresados en coordenadas 3-D de pantalla, en los correspondientes pixels a dibujar. Se divide en cuatro unidades: buffer de coordenadas de pantalla, generador de pixels, procesador de pixels y cola FIFO de salida.

Los datos de salida de los tres aceleradores se almacenan en un buffer de coordenadas de dispositivo, a través de una cola de prioridad que arbitra la unificación de tres salidas en una entrada. De esta forma, se consigue el máximo paralelismo entre los tres aceleradores y el generador de pixels.

El generador de pixels interpola linealmente, y de forma simultánea, las 6 coordenadas de pantalla que describen la posición (X,Y,Z) y el color (R,G,B) de los vértices de líneas y polígonos proporcionados por las transformaciones geométricas. El resultado es una lista con todos los pixels necesarios para dibujar cada línea o polígono, con variación bilineal del color y sombreado (técnica de Gouraud).

Un procesador de pixels realiza tareas complementarias para la generación de imágenes realistas, como, por ejemplo: simulación de paletas de colores mediante tramas de pixels (*dithering*), eliminación de pixels para visualización realista de superficies semitransparentes, corrección en gamma para compensar la respuesta no lineal del ojo humano, implementación de un sistema de ventanas hardware, representación de texto simulando un terminal alfanumérico, etc.

Como los intervalos de salida del generador de pixels son variables, mientras que el tiempo requerido por el *frame-buffer* para procesar cada bloque de pixels es constante, es necesaria una cola de salida de pixels FIFO (primero en entrar, primero en salir). La cola FIFO minimiza los tiempos de espera, tanto del generador de pixels para escritura como del *frame-buffer* para lectura.

7.2.4 Visualización de la imagen

Para la visualización de la imagen en tiempo real, es muy importante que el proceso de escritura en el *frame-buffer* sea muy rápido. Sin embargo, no es económicamente rentable la utilización de memoria RAM de alta velocidad en

cantidades tan elevadas como requiere el *frame-buffer*. Por ello, se utiliza un *pixel cache* que acepta la lista de pixels proveniente de la cola FIFO, a muy alta velocidad, y escribe los pixels en el *frame-buffer* en paralelo en bloques de 16, a velocidad 16 veces inferior.

La eliminación de superficies ocultas se realiza con ayuda del *z-buffer*, al cual se accede también a través de un *cache* de coordenadas Z.

El *frame-buffer* se lee 60 veces por segundo para refrescar el contenido de la pantalla. Con objeto de maximizar el rendimiento, la lectura se realiza simultáneamente con la escritura. El dato contenido en el *frame-buffer* para cada pixel es el índice a una tabla de colores, implementada en memoria de muy alta velocidad, que contiene las componentes RGB del color a representar. Esta última información se convierte en voltajes analógicos que controlan los tres cañones -rojo, verde y azul- del tubo de rayos catódicos (CRT).

7.2.5 Primitivas especiales implementadas en hardware

Como se ha indicado anteriormente, el acelerador gráfico es capaz de representar superficies paramétricas NURB mediante una conversión a polígonos. El grado de resolución deseado puede especificarse por software, con lo que se determina el número de facetas planas en las que se discretiza cada segmento de la curva *B-spline* comprendido entre dos nodos. Esta resolución puede llegar a ser tan elevada que cada faceta ocupe uno, o muy pocos, pixels. El acelerador gráfico también es capaz de procesar las *trimming curves* definidas sobre las superficies B-spline.

Otra característica importante es la generación de mallas de facetas cuadrangulares o triangulares, optimizando el procesamiento de los vértices compartidos por varios polígonos.

El procesamiento en tiempo real de primitivas de tan alto nivel como superficies paramétricas o mallados se consigue gracias a una CPU microprogramada, que controla los tres coprocesadores en coma flotante aceleradores de las transformaciones geométricas. El microprograma se almacena en una RAM de 32 Kpalabras, y proviene del controlador de dispositivo Starbase.

PARTE III

PROCESADO GRAFICO EN TIEMPO REAL

CAPITULO 8

OPTICA GEOMETRICA

El presente capítulo inicia la parte III exponiendo las primeras ideas en el desarrollo de esta tesis para la predicción de sección recta por procesado gráfico en tiempo real. Estas ideas se basan en la aproximación de óptica geométrica, la más simple y con mayores limitaciones de las aproximaciones de alta frecuencia (ver cap. 4). Según la teoría de óptica geométrica, se puede calcular la sección recta a partir del conocimiento de los puntos de reflexión especular del blanco.

La idea clave, que inició el desarrollo de la presente tesis, es la detección de los puntos de reflexión especular identificándolos con los puntos brillantes de una visualización realista del blanco. Un procesado gráfico adecuado de la imagen del blanco presente en la pantalla de la estación gráfica permite obtener el valor de la sección recta según la aproximación de óptica geométrica.

Dadas las grandes limitaciones de esta aproximación (ver 4.1), más otras añadidas inherentes al procesado gráfico, continuó la búsqueda de nuevos algoritmos para predecir la sección recta en tiempo real, lo que condujo al desarrollo de métodos de procesado gráfico para implementar las aproximaciones de óptica física y teoría física de la difracción. De esta forma, se superaron las principales limitaciones de la aproximación de óptica geométrica, y, con el desarrollo de un algoritmo para el cálculo de las reflexiones múltiples, se completó el paquete software para la predicción de sección recta en alta frecuencia.

A pesar de quedar totalmente obsoleto el algoritmo inicial de óptica geométrica, se ha decidido incluirlo en este trabajo. El principal motivo es presentar una visión global completa del desarrollo de la idea inicial, que, a través del procesado gráfico, ha permitido obtener la sección recta en alta frecuencia de blancos radar complejos en tiempo real.

8.1 DETECCION DE PUNTOS BRILLANTES MEDIANTE VISUALIZACION GRAFICA REALISTA

La idea inicial surgió al observar la visualización realista de un avión generada por el software de modelado geométrico de sólidos (ver cap. 6). Simulando una reflexión especular muy directiva en las superficies del avión (ver 7.1.3), aparecen unos puntos brillantes en la imagen, correspondientes a los puntos de reflexión especular que cumplen la ley de Snell.

Para aplicar esta idea al problema de sección recta radar, solamente hay que situar una fuente de iluminación direccional (onda plana) en la misma dirección que el radar transmisor, y situar al observador en la posición del radar receptor. Ambas direcciones coinciden en el caso monoestático, al que se dedica la presente tesis. De esta forma, pueden identificarse los puntos de reflexión especular de óptica geométrica con los puntos brillantes de la imagen realista del blanco.

La única diferencia entre ambas situaciones reside en la frecuencia de la onda electromagnética incidente: frecuencia óptica (casi infinita) en un caso y frecuencia de microondas en el otro. Un procesado adecuado de la imagen debería permitir calcular la sección recta según una aproximación asintótica que supusiera frecuencia infinita, como es el caso de la aproximación de óptica geométrica.

Así se soluciona uno de los mayores problemas de la aplicación de la técnica de óptica geométrica a blancos muy complejos: para unas direcciones de iluminación y observación dadas, es muy difícil detectar por métodos numéricos clásicos los puntos de reflexión especular procesando la base de datos de modelado geométrico. Por el contrario, el procesado gráfico del *frame-buffer* (ver 7.1.4) y *z-buffer* (ver 7.1.5) permite obtener muy rápidamente las coordenadas de pantalla de los puntos de reflexión especular.

En la figura 8-1 se muestran los puntos brillantes en dos imágenes realistas de un avión genérico.



Figura 8-1: Visualización realista tridimensional de un avión genérico y puntos de reflexión especular

8.2 CALCULO DE SECCION RECTA: OPTICA GEOMETRICA

Según la aproximación de óptica geométrica, la sección recta radar de una superficie curvada se calcula a través del producto de los radios principales de curvatura de la superficie en el punto de reflexión especular:

$$\sigma = \pi \rho_1 \rho_2 \quad (8-1)$$

Una vez localizados los puntos brillantes en la imagen realista del blanco, basta calcular los radios principales de curvatura de la superficie. Precisamente en el cálculo de los radios principales de curvatura de una superficie arbitrariamente compleja reside la segunda gran dificultad de la aproximación de óptica geométrica, después de la detección de los puntos de reflexión especular.

La primera idea fué obtener los radios de curvatura a partir de la información geométrica de la superficie almacenada en la base de datos. Sin embargo, el método se descartó de entrada debido a su gran complejidad.

La segunda idea consistía en el cálculo directo de los radios de curvatura a partir del procesado gráfico de la pantalla. Aunque el algoritmo era prometedor, padecía algunos problemas, por lo que no llegó a implementarse al surgir una idea mejor.

La tercera y definitiva idea evitaba las dificultades del cálculo de los radios principales de curvatura mediante la obtención directa de la sección recta por procesado gráfico. El algoritmo surgió al observarse que el área del punto brillante era proporcional al producto de radios de curvatura, con lo que bastaba contar el número de pixels con luminosidad máxima.

Cuando el blanco es complejo, suele presentar varios puntos de reflexión especular. En este caso deben sumarse las contribuciones de todos ellos de forma coherente, teniendo en cuenta la fase por diferencia de caminos debida a la distancia al observador, la cual se encuentra almacenada en el *z-buffer* (ver 7.1.5).

8.2.1 Obtención de radios de curvatura en base de datos

El algoritmo más inmediato para calcular la sección recta consiste en localizar las coordenadas de los puntos brillantes procesando gráficamente la pantalla y, a partir de ellas, calcular los radios de curvatura utilizando la información en la base de datos de modelado geométrico. Los pasos a seguir son:

- Localizar puntos brillantes en el *frame-buffer* y obtener sus coordenadas (x, y) de pantalla.
- Leer en el *z-buffer* la coordenada z de pantalla.

- Realizar las transformaciones geométricas necesarias para obtener las coordenadas 3-D del punto brillante en el espacio objeto a partir de las coordenadas (x, y, z) de pantalla.
- Acceder a la base de datos de modelado geométrico para obtener la matriz de puntos de control y los vectores de nodos de la superficie NURB (ver 6.3) en la que se encuentra el punto brillante.
- Calcular el valor de los parámetros de la superficie paramétrica en el punto brillante.
- Calcular todas las derivadas segundas de la expresión paramétrica de la superficie y, a partir de ellas, obtener los radios de curvatura.

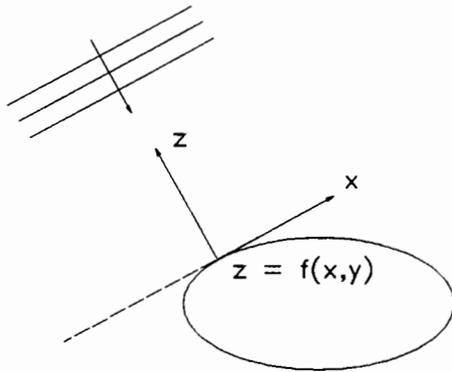
La evidente complejidad del método no compensa las grandes limitaciones de la aproximación de óptica geométrica, por lo que este algoritmo no se ha llegado a implementar.

8.2.2 Cálculo de radios de curvatura por procesado gráfico

El cálculo de los radios de curvatura mediante procesado gráfico de la pantalla se basa en el hecho de que el *z-buffer* contiene la representación matemática explícita de la superficie del blanco.

La explicación es muy sencilla: Dado que la imagen en pantalla es una proyección del objeto en un plano perpendicular a la dirección de observación, se definen las coordenadas de pantalla (x, y, z) de cada pixel (ver 7.1.5), en las que Z es la distancia al observador y el par (x, y) la posición del pixel en la pantalla 2-D. El *z-buffer* contiene la coordenada z para cada posición (x, y) de pantalla, lo que equivale a un muestreo en parrilla rectangular de la función explícita $z = f(x, y)$ que define a la superficie del objeto en un sistema de coordenadas 3-D con el eje z en la dirección de observación.

En el caso de sección recta radar monoestática, en los puntos de reflexión especular la normal a la superficie se encuentra en la dirección de observación (ver 4.1). En estas condiciones, el eje z de la función explícita $z = f(x, y)$ es perpendicular a la superficie (ver fig. 8-2), y resulta que el radio de curvatura de la superficie en una dirección cualquiera es el inverso de la derivada segunda de la función explícita en esta dirección.



$$\rho = - \frac{1}{\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}} \quad (8-2)$$

Figura 8-2: Radio de curvatura en un punto de reflexión especular

La derivada segunda puede calcularse fácilmente por diferencias finitas a partir del muestreo de la función explícita en el *z-buffer*:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{z_{i+1} - 2z_i + z_{i-1}}{(\Delta x)^2} \quad (8-3)$$

Con este método es muy sencillo calcular los radios de curvatura en las direcciones x (horizontal en la pantalla) e y (vertical en la pantalla). Sin embargo, las direcciones principales de curvatura no tienen por qué coincidir con x ó y . Por ello, deben calcularse los radios de curvatura en el punto de reflexión especular en todas direcciones y tomar los valores máximo y mínimo obtenidos, correspondientes a los radios principales. Este procedimiento presenta algunas dificultades debido al muestreo en parrilla rectangular de la función explícita en el *z-buffer*.

Un problema adicional reside en que algunas configuraciones de la estación gráfica utilizada, HEWLETT-PACKARD 370 Turbo SRX, únicamente permiten el acceso al byte menos significativo de los 16 bits del *z-buffer*. Utilizando únicamente el byte menos significativo, el cálculo de los radios de curvatura según la expresión (8-3) presentará errores importantes cuando los valores del byte más significativo en z_{i+1} , z_i y z_{i-1} no sean iguales.

8.2.3 Cálculo directo de RCS por procesamiento gráfico

Una idea muy intuitiva que facilita el cálculo de sección recta según la ecuación (8-1) se basa en que cuando las superficies presentan reflexión especular el producto de radios principales de curvatura es proporcional al área del punto brillante en la imagen realista del blanco. En este caso, la luminosidad de los pixels de la imagen es $L = \cos^n \theta$, donde θ es el ángulo formado por la normal a la superficie y la dirección del radar (ver fig. 8-3).

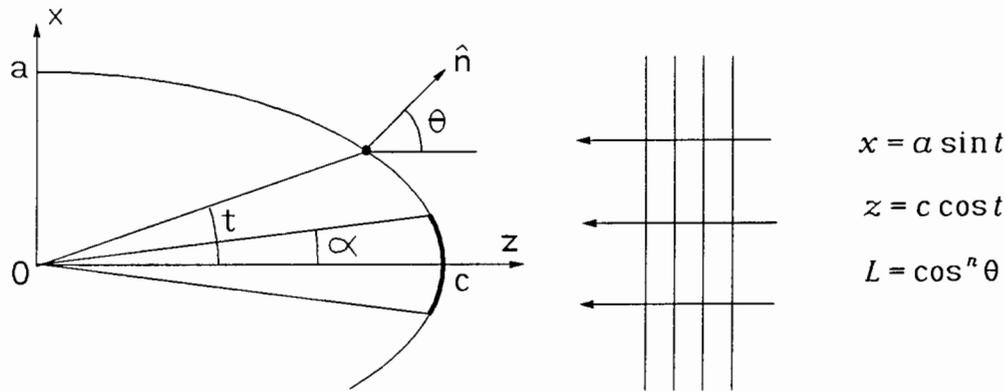


Figura 8-3: Punto brillante en un elipsoide. Corte 2-D con plano $x-z$

Para comprobar matemáticamente la validez de esta idea intuitiva, vamos a analizar el caso de un elipsoide de semiejes a , b , c en direcciones x , y , z respectivamente. Si el radar se encuentra en dirección z , el punto brillante aparece en $x = y = 0$, $z = c$ y los radios principales de curvatura valen $\rho_1 = a^2/c$ en dirección x y $\rho_2 = b^2/c$ en y , con lo que la sección recta según (8-1) es:

$$\sigma = \pi \frac{a^2 b^2}{c^2} \quad (8-4)$$

Dada la geometría particular del problema, podemos calcular por separado los dos radios principales de curvatura considerando dos problemas bidimensionales, uno en x y el otro en y . La figura 8-3 muestra el problema en x , mientras que el problema en y es análogo.

Para calcular el área del punto brillante se considera que forman parte del mismo aquellos pixels cuya luminosidad L sea mayor que un umbral U . De esta forma, la sección recta será proporcional al número de pixels con luminosidad $U < L \leq 1$. Si α es el valor del parámetro t para el que la luminosidad es justamente U (ver fig. 8-3), tenemos un punto brillante de longitud en x :

$$N_x = 2a \sin \alpha \quad (8-5)$$

Para obtener la relación entre la longitud del punto brillante N_x , el umbral de luminosidad U y los semiejes del elipsoide, en primer lugar es necesario relacionar el ángulo θ , del que depende la luminosidad, con el parámetro t , del que depende N_x al ser α un valor particular de t :

$$\tan \theta = \frac{dz}{dx} = \frac{dz/dt}{dx/dt} = \frac{-c \sin t}{a \cos t} = -\frac{c}{a} \tan t \quad (8-6)$$

Como la luminosidad depende del coseno de θ , expresamos éste en función de la tangente:

$$\cos^2 \theta = \frac{1}{1 + \tan^2 \theta} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + c^2 \tan^2 t} \quad (8-7)$$

y como para $t = \alpha$ la luminosidad es $L = U$, resulta:

$$\cos^2 \theta = U^{2/n} \quad (8-8)$$

Igualando (8-7) y (8-8) se obtiene la relación buscada entre α y U :

$$\tan^2 \alpha = \frac{\alpha^2}{c^2} (U^{-2/n} - 1) \quad (8-9)$$

Y, finalmente, se sustituye en (8-5) expresando el seno en función de la tangente, con lo que se obtiene la longitud del punto brillante en el eje x :

$$N_x^2 = 4\alpha^2 \sin^2 \alpha = 4\alpha^2 \frac{\tan^2 \alpha}{1 + \tan^2 \alpha} = \frac{4\alpha^4 (U^{-2/n} - 1)}{c^2 + \alpha^2 (U^{-2/n} - 1)} \quad (8-10)$$

Análogamente, la longitud del punto brillante en el eje y es:

$$N_y^2 = \frac{4b^4 (U^{-2/n} - 1)}{c^2 + b^2 (U^{-2/n} - 1)} \quad (8-11)$$

y como el área del punto brillante es el área de una elipse de ejes N_x y N_y , resulta:

$$A = \pi \frac{N_x}{2} \frac{N_y}{2} = \pi \frac{\alpha^2 b^2 (U^{-2/n} - 1)}{\sqrt{c^2 + \alpha^2 (U^{-2/n} - 1)} \sqrt{c^2 + b^2 (U^{-2/n} - 1)}} \quad (8-12)$$

Esta expresión será proporcional al producto de radios principales de curvatura $\alpha^2 b^2 / c^2$ si $U^{-2/n} \approx 1$. Para ello es necesario que $U \rightarrow 1$ o bien que $n \rightarrow \infty$. En ambos casos $\alpha \rightarrow 0$ y, por tanto, el punto brillante en la imagen del blanco es de tamaño muy reducido. Aproximando la exponencial por su desarrollo de Taylor para argumentos pequeños

$$U^{-2/n} = e^{-\ln U \frac{2}{n}} \rightarrow 1 - \frac{2}{n} \ln U \quad (8-13)$$

y sustituyendo en (8-12) resulta:

$$A = \pi \frac{\alpha^2 b^2}{c^2} \frac{2 |\ln U|}{n} \quad (8-14)$$

que es proporcional a la sección recta del elipsoide (8-4). Inversamente, se puede expresar la sección recta en función del área del punto brillante:

$$\sigma = A \frac{n}{2 |\ln U|} \quad (8-15)$$

Para el cálculo de sección recta según óptica geométrica por procesado gráfico se ha implementado la ecuación (8-15), en la que el área del punto brillante A se calcula de forma muy sencilla contando el número de pixels con luminosidad mayor que U .

Antes de presentar los resultados en el apartado 8.4, es necesario estudiar el margen de validez del método.

8.3 LIMITACIONES Y MARGENES DE VALIDEZ

El algoritmo presentado en el apartado 8.2.3 para el cálculo de sección recta mediante procesado gráfico no es aplicable en todas las situaciones ni para todo tipo de objetos. En general, la sección recta es proporcional al área del punto brillante sólo para un cierto margen de variación de los radios principales de curvatura en el punto de reflexión especular.

El margen de validez del método depende de:

- Margen de aplicación de la aproximación de óptica geométrica.
- Margen de aplicación del algoritmo de procesado gráfico. En el caso de un elipsoide, viene dado por la validez de la aproximación (8-13).
- Limitaciones inherentes a la discretización del algoritmo para su implementación en hardware gráfico, debidas a dos factores:
 - a) Escala de luminosidad discreta con número finito de tonos.
 - b) Número de pixels en pantalla finito.

En los siguientes apartados vamos a analizar por separado las tres causas que influyen en el margen de aplicabilidad del algoritmo.

8.3.1 Limitaciones de óptica geométrica

La teoría de óptica geométrica no tiene en cuenta la naturaleza ondulatoria de los campos (ver 4.1), lo que equivale a considerar ondas electromagnéticas de frecuencia infinita. Por ello, no es capaz de predecir los fenómenos de difracción, sino únicamente la reflexión especular en superficies de curvatura suave.

El margen de aplicación de la teoría de óptica geométrica puede resumirse en los siguientes puntos:

- Sólo es válida para reflexión en superficies curvadas con los dos radios principales de curvatura en el punto de reflexión especular finitos y mayores que la longitud de onda.
 - a) No es válida en superficies planas, cilíndricas o cónicas.
 - b) No es válida en aristas o bordes con radio de curvatura pequeño.
- No proporciona resultados dependientes de la polarización.
- Sólo es válida en la dirección de reflexión especular.

8.3.2 Limitaciones del procesado gráfico

El método de procesado gráfico se basa en una suposición intuitiva: el área del punto brillante es proporcional al producto de radios de curvatura, y, por tanto, a la sección recta (ec. 8-14).

El margen de validez de la suposición anterior está limitado por la aproximación (8-13) de la exponencial de argumento pequeño. Para evaluar el error relativo, tomamos el siguiente término del desarrollo de Taylor de la exponencial:

$$U^{-\frac{2}{n}} = e^{-\frac{2}{n} \ln U} \rightarrow 1 - \frac{2}{n} \ln U + \frac{1}{2} \left(\frac{2}{n} \ln U \right)^2 \quad (8-16)$$

El error relativo al aproximar (8-12) por (8-14) es, en el numerador,

$$\Delta = \frac{|\ln U|}{n} \quad (8-17)$$

y en el denominador

$$\Delta = \frac{\alpha^2 + b^2}{c^2} \frac{|\ln U|}{n} \quad (8-18)$$

con lo que el error relativo total en (8-14) es:

$$\Delta = \frac{c^2 - a^2 - b^2}{c^2} \frac{|\ln U|}{n} \quad (8-19)$$

De la expresión (8-19) se pueden extraer varias conclusiones interesantes: el error disminuye

- al aproximarse el umbral U a su valor máximo, la unidad.
- al aumentar la direccionalidad de la reflexión especular n .
- al aumentar la excentricidad del elipsoide c/a ó c/b , hasta que el error deja de disminuir cuando $c \gg a, b$.

En los tres casos el área del punto brillante disminuye. Teniendo en cuenta que según (8-14) esta última es proporcional a

$$A \propto \frac{|\ln U|}{n} \quad (8-20)$$

se explica que al variar los parámetros n ó U el error relativo varíe proporcionalmente con el área del punto brillante.

En la sección 8.4 se presentan resultados que permiten evaluar el error cometido en la expresión (8-14) en función de la excentricidad del elipsoide, el umbral de luminosidad U y el exponente de reflexión especular n .

8.3.3 Limitaciones del hardware gráfico

La implementación en hardware gráfico de la ecuación (8-15) también presenta un margen de validez limitado debido al número finito de pixels y de valores de luminosidad en la imagen del blanco.

Cuando el área del punto brillante se reduce en exceso, el número de pixels contenidos en el punto brillante es demasiado pequeño y se comete un error de discretización. En el límite, el área mínima del punto brillante que se puede representar es un solo pixel y la sección recta calculada por procesado gráfico no puede disminuir más si aumenta la excentricidad del elipsoide.

El número de pixels en el punto brillante es (de 8-14):

$$A_{\text{pixels}} = \frac{P_x P_y}{2a 2b} \geq \frac{a^2 b^2 |\ln U|}{c^2 n} \quad (8-21)$$

donde P_x y P_y son el número de pixels del *frame-buffer* en x y en y respectivamente. Para que el número de pixels en el punto brillante sea mayor o igual que uno, de 8-21 se deduce que el valor máximo de excentricidad en x ó en y es:

$$\frac{c}{a} \frac{c}{b} \leq P_x P_y \frac{\ln U}{2n} \quad (8-22)$$

Por otra parte, cuando el elipsoide es muy achatado (con $a, b \gg c^2$), para mantener un error relativo pequeño según (8-19) el umbral U debe estar muy próximo a la unidad y el exponente n ser muy grande. En caso contrario, en (8-12) se hace $U^{-2/n} \gg 1$ y el área del punto brillante tiende a πab , de forma que el punto brillante ocupa toda la imagen del elipsoide.

Sin embargo, los valores de n y U no pueden aumentar arbitrariamente, pues se encuentran acotados por el hardware gráfico:

- Si el valor de n se almacena en un registro de p bits, el máximo valor de n es

$$n_{\max} = 2^p - 1 \quad (8-23)$$

En el acelerador gráfico HP Turbo SRX el número de bits utilizados para representar n es 14, por lo que el máximo exponente n es 16383.

- El umbral U se encuentra acotado superiormente por el número de colores representables en el *frame-buffer* N_c igual al tamaño de la tabla de colores hardware del acelerador gráfico. Si se define una escala de colores de luminosidad linealmente creciente, el valor máximo del umbral es:

$$U_{\max} = \frac{N_c - 1}{N_c} \quad (8-24)$$

y, si $N_c \gg 1$, el mínimo valor absoluto de $\ln U$ es:

$$|\ln U| \geq \frac{1}{N_c} \quad (8-25)$$

Utilizando los valores de n y U máximos, el mínimo error relativo es:

$$\Delta_{\min} = \frac{c^2 - a^2 - b^2}{c^2} \frac{1}{N_c n_{\max}} \quad (8-26)$$

8.3.4 Margen de validez

Para un par de valores fijos de la direccionalidad de la reflexión especular n y del umbral de luminosidad U , existe un margen de variación de la excentricidad del elipsoide para el cual la ecuación (8-16) implementada en hardware gráfico predice correctamente la sección recta.

Para un elipsoide de revolución es $a = b$, y definimos la excentricidad

$$e = \frac{c}{a} = \frac{c}{b} \quad (8-27)$$

El margen de variación de excentricidad está acotado inferiormente por el error (8-18) en el denominador de (8-14) y superiormente por la resolución en la pantalla gráfica (8-22). De ambas ecuaciones resulta:

$$\frac{2}{\Delta_{\max}} < e^2 \frac{n}{|\ln U|} < \frac{P_x P_y}{2} \quad (8-28)$$

donde Δ_{\max} es el máximo error permitido al crecer excesivamente el punto brillante y ocupar casi toda la imagen del elipsoide.

En (8-28) se puede observar que el margen de variación del tamaño del punto brillante en la pantalla, que según (8-14) es proporcional a $e^2 n / |\ln U|$, se encuentra limitado por dos valores fijos. De esta forma, el máximo error permitido y el hardware gráfico determinan la relación entre el máximo y el mínimo de excentricidad. Por ejemplo, en el acelerador gráfico HP Turbo SRX el número de pixels en x es $P_x = 1280$ y en y es $P_y = 1024$, y si se tolera un error máximo $\Delta_{\max} = 10^{-2}$, resulta una relación e_{\max} / e_{\min} del orden de 3000.

Una vez fijada la relación e_{\max} / e_{\min} , es posible variar los límites del margen de validez e_{\max} y e_{\min} actuando sobre los parámetros n y U . Así se reducen los valores de excentricidad disminuyendo el tamaño del punto brillante (8-20), o bien se pueden aumentar haciendo crecer dicho punto brillante. De esta forma se compensan las variaciones en el tamaño del punto brillante introducidas por la excentricidad, manteniéndolo entre los límites impuestos por (8-28).

Para conseguir resultados de sección recta correctos para el intervalo más amplio posible de radios de curvatura, es necesario que el límite inferior del margen de validez (8-28) sea menos restrictivo que el debido a la aproximación de óptica geométrica. Esto puede conseguirse con los valores adecuados de los parámetros n y U . Por otra parte, si la resolución del terminal gráfico es suficiente, el máximo radio de curvatura -determinado por (8-28)- será varios miles de veces mayor que el mínimo. Este intervalo de aplicación del algoritmo incluye prácticamente todos

los radios de curvatura que se suelen encontrar en blancos radar reales, a excepción de los radios de curvatura infinitos, a los que no es aplicable la aproximación de óptica geométrica.

En conclusión, es importante reseñar que, aunque el procesado gráfico introduce unas limitaciones en el margen de validez del método, éstas pueden ser menos restrictivas que las debidas a la aproximación de óptica geométrica.

8.4 PRUEBAS Y RESULTADOS DE VALIDACION

Sólo se han obtenido resultados de validación para objetos sencillos, como elipsoides y esferas. Ello es debido al inmediatamente posterior desarrollo de un algoritmo de procesado gráfico de óptica física (ver cap. 9), que ha dejado obsoleto al algoritmo de óptica geométrica. Sin embargo, el procesado gráfico de óptica geométrica es aplicable a objetos complejos con múltiples puntos de reflexión especular, mediante una suma coherente de las contribuciones de cada uno de ellos.

En la sección 8.4.1 se valida el algoritmo de cálculo de la sección recta por procesado gráfico de un solo punto brillante y se determina el margen de validez del método en función de los parámetros umbral de luminosidad y direccionalidad de la reflexión especular.

Por otra parte, en la sección 8.4.2 se calcula la sección recta sumando coherentemente las contribuciones de dos puntos brillantes, con objeto de validar la aplicación del algoritmo a objetos complejos.

8.4.1 Un punto brillante

Para validar el algoritmo de cálculo de la aproximación de óptica geométrica mediante procesado gráfico se ha obtenido la sección recta en dirección z de un elipsoide de revolución de semiejes $a = b$ fijos, en función de la excentricidad (8-27).

Las gráficas se representan en escala logarítmica, de forma que en la expresión de óptica geométrica

$$\sigma = \pi \frac{a^2 b^2}{c^2} \quad (8-4)$$

la sección recta en función de la excentricidad e es una recta de pendiente -2.

En la figura 8-4 se muestra la sección recta del elipsoide para excentricidades entre 10^{-2} y 10^2 , con un valor del umbral de luminosidad $U = 254/255$. Se trazan varias curvas para distintos valores n de direccionalidad de la reflexión especular, así como la recta de pendiente -2 definida por la ecuación (8-4).

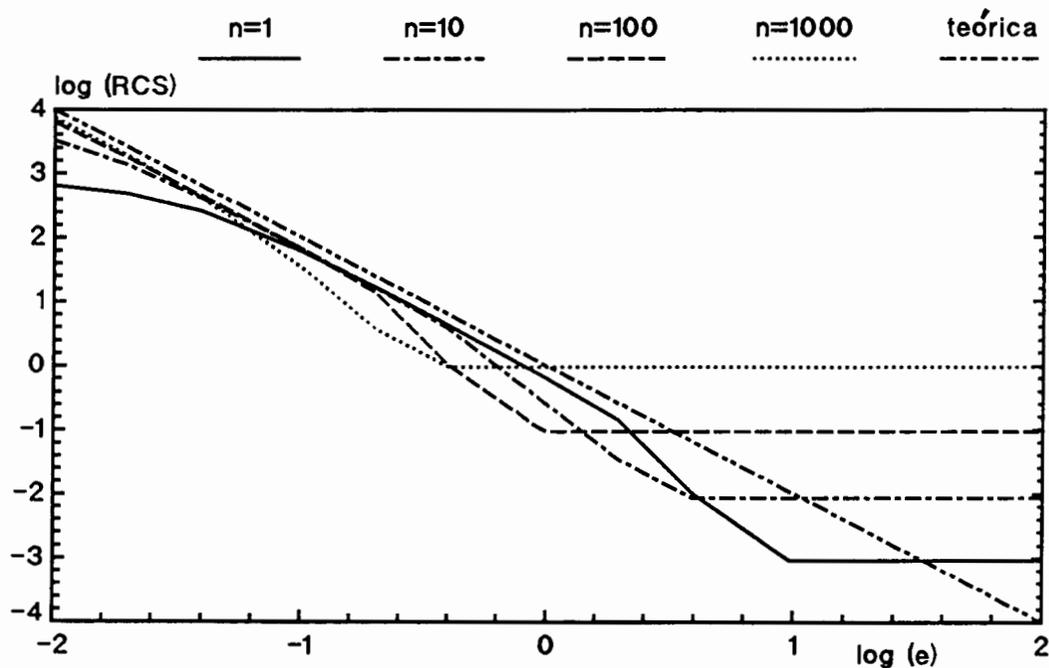
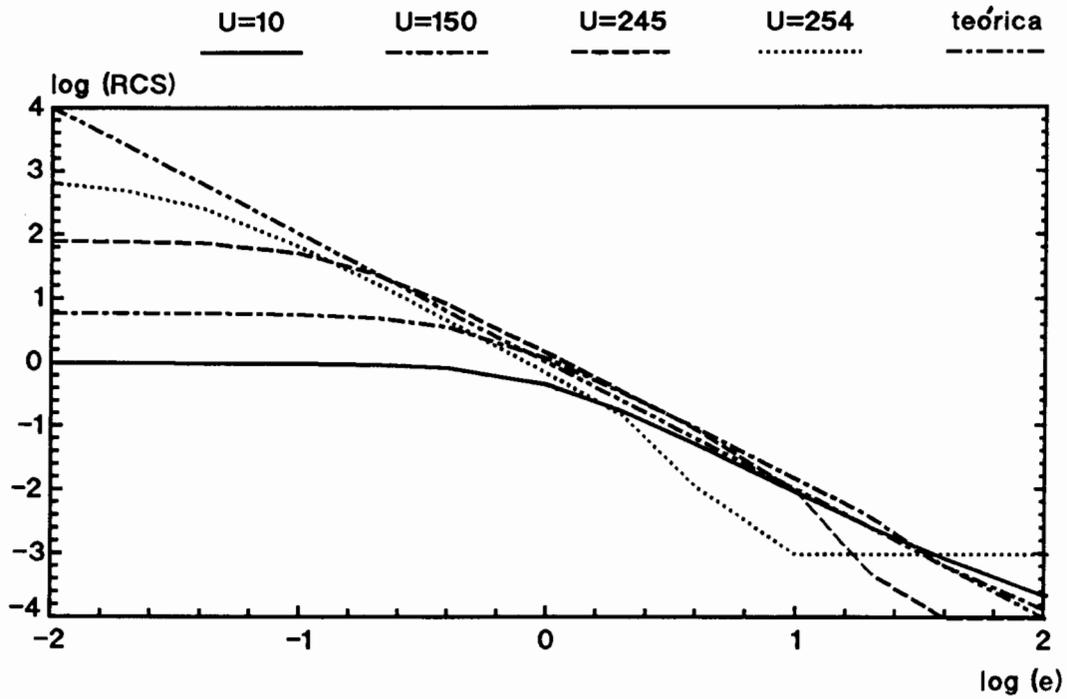


Figura 8-4: Sección recta de un elipsoide en función de la excentricidad para $U = 254/255$ y distintos valores de n

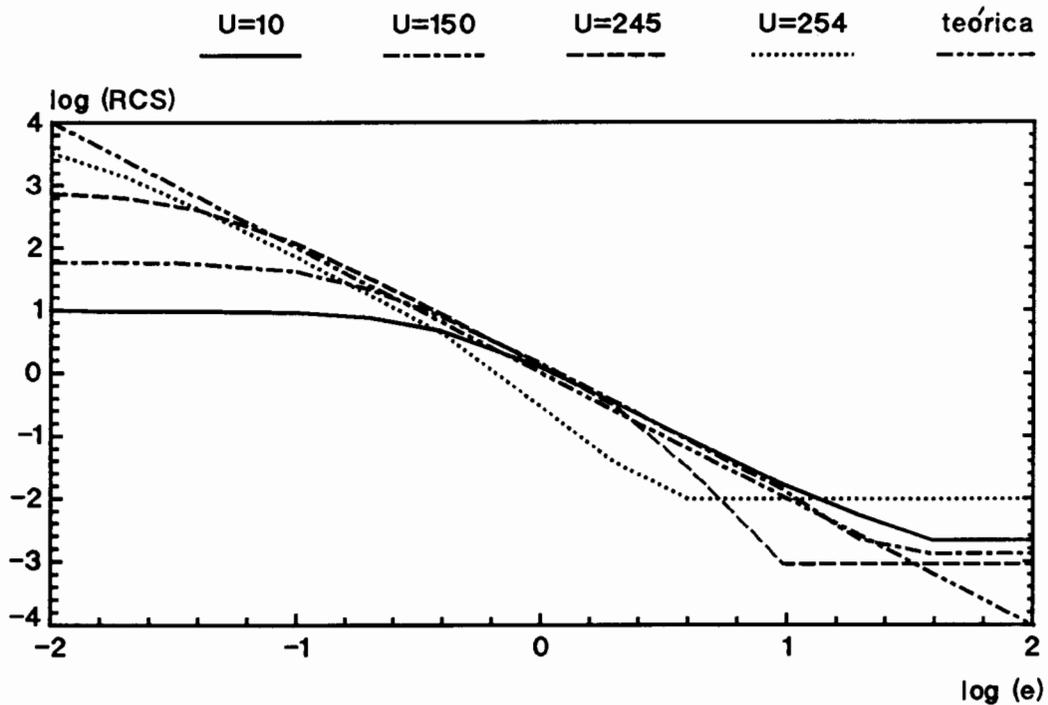
Se ha tomado el máximo valor del umbral con objeto de reducir al mínimo el tamaño del punto brillante. Las curvas de sección recta se aproximan a la recta de pendiente -2 cuando la excentricidad se encuentra dentro del margen de validez (8-28). Puede observarse que el máximo valor de excentricidad, al que corresponde un punto brillante de un solo pixel, es el que predicen las ecuaciones (8-22) y (8-28), y como su variación en función de n es lineal.

Las figuras 8-5, 8-6, 8-7 y 8-8 muestran la sección recta del elipsoide para distintos valores de U , expresados en términos de una escala de luminosidad linealmente creciente de $N_e = 256$ elementos. La máxima luminosidad es 255, por lo que el máximo umbral de luminosidad es 254/255.

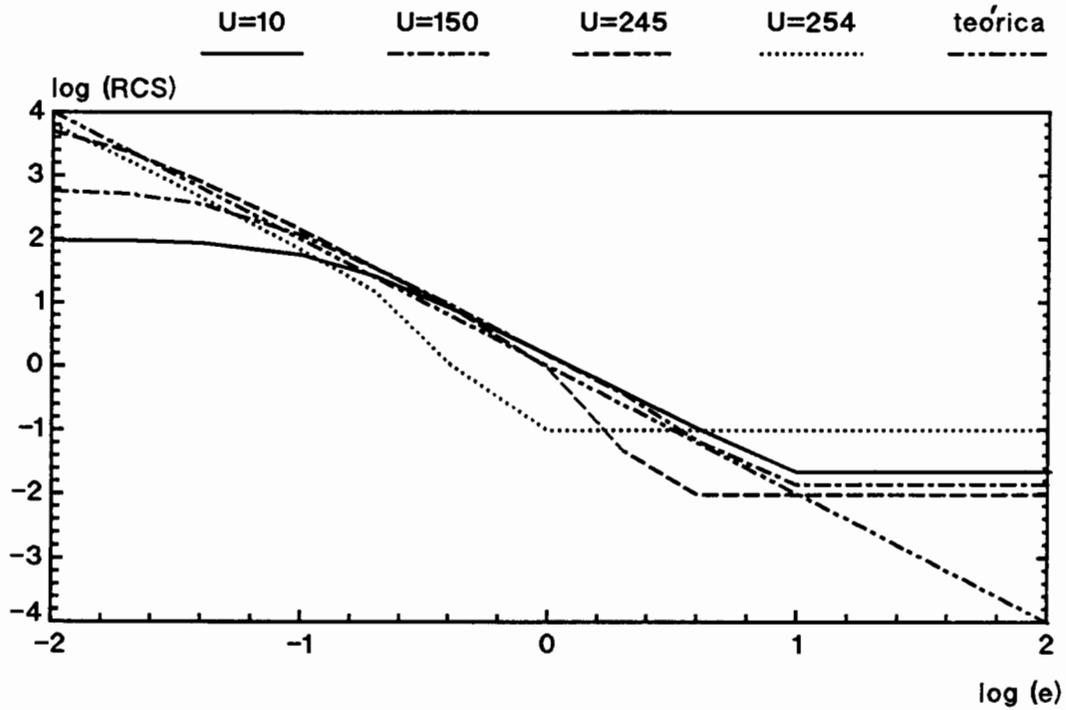
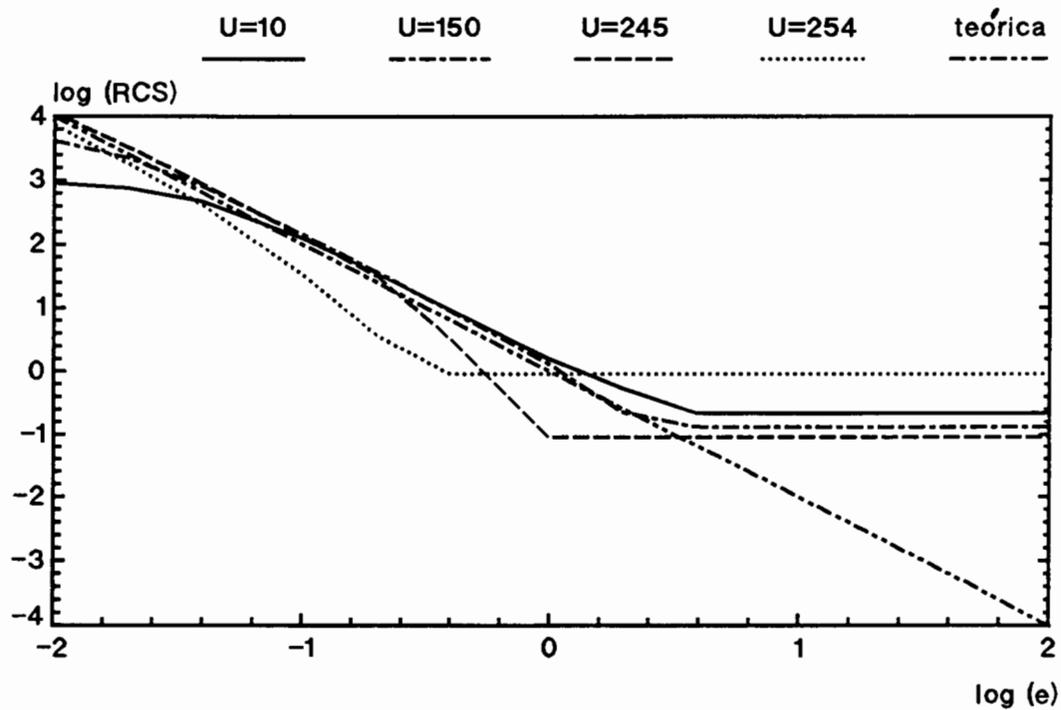
Direccionalidad $n = 1$



Direccionalidad $n = 10$



Figuras 8-5 y 8-6: Sección recta de un elipsoide en función de la excentricidad para $n = 1$ y $n = 10$ y distintos valores de U

Direccionalidad $n = 100$ Direccionalidad $n = 1000$ 

Figuras 8-7 y 8-8: Sección recta de un elipsoide en función de la excentricidad para $n = 100$ y $n = 1000$ y distintos valores de U

En esta serie de gráficas se muestra la variación del intervalo de excentricidades en los que la sección recta calculada por procesado gráfico se aproxima a una recta de pendiente -2 y, por tanto, es correcta. Puede observarse como la relación entre los límites del intervalo de validez e_{\max}/e_{\min} permanecen aproximadamente constantes, mientras que ambos límites aumentan o disminuyen proporcionalmente al valor de $|\ln U|/n$.

8.4.2 Varios puntos brillantes

Para aplicar el algoritmo de procesado gráfico a objetos complejos que presenten varios puntos brillantes, deben sumarse las contribuciones de cada uno de ellos de forma coherente, teniendo en cuenta el desfase por diferencia de caminos entre los puntos brillantes y el radar. La distancia entre la superficie del objeto y el observador (radar) se obtiene del *z-buffer*.

Con objeto de validar la suma coherente de contribuciones de dos puntos brillantes utilizando el *z-buffer*, se ha obtenido la sección recta de dos esferas iguales de radio $\lambda/4$ separadas $5\lambda/2$ que giran en un plano que contiene las dos esferas y la dirección de observación. Como se muestra en la figura 8-9, se define el ángulo de giro ϕ como el complementario del que forma la dirección de observación con el eje que une las esferas.

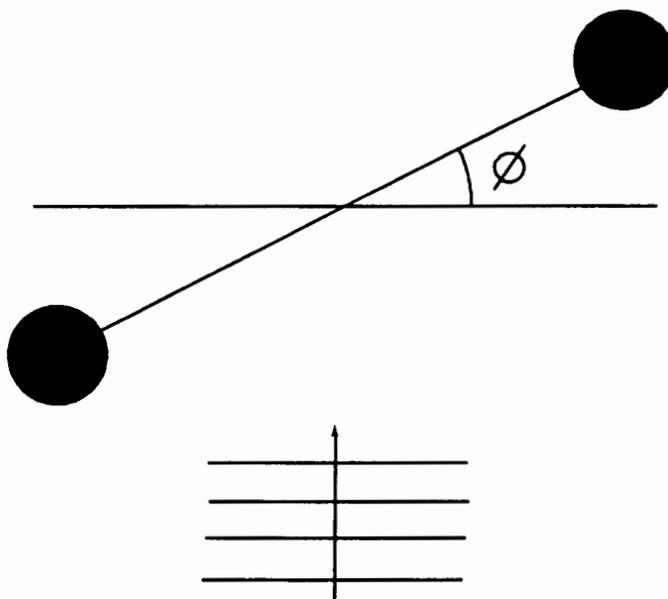


Figura 8-9: Dos esferas girando en el plano del observador

La figura 8-10 muestra la sección recta de las dos esferas normalizada respecto a la de una de ellas: vale 2 cuando las dos contribuciones se suman en fase y es nula cuando se cancelan.

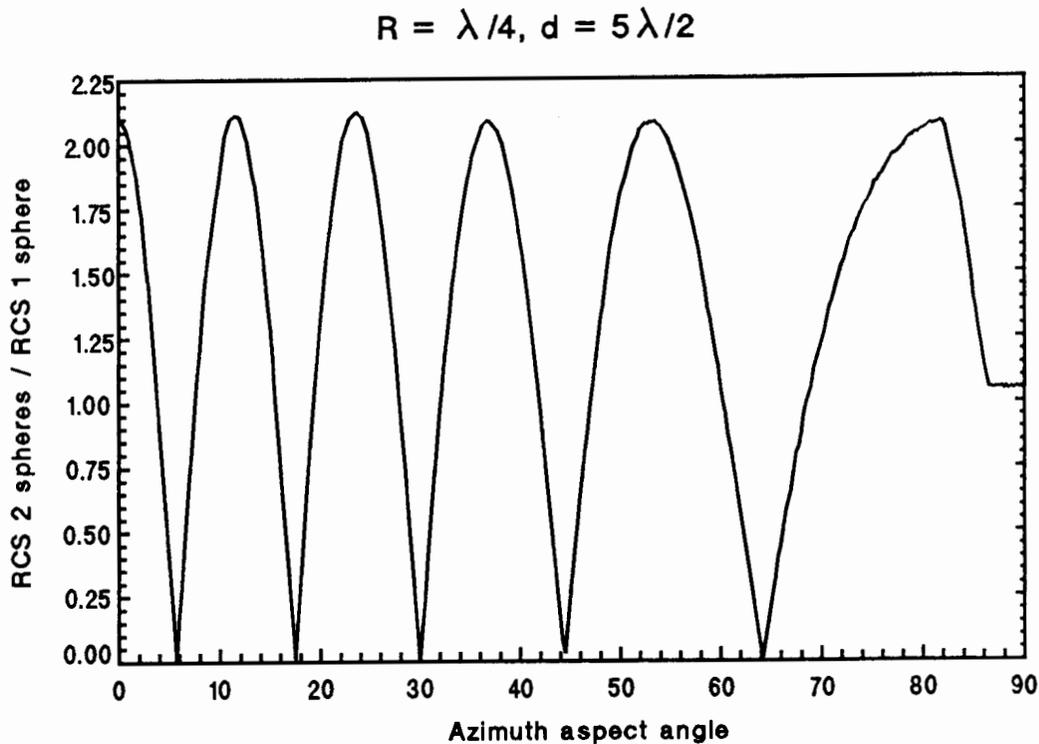


Figura 8-10: Sección recta normalizada de dos esferas girando en el plano del observador

Para ángulos próximos 90° , puede observarse el eclipsamiento de la esfera más alejada por la más próxima: la sección recta incluye únicamente la contribución de la esfera visible. Este efecto, que es muy difícil de simular mediante técnicas numéricas clásicas [Domingo'90] [Abad'90], se tiene en cuenta de forma natural en el procesado gráfico, ya que el algoritmo de eliminación de superficies ocultas *z-buffer* representa en la imagen del blanco únicamente las superficies visibles.

8.5 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un método para el cálculo de sección recta radar en tiempo real, según la aproximación de óptica geométrica, utilizando técnicas de procesado gráfico. Como el método es aplicable a objetos complejos, representa un primer paso hacia la consecución de los objetivos propuestos en esta tesis.

Sin embargo, a las grandes limitaciones de la aproximación de óptica geométrica se añaden las propias del procesado gráfico:

- La aproximación de óptica geométrica sólo es aplicable a superficies de curvatura suave y finita.

- La aplicabilidad del procesado gráfico se encuentra limitada por la resolución de la pantalla y de la tabla de colores del terminal gráfico.

En una serie de pruebas y resultados con objetos sencillos, se ha validado el algoritmo de procesado gráfico de un punto brillante y la suma coherente de contribuciones de varios puntos brillantes. Asimismo, se ha comprobado que el intervalo de radios de curvatura en los que es aplicable el procesado gráfico es el determinado por la ecuación (8-28) y, que con los valores adecuados de los parámetros umbral de luminosidad y direccionalidad de la reflexión especular, el procesado gráfico impone limitaciones menos restrictivas que la aproximación de óptica geométrica.

Sin embargo, se ha desarrollado posteriormente un algoritmo muy similar que permite el cálculo de la aproximación de óptica física, válida también para superficies con algún radio de curvatura infinito -planas, cilíndricas o cónicas-. Además, el algoritmo de óptica física carece de las limitaciones introducidas por el procesado gráfico, con lo que su margen de validez se extiende a todas las situaciones en las que sea aplicable la aproximación de óptica física. Por ello, se ha decidido abandonar el algoritmo de óptica geométrica en favor del de óptica física.

CAPITULO 9

OPTICA FISICA

En el capítulo anterior se ha presentado una primera idea para el cálculo de sección recta en tiempo real por procesado gráfico, basada en la detección de puntos brillantes en una imagen realista del blanco y su identificación con los puntos de reflexión especular de óptica geométrica. Sin embargo, las grandes limitaciones del método hacían poco adecuada su aplicación a blancos radar complejos. Por ello, para alcanzar el objetivo de esta tesis es necesario desarrollar un nuevo algoritmo de procesado gráfico, que sea capaz de implementar una aproximación de alta frecuencia menos restrictiva que la de óptica geométrica.

La principal limitación de la aproximación de óptica geométrica es consecuencia del hecho de suponer frecuencia infinita. La aproximación de óptica física introduce la dependencia adecuada con la frecuencia a través de la aplicación del teorema de equivalencia: calcula los campos radiados por las corrientes inducidas sobre la superficie del objeto (ver capítulo 4). Para conocer éstas se utiliza la aproximación del plano tangente en la superficie iluminada y se suponen nulas en la zona de sombra. Ello equivale a realizar la integral de radiación únicamente sobre la superficie iluminada despreciando la contribución de las superficies ocultas.

Dado que el método de óptica física aproxima las corrientes sobre la superficie del objeto por las corrientes que habría sobre un plano infinito tangente a la superficie, predice correctamente la reflexión de primer orden en grandes superficies, mientras que trata incorrectamente las superficies de pequeño radio de curvatura y la difracción en aristas y vértices. Por ello proporciona buenos resultados con blancos radar de grandes dimensiones, en los que la reflexión en la

superficie del fuselaje es dominante. De esta forma se alcanza el objetivo principal de esta tesis: la obtención de una buena aproximación a la sección recta de blancos complejos en tiempo real.

Cuando la reflexión en grandes superficies no es la contribución principal, como sucede en los artefactos de baja sección recta que han aparecido recientemente, la aproximación de óptica física puede mejorarse considerando la presencia de recubrimientos absorbentes radar, difracción en aristas y múltiples reflexiones. A estos temas se dedicarán los próximos capítulos.

El presente capítulo se inicia con un breve comentario del método actualmente más utilizado para el cálculo de sección recta de blancos radar complejos: modelado por facetas planas con aplicación de las técnicas de óptica física y teoría física de la difracción.

Posteriormente se expone un algoritmo original de procesamiento gráfico para calcular en tiempo real la integral de óptica física sobre la superficie del avión, así como una serie de pruebas y resultados de validación.

La validación del método de procesamiento gráfico para cálculo de sección recta de blancos radar complejos se ha estructurado en tres pasos:

- **Validación del procesamiento gráfico:** en primer lugar es necesario comprobar la validez del algoritmo de procesamiento gráfico, es decir, que el cálculo de la integral de superficie de óptica física por procesamiento gráfico coincida con el obtenido por los métodos clásicos. Para ello se analizarán objetos canónicos de sección recta conocida, seleccionados de forma que pongan a prueba diversos aspectos clave del algoritmo.
- **Limitaciones de la aproximación óptica física:** en segundo lugar debe analizarse el comportamiento de la aproximación de óptica física en aquellas situaciones en las que no es aplicable, como aristas, vértices y múltiples reflexiones, con objeto de cuantificar la magnitud del error en la sección recta.
- **Aplicación a blancos radar complejos:** finalmente se estudiará la aplicación a blancos radar reales, de diversos grados de complejidad, considerando tanto objetos dentro del dominio de validez de la aproximación como fuera del mismo.

9.1 MODELADO POR FACETAS PLANAS

La técnica más utilizada en la actualidad para la predicción de sección recta de blancos radar complejos es el cálculo de la aproximación de óptica física utilizando un modelo de facetas poligonales planas [Youssef'89], [Abad'90], [Domingo'90], [Klement'88].

El método consiste en calcular la sección recta de cada una de las facetas visibles mediante la expresión analítica de Gordon [Gordon'75]:

$$\sqrt{\sigma} = -\frac{\hat{n} \cdot \hat{e}_r \times \hat{h}_i}{\sqrt{\pi T}} e^{-jK\vec{r}_0 \cdot \vec{w}} \sum_{m=1}^M (\hat{p} \cdot \vec{a}_m) e^{-jK\vec{r}_m \cdot \vec{w}} \frac{\sin[K\vec{a}_m \cdot \vec{w}/2]}{K\vec{a}_m \cdot \vec{w}/2} \quad (9-1)$$

donde:

σ = sección recta biestática de la faceta

\hat{n} = vector unitario normal a la faceta

\hat{h}_i = vector unitario de polarización del campo magnético incidente

\hat{e}_r = vector unitario de polarización del campo eléctrico del receptor

\vec{r}_0 = vector de posición del origen de coordenadas local de la faceta

$\vec{w} = \hat{i} - \hat{s}$ donde \hat{i} es la dirección de incidencia y \hat{s} la de observación

T = longitud de la proyección de \vec{w} en el plano de la faceta

$\hat{p} = \hat{n} \times \vec{w} / |\hat{n} \times \vec{w}|$ vector unitario en el plano de la faceta perpendicular a \vec{w}

M = número de lados de la faceta poligonal

\vec{a}_m = vector con la longitud y dirección del m-ésimo lado de la faceta

\vec{r}_m = vector de posición del punto central del m-ésimo lado de la faceta

La sección recta del blanco completo se obtiene sumando coherentemente las contribuciones de cada una de las facetas iluminadas.

El método de modelado por facetas permite añadir fácilmente la difracción en aristas analizando las cuñas que forman facetas adyacentes. Estas cuñas pueden corresponder a:

- Aristas reales del modelo, como por ejemplo el borde de salida de las alas.
- Aristas artificiales debidas a la facetización de la superficie real curvada.

El análisis de las primeras mediante teoría física de la difracción (ver capítulo 4) permite predecir la difracción en las aristas del blanco, con lo que se obtiene una respuesta polarimétrica. Por otra parte, la contribución de las segundas corrige el error cometido al facetizar una superficie curvada y aproximar la sección recta como suma de las contribuciones de las facetas iluminadas.

La contribución de las dobles reflexiones entre facetas, que es una importante fuente de polarización cruzada, puede analizarse utilizando expresiones analíticas aproximadas que proporcionen la sección recta de un par de facetas arbitrario que interactúan entre sí. Para evitar analizar todos los posibles pares de facetas, se realiza una selección previa de pares candidatos a sufrir doble reflexión, basada en criterios elementales de óptica geométrica:

- ambas facetas deben ser visibles por el radar,
- las dos normales deben ser perpendiculares entre sí,
- las dos normales y la dirección de observación deben ser coplanarias.

Aunque de esta forma se reduce en gran medida el número de pares de facetas a analizar, el proceso es muy costoso computacionalmente. Además, si se tiene en cuenta que solamente una parte de las facetas contribuye a la doble reflexión, y por tanto es necesaria una subdivisión adecuada, el coste del procedimiento aumenta enormemente.

Otra cuestión importante surge del hecho de que la integral de superficie se extiende únicamente sobre la zona iluminada del objeto. Es por ello necesaria la distinción entre facetas iluminadas y oscuras. Las facetas ocultas en la parte no visible del objeto se detectan fácilmente teniendo en cuenta que la normal exterior a la faceta forma un ángulo con la dirección de observación de más de 90 grados. La detección de facetas eclipsadas o ensombrecidas por otras partes del objeto es mucho más difícil y computacionalmente costosa, y requiere el uso de algoritmos especializados en eliminación de partes ocultas. El problema se complica si se considera además la contribución de las facetas parcialmente eclipsadas, que deben ser divididas en una sub-faceta iluminada y una oscura.

El cálculo de sección recta mediante modelado por facetas planas ha sido implementado recientemente por la Universidad de Cantabria y la Politécnica de Madrid en el código TOTAL [Abad'90], [Domingo'90], y por la compañía Boeing Aerospace en el código RECOTA [Youssef'89]. En ambos casos se obtienen excelentes resultados para blancos radar complejos, que se van a utilizar para validar el método de procesado gráfico por hardware desarrollado en esta tesis.

El principal inconveniente del modelado por facetas planas reside en que la superficie real debe ser aproximada por el modelo facetizado con una precisión de $\lambda/16$, por lo que el número de facetas crece con el tamaño y complejidad del

objeto, siendo muy elevado en el caso de blancos radar complejos. Como los requerimientos de memoria de almacenamiento masivo, memoria RAM de proceso y tiempo de CPU crecen con el número de facetas, para obtener resultados en tiempo real deben utilizarse ordenadores de gran potencia y coste económico muy elevado. Por ejemplo, el tiempo de CPU para el código RECOTA con un VAX 11/750 es del orden de 10 miliseg. por faceta y ángulo de vista, para cada polarización.

9.2 PROCESADO GRAFICO

El procesado gráfico de una imagen del blanco en la pantalla de la estación gráfica evita los principales problemas que aparecen al implementar el método de modelado por facetas y óptica física:

- el tratamiento de superficies eclipsadas
- el aumento del coste computacional con el tamaño y complejidad del blanco.

El primer problema se evita generando la imagen del blanco desde el punto de vista del radar: el hardware del acelerador gráfico elimina las zonas ocultas y eclipsadas, que no se visualizan en la pantalla (ver 7.1.5). Por ello, el procesado gráfico calcula la integral de superficie únicamente sobre las superficies visibles, de forma automática, sin necesidad de plantearse el problema.

Por otra parte, el procesado de la imagen en la pantalla gráfica es independiente del tamaño eléctrico y de la complejidad del blanco, con lo que resultan unos requerimientos de CPU y RAM independientes de estos parámetros. Por ello, el método es tanto más eficiente en comparación con el modelado por facetas cuanto mayores sean el tamaño del blanco y su complejidad.

9.2.1 Cálculo de la integral de superficie de óptica física

La sección recta según la aproximación de óptica física es (ver capítulo 4, ecuación 4-6):

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_s \cos\theta e^{2ikz} ds \right|^2 \quad (9-2)$$

donde, como se muestra en la figura 9-1, θ es el ángulo que forman la normal a la superficie y la dirección de observación, y z la distancia del diferencial de superficie al observador proyectada en la dirección de observación.

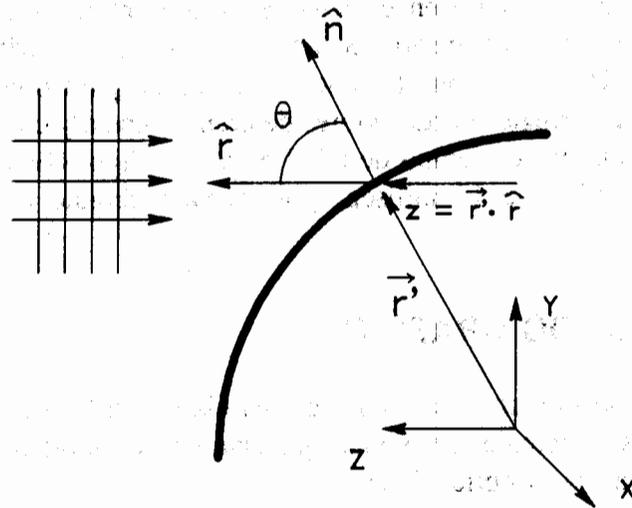


Figura 9-1: Elemento de superficie en la integral de óptica física

Al obtener una imagen del blanco en la pantalla de la estación de trabajo, se realiza una proyección de las superficies tridimensionales en un plano perpendicular a la dirección de observación (ver figura 9-2).

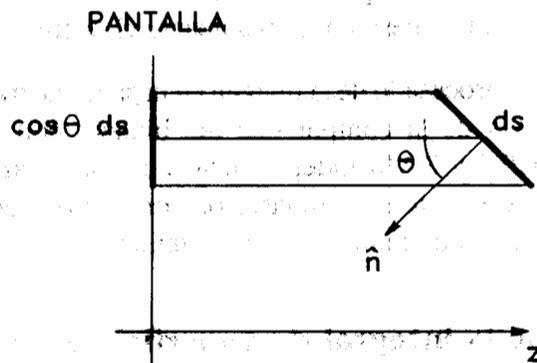


Figura 9-2: Proyección de un elemento de superficie en la pantalla gráfica

Por ello, el diferencial de superficie sobre la pantalla ds' es

$$ds' = \cos \theta ds \quad (9-3)$$

con lo que la integral de superficie (9-2) puede escribirse

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_s \cos \theta e^{2jKz} ds \right|^2 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_s e^{2jKz} ds' \right|^2 \quad (9-4)$$

Finalmente, la integral (9-4) puede calcularse de forma discreta como

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{\text{pixels}} e^{2jkz} \right|^2 \quad (9-5)$$

La expresión (9-5) corresponde a la suma coherente de las fases de cada pixel de la imagen del objeto en la pantalla, donde las fases relativas son consecuencia de la distancia z de cada pixel al observador. La eficacia del método reside en que no es necesario calcular la distancia z , pues el hardware del acelerador gráfico la ha calculado previamente y se encuentra almacenada en el *z-buffer* (ver 7.1.5).

En resumen, el algoritmo consiste en generar una imagen del blanco en la pantalla de la estación gráfica y, para cada pixel de la imagen, leer su coordenada z del *z-buffer* y sumar coherentemente su contribución según la ecuación (9-5). Como no influye la luminosidad de los pixels de pantalla, puede reducirse el tiempo de generación de la imagen visualizando únicamente la proyección del blanco en el plano de observación (ver figuras 9-3 y 9-4).

9.2.2 Aplicación del principio de fase estacionaria

Una de las principales causas de error en la aproximación de óptica física es la transición brusca entre las corrientes en la zona iluminada, obtenidas mediante la aproximación del plano tangente, y las de la zona oscura, supuestas nulas. Con ello se introduce una discontinuidad artificial en la zona de transición, que produce oscilaciones espúreas en el valor de sección recta calculado (ver capítulo 4, figura 4-5).

Por ejemplo, al aplicar la aproximación de óptica física a una esfera, la ecuación (9-2) se expresa

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \cos\theta e^{-2jk(r-R\cos\theta)} R^2 \sin\theta d\phi d\theta \right|^2 \quad (9-6)$$

y realizando la doble integración se obtiene

$$\sigma = \pi R^2 \left| \left(1 - \frac{1}{2jkR} \right) e^{2jkR} + \frac{1}{2jkR} \right|^2 \quad (9-7)$$



Figura 9-3: Proyección de un Boeing 727 en la pantalla de la estación gráfica

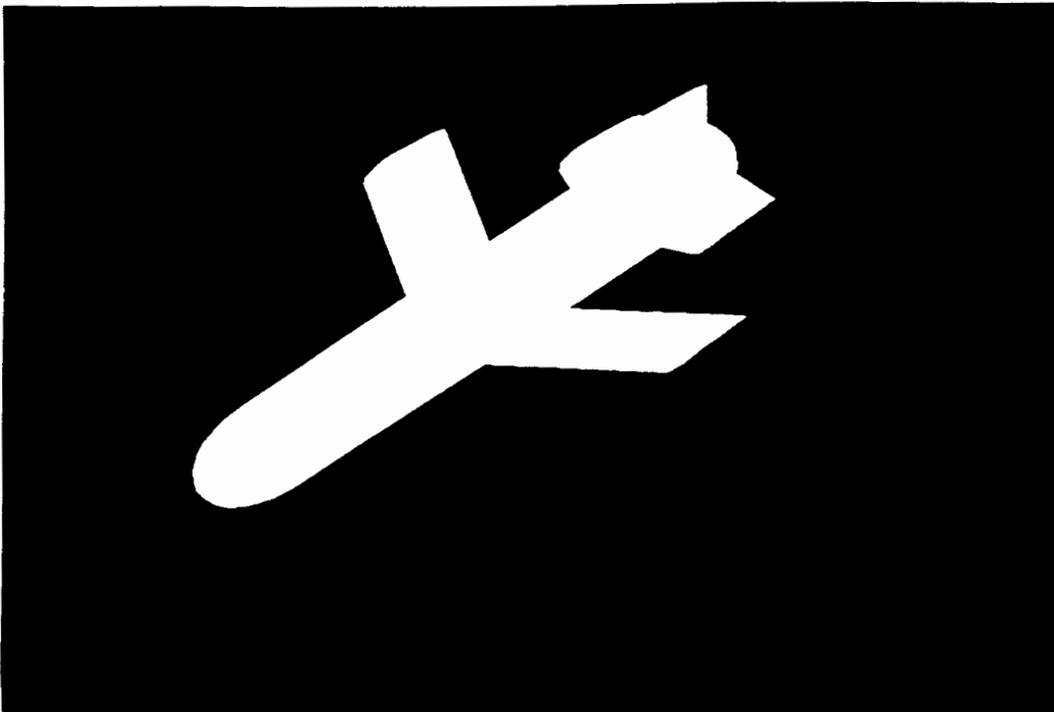


Figura 9-4: Proyección de un misil en la pantalla de la estación gráfica



Figura 9-5: Imagen de un Boeing 727 con reflexión difusa

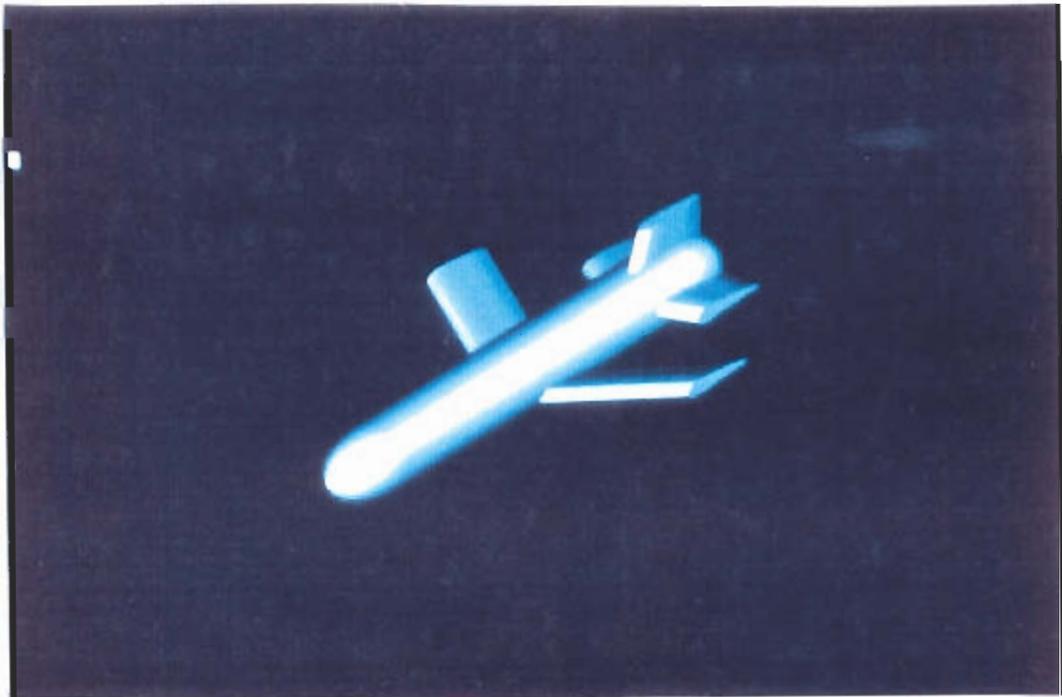


Figura 9-6: Imagen de un misil con reflexión difusa

El primer término de (9-7) corresponde a la aproximación de óptica geométrica $\sigma = \pi R^2$. El segundo es el siguiente término de la solución exacta, llamada serie de Mie. Estos dos términos provienen del límite inferior de la integral, $\theta = 0$, correspondiente al punto de reflexión especular. El último término proviene del límite superior de la integral, $\theta = \pi/2$, correspondiente a la transición entre zona iluminada y zona de sombra. Como en esta región las corrientes inducidas son prácticamente cero, y no las que predice la aproximación del plano tangente, se introduce un error importante en la parte imaginaria de la expresión, que origina oscilaciones espúreas en la gráfica de la sección recta al variar la frecuencia.

Las oscilaciones espúreas pueden evitarse teniendo en cuenta el principio de fase estacionaria (ver fig. 4-5), según el cual sólo contribuyen a la integral los elementos de superficie en los que la variación espacial de la fase de las corrientes es mínima. Esto sucede en los elementos de superficie con la normal próxima a la dirección de incidencia, $\cos\theta \approx 1$, y por tanto cercanos al punto de reflexión especular. Por el contrario, en los puntos próximos a la transición entre zona iluminada y oscura, la normal es perpendicular a la dirección de incidencia, $\cos\theta \approx 0$, y, como la variación de fase es muy rápida, no contribuyen al valor de la integral.

La solución adoptada en el método de procesado gráfico consiste en disminuir la influencia de los puntos cercanos a la transición ponderando su contribución por $\cos\theta$. Una forma eficiente de obtener el valor de la función $\cos\theta$ para todos los puntos de la superficie es generar la imagen del blanco con reflexión difusa en las superficies, e iluminar la escena con una onda plana en la dirección del radar (ver figuras 9-5 y 9-6): en estas condiciones la luminosidad de cada pixel de pantalla es igual a $\cos\theta$ (ver 7.1.3.2). Para calcular la sección recta basta sumar coherentemente las luminosidades $\cos\theta$ de todos los pixels de la imagen, que el hardware gráfico calcula y almacena en el *frame-buffer* (ver 7.1.4). La fase de cada pixel se obtiene según la ecuación (9-5) a partir de la coordenada z , que se encuentra almacenada en el *z-buffer* (ver 7.1.5).

El algoritmo que finalmente resulta es:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_s \cos^2\theta e^{2ikz} ds \right|^2 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{pixels} \cos\theta e^{2ikz} ds \right|^2 \quad (9-8)$$

En la figura 9-7 se muestra la sección recta de una esfera en función de la frecuencia calculada por procesado gráfico según óptica física, ecuación (9-5), y añadiendo el principio de fase estacionaria, ecuación (9-8).

La aplicación del principio de fase estacionaria reduce drásticamente las oscilaciones espúreas debidas a la transición entre zonas iluminadas y oscuras, pero, por otra parte, pondera con una función $\cos\theta$ la gráfica de la sección recta en función del ángulo de aspecto. Esta ponderación no tiene gran importancia

cuando la superficie presenta curvaturas suaves y es eléctricamente grande, pues en este caso la principal contribución a la sección recta se produce en los puntos de reflexión especular, en los que la dirección de observación es normal a la superficie y $\cos \theta \approx 1$. Los resultados obtenidos con blancos radar complejos son excelentes, y únicamente es apreciable el error cometido cuando se evalúa el nivel de lóbulo principal a secundario de la sección recta de placas planas de pequeñas dimensiones (ver 9.3.4).

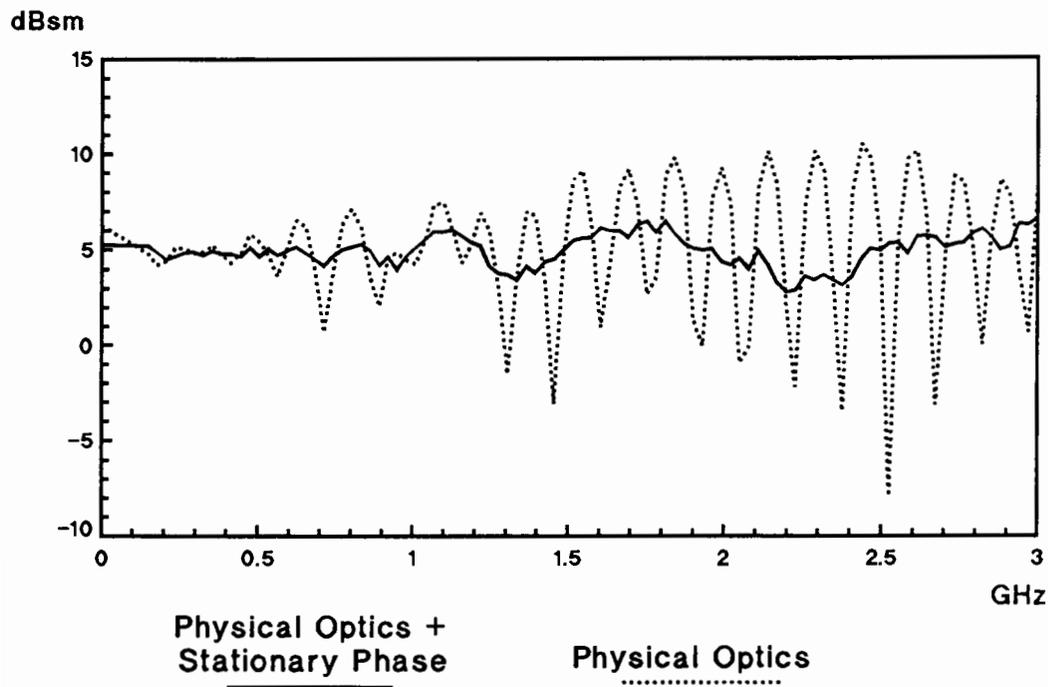


Figura 9-7: Sección recta de una esfera de radio 1 metro en función de la frecuencia.

9.2.3 Algoritmo de procesamiento gráfico

El algoritmo de procesamiento gráfico para calcular RCS según la aproximación de óptica física, aplicando el principio de fase estacionaria, es:

- Extraer de la base de datos del modelo geométrico del blanco los parámetros de las curvas y superficies NURB que lo definen.
- Definir reflexión difusa sobre las superficies del blanco.
- Definir una fuente de luz en el infinito en la misma dirección que la onda plana incidente del radar.

- d) Colocar el punto de observación en la situación del radar y utilizar perspectiva paralela (no cónica).
- e) El acelerador gráfico transforma las superficies NURB en una malla de facetas poligonales (ver 7.2), con la resolución deseada, y genera una imagen bidimensional con sombreado de Phong y suavizado de Gouraud (ver 7.1.3).
- f) Para cada pixel iluminado:
- leer del *frame-buffer* el valor de $\cos \theta$,
 - leer del *z-buffer* el valor de z ,
 - calcular la fase e^{2jKz} .
- g) Sumar coherentemente las contribuciones de todos los pixels:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{\text{pixels}} \cos \theta e^{2jKz} \right|^2 \quad (9-8)$$

Un aspecto importante a considerar es la transformación de las superficies NURB en mallas de facetas poligonales realizada por el acelerador gráfico. En principio, y salvo por la aplicación del principio de fase estacionaria, la sección recta calculada por procesado gráfico coincide con la obtenida por el método clásico y la ecuación de Gordon, ver 9.1, utilizando la misma malla de facetas poligonales. Sin embargo, puede generarse fácilmente una malla de resolución tan elevada que el tamaño de las facetas sea del mismo orden que el de los pixels de pantalla, con lo que el coste computacional del método clásico para obtener el mismo resultado sería prohibitivo. Además, la aplicación del principio de fase estacionaria con una ponderación $\cos \theta$ reduce de forma muy importante las oscilaciones espúreas.

El proceso se realiza en tiempo real si se dispone de un acelerador gráfico hardware que genere la imagen del blanco de forma instantánea. Prácticamente todo el tiempo de CPU se consume en sumar coherentemente la fase de los pixels de la imagen, por lo que puede reducirse tanto como se desee disminuyendo el tamaño de la imagen en pantalla, a costa de una pérdida de resolución en la discretización de la superficie del blanco.

Utilizando una estación de trabajo Hewlett-Packard 375 con acelerador gráfico Turbo SRX, el tiempo de CPU es aproximadamente de 7 a 15 microsegundos por pixel iluminado, según se aplique o no el principio de fase estacionaria. El tiempo de CPU indicado por pixel corresponde a entre 1 y 2 segundos para una imagen

que ocupe aproximadamente media pantalla. La elevada velocidad de procesamiento gráfico permite realizar barridos acimutales y en frecuencia en un tiempo de CPU razonablemente corto.

El procesamiento gráfico realizado de esta forma presenta las siguientes ventajas sobre el cálculo numérico clásico de las integrales de superficie:

- Memoria RAM necesaria para el cálculo independiente del tamaño eléctrico del blanco y su complejidad: para cada pixel de pantalla hacen falta 3 bytes: 1 byte de *frame-buffer* y 2 bytes de *z-buffer*.
- Tiempo de CPU necesario para el cálculo proporcional al número de pixels de pantalla iluminados. No aumenta con el tamaño eléctrico y ni con la complejidad del blanco, pero sí es proporcional al área de la proyección del mismo en el plano de observación. El tiempo de CPU puede reducirse tanto como se desee a costa de la resolución.
- Resolución muy elevada en la discretización del modelo electromagnético: cada pixel de la imagen puede ser equivalente a una faceta iluminada en el modelado por los métodos clásicos.
- Aplicación del principio de fase estacionaria, con lo que se mejoran sustancialmente los resultados de la aproximación de óptica física.

9.3 VALIDACION DEL PROCESADO GRAFICO

Para validar el método desarrollado para el cálculo de sección recta, en primer lugar es necesario comprobar la validez del algoritmo de procesamiento gráfico, es decir, que la suma coherente de las luminosidades de los pixels de la imagen coincida con el valor de la integral de óptica física. Para ello se analizarán objetos canónicos de sección recta conocida, seleccionados de forma que pongan a prueba diversos aspectos clave del algoritmo, como son:

- eliminación de superficies ocultas
- obtención de la distancia al observador en el *z-buffer* para la contribución de fase de cada pixel
- cálculo de la integral de óptica física sobre superficies planas y con curvatura doble o simple.

9.3.1 Eliminación de superficies eclipsadas

El primer aspecto del algoritmo de procesado gráfico que se debe validar es el funcionamiento del método del *z-buffer* para eliminación de superficies eclipsadas. Como se ha indicado en el apartado 9.2, sólo contribuyen al campo difractado las superficies iluminadas directamente por el campo incidente y no lo hacen las que se encuentran ocultas o eclipsadas en la zona de sombra. Tiene por ello una importancia fundamental la detección y eliminación de estas últimas.

La eliminación de superficies ocultas y eclipsadas se basa en la visualización del blanco desde el punto de vista del radar: sólo serán visibles en la pantalla gráfica las superficies iluminadas por la onda incidente. Al realizar la integral de superficie como suma coherente de los pixels de la imagen, sólo contribuirán a la misma las superficies visibles.

La eliminación de superficies ocultas en la parte no visible del objeto no presenta ninguna dificultad: basta con visualizar únicamente los polígonos cuya normal forme un ángulo agudo con la dirección de observación. La eliminación de superficies eclipsadas por otras superficies del objeto plantea un problema difícil, que el método de procesado gráfico resuelve por hardware utilizando el algoritmo del *z-buffer* (ver 7.1.5).

En las figuras 9-8 y 9-9 se muestran fotografías de la pantalla de la estación de trabajo con dos ejemplos de eclipsamiento de superficies. Para validar el correcto funcionamiento del algoritmo del *z-buffer* se ha calculado la sección recta de las dos esferas de la figura 9-8: Cuando el ángulo de giro θ se aproxima a 90° se produce el eclipsamiento de la más alejada por la más cercana, y sólo la reflexión en esta última contribuye a la sección recta.

En la figura 9-10 se muestran los resultados obtenidos para radio de las esferas 0.1λ y separación entre centros λ . La sección recta de ambas esferas se presenta normalizada respecto a la sección recta de una sola. Si el radio de las esferas fuera nulo (o mucho menor que la distancia que las separa), la RCS normalizada respecto a la de una sólo esfera sería:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left| 2 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta\right) \right| \quad (9-9)$$

Según (9-9), los nulos de sección recta se producen en las direcciones:

Primer nulo:	$\theta = \sin^{-1}(\lambda/4d) = 14.5^\circ$
Segundo nulo:	$\theta = \sin^{-1}(3\lambda/4d) = 48.6^\circ$

En la figura 9-10 se observa que la posición de ambos nulos es correcta. Como la suma coherente de las contribuciones de ambas esferas coincide con el valor teórico de la ecuación (9-9), también se valida el cálculo de la fase de cada pixel mediante la lectura de distancia al observador en el *z-buffer*.

Como el radio de las dos esferas que estamos analizando es comparable a la distancia que las separa, se produce eclipsamiento para ángulos de giro mayores que

Límite de eclipsamiento:	$\cos^{-1}(2R/d) = 78.5^\circ$
--------------------------	--------------------------------

Cuando el eclipsamiento es total, $\theta = 90^\circ$, la sección recta normalizada vale la unidad. Este fenómeno puede ser apreciado perfectamente en la gráfica de la figura 9-10.

En conclusión, en este apartado se ha validado la utilización del *z-buffer* en dos aspectos:

- Obtención de la distancia al observador calcular la fase de cada pixel.
- Eliminación de superficies eclipsadas.

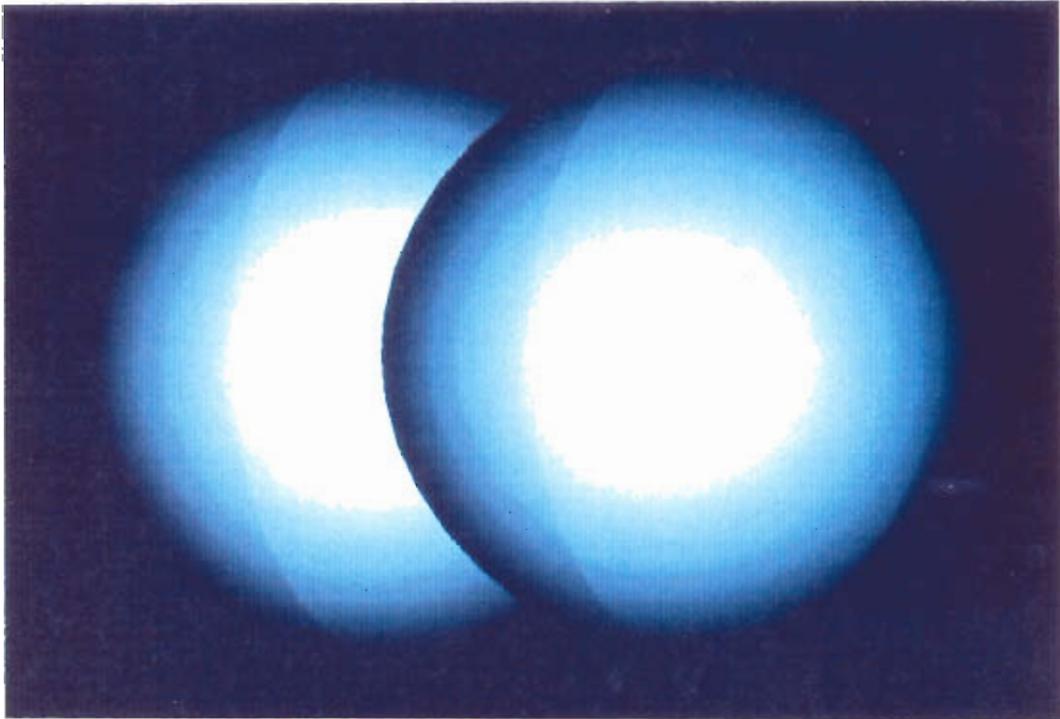


Figura 9-8: Eclipsamiento de la esfera más alejada por la más cercana

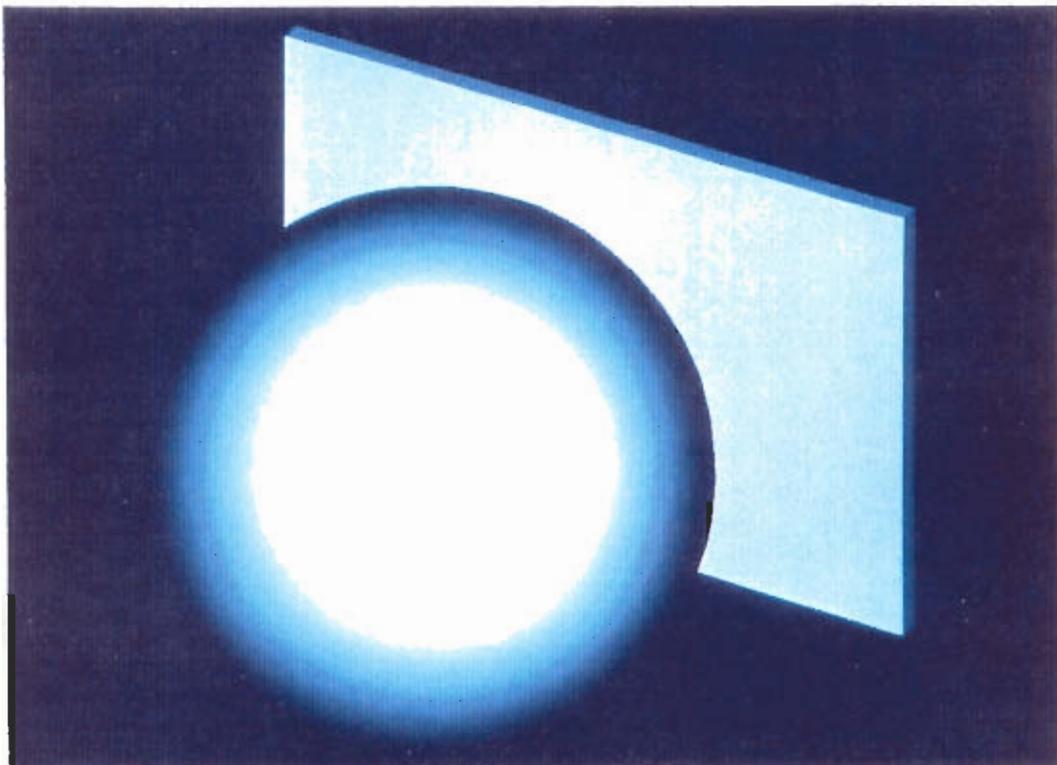


Figura 9-9: Eclipsamiento de un plano por una esfera

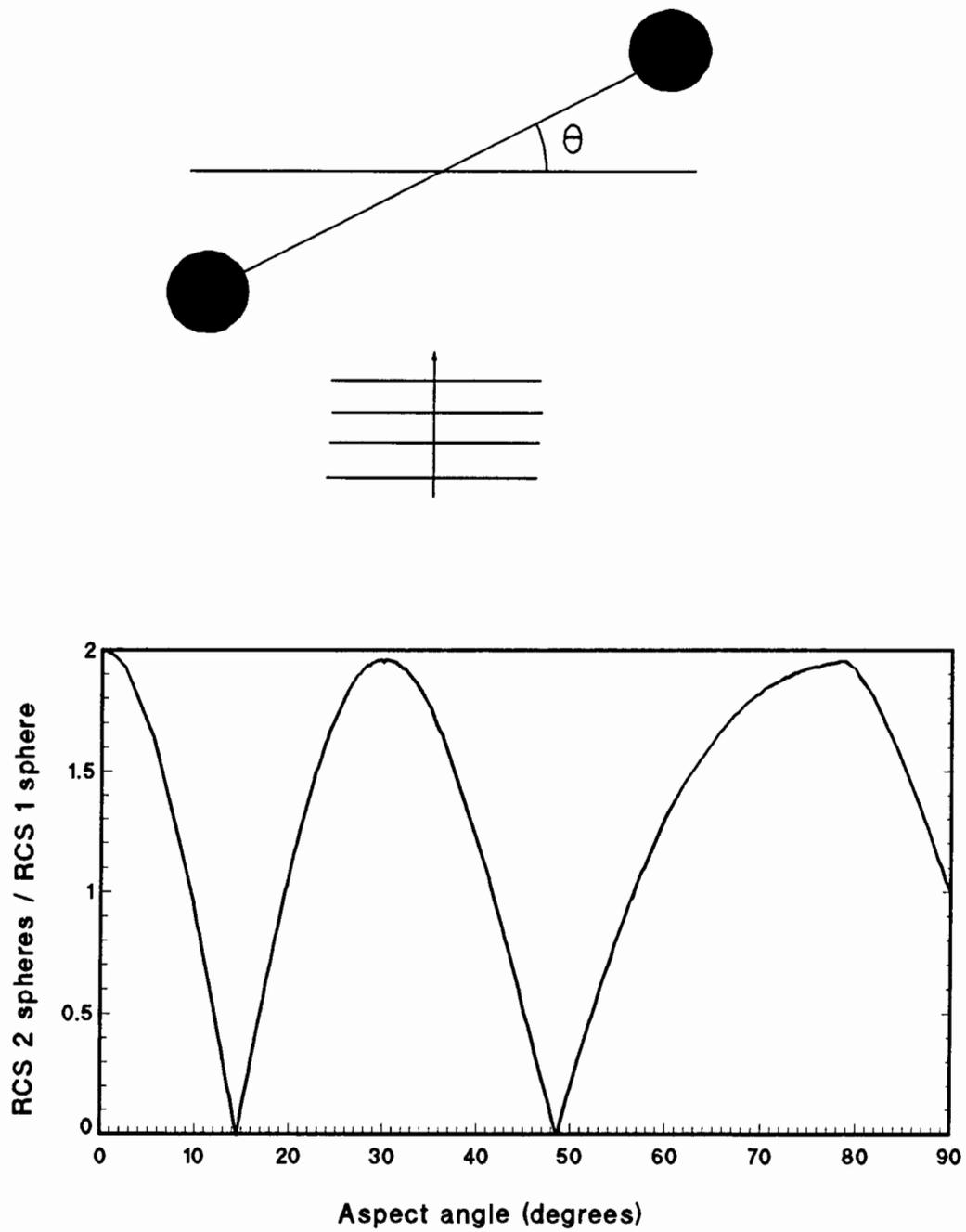


Figura 9-10: Sección recta normalizada de dos esferas de radio 0.1λ separadas λ girando en el plano del observador.

9.3.2 Superficies doblemente curvadas

Para validar el cálculo de la integral de superficie de óptica física por procesado gráfico, vamos a considerar en primer lugar las superficies con los dos radios principales de curvatura finitos. Únicamente en este caso es aplicable la aproximación de óptica geométrica, y puede utilizarse el algoritmo desarrollado en el capítulo 8. Como se ha indicado, el algoritmo de procesado gráfico de óptica geométrica presentaba una serie de limitaciones, teóricas y de implementación en hardware, que restringían su aplicación a una gama reducida de radios de curvatura de la superficie.

Sin embargo, el procesado gráfico de óptica física no presenta ningún tipo de limitación, exceptuando las inherentes a la aproximación del plano tangente: es aplicable para todos los radios de curvatura, desde radios algo menores que una longitud de onda hasta infinito. El caso de uno o ambos radios de curvatura infinitos se considerará en los apartados siguientes.

La sección recta de una superficie doblemente curvada en alta frecuencia es (4-3) y (8-1):

$$\sigma = \pi \rho_1 \rho_2 \quad (4-3)$$

donde ρ_1 y ρ_2 son los radios principales de curvatura en el punto de reflexión especular. Por ejemplo, para un elipsoide de semiejes $a : b : c$ en x, y, z respectivamente, la ecuación (4-3) puede expresarse como [Maffet'89]:

$$\sigma = \frac{\pi(abc)^2}{(a^2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \theta \sin^2 \phi + c^2 \cos^2 \theta)^2} \quad (9-10)$$

donde los ángulos (ϕ, θ) representan la dirección de observación en coordenadas esféricas.

Se ha calculado la sección recta de un elipsoide de semiejes 3:2:1 para direcciones de observación en el plano zx . La figura 9-11 muestra el resultado obtenido mediante procesado gráfico de óptica física comparado con el cálculo teórico según la ecuación (9-10).

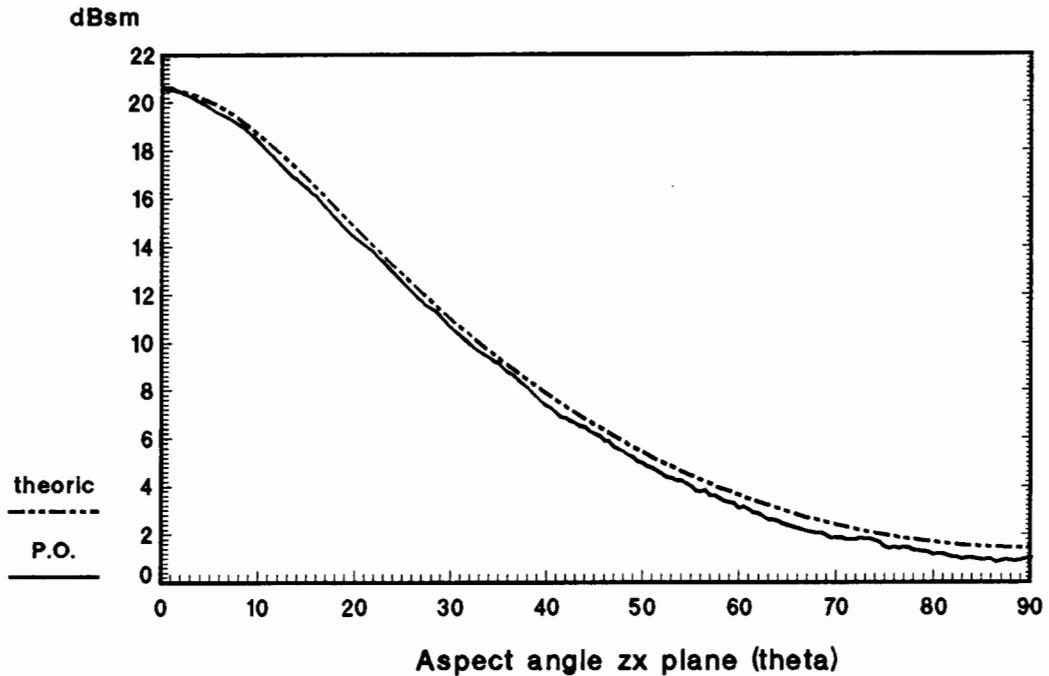


Figura 9-11: Sección recta de un elipsoide de semiejes 3:2:1 en el plano xz . Comparación del cálculo teórico y procesado gráfico para una longitud de onda $\lambda = 1$

Los valores teóricos de sección recta en los ejes z y x son:

eje z : $\phi = 0^\circ, \theta = 0^\circ$	$\sigma = \pi \frac{\alpha^2 b^2}{c^2} = 20.5 \text{ dBsm}$
eje x : $\phi = 0^\circ, \theta = 90^\circ$	$\sigma = \pi \frac{b^2 c^2}{\alpha^2} = 1.45 \text{ dBsm}$

En la figura 9-11 puede observarse que, para todo el margen de variación de los radios de curvatura, los valores teóricos difieren poco de los resultados del procesado gráfico.

9.3.3 Superficies simplemente curvadas

Para probar el funcionamiento del algoritmo de procesado gráfico con superficies que posean algún radio principal de curvatura infinito, se ha escogido el cilindro, que presenta dos tipos de comportamiento: una superficie lateral con curvatura simple y tapas circulares planas en los extremos. A este último tipo de superficies se dedica el apartado 9.3.4.

La sección recta según óptica física de una superficie cilíndrica de radio R y longitud L en función del ángulo θ entre la dirección de incidencia y el eje del cilindro es (4-22):

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} R L^2 \sin^2 \theta \left[\frac{\sin(KL \cos \theta)}{KL \cos \theta} \right]^2 \quad (4-22)$$

mientras que la de la tapa circular de radio R viene dada por (4-21 bis):

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cos^2 \theta \left[2\pi R^2 \frac{J_1(2KR \sin \theta)}{2KR \sin \theta} \right]^2 \quad (4-21 \text{ bis})$$

La figura 9-12 muestra la sección recta calculada por procesado gráfico de un cilindro circular. Para valores pequeños de θ predomina la contribución de la tapa circular plana (4-21 bis), mientras que para valores próximos a 90° predomina la respuesta (4-22) de la superficie cilíndrica, que presenta oscilaciones muy rápidas debido a su gran longitud eléctrica.

La sección recta del cilindro anterior medida para ambas polarizaciones se encuentra en la figura 9-13. Los resultados del procesado gráfico se aproximan correctamente a la medida en las direcciones en que predominan las respuestas de la superficie cilíndrica (0°) y la tapa plana (90°). En ángulos intermedios, entre 30° y 60° , es significativa la difracción en la arista que separa ambas superficies, y la aproximación de óptica física difiere ligeramente de la medida. Sin embargo, el error cometido no es importante y se presenta en niveles 40 dB por debajo del máximo.

Los valores teóricos de la RCS de la **placa circular plana** son (ver 9.3.4):

Máximo: $\theta = 0^\circ$	$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} (\pi R^2)^2 = -5.2 \text{ dBsm}$
Primer nulo:	$\theta = \sin^{-1} \left(0.305 \frac{\lambda}{R} \right) = 7.3^\circ$

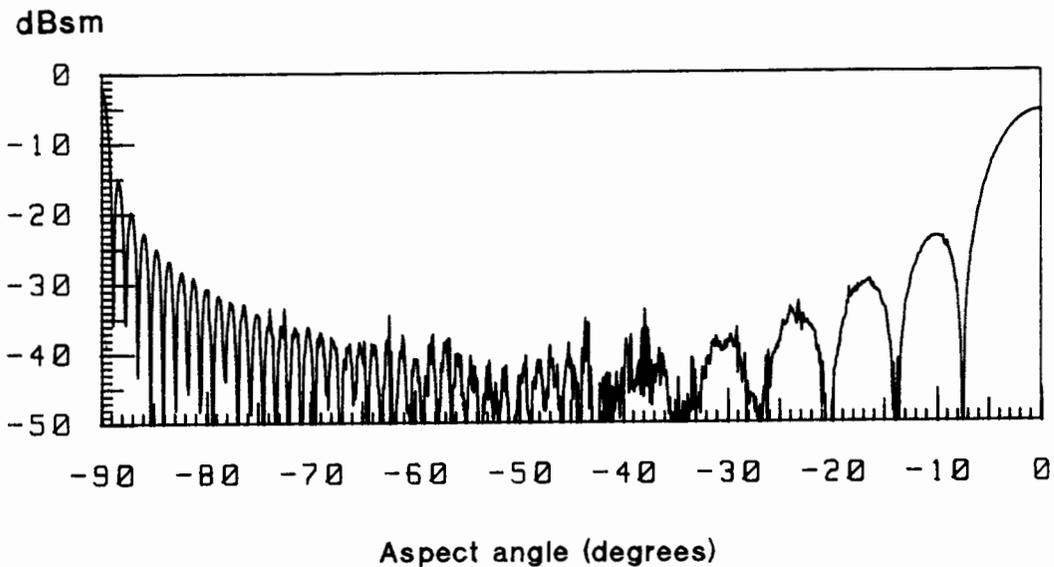


Figura 9-12: Aproximación de óptica física y procesado gráfico. Sección recta de un cilindro circular de diámetro 4.779λ y longitud 24.265λ , a una frecuencia de 34.84 GHz.

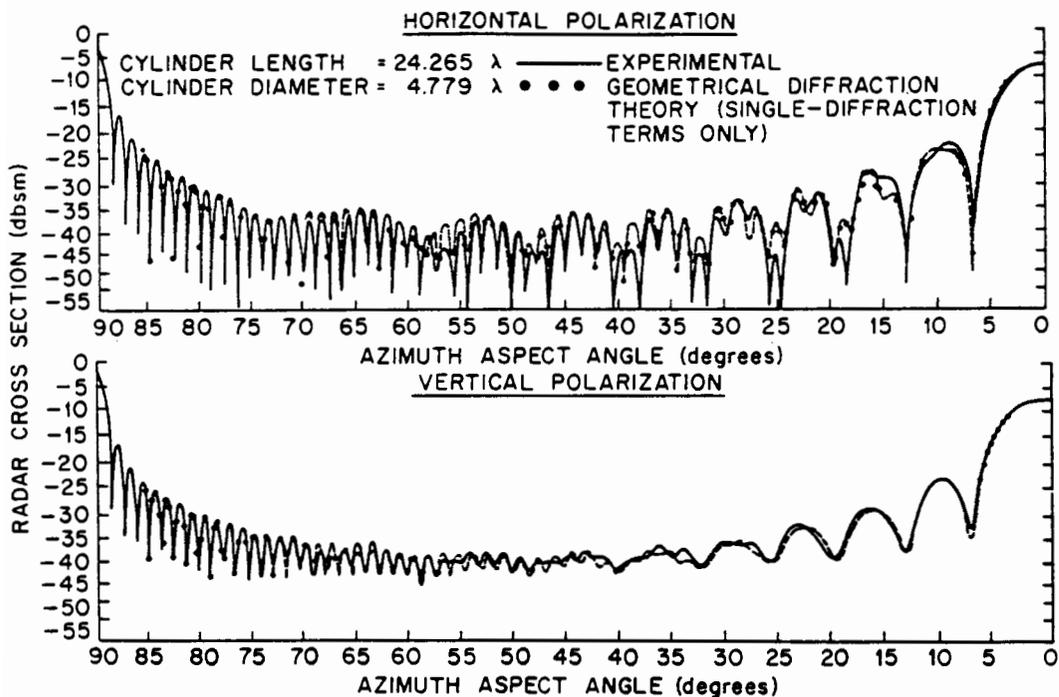


Figura 9-13: Medidas para ambas polarizaciones de la sección recta del cilindro de la figura 9-12 [Skolnik'70]

Valores teóricos de la RCS de la **superficie cilíndrica**:

Máximo: $\theta = 90^\circ$	$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} R L^2 = -1.8 \text{ dBsm}$
Primer nulo:	$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{\lambda}{2L}\right) = 88.8^\circ$

Para ambos tipos de superficie la aproximación de óptica física se ajusta con precisión a los valores teóricos esperados.

9.3.4 Superficies planas

Para validar el procesado gráfico con superficies planas, se ha obtenido la sección recta de placas cuadradas y circulares. La evaluación analítica de la integral de óptica física para estos objetos se ha realizado en el capítulo 4, obteniendo la sección recta monoestática:

Placa plana rectangular de lados A y B en x e y respectivamente (4-21):

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} A^2 B^2 \cos^2 \theta \left[\frac{\sin(KA \sin \theta \cos \phi)}{KA \sin \theta \cos \phi} \right]^2 \left[\frac{\sin(KB \sin \theta \sin \phi)}{KB \sin \theta \sin \phi} \right]^2$$

Placa circular de radio R situada en plano xy (4-21 bis):

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cos^2 \theta \left[2\pi R^2 \frac{J_1(2KR \sin \theta)}{2KR \sin \theta} \right]^2$$

donde θ y ϕ definen la dirección de incidencia en coordenadas esféricas.

En las figuras 9-14 y 9-15 se comparan los valores calculados mediante procesado gráfico con los obtenidos mediante las ecuaciones (4-21) y (4-21 bis). En el eje vertical se representa la sección recta normalizada respecto al área de la placa, con objeto de que el valor representado dependa sólo de las dimensiones eléctricas de la placa y no de los valores absolutos de tamaño y frecuencia.

Los parámetros más significativos de estas curvas de sección recta son: el valor del máximo, el nivel de lóbulo principal a secundario (NLPS) y la posición del primer nulo. Los valores teóricos se obtienen fácilmente de las expresiones (4-21) y (4-21 bis):

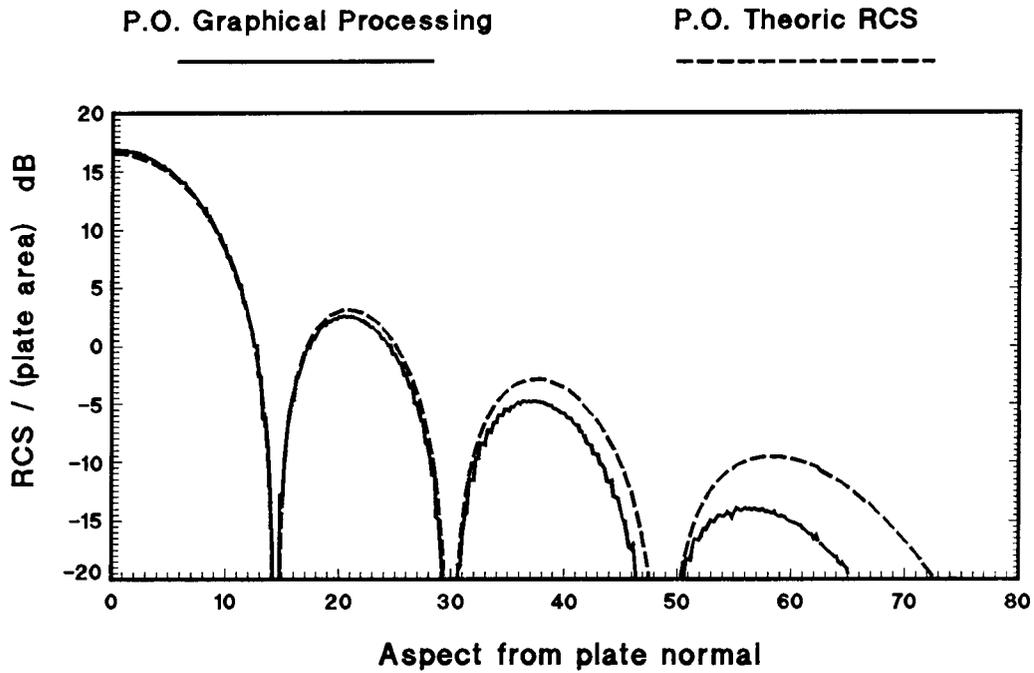


Figura 9-14: Comparación de los resultados del procesado gráfico con los teóricos de óptica física. Placa plana cuadrada de lado 2λ .

Placa cuadrada de lado 2λ :

Máximo $\theta = 0^\circ$:	$\frac{\sigma_{\max}}{AB} = \frac{4\pi}{\lambda^2} AB = 17 dB$
Primer nulo:	$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2L}\right) = 14.5^\circ$

El nivel de lóbulo principal a secundario es aproximadamente la suma del debido a la función $\sin u/u$, con máximo secundario en $\theta = 21^\circ$, y el debido al $\cos \theta$ en $\theta = 21^\circ$:

	$\sin u/u$	$\cos 21^\circ$	Total
NLPS	13.5 dB	0.6 dB	14.1 dB

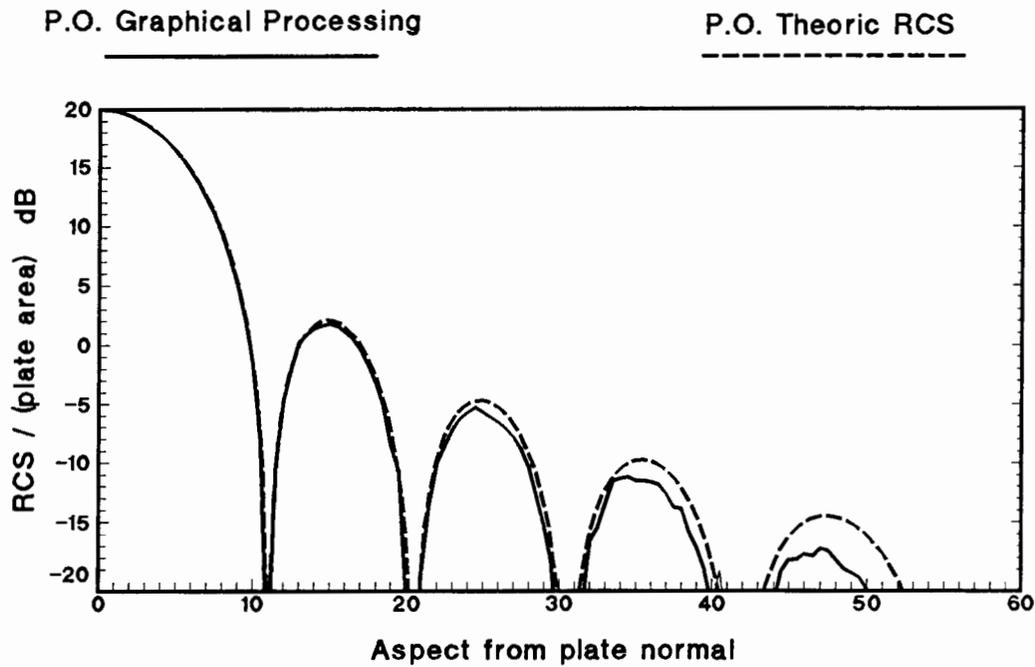


Figura 9-14: Comparación de los resultados del procesado gráfico con los teóricos de óptica física. Placa plana circular de perímetro 10λ .

Placa circular de perímetro 10λ :

Máximo $\theta = 0^\circ$:	$\frac{\sigma_{\max}}{\pi R^2} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \pi R^2 = 20 dB$
Primer nulo:	$\theta = \sin^{-1}\left(0.305 \frac{\lambda}{R}\right) = 11^\circ$

Para el NLPS, debe tenerse en cuenta que el máximo secundario de $J_1(u)/u$ está situado en $\theta = 15^\circ$:

	$J_1(u)/u$	$\cos 15^\circ$	Total
NLPS	17.6 dB	0.3 dB	17.9 dB

Los resultados de procesado gráfico coinciden con los valores teóricos para todos los parámetros, excepto el nivel de lóbulo principal a secundario. La diferencia, de 0.6 dB para la placa cuadrada y 0.3 dB para la circular, es debida a la ponderación $\cos \theta$ que se realiza para aplicar el principio de fase estacionaria.

Como puede observarse en las figuras 9-13 y 9-14, el error aumenta al alejarse la dirección de observación de la normal. Sin embargo, este efecto sólo es significativo en la sección recta de placas planas de tamaño eléctrico no muy grande, y se hace inapreciable en superficies curvadas y blancos complejos.

9.4 LIMITACIONES DE OPTICA FISICA

En el apartado 9.3 se ha comprobado la validez del procesado gráfico como una herramienta eficiente para calcular la integral de superficie de óptica física. Sin embargo, para que los valores de sección recta obtenidos sean correctos, es necesario que se cumpla la aproximación de óptica física.

En el capítulo 4 se vió como la teoría de óptica física se basaba en la aproximación del plano tangente para estimar las corrientes inducidas, responsables del campo dispersado. Esto significa que la aproximación de óptica física será aplicable en situaciones que se asemejen a un plano infinito, como son las superficies de gran radio de curvatura. Además, se despreja la posible interacción electromagnética entre elementos de superficie, con lo cual sólo se consideran las reflexiones de primer orden.

Por tanto, la aproximación de óptica física no es válida en las siguientes situaciones: pequeños radios de curvatura, aristas, vértices, superficies con reflexiones múltiples, etc.

Con objeto de evaluar la magnitud del error cometido al calcular la sección recta de cuerpos sencillos que presenten las características anteriores, se ha realizado una serie de simulaciones, comparando los resultados con los de métodos más exactos, con la intención de extrapolar las conclusiones al caso de blancos radar complejos, objetivo de esta tesis, que se analizarán con detalle en la sección 9.5.

9.4.1 Superficies de pequeño radio de curvatura

Debido a la aproximación del plano tangente, el método de óptica física no puede aplicarse a objetos de pequeñas dimensiones eléctricas, particularmente a superficies de pequeño radio de curvatura. Para conocer el límite inferior de validez de la aproximación, se ha aplicado el método de procesado gráfico a un cilindro circular infinito (problema bidimensional), obteniendo la sección recta -o el campo dispersado- en función del radio normalizado respecto a la longitud de onda.

La figura 9-16 muestra la sección recta bidimensional del cilindro para ambas polarizaciones, obtenida mediante la expresión exacta basada en la serie de autofunciones del problema canónico. El valor que predice la teoría de óptica geométrica (frecuencia infinita) es:

$$\sigma_{2-D} = \pi a \quad (9-11)$$

que en la gráfica de la figura 9-16 correspondería a una recta de pendiente π . Puede observarse que, salvo las oscilaciones debidas a las *creeping waves* que aparecen en el caso TE, la teoría de alta frecuencia aproxima muy bien la sección recta exacta.

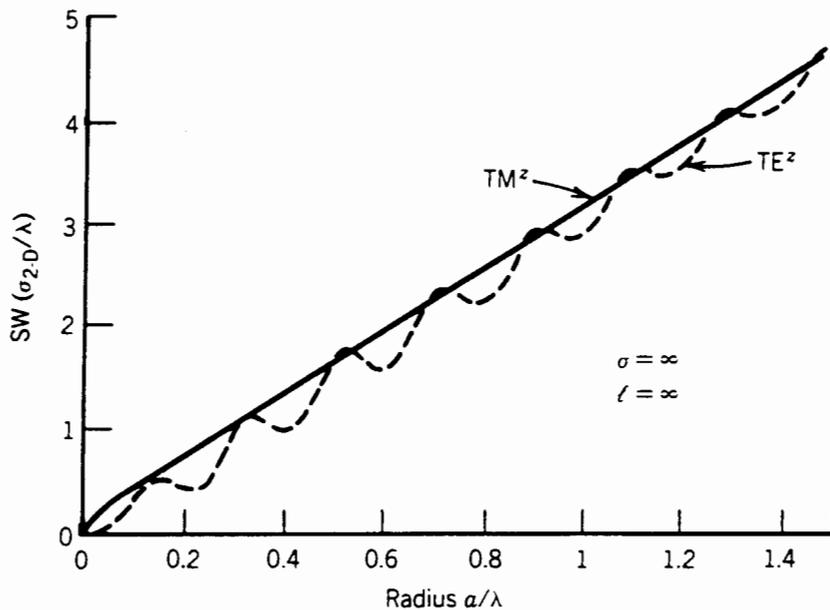


Figura 9-16: Sección recta monoestática de un cilindro infinito de radio a

Con objeto de cuantificar mejor el error cometido cuando el radio del cilindro tiende a cero, se ha obtenido el campo dispersado normalizado respecto al campo de óptica geométrica. En la figura 9-17 se presentan los resultados exactos comparados con los de óptica física y procesado gráfico. La gráfica del campo de óptica geométrica correspondería a una constante igual a uno.

Puede observarse que el campo exacto para la polarización TM (paralela al eje del cilindro) tiende a infinito si el radio tiende a cero. Esto es debido a que la sección recta exacta tiende a cero más despacio que la aproximación de óptica geométrica, como puede observarse en la figura 9-16.

Computed field / high-freq. field

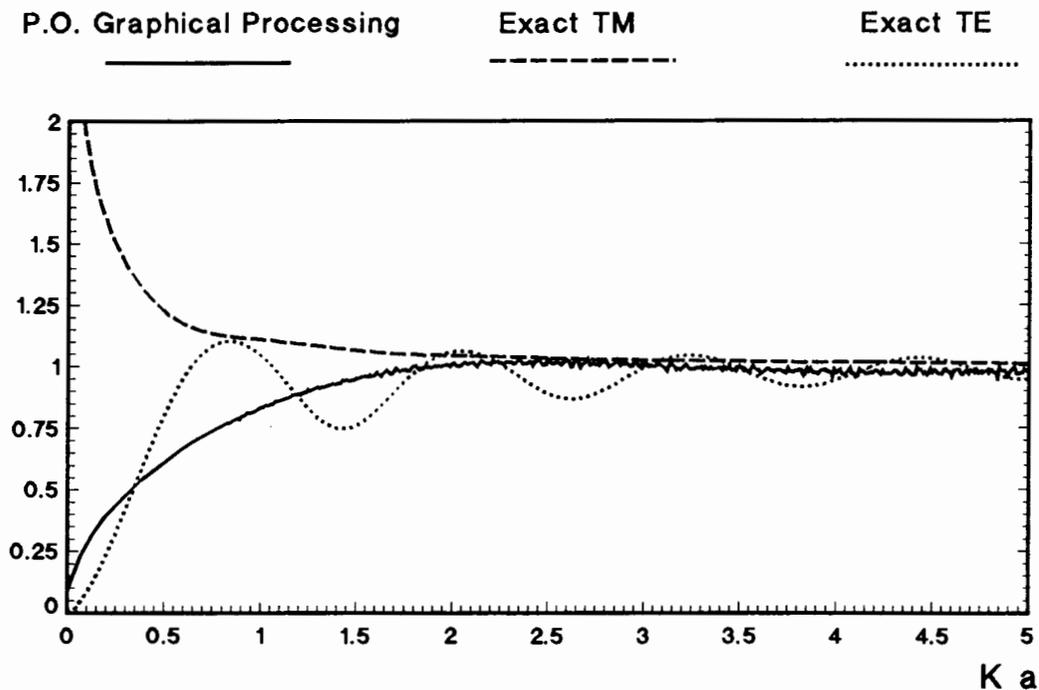


Figura 9-17: Campo dispersado monoestático por un cilindro infinito de radio α normalizado respecto a la aproximación de óptica geométrica. Comparación de los resultados exactos con los del procesado gráfico.

Por su parte, el campo exacto para la polarización TE (perpendicular al eje) tiende a cero más rápidamente que el de óptica geométrica (ver figura 9-16), por lo que en la figura 9-17 el campo TE normalizado tiende a cero al disminuir el radio. Además, presenta una serie de oscilaciones debidas a las *creeping waves*.

El campo obtenido por óptica física y procesado gráfico coincide con la aproximación de alta frecuencia para $Ka > 2$, mientras que tiende a cero para radios inferiores. Este comportamiento es debido a que si el radio es mucho menor que la longitud de onda, todos los puntos del cilindro radían en fase y la integral de superficie de óptica física, y por tanto el campo, es proporcional al radio α del cilindro. Como la sección recta según óptica geométrica también es proporcional

a α ; el campo lo es a $\sqrt{\alpha}$. De esta forma, el campo de óptica física normalizado respecto al de óptica geométrica es proporcional a $\sqrt{\alpha}$, como puede comprobarse en la figura 9-17.

Para $K\alpha < 1$, los resultados de óptica física y procesado gráfico predicen un campo muy inferior al exacto para polarización TM. Sin embargo, se aproximan bien para polarización TE, si se toma el valor medio de las oscilaciones. Por ello, al calcular la sección recta de estructuras en las que la amplitud de las *creeping waves* es despreciable, como son los bordes de ala, el método de óptica física aproxima bien los campos dispersados con polarización TE y se comete un error considerable con polarización TM.

En conclusión, al aplicar la aproximación de óptica física a blancos radar complejos se esperan obtener resultados correctos en todas las superficies con radio de curvatura mayor que 0.25λ . Para superficies de radio menor, como pueden ser los bordes de ataque y salida de las alas, se debería aproximar correctamente la polarización perpendicular al borde, salvo si el radio de curvatura es cero -arista-, y se espera obtener un resultado muy inferior para la polarización paralela.

9.4.2 Difracción en aristas

Como sabemos, la aproximación del plano tangente impide que la teoría de óptica física sea aplicable a superficies con radio de curvatura nulo, como aristas, cuñas y vértices. Uno de los ejemplos más evidentes es una placa plana. En la figura 9-18 se muestran los resultados clásicos de R.A.Ross [Ross'66], comparando la aproximación de óptica física con teoría geométrica de la difracción más reflexiones múltiples y medidas experimentales. Los resultados obtenidos con procesado gráfico para placas planas en el apartado 9.3.4 son análogos al de óptica física de la figura 9-18.

En el apartado 11 se presentará una implementación mediante procesado gráfico de la teoría física de la difracción, que corrige la aproximación de óptica física incluyendo la difracción de primer orden en aristas.

Para objetos mayores que la longitud de onda, la contribución de la reflexión en la superficie de una placa plana en función de la frecuencia y la dimensión es proporcional a $F^2 L^4$, mientras que la de las aristas y superficies doblemente curvadas lo es a $F^0 L^2$. Por ello, la contribución de la superficie -óptica física- es dominante en alta frecuencia, salvo en objetos carentes de superficies planas o en ángulos de observación en los que la contribución de éstas sea pequeña. Este efecto puede observarse claramente en la figura 9-18: para ángulos de observación próximos a la normal, predomina la contribución de óptica física, mientras que a partir de unos 45° empieza a ser dominante la difracción en aristas.

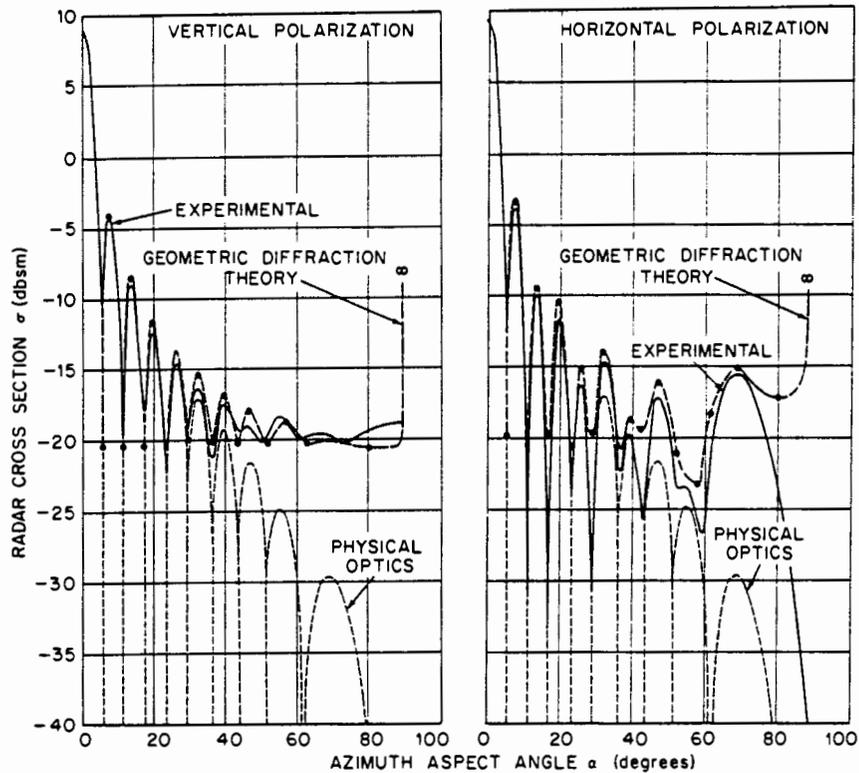


Figura 9-18: Sección recta de una placa plana de dimensiones $5 \times 5 \lambda$ a una frecuencia de 9.23 GHz. Comparación de óptica física con medidas experimentales y teoría geométrica de la difracción.

Además de las aristas en los bordes de placas (fig. 9-18), existen otras estructuras con un radio principal de curvatura nulo: cuñas de caras planas y de caras curvadas. Para evaluar el comportamiento de la aproximación de óptica física en estas situaciones, las figuras 9-19 a 9-27 presentan los resultados obtenidos con los problemas del *workshop* : "RCS of perfectly conducting or coated bodies" celebrado en Niza en noviembre de 1990, dentro de las "Journées Internationales de Nice sur les Antennes" (JINA'90). En todas ellas se comparan los resultados del procesado gráfico con los obtenidos por el "Centre Commun de Recherches Louis-Bleriot" de la compañía Aerospatiale utilizando métodos de baja frecuencia.

En el capítulo 10 se presentan los resultados obtenidos para estos problemas con recubrimientos absorbentes radar, y en el 11 se aplica la teoría física de la difracción por procesado gráfico. En éste capítulo, se considera únicamente el caso de objetos con superficie conductora perfecta.

El problema número uno es un cilindro de sección ojival infinito -problema bidimensional- (figura 9-19). En las figuras 9-20 y 9-21 se muestran los resultados del procesado gráfico comparados con los de Aerospacial.

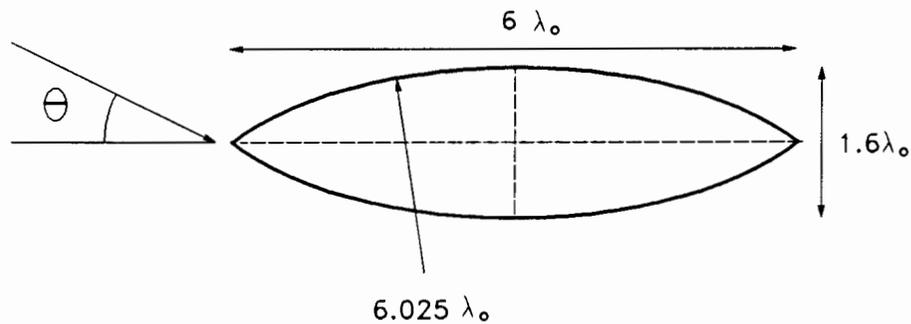


Figura 9-19: Problema 1 del workshop JINA '90. Cilindro infinito de sección ojival perfectamente conductor.

En el caso TM, para ángulos mayores que 60° , predomina la reflexión superficial y la coincidencia es perfecta. Para ángulos inferiores es significativa la difracción en la arista, y la aproximación de óptica física predice un resultado de sección recta muy inferior al real.

En el caso TE, la sección recta presenta oscilaciones debidas a *creeping waves* que no puede predecir la teoría de óptica física. Sin embargo, los resultados del procesado gráfico se ajustan muy bien a los de Aerospacial, si no se tienen en cuenta las oscilaciones, coincidiendo perfectamente para dirección de observación en la bisectriz de la cuña (0°).

Estos resultados permiten extender las conclusiones del apartado 9.4.1 a cuñas -radio de curvatura nulo-: la aproximación de óptica física predice correctamente la difracción monoestática para la polarización perpendicular a la arista y proporciona valores muy inferiores para la paralela.

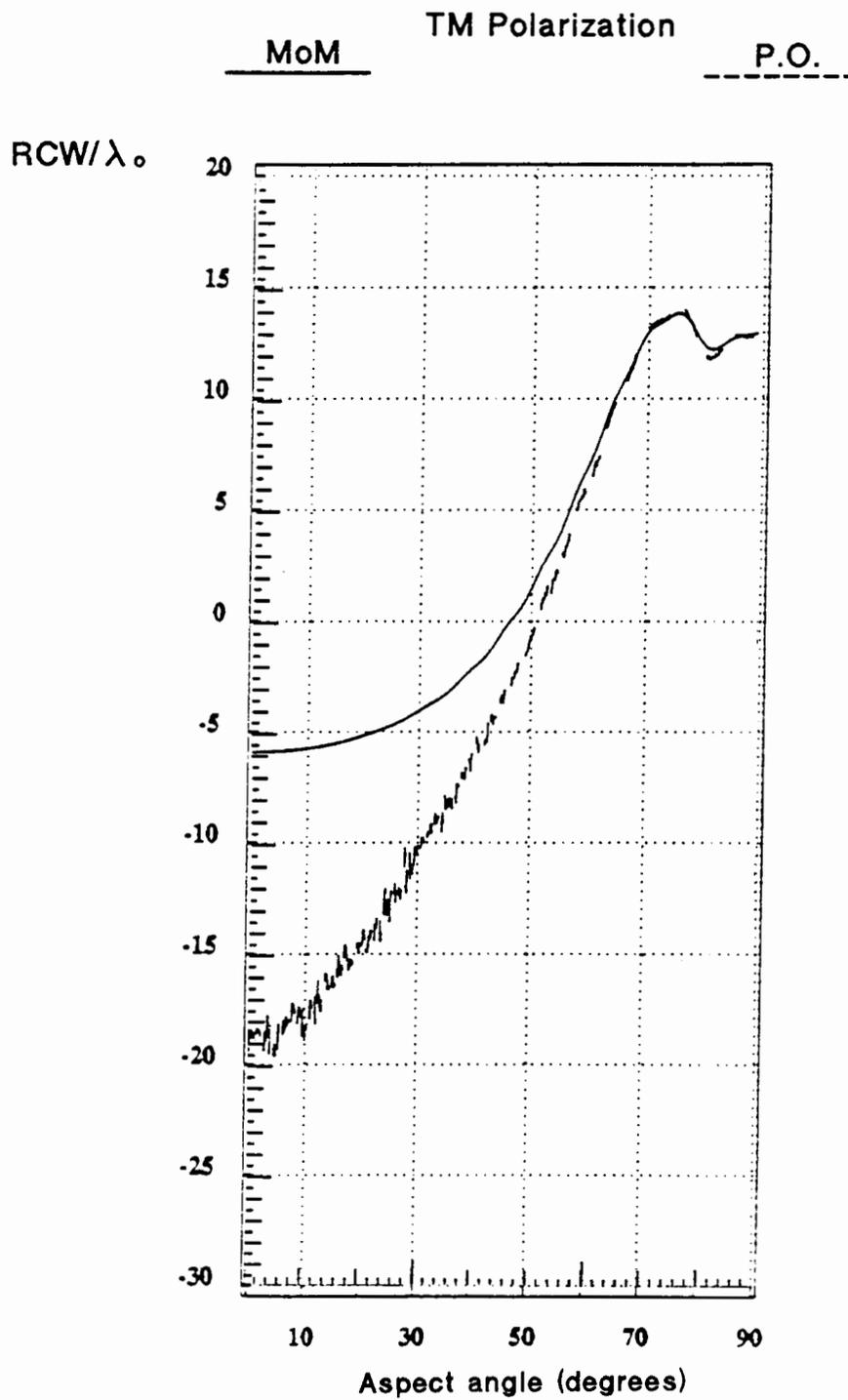


Figura 9-20: Problema 1 del workshop JINA '90. Cilindro infinito de sección ojival perfectamente conductor. Comparación del procesado gráfico con un método de baja frecuencia para polarización TM.

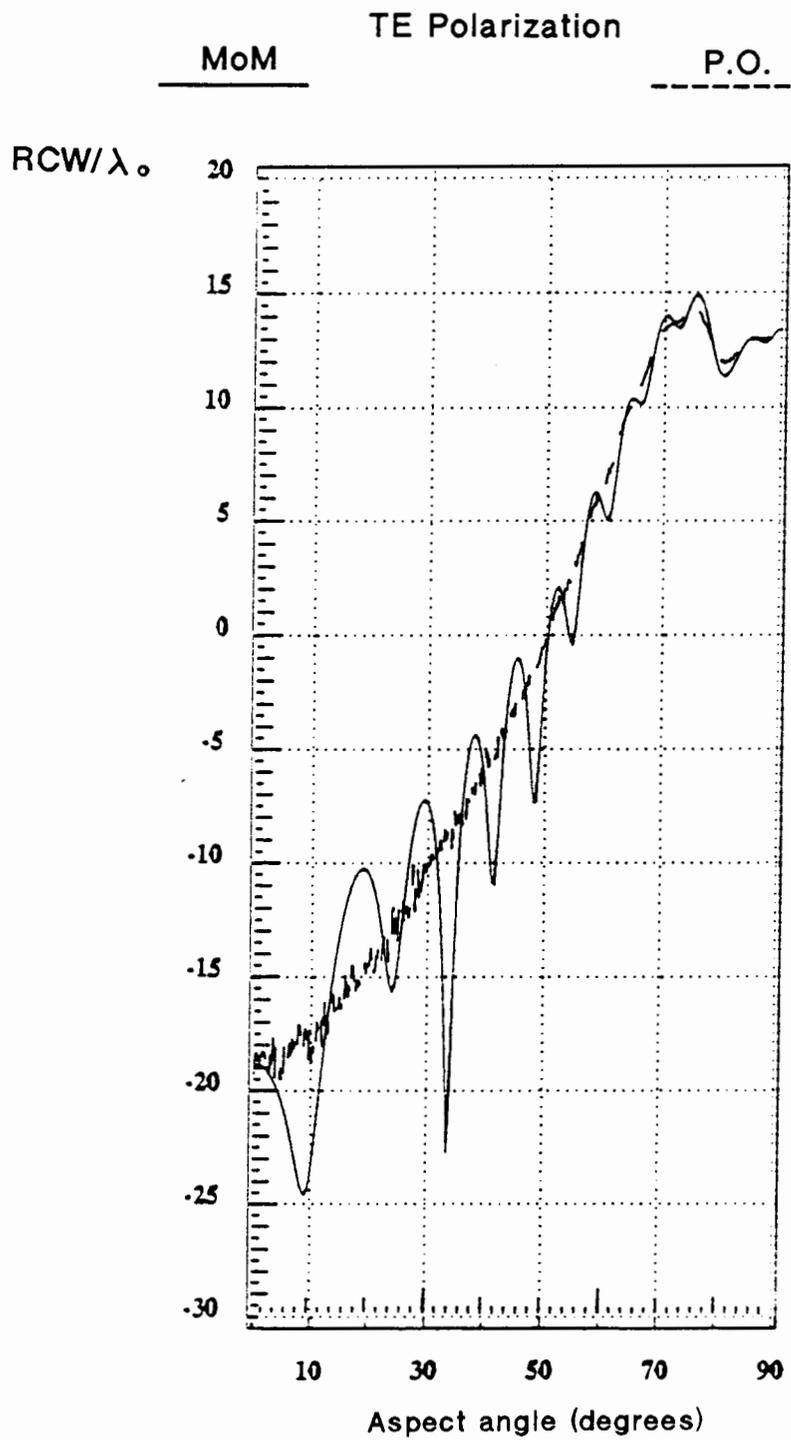


Figura 9-21: Problema 1 del workshop JINA'90. Cilindro infinito de sección ojival perfectamente conductor. Comparación del procesado gráfico con un método de baja frecuencia para polarización TE.

El segundo problema es un cilindro triangular (figura 9-22). En las figuras 9-23 y 9-24 se presentan los resultados de procesado gráfico superpuestos a los de baja frecuencia de Aeroespacial.

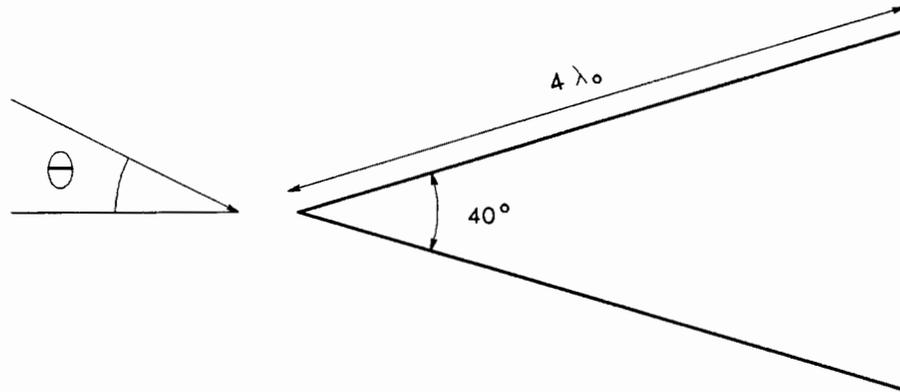


Figura 9-22: Problema 2 del workshop JINA'90. Cilindro infinito de sección triangular perfectamente conductor.

Para ambas polarizaciones la aproximación de óptica física es correcta en direcciones de observación en que predomine la contribución de las caras planas, dada por la ecuación (4-21).

En el caso de polarización TM, la difracción en aristas es muy importante y enmascara los ceros de la función *sinc* de (4-21). El error cometido empieza a ser significativo para ángulos que disten 20° de la normal a las caras, y es muy grande en la dirección de la bisectriz de las cuñas.

Para la polarización TE la difracción en la arista más cercana al observador no es tan importante, con lo que se obtienen nulos de sección recta más profundos que con polarización TM. A diferencia del problema anterior, en este caso no aparecen *creeping-waves*, pues las aristas visibles más alejadas del observador reflejan la onda de superficie que genera la polarización TE, evitando así que alcance a la arista oculta. Esta reflexión de la onda de superficie produce un retorno importante de la polarización perpendicular a las aristas cuando la incidencia es en el sentido de la cara hacia la arista (ver 11.3.2). Por este motivo, la curva de sección recta presenta oscilaciones debidas a la interferencia del campo difractado en las dos aristas lejanas. Evidentemente, la aproximación de óptica física no puede predecir estas oscilaciones.

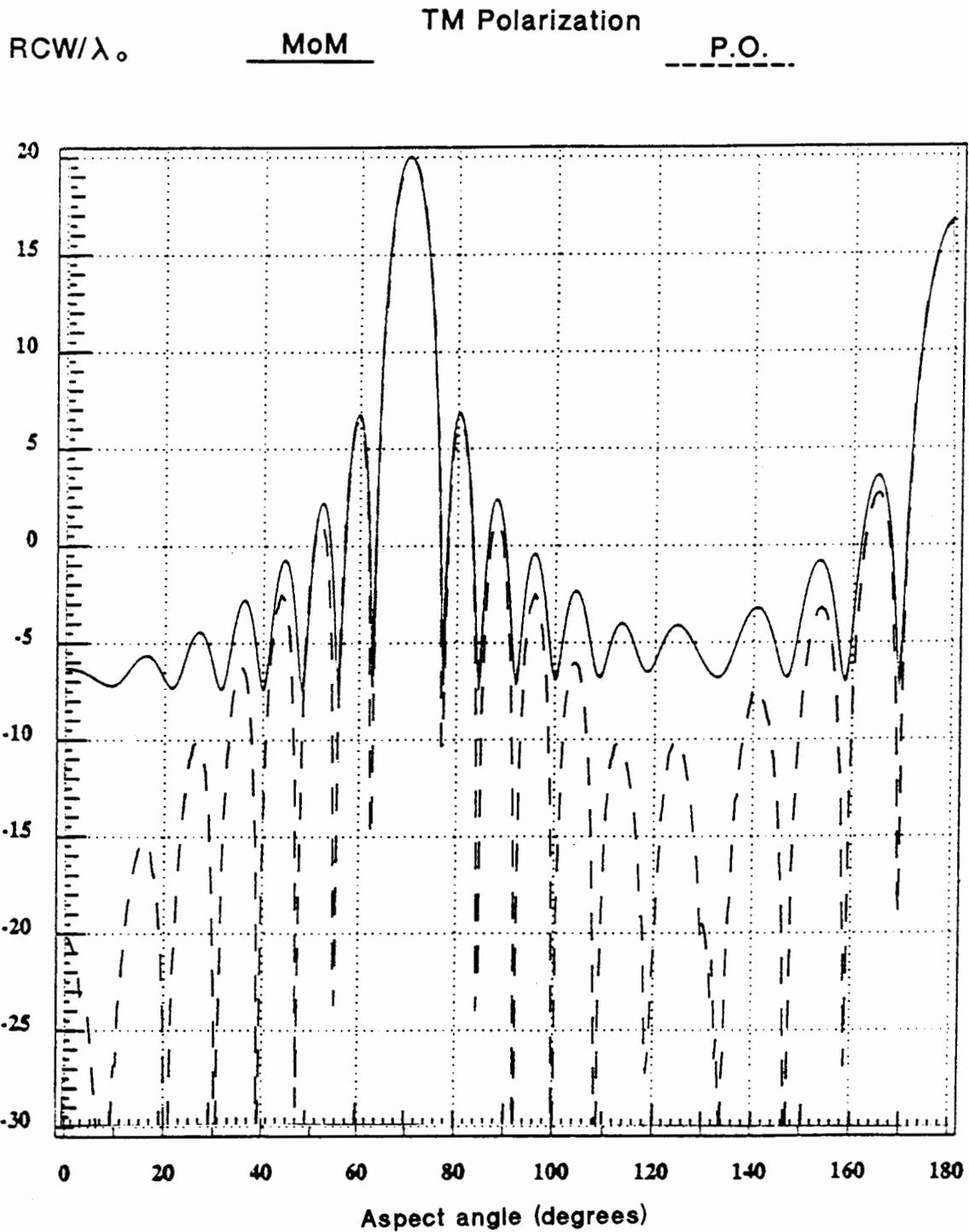


Figura 9-23: Problema 2 del workshop JINA'90. Cilindro infinito de sección triangular perfectamente conductor. Comparación del procesado gráfico con un método de baja frecuencia para polarización TM.

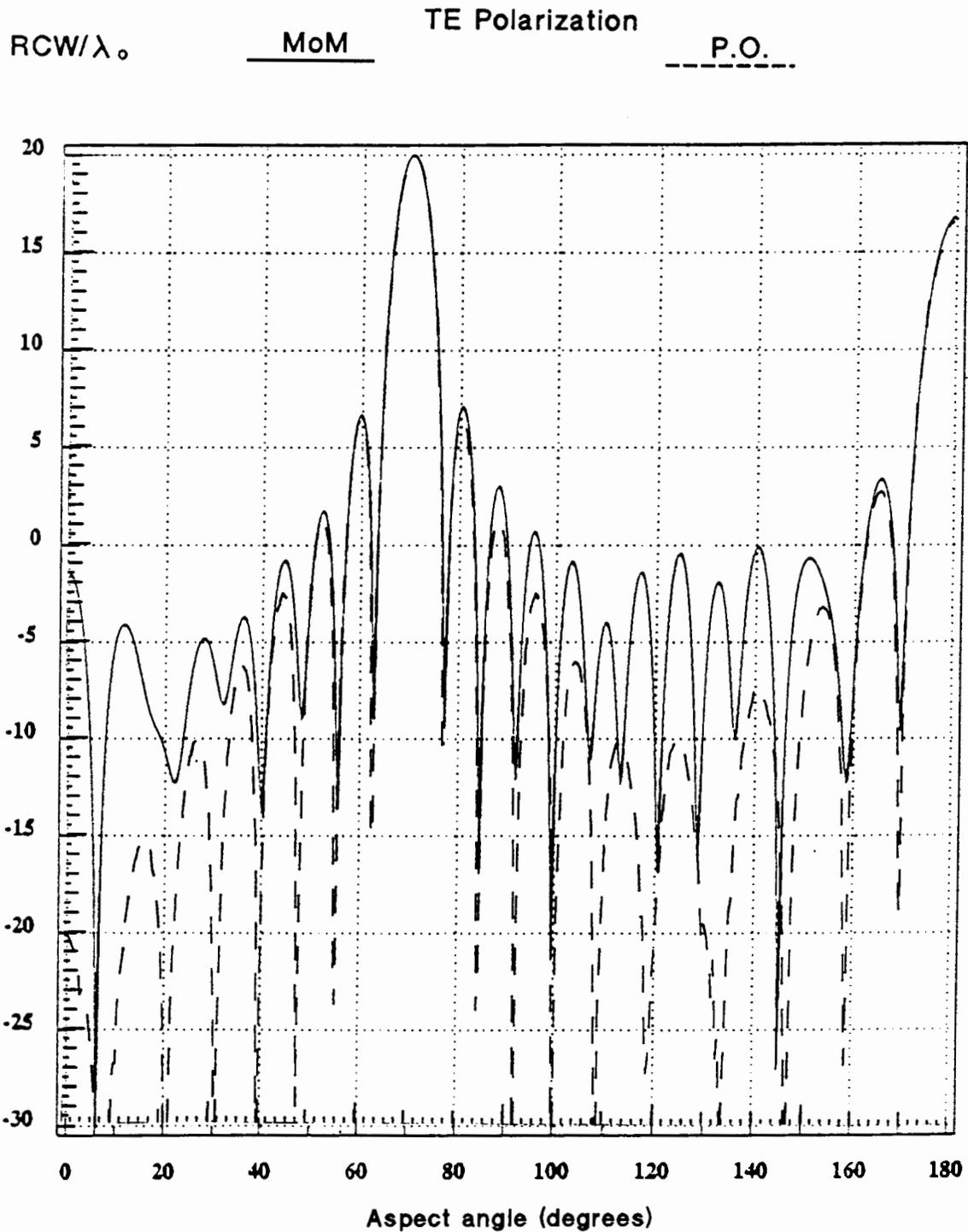


Figura 9-24: Problema 2 del workshop JINA'90. Cilindro infinito de sección triangular perfectamente conductor. Comparación del procesado gráfico con un método de baja frecuencia para polarización TE.

9.4.3 Difracción en vértices

Otro mecanismo de difracción cuya importancia es secundaria a la frecuencia de trabajo de los radar actuales es la difracción en puntas y vértices, en los que ambos radios principales de curvatura son nulos. Ello es debido a que la contribución a la RCS de los vértices varía con la frecuencia y la dimensión de la forma $F^{-2} L^0$, mientras que la de aristas y superficies doblemente curvadas es de tipo $F^0 L^2$, y la de placas planas $F^2 L^4$. Por ello, esta contribución sólo será apreciable en baja frecuencia y en direcciones de observación en las que no aparezcan superficies o aristas perpendiculares. Será poco importante en objetos complejos y eléctricamente grandes, como los blancos radar, en los que puede producirse este tipo de difracción en la punta del radomo frontal -supuesto opaco a la frecuencia del radar- y en las esquinas de alas y estabilizadores, si las hay.

Para cuantificar el error cometido por el procesado gráfico de óptica física en un vértice tridimensional, se ha calculado la sección recta del problema 4 del workshop del JINA '90: un cono terminado en esfera (figura 9-25). Las figuras 9-26 y 9-27 comparan los resultados del procesado gráfico de óptica física con los obtenidos por Aerospacial con un método de baja frecuencia.

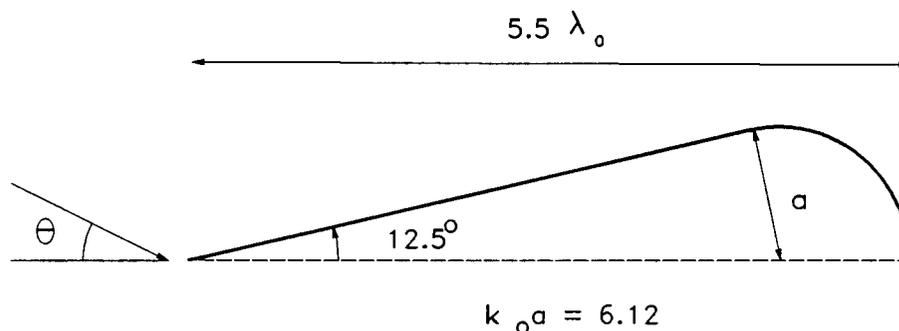


Figura 9-25: Problema 4 del workshop JINA'90. Cono terminado en esfera, perfectamente conductor.

La sección recta de un conoesfera incluye los siguientes mecanismos de difracción, por orden de importancia:

- Reflexión en la superficie lateral del cono o en la esfera. Se produce para direcciones de incidencia $\theta > 70^\circ$, ajustándose muy bien a los resultados de óptica física.
- *Creeping waves*, presentes para ambas polarizaciones por ser un problema tridimensional. Cuando el camino seguido por las *creeping waves* es muy

dependiente de la dirección de incidencia, aparecen fuertes oscilaciones. Este fenómeno es particularmente notable en el caso de polarización horizontal $\theta\theta$.

- Difracción en el vértice, apreciable sólo cuando los efectos anteriores presentan una respuesta muy baja, como en la dirección del eje del cono $\theta \approx 0^\circ$.
- Difracción en la discontinuidad de curvatura en la unión entre cono y esfera. Es del orden $F^{-3}L^{-1}$, por lo que su importancia es mínima.

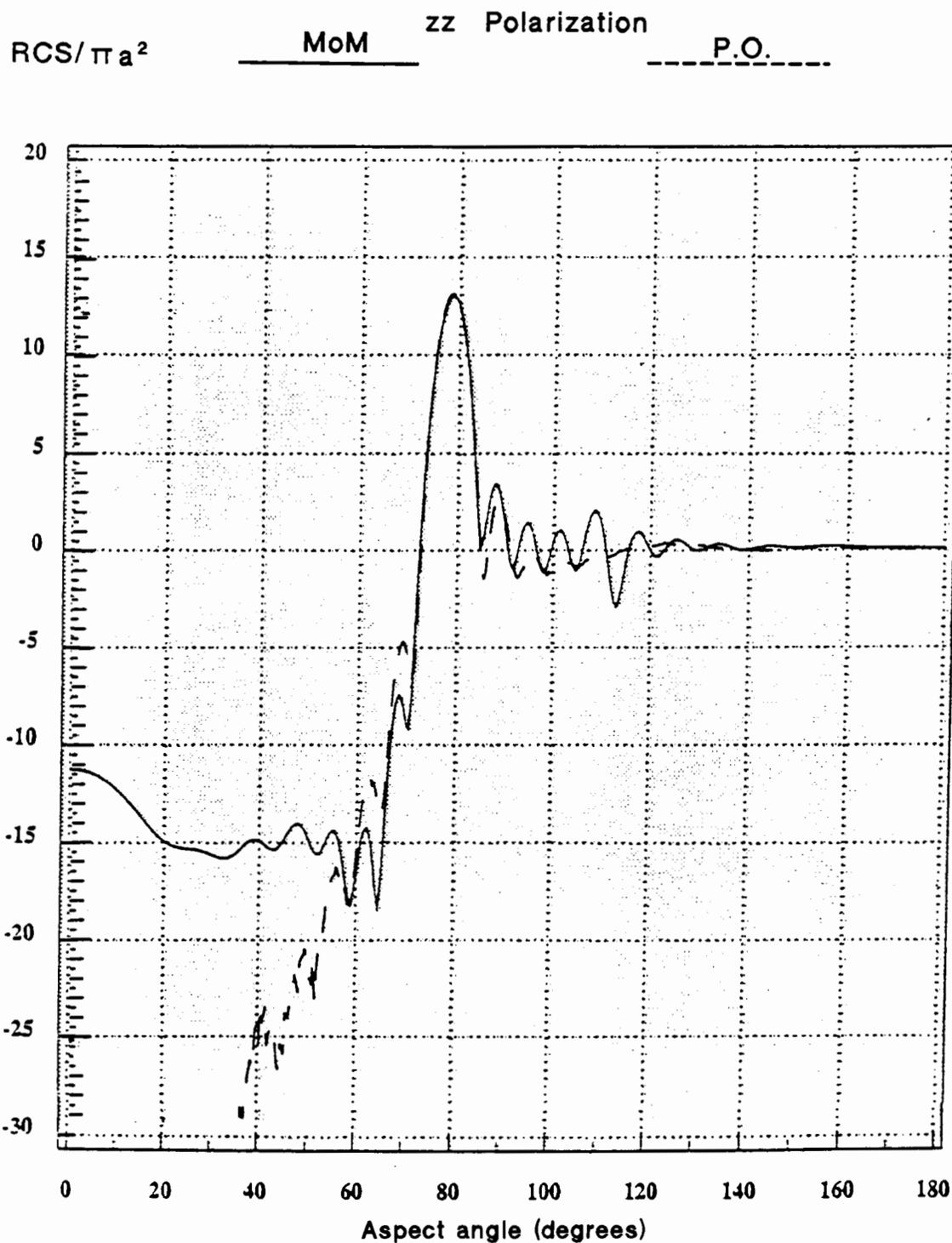


Figura 9-26: Problema 4 del workshop JINA'90. Cono terminado en esfera, perfectamente conductor. Comparación del procesado gráfico con un método de baja frecuencia para polarización zz (perpendicular al plano acimutal).

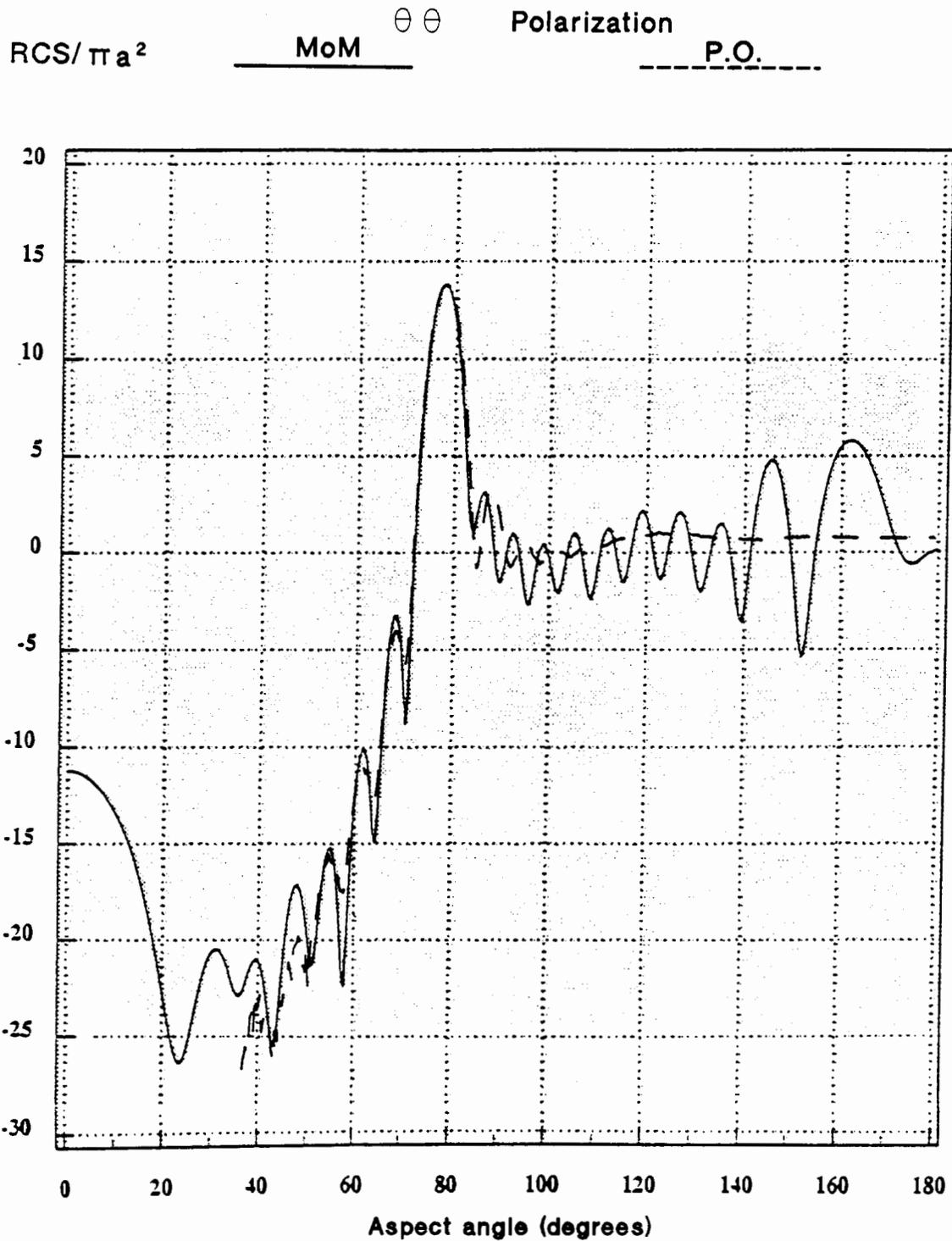


Figura 9-27: Problema 4 del workshop JINA'90. Cono terminado en esfera, perfectamente conductor. Comparación del procesado gráfico con un método de baja frecuencia para polarización $\theta\theta$ (paralela al plano acimutal).

9.4.4 Reflexiones múltiples

Como se ha explicado en el capítulo 4, la teoría de óptica física aproxima las corrientes inducidas sobre la superficie del objeto, que radían el campo dispersado, por las corrientes que produciría el campo incidente sobre un plano tangente. Esto significa que, además de realizar la aproximación del plano tangente, se supone que la reflexión es de primer orden. La aproximación es buena cuando las interacciones electromagnéticas entre distintos elementos de superficie son despreciables, es decir, cuando la difracción es un fenómeno local.

La situación anterior es la habitual en alta frecuencia, salvo cuando se producen reflexiones múltiples entre superficies. En este caso, el campo reflejado total en alta frecuencia suele aproximarse considerando reflexiones intersuperficiales de tipo especular, mediante criterios de óptica geométrica.

El citado fenómeno se pone particularmente de manifiesto cuando el blanco presenta superficies planas que formen ángulos rectos entre sí -diedros o triedros-. En estos casos, la sección recta de los diedros es mucho mayor que la que predice óptica física, por lo que deben aplicarse otros métodos. En el capítulo 12 se desarrolla un algoritmo original de procesamiento gráfico para resolver las interacciones múltiples entre superficies.

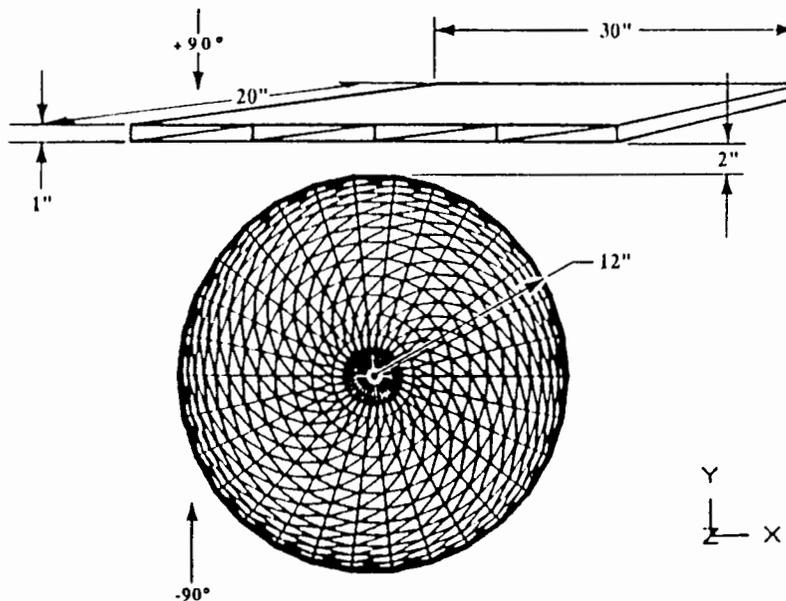
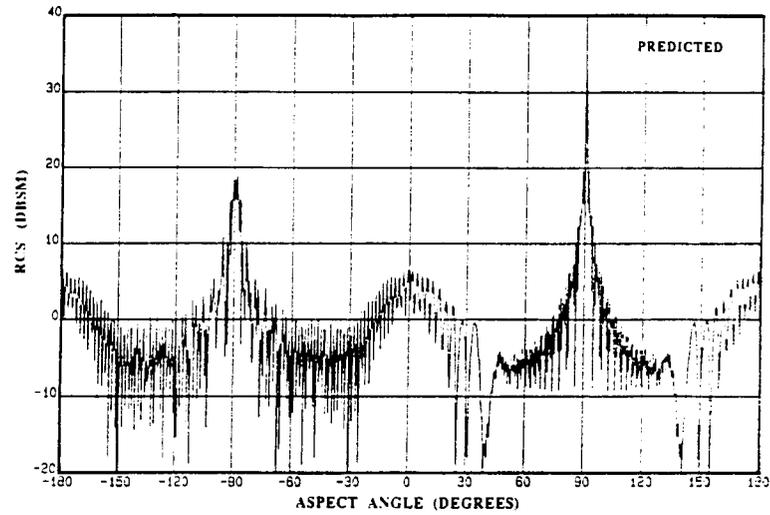
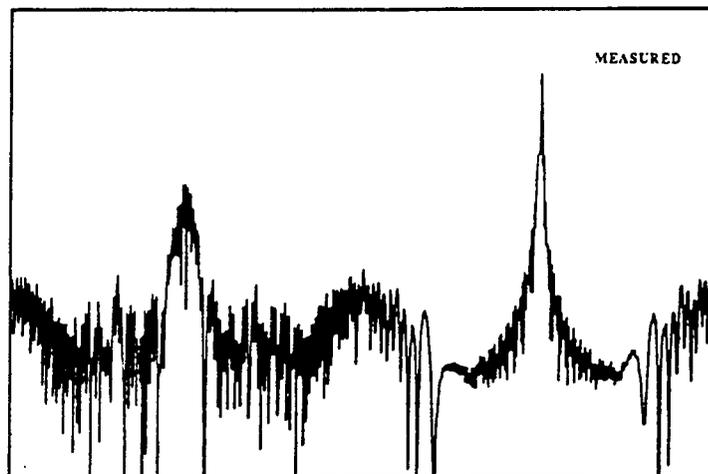


Figura 9-28: Esfera frente a placa rectangular, ambas perfectamente conductoras. Las dimensiones se expresan en pulgadas.

En el presente apartado se va a evaluar el error cometido por óptica física de primer orden cuando en las dobles reflexiones intervienen superficies curvadas. Para ello se ha modelado una esfera situada frente a un plano conductor finito (figura 9-28).



(a)



(b)

Figura 9-29: a) Predicción del código RECOTA y b) medidas experimentales, para el modelo de la figura 9-28 a una frecuencia 10 GHz y con polarización vertical [Youssef'89].

La figura 9-29 presenta medidas experimentales a 10 GHz y los resultados del código RECOTA [Youssef'89], de la compañía Boeing Aerospace (ver 9.1), que calcula las reflexiones múltiples en un modelo de facetas utilizando la aproximación de óptica física.

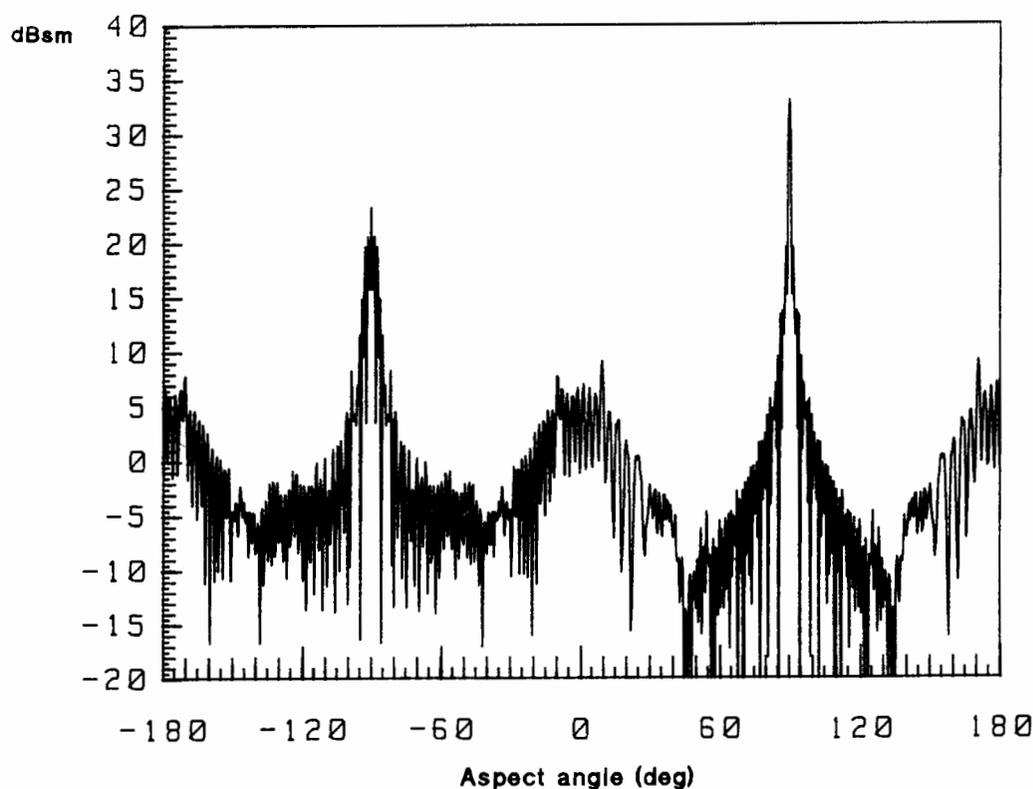


Figura 9-30: Resultados de óptica física y procesamiento gráfico para el modelo de la figura 9-28, a 10 GHz con polarización vertical.

Los resultados del procesamiento gráfico se muestran en la figura 9-30. Puede observarse que se aproximan muy bien a las medidas experimentales, y aún mejor a los resultados del código RECOTA. La conclusión evidente es que la contribución de las reflexiones de primer orden predomina sobre las de orden superior. Este resultado posiblemente puede extrapolarse a las reflexiones entre superficies curvadas en blancos radar complejos, por lo que no cabe esperar una contribución importante de las reflexiones múltiples, salvo cuando intervenga el diedro formado por los estabilizadores horizontal y vertical.

9.5 APLICACION A BLANCOS RADAR REALES

Una vez validado el algoritmo de procesado gráfico para cuerpos canónicos y objetos sencillos, y vistas las limitaciones de la aproximación de óptica física, para alcanzar el objetivo de la presente tesis es finalmente necesario evaluar el comportamiento del método desarrollado para la predicción de sección recta de blancos radar reales. Para que la validación sea completa, se van a considerar objetos complejos tanto dentro del dominio de validez de la aproximación de óptica física como fuera del mismo.

Al aplicar la aproximación de óptica física a blancos radar reales, las siguientes partes de los mismos son susceptibles de producir errores en los resultados de sección recta, además de otras de menor importancia:

- bordes de ataque de alas y estabilizadores, por el pequeño radio de curvatura de la superficie
- bordes de salida de alas y estabilizadores, por presentar aristas
- punta del radomo (supuesto opaco) y esquinas de alas y estabilizadores, por contener vértices
- diedro formado por los estabilizadores horizontal y vertical, por la posibilidad de que se produzcan dobles reflexiones
- tomas de aire y toberas de los motores, porque forman cavidades

En la sección 9.4 se ha comprobado, a través de un estudio realizado con objetos sencillos, que la limitación más grave de la aproximación de óptica física es el tratamiento incorrecto de aristas y cuñas. Otras situaciones estudiadas, como la difracción en vértices, las superficies de pequeño radio de curvatura o las reflexiones múltiples entre superficies curvadas, introducen errores de menor importancia.

Sin embargo, otras contribuciones muy importantes a la sección recta que no se han considerado en el apartado 9.4 son las dobles reflexiones en diedros y las cavidades. A las primeras se dedica el capítulo 12, mientras que para las segundas no se ha encontrado solución por procesado gráfico y deben analizarse por otros métodos [Hermida'90], [Hermida'90 Dallas], [Ling'90].

En el apartado siguiente, vamos a estudiar el comportamiento del procesado gráfico en los bordes de alas y estabilizadores, mientras que en los dos últimos apartados de esta sección se presentan resultados obtenidos con blancos radar reales.

9.5.1 Perfiles de ala y estabilizadores

El primer perfil de ala que se ha analizado es el definido por la norma NACA 3317 [Jacobs'33], que muestra la figura 9-31. Los resultados del código RECOTA y medidas experimentales de la compañía Boeing Aerospace [Youssef'89] se presentan en las figuras 9-33 y 9-32 respectivamente. El código RECOTA, que se ha descrito en la sección 9.1, utiliza modelado por facetas planas aplicando óptica física y teoría física de la difracción. Por tanto, es capaz de predecir correctamente la difracción en aristas.

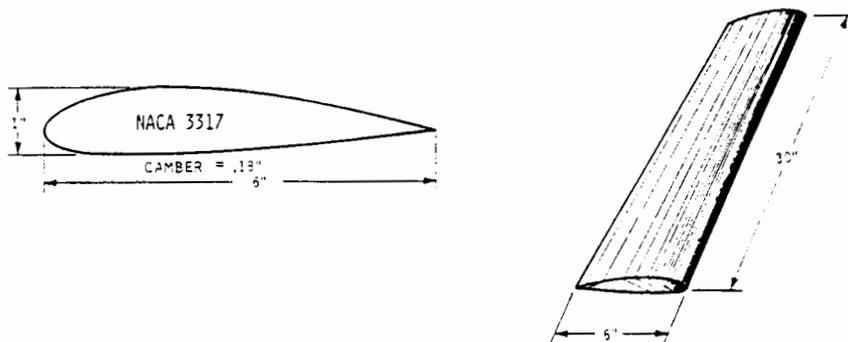


Figura 9-31: Perfil de ala NACA 3317

Los resultados del procesado gráfico se muestran en la figura 9-34 para distintos valores de resolución en la visualización de las superficies paramétricas NURB. Como se indicó en la sección 7.2.5, el acelerador gráfico aproxima las superficies paramétricas mediante una malla de facetas planas. El valor numérico de la resolución representa el número de lados de una poligonal que aproxima la curva paramétrica entre dos nodos consecutivos. En el caso de superficies paramétricas, cada sub-parche superficial comprendido entre cuatro nodos es aproximado por una malla de (*resolución x resolución*) facetas.

En primer lugar debe observarse que la respuesta en las direcciones 0° y 180° es debida a las tapas planas situadas en los extremos del ala. La siguiente tabla resume los valores de sección recta obtenidos en las medidas, por el código RECOTA y por el procesado gráfico, para los bordes de ataque y salida del perfil de ala:

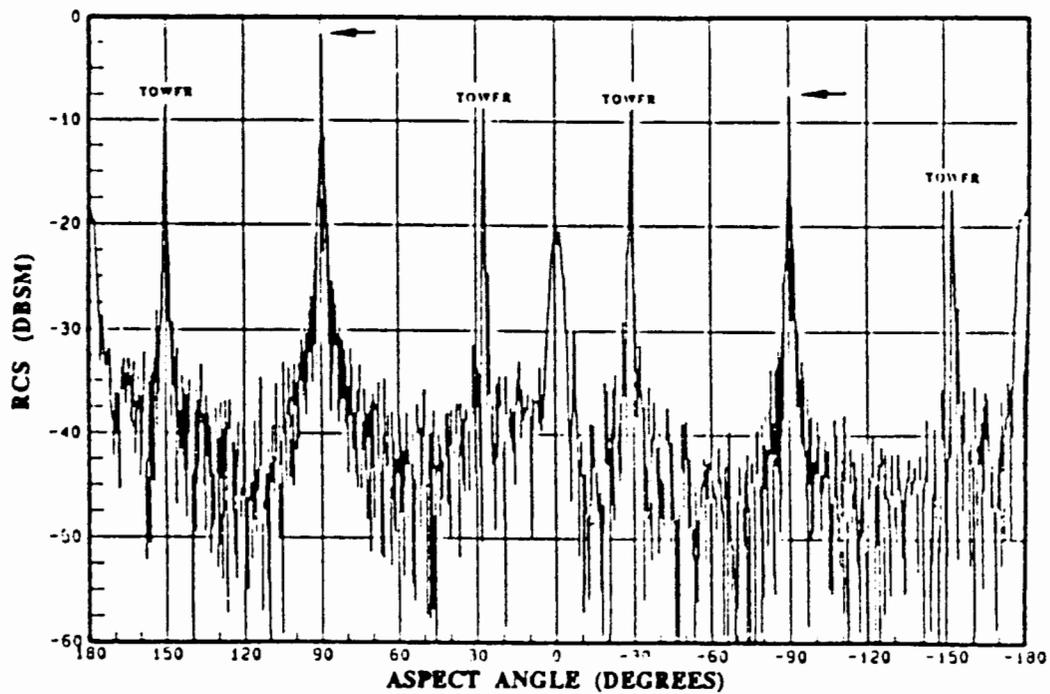
			Procesado gráfico		
	Polariz.	Medida	RECOTA	Res. 1	Res. 100
Ataque $\theta = 90^\circ$	Horizontal	-2 dBsm	-1 dBsm	1 dBsm	1 dBsm
	Vertical	-3 dBsm	-1 dBsm	1 dBsm	1 dBsm
Salida $\theta = -90^\circ$	Horizontal	-8 dBsm	-6 dBsm	-13 dBsm	-9 dBsm
	Vertical	-17 dBsm	-17 dBsm	-13 dBsm	-9 dBsm

En el borde de ataque se obtienen los mismos valores de sección recta para ambas polarizaciones, pues el radio de curvatura de la superficie es aproximadamente $\lambda/4$ a 16 GHz, en el límite de validez de la aproximación de óptica física. Por ello, el error cometido por el método de procesado gráfico no es grande, del orden de unos 3 dB.

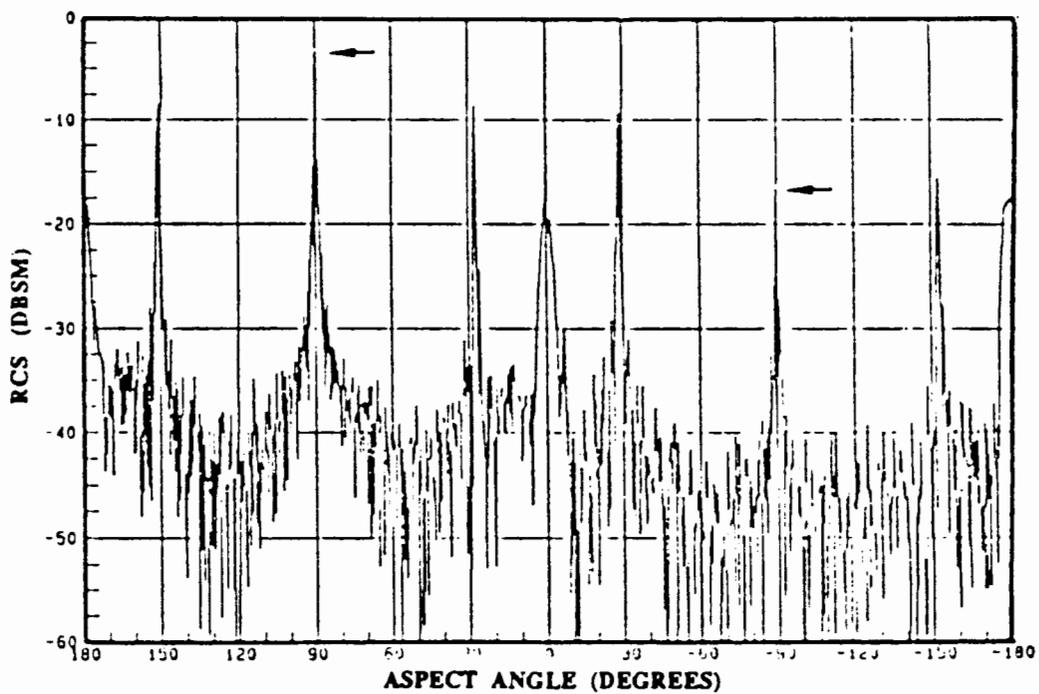
El borde de salida es una cuña afilada, con un ángulo interior de 20° , por lo que se observa una gran dependencia con la polarización. Como se indicó en el apartado 9.4.2, la sección recta para la polarización paralela a la arista es mucho mayor que para la perpendicular. Los resultados del procesado gráfico se encuentran comprendidos entre los valores reales para ambas polarizaciones y varían ligeramente con la resolución. Para una resolución baja se acercan a la polarización perpendicular a la arista, mientras que para una resolución alta tienden a la polarización paralela.

Este comportamiento se explica considerando que la cuña del borde de salida ha sido modelada como una superficie de radio de curvatura pequeñísimo. Si se visualiza con una resolución baja, las facetas que aproximan la superficie paramétrica son de tamaño demasiado grande para seguir un radio de curvatura tan pequeño, y forman realmente una cuña. Por ello, la sección recta calculada por procesado gráfico y óptica física es similar al valor real con polarización perpendicular (ver 9.3.1 y 9.3.2). Sin embargo, si la resolución es muy alta, la discretización en facetas modela una superficie de pequeño radio de curvatura, en la que existe una línea de reflexión especular, y la sección recta calculada por óptica física aumenta.

El nivel de "ruido de fondo" obtenido con procesado gráfico aumenta con la resolución. Si ésta es baja, el nivel es similar a la predicción del código RECOTA, mientras que si la resolución aumenta, el nivel se aproxima a la medida experimental. La explicación reside en que una baja resolución produce resultados similares a los del modelado con facetas planas -código RECOTA-, y una resolución alta modela con mayor precisión la realidad electromagnética.

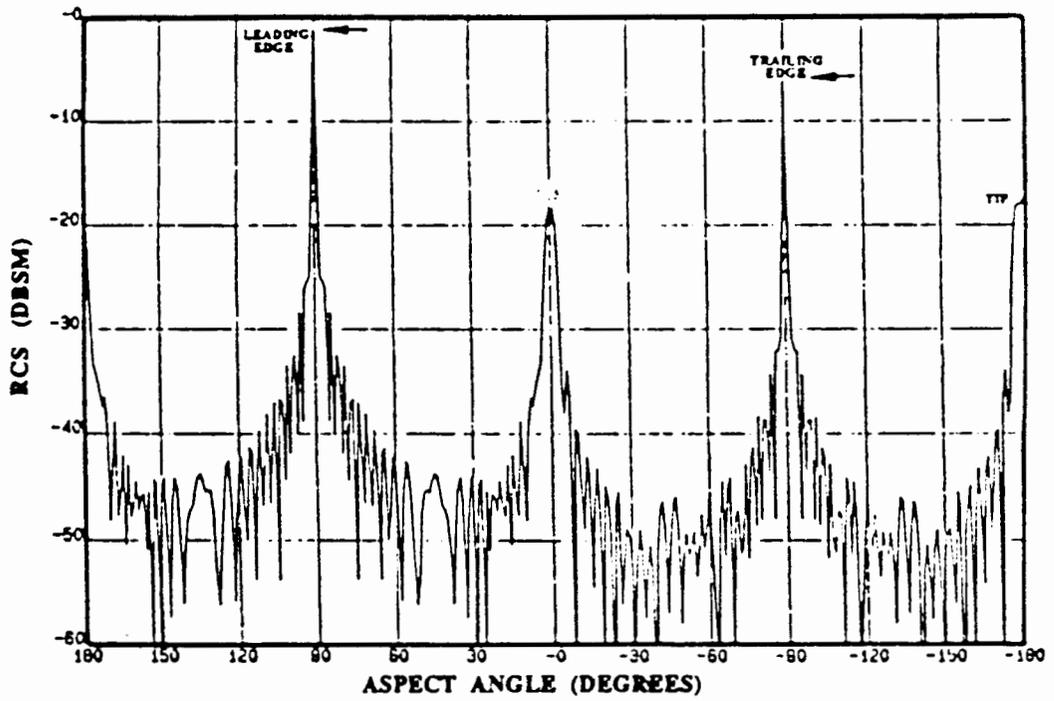


a) Medida con polarización horizontal

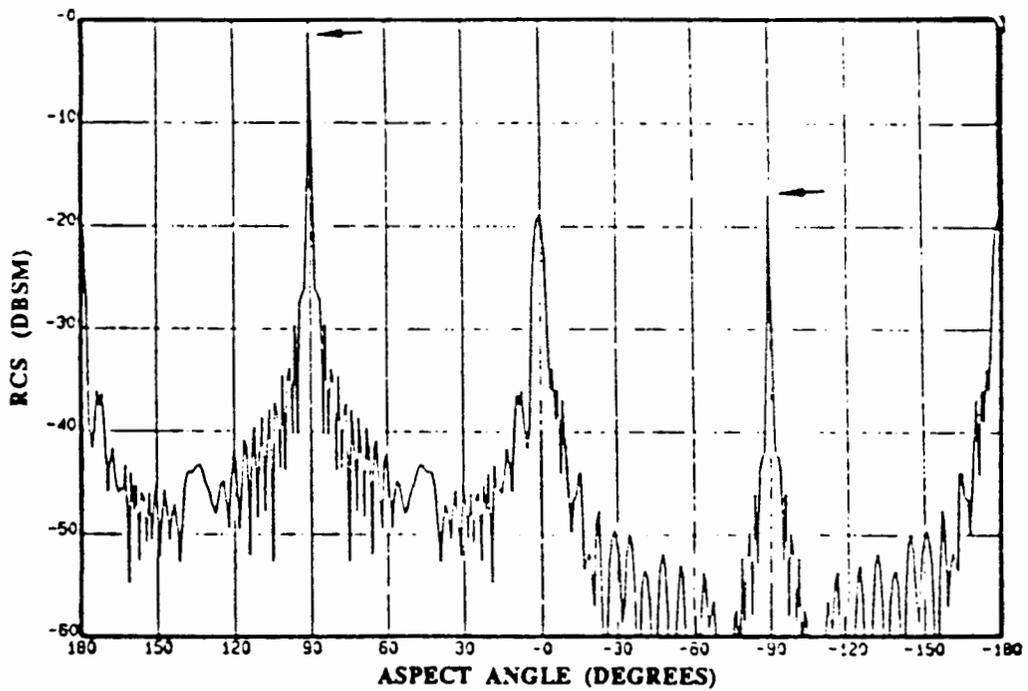


b) Medida con polarización vertical

Figura 9-32: Sección recta del perfil NACA 3317 a 16 GHz [Youssef'89]

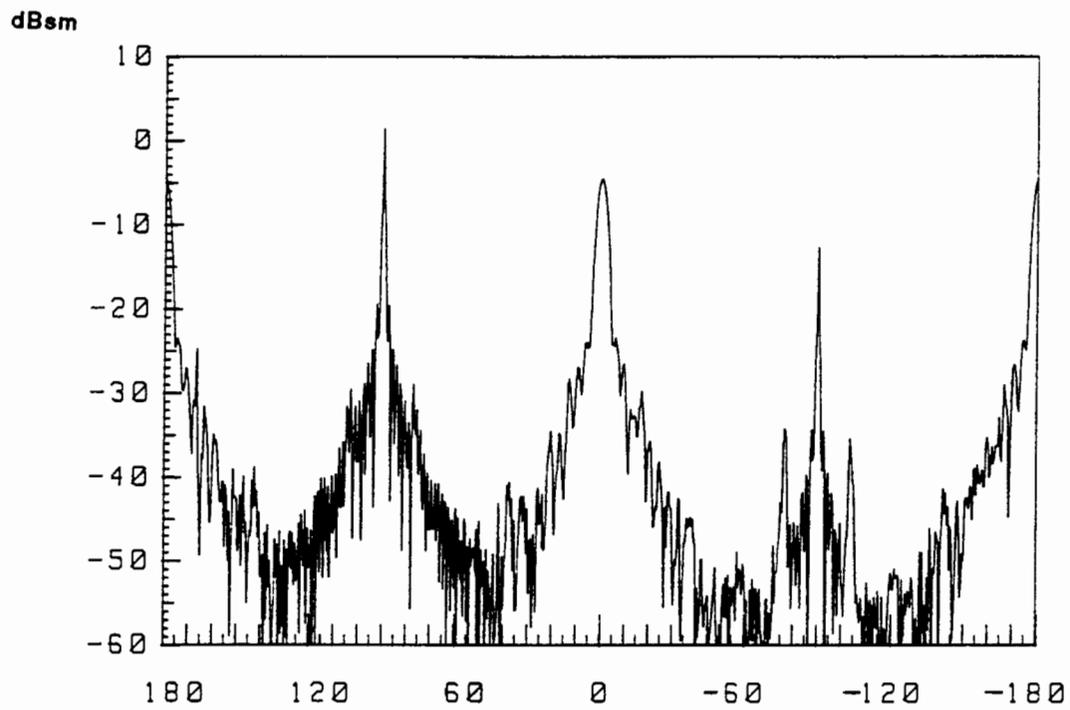


a) Predicción RECOTA con polarización horizontal

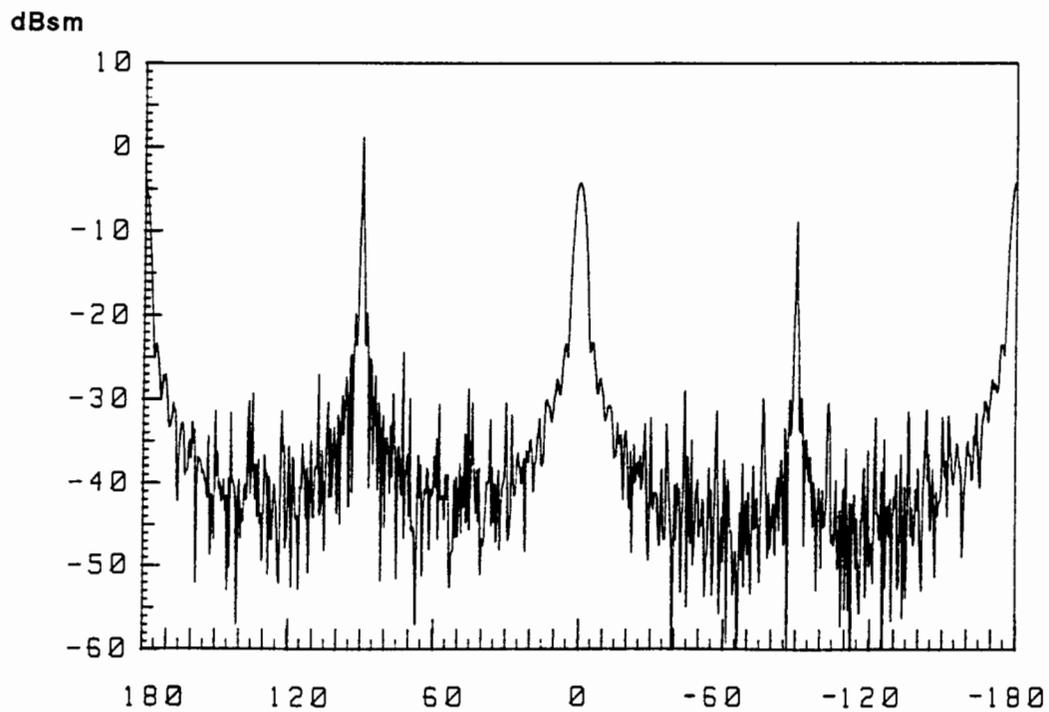


b) Predicción RECOTA con polarización vertical

Figura 9-33: Sección recta del perfil NACA 3317 a 16 GHz [Youssef'89]



a) Resolución = 1



b) Resolución = 100

Figura 9-34: Sección recta del perfil NACA 3317 a 16 GHz con óptica física y procesado gráfico.

También se ha analizado el perfil de ala propuesto en el workshop JINA'90 (ver 9.4.2), representado en la figura 9-35. Las figuras 9-36 y 9-37 muestran los resultados de óptica física y procesado gráfico, comparándolos con los obtenidos por Aerospatiale utilizando un método de baja frecuencia. La resolución utilizada para la visualización del modelo es de 50, un valor considerablemente alto.

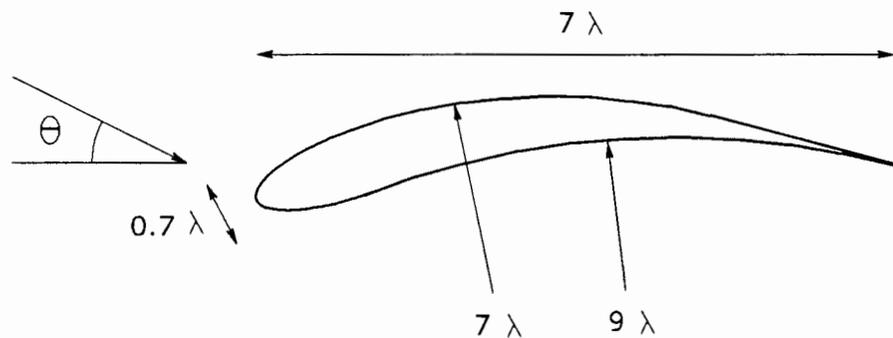


Figura 9-35: Problema 3 del workshop JINA'90. Cilindro infinito de sección perfil de ala, perfectamente conductor.

Para la polarización TM, la aproximación de óptica física predice correctamente la sección recta en direcciones perpendiculares a las superficies: entre -120° y -40° para la zona convexa y entre 50° y 115° para la cóncava. En el borde de ataque, alrededor de 0° , se comete un error de 2 dB debido al pequeño radio de curvatura de la superficie, mientras que en el borde de salida la difracción en la arista es predominante y el error muy grande.

Como la difracción en las aristas es mucho menor para la polarización TE, los resultados de óptica física concuerdan muy bien con los de baja frecuencia para todos los ángulos de observación. Únicamente aparecen discrepancias en un margen angular estrecho cuando se iluminan los bordes de ataque o de salida. Ello es debido a que la difracción en la arista del borde de salida afecta incluso cuando se ilumina en la dirección del borde de ataque, pues refleja la onda de superficie que genera la polarización TE, perpendicular a la arista.

En conclusión, el método de óptica física por procesado gráfico predice correctamente la sección recta de perfiles de ala para todas las direcciones de incidencia, salvo las próximas al borde de salida. En este caso, el resultado depende de la resolución en la visualización de la superficie paramétrica. Si ésta es baja, el resultado será similar al de los métodos clásicos de óptica física y modelado con facetas planas, y, por tanto, a la respuesta de la polarización perpendicular. Si la resolución es alta, la sección recta aumenta, acercándose a los valores medidos con polarización paralela.

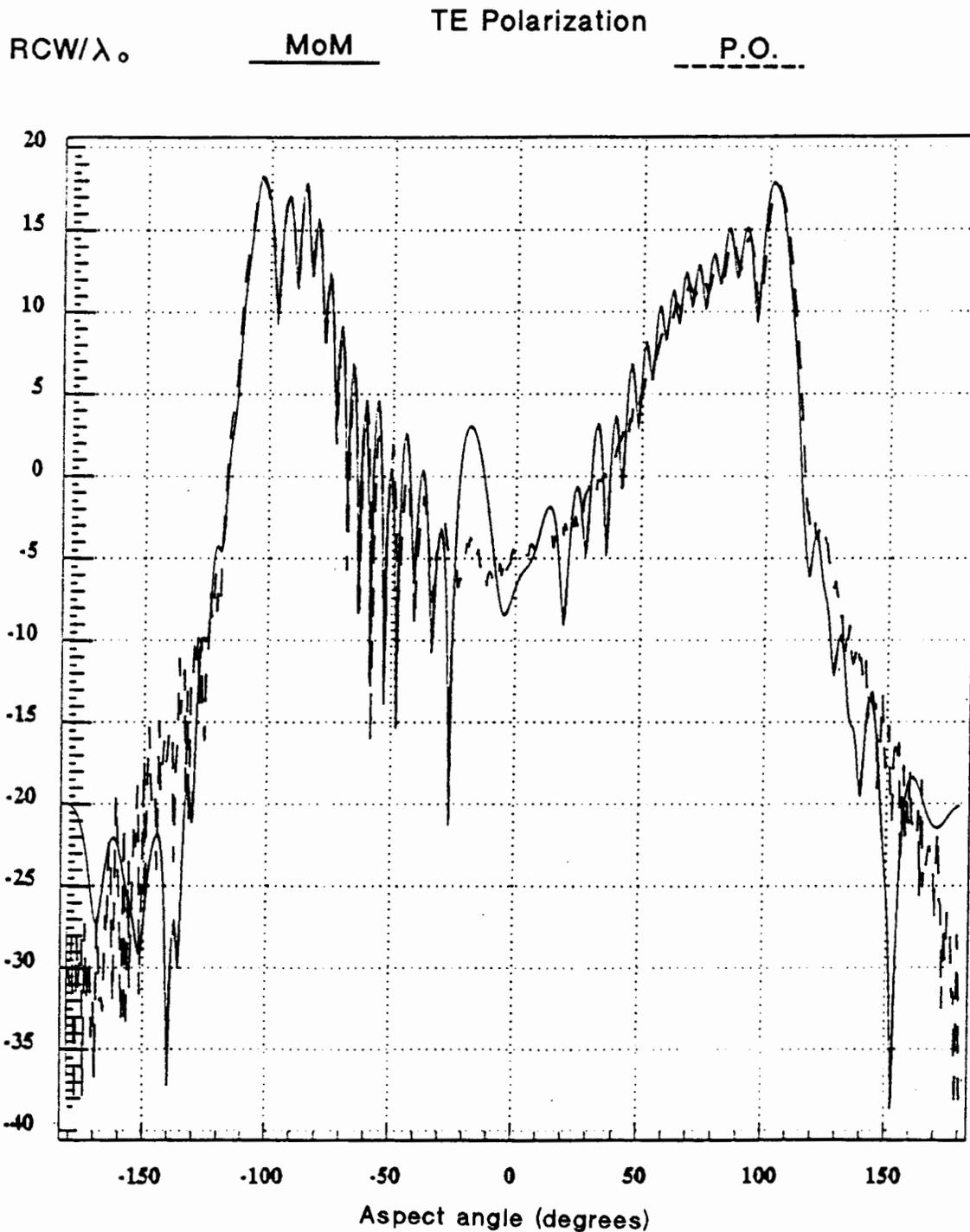


Figura 9-37: Problema 3 del workshop JINA'90. Cilindro infinito de sección perfil de ala, perfectamente conductor. Comparación del procesado gráfico con un método de baja frecuencia para polarización TE.

9.5.2 Misil

En esta sección se comparan los resultados del procesado gráfico obtenidos para un misil genérico, figura 9-38, con los de los códigos RECOTA, de la compañía Boeing Aerospace [Youssef'89], y TOTAL, de las Universidades de Cantabria y Madrid [Abad'90] [Domingo'90]. Ambos se basan en el modelado por facetas planas, teniendo en cuenta la difracción en aristas (método de corrientes equivalentes con teoría física de la difracción) y las dobles reflexiones.

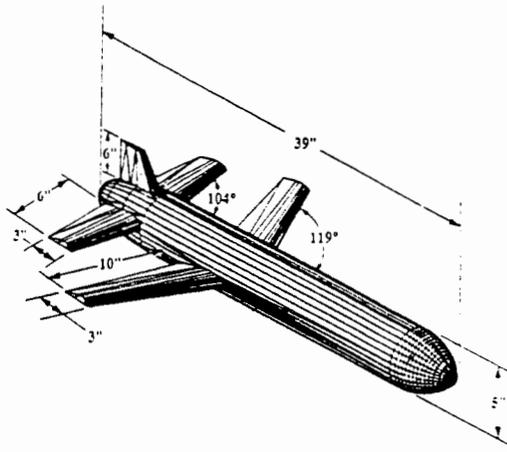


Figura 9-38: Misil genérico, de longitud aproximadamente 1 metro.

La siguiente tabla compara los valores obtenidos por las medidas y los tres métodos de predicción para las contribuciones más significativas a la sección recta:

	Medida	RECOTA	TOTAL	Proces. gráfico
Borde ataque estabilizador horizontal	16° -19 dBsm	13° -17 dBsm		11° -21 dBsm
Borde ataque ala	29° -13 dBsm	29° -12 dBsm	37° -12 dBsm	29° -11 dBsm
Superficie fuselaje y estabilizador vertical	89° 8 dBsm	90° 9 dBsm	89° 8 dBsm	91° 8 dBsm
Nulo de RCS	124°	131°	122°-125°	119°
Valor estable 140°-150°	-18 dBsm	-20 dBsm	-15 dBsm	-17 dBsm

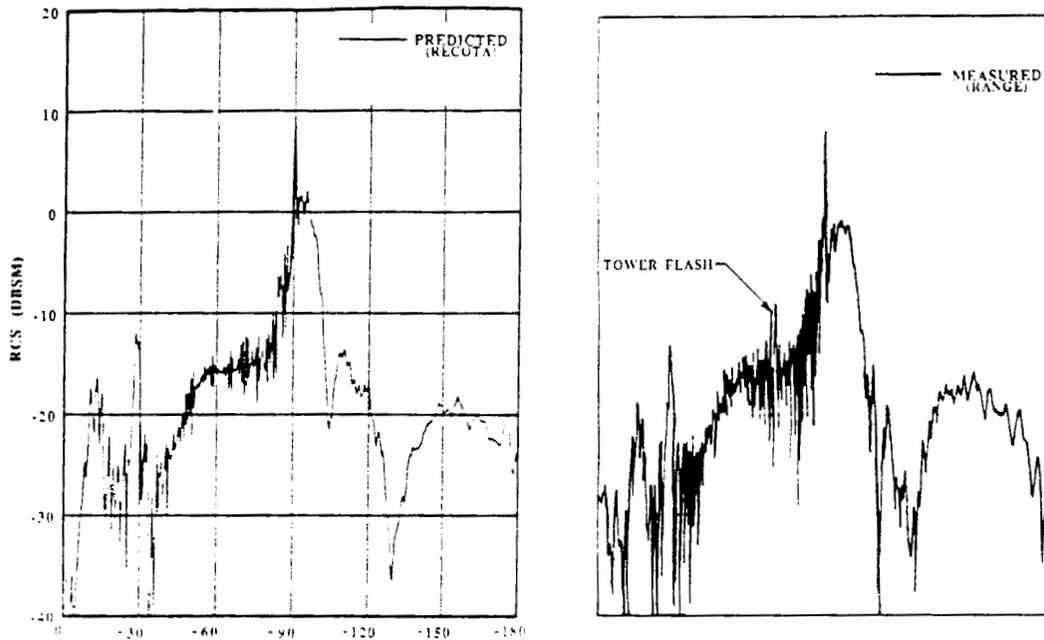


Figura 9-39: Resultados de código RECOTA y medidas para el misil de la figura 9-38. Frecuencia 12 GHz y polarización vertical [Youssef 89].

Las posiciones teóricas de los picos de sección recta son: 14° para el borde de ataque del estabilizador horizontal, 29° para el borde de ataque del ala, 90° para la superficie lateral del fuselaje y algo más de 90° para el estabilizador vertical. En general, los resultados obtenidos por los tres códigos son muy buenos.

Las diferencias que aparecen en la posición y valor de los picos de sección recta calculados por los tres códigos, entre sí y con las medidas, se deben principalmente a diferencias entre los modelos geométricos del misil que se han utilizado, y que, salvo para el modelo de Boeing Aerospace, difícilmente son una representación exacta de la maqueta con la que se han realizado las medidas.

Debido a que la polarización es vertical, y por tanto perpendicular a las aristas, la corrección introducida por la teoría física de la difracción (códigos TOTAL y RECOTA) no mejora apreciablemente el resultado. Únicamente aparecen diferencias susceptibles de estar relacionadas con la difracción en los bordes de salida en la zona alrededor de 160° (ver figura 9-40).

Es interesante observar que para ángulos de aspecto alrededor de 60° se produce una doble reflexión entre el fuselaje y el borde anterior de ala. Los códigos RECOTA y TOTAL obtienen correctamente valores entre -14 y -16 dBsm, similares a las medidas. En cambio, el procesado gráfico de óptica física no tiene en cuenta las dobles reflexiones y obtiene valores ligeramente inferiores, entre -17 y -18 dBsm.

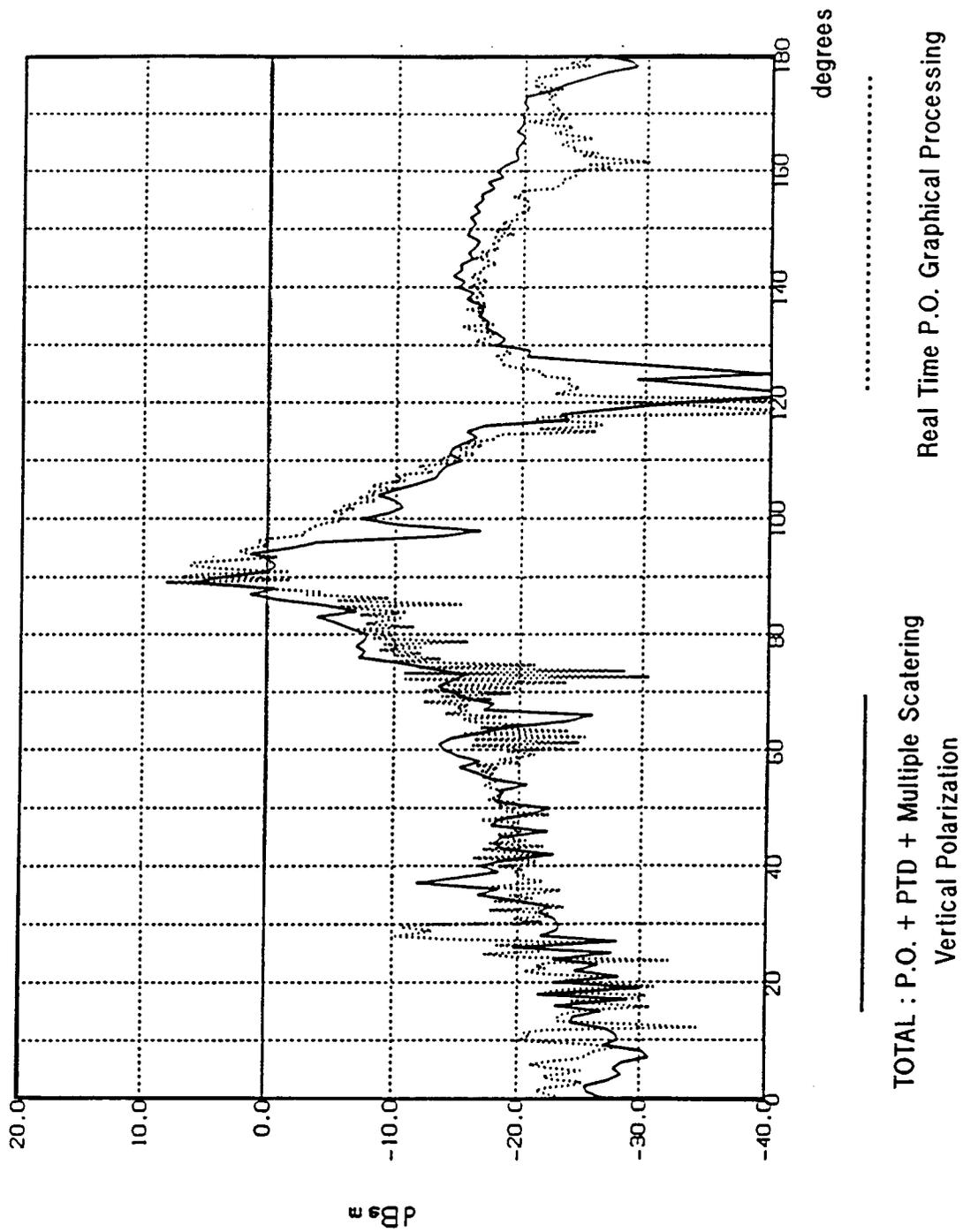


Figura 9-40: Resultados de óptica física y procesado gráfico comparados con los del código TOTAL [Domingo'90], [Abad'90], para el misil de la figura 9-38, a 12 GHz con polarización vertical.

9.5.3 Boeing 727

Con objeto de validar el algoritmo de procesado gráfico para blancos radar de grandes dimensiones, se ha modelado el avión comercial Boeing 727-100C y se ha calculado la sección recta a una frecuencia de 0.94 GHz. A esta frecuencia, la dimensión máxima del avión es de 128 longitudes de onda, valor suficientemente grande como para requerir un tiempo de CPU muy elevado con el método de modelado por facetas. La figura 9-41 muestra los dibujos de alzado y planta del avión.

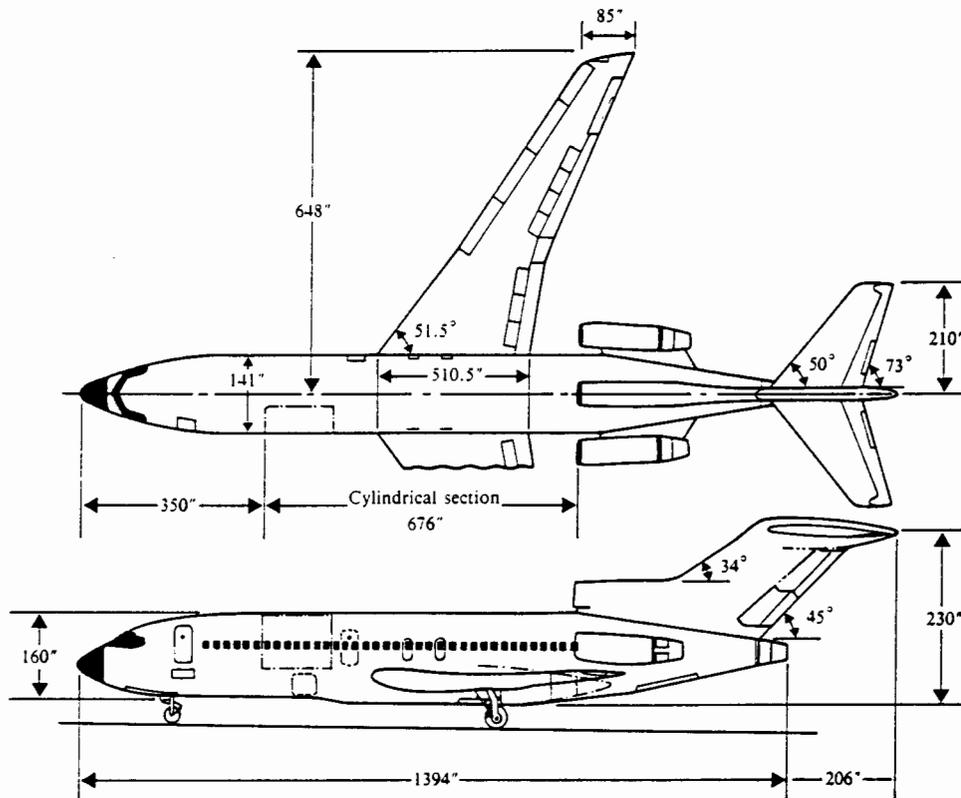


Figura 9-41: Boeing 727-100C. Las dimensiones están expresadas en pulgadas.

En la figura 9-42 se muestran medidas de sección recta para ambas polarizaciones realizadas por la compañía Boeing Airplane con una maqueta a escala 1/100 a 94 GHz, equivalentes a 0.94 GHz a escala real [Maffet'89]. Los resultados obtenidos mediante procesado gráfico y óptica física para diferentes valores de resolución se representan en las figuras 9-43 y 9-44.

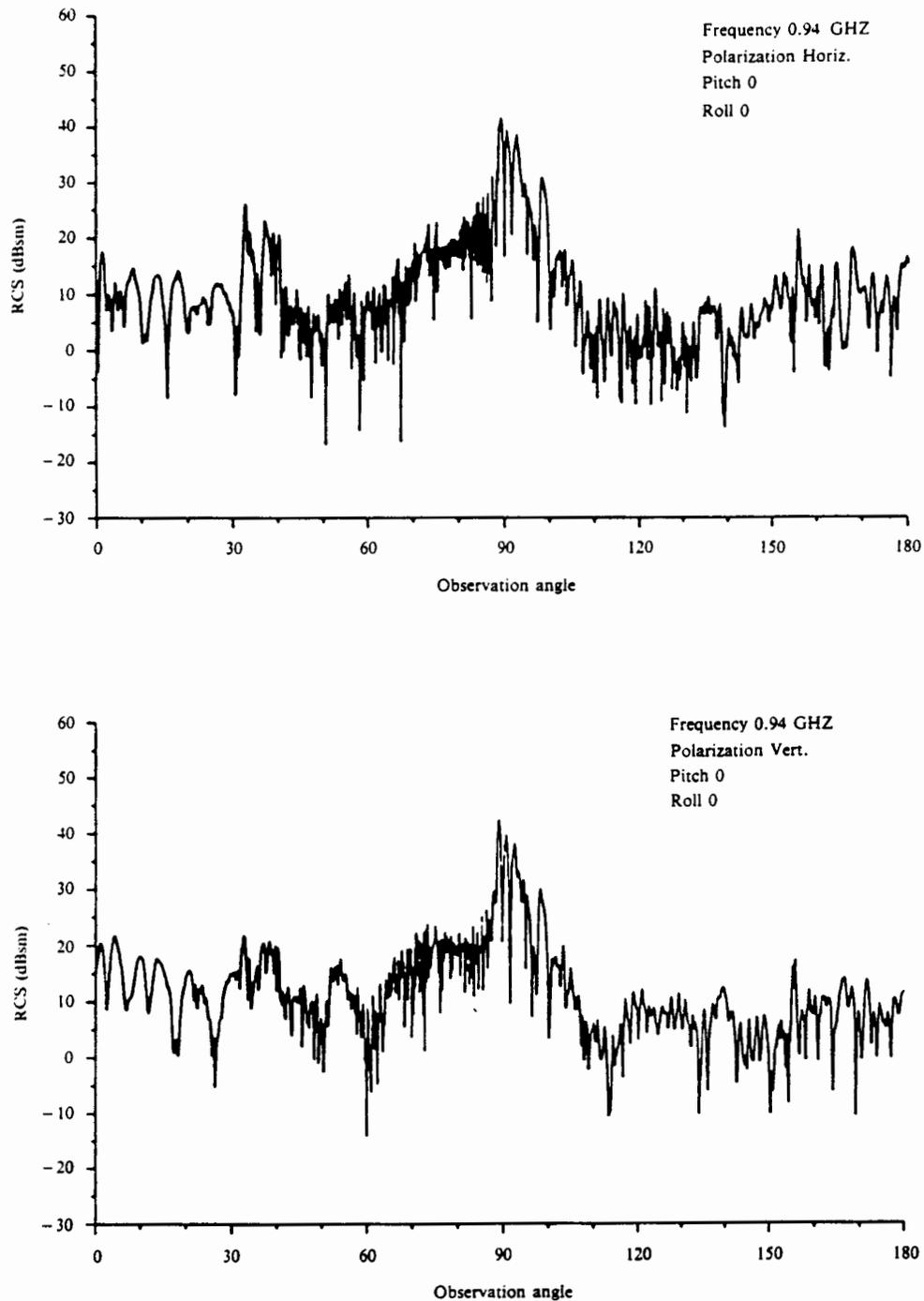


Figura 9-42: Medidas de la sección recta monoestática del Boeing 727-100C a 0.94 Ghz [Maffet'89]. En la gráfica superior con polarización horizontal y en la inferior con vertical.

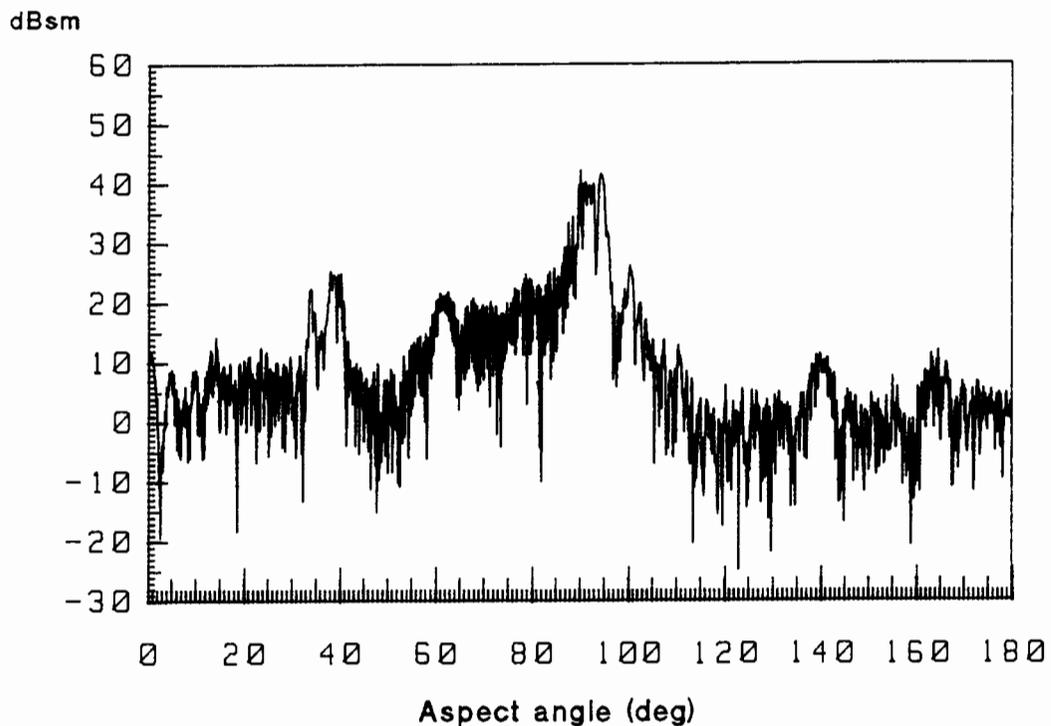


Figura 9-43: Resultados de óptica física y procesamiento gráfico para el Boeing 727-100C a 0.94 GHz. Resolución = 10.

Los resultados del procesamiento gráfico de baja resolución, figura 9-43, incluyen los principales picos de sección recta que aparecen en las medidas para ambas polarizaciones. Para interpretar adecuadamente los resultados, debe tenerse en cuenta que el procesamiento gráfico de baja resolución equivale a la aproximación de óptica física sobre un modelo de aproximadamente un millón de facetas planas.

En cambio, para el procesamiento gráfico de alta resolución puede observarse en la figura 9-44 que la forma del "ruido de fondo" sigue con mucha fidelidad a la curva que presenta un mayor valor de sección recta de entre las medidas de polarización horizontal y vertical. Al utilizarse un eje de ordenadas logarítmico, podemos afirmar que la curva obtenida mediante óptica física y procesamiento gráfico de alta resolución se asemeja a la suma de las medidas con ambas polarizaciones, tanto en el nivel y posición de los picos principales como en el nivel y la forma del "ruido de fondo".

Con objeto de determinar los centros de eco que originan los distintos picos de sección recta, se han procesado los resultados con un método de imagen radar ISAR. La técnica ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) obtiene imágenes de la distribución espacial de reflectividad radar a partir de la información del campo

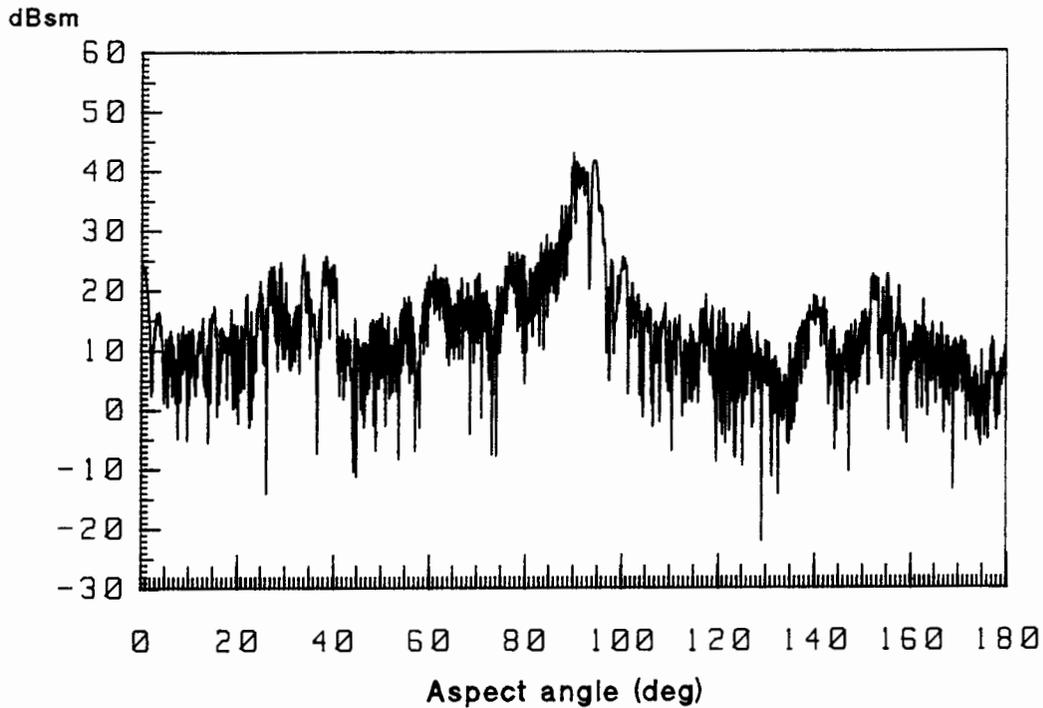


Figura 9-44: Resultados de óptica física y procesamiento gráfico para el Boeing 727-100C a 0.94 GHz. Resolución = 100.

reflejado monoestático para un margen angular pequeño de direcciones de incidencia y un cierto barrido frecuencial [Mensa'82]. De esta forma se identifican los principales centros de eco que intervienen para una cierta dirección de incidencia. Por otra parte, el procesamiento de la información para un amplio margen angular tiende a promediar la contribución de todos los centros de eco que intervienen en distintas direcciones, obteniendo una reconstrucción de la superficie metálica del blanco. Por ejemplo, la figura 9-45 presenta la imagen ISAR del Boeing 727-100C obtenida por X.Fábregas [Fábregas'90] procesando todas las direcciones de incidencia con un amplio barrido frecuencial.

El algoritmo ISAR aplicado sobre el margen angular comprendido en los picos de sección recta permite identificar el centro de eco que los produce [Fábregas'90], [Fábregas'91]. La tabla siguiente resume los resultados obtenidos, indicando la posición teórica de los picos según el dibujo de la figura 9-41:

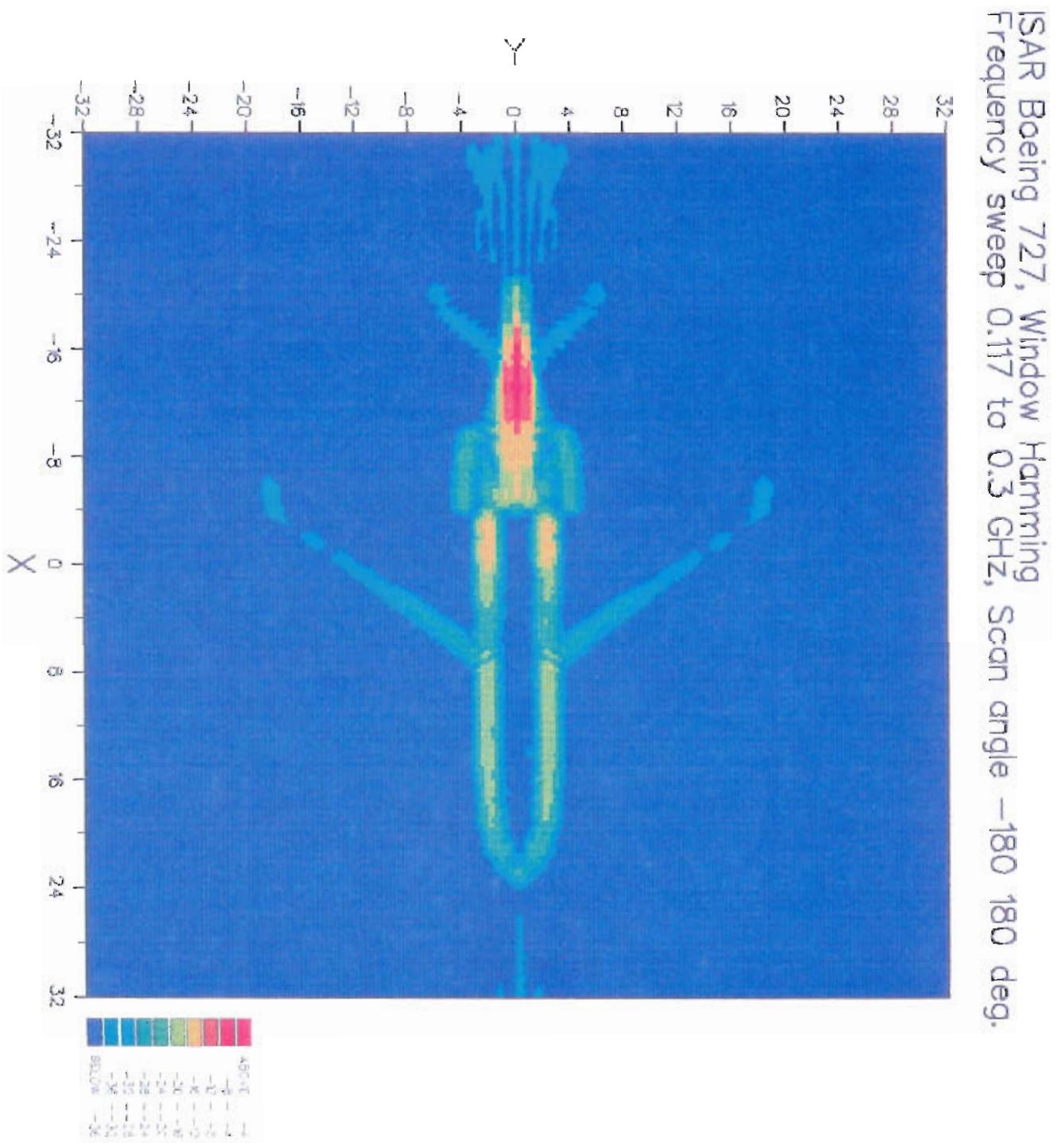


Figura 9-45: Imagen de reflectividad radar del Boeing 727-100C obtenida con la técnica ISAR [Fábregas'90]

Margen angular procesado	RCS a 0.94 GHz	Centros de eco	Posición teórica
32°-42°	22-26 dBsm	Borde ala Borde estabilizador horizontal	35° 39°
58°-66°	20 dBsm	Superficie cónica del morro	75°
84°-98°	40-42 dBsm	Fuselaje Estabilizador vertical Cilindro del motor	90°
98°-106°	26 dBsm	Superficie cónica de cola	100°
136°-145°	10 dBsm	Soporte del motor, unido al fuselaje	150°

Los resultados anteriores concuerdan aceptablemente con los siguientes picos de sección recta de las medidas:

Centros de eco	Polarización	RCS medida a 0.94 GHz	Posición medida
Fuselaje y estabilizador vertical	H y V	38-42 dBsm	90°-95°
Superficie cónica de cola	H y V	30 dBsm	99°
Borde de ala y estabilizador horizontal	H	20-27 dBsm	33°-40°
	V	19-22 dBsm	33°-40°

mientras que aparece una cierta imprecisión para:

Soporte del motor	H y V	19-20 dBsm	155°
Superficie cónica del morro	V	15-18 dBsm	52°-56°

Además, no se detectan algunos picos muy estrechos en direcciones próximas al eje del avión debidos probablemente a la radiación en las aperturas de las cavidades existentes en los reactores, suponiendo que éstos hayan sido modelados correctamente en la maqueta escala 1/100: entre 12 y 17 dBsm a partir de 167°, y picos de 15 - 20 dBsm a 1°, 4°, 10°, 13° y 20°.

En conclusión, los resultados obtenidos por óptica física y procesado gráfico concuerdan aceptablemente con las medidas. Dadas las características particulares del blanco, en el que predominan las superficies sobre las aristas, las diferencias que aparecen en el nivel y posición de los picos de RCS muy difícilmente se deben a las limitaciones de la aproximación de óptica física, sino que con toda probabilidad son debidos a inexactitudes en el modelo geométrico del Boeing 727.

9.6 CONCLUSIONES

En el presente capítulo se ha desarrollado un algoritmo original de procesado gráfico que implementa muy eficientemente la aproximación de óptica física para superficies perfectamente conductoras. Entre las numerosas ventajas que presenta sobre los métodos más utilizados en la actualidad merece destacarse el reducido coste computacional del procesado gráfico, independiente del tamaño eléctrico y complejidad del objeto analizado, lo cual hace muy adecuada su aplicación a blancos radar reales. Los resultados pueden obtenerse en tiempo real si se utiliza una estación de trabajo tridimensional con acelerador gráfico.

El algoritmo ha sido validado con una serie de objetos canónicos de sección recta conocida y se ha puesto a prueba su comportamiento frente a las limitaciones de la aproximación de óptica física. En este sentido se ha comprobado que el método funciona correctamente incluso para superficies de pequeño radio de curvatura. Los resultados para aristas puras dependen de la resolución en la visualización de la superficie paramétrica. Si ésta es baja, el resultado será similar al de los métodos clásicos de óptica física y modelado con facetas planas, y, por tanto, a la respuesta de la polarización perpendicular. Si la resolución es alta, la sección recta aumenta, acercándose a los valores medidos con polarización paralela.

Por otra parte, los resultados obtenidos con blancos radar reales demuestran que la reflexión de primer orden en las superficies constituye en la mayoría de los casos la principal contribución a la sección recta, por lo que la aproximación de óptica física proporciona resultados satisfactorios. Las principales causas de error son las dobles reflexiones entre superficies, muy importantes si su radio de curvatura es grande y el ángulo que forman próximo a 90° , y la contribución de las cavidades resonantes, especialmente las turbinas de los reactores. A las reflexiones múltiples se dedica el capítulo 12, mientras que para las cavidades no se ha encontrado una solución eficiente por procesado gráfico.

Por todo ello puede considerarse alcanzado el objetivo principal de esta tesis: la predicción aproximada de sección recta de blancos radar complejos en tiempo real. Lógicamente, la aproximación de óptica física no es aplicable a artefactos de baja sección recta, en los que la presencia de recubrimientos absorbentes radar y

la minimización de la reflexión en superficies hacen necesaria la aplicación de otras técnicas de alta frecuencia, como el método de la impedancia superficial -capítulo 10- y la teoría física de la difracción -capítulo 11-.