

Capítulo 2

Difracción

2.1.- Introducción a la Difracción.

El término difracción viene del latín *diffractus* que significa quebrado. La difracción ocurre debido a que una onda puede rodear un obstáculo en su propagación alejándose del comportamiento de los rayos rectilíneos. Los efectos de la difracción son regularmente pequeños. [4]

El fenómeno de la difracción puede ser visto muy fácilmente. Teniendo una fuente de luz y poniendo dos dedos a diez centímetros de un ojo haciendo un espacio muy pequeño entre los dedos, se puede ver una serie de líneas oscuras y luminosas. Estas líneas son causadas principalmente por interferencia constructiva y destructiva de luz difractada alrededor de los dedos.[4]

La razón por la que ocurre la difracción no es totalmente obvia. Christian Huygens ofreció una explicación a este fenómeno. [5]

Mientras la radiación electromagnética abandona su fuente, se expande viajando en línea recta tal como si fuera cubriendo la superficie de una esfera en continua expansión.

Esta área se incrementa proporcionalmente al cuadrado de la distancia que ha viajado la radiación.

La energía electromagnética puede considerarse que se propaga de una fuente puntual en ondas planas. La ley de cuadrado inverso no solo se aplica a la fuente de energía sino también a cualquier punto en una onda plana. Es decir, de cualquier punto en una onda plana, la energía se propaga como si el punto fuera la fuente de energía. Por lo cual, las ondas pueden ser consideradas que son creadas continuamente desde cada punto en el plano y propagadas en todas direcciones.[1]

2.1.1.- Principio de Huygens.

En el tratado de Huygens publicado hace mas de 300 años (1629-1695) se propone un nuevo mecanismo para la propagación de la luz conocido hoy en día como principio de Huygens. En una analogía con el sonido, se consideraba que la luz viajaba como ondas en una especie de materia ficticia llamada éter que se suponía que llenaba el espacio entero.

Cada partícula de éter puesta a vibrar por la onda era vista como el origen de nuevas ondas. Como se muestra en la figura 2.1.[3]

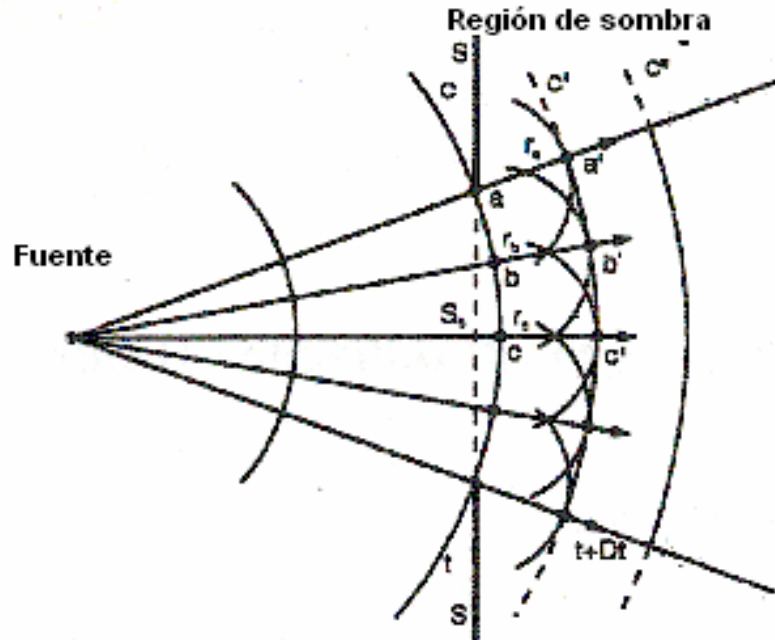


Figura 2.1 Principio de Huygens.

Las ondas esféricas iniciales originadas de una fuente puntual son parcialmente obscurecidas por una pantalla infinita S . El movimiento de estas ondas es definido por una velocidad v en el cono limitado por la apertura de la pantalla S_o . Suponiendo que al tiempo t el frente de onda esférico se encuentra situado dentro de la apertura, donde se considera que el frente de onda se compone de partículas en fase que radian de igual forma ondas esféricas secundarias y de esta forma las ondas traseras desaparecen a medida que persisten las posteriores. [3]

Al momento siguiente $t + \Delta t$ un nuevo frente de onda v es formado con radio $ra=rb=rc$ y producen nuevas generaciones de ondas y de esta forma el frente de onda va avanzando hacia delante con la misma dirección.

El principio de Huygens es usado también para probar las leyes de reflexión y refracción de ondas planas. En su forma inicial, el principio de Huygens es únicamente relevante para la geometría óptica y es válido para longitudes de onda extremadamente pequeños, así también, es inadecuado para la explicación de todos los fenómenos de las ondas. Por ejemplo, la desviación de ondas de una propagación rectilínea de rayos cuando pasa por el borde de un objeto o a través de pequeñas aperturas.[3]

A pesar de que Huygens creó su mecanismo de movimiento de luz usando las ideas acerca de ondas secundarias y su suma para formar un nuevo frente de onda, él no estaba conciente de la naturaleza periódica de la luz y del hecho de que ésta periodicidad se encuentra ligada al espacio y al tiempo. El mecanismo de Huygens para propagación de ondas fue olvidado y por un largo tiempo solo el modelo de propagación de luz fue tomado como la raíz de la óptica.[3]

Más de un siglo después de Huygens, Thomas Young (1773-1829) descubrió el principio de interferencia de rayos y explica cualitativamente que ocurre cuando dos rayos de luz se combinan. Young explicó las propiedades periódicas de la luz como resultado de combinar rayos con magnitudes positivas y negativas. Posteriormente Agustin Fresnel reavivó el principio de Huygens para establecer la teoría de las ondas de luz. [3]

El principio de Huygens básicamente explica que todos los puntos de un frente de onda pueden ser considerados como una fuente de puntos que producen ondas secundarias

y éstas se combinan para producir un nuevo frente de onda en la dirección de propagación y de esta forma la difracción es causada por la propagación de estas onditas secundarias en una región de sombra. El campo de una onda difractada en una región de sombra es una suma de vectores de componentes de campos eléctricos de todas las ondas secundarias en el espacio alrededor del obstáculo. [2]

2.1.2.- Zonas de Fresnel.

Fresnel al entender la deducción del mecanismo de las ondas de Huygens, tomó en cuenta la periodicidad del espacio y tiempo de las ondas de luz, interferencia mutua y polarización de los efectos para formar un nuevo principio aplicado a las ondas electromagnéticas. De acuerdo a Fresnel, el frente de onda adquiere un claro significado físico como una superficie en la cual las onditas secundarias contienen amplitudes y direcciones de radiación de interferencia dadas. De esta forma, el principio de Huygens modificado y perfeccionado toma el nombre de Principio de Huygens-Fresnel que se convierte en un método fundamental para resolver problemas de difracción de las ondas.

Este método es usado para describir la propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio. [3]

2.1.2.1.- Geometría de las Zonas de Fresnel.

Considerando que el transmisor está separado del receptor en el espacio libre y una pantalla obstruyendo el enlace con una altura efectiva h y con un ancho infinito se encuentra a una distancia $d1$ del transmisor y a $d2$ del receptor, las ondas que viajan por arriba de la pantalla a una distancia mayor que si existiera una línea de vista entre las

antenas transmisora y receptora. Asumiendo que $h \ll d_1, d_2$ y $h \gg \text{longitud de onda } \lambda$, entonces la diferencia entre la línea de vista y el camino difractado llamado *longitud del camino en exceso* (Δ), puede ser obtenido por la geometría de la figura 2.2.[2]

$$\Delta \cong \frac{h^2}{2} \frac{(d_1 + d_2)}{d_1 d_2} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde

h = es la altura efectiva de la pantalla.

d_1 = distancia de la pantalla al transmisor.

d_2 = distancia de la pantalla al receptor.

Δ = longitud de la trayectoria en exceso.

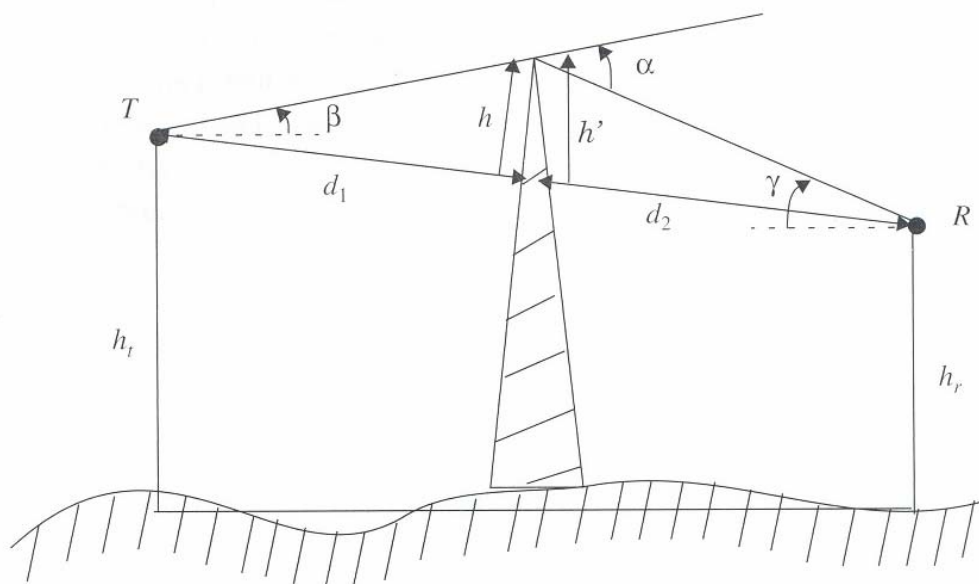


Figura 2.2 Geometría de difracción cuando el transmisor y el receptor no se encuentran a la misma altura.

De esta forma la fase correspondiente está dada por.[2]

$$\phi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde.

Δ = longitud de la trayectoria en exceso.

λ = longitud de onda

Debido a estas ecuaciones, se puede deducir que la diferencia de fase entre la línea de vista y el camino difractado es función de la altura y posición de la obstrucción, así como también de la posición de la antena transmisora y receptora.

En los problemas por difracción, es ventajoso reducir todas las alturas por una constante para que la geometría pueda ser simplificada sin cambiar los valores de los ángulos como se muestra en la figura 2.3.[2]

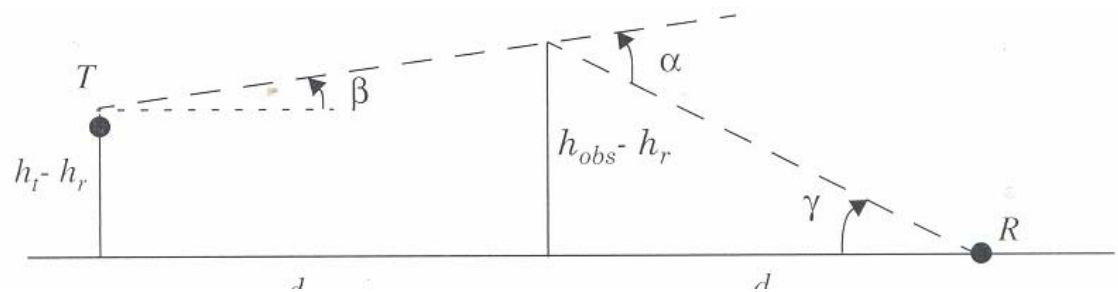


Figura 2.3 Geometría equivalente cuando la altura más pequeña es substraída de todas las otras Alturas.

El concepto de pérdidas por difracción es función de la diferencia del camino alrededor de la obstrucción explicado por las zonas de Fresnel. Las zonas de Fresnel representan regiones sucesivas donde las ondas secundarias tienen un camino con una longitud desde el transmisor hasta el receptor que es $n\lambda/2$ más largo que el camino de línea de vista. La figura 2.4 demuestra un plano transparente puesto entre el trasmisor y el receptor. Los círculos concéntricos en el plano representan el punto de origen de las onditas secundarias que se propagan hacia el receptor y así, la longitud del camino total se incrementa por $\lambda/2$ para los círculos sucesivos.[3]

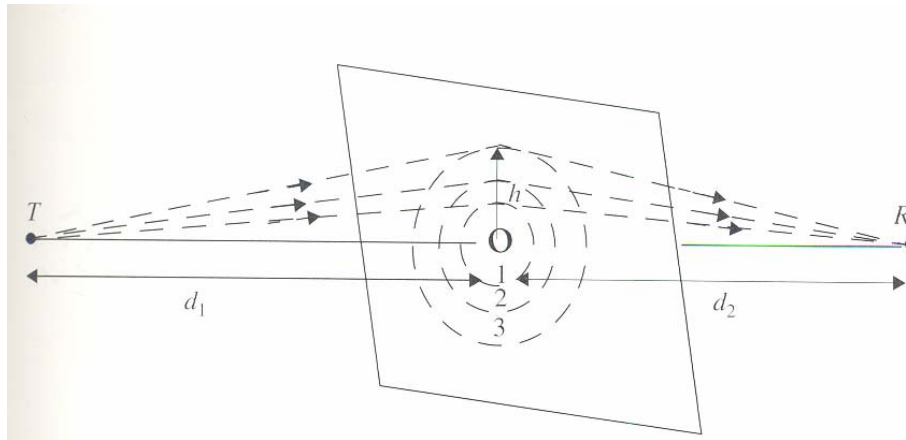


Figura 2.4 Círculos concéntricos que definen los límites de las zonas sucesivas.

Los círculos concéntricos son llamados zonas de Fresnel. Las zonas de Fresnel posteriores tienen un efecto que alternadamente proveen interferencia constructiva y destructiva para la señal total recibida por la antena receptora. El radio del enésimo círculo de la zona de Fresnel denominado r_n y esta determinado por n , λ , $d1$, d . [2].

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d1 d2}{d1 + d2}}$$

Ecuación 2.3

Donde

λ = longitud de onda.

$d1$ = distancia de la pantalla al transmisor.

$d2$ = distancia de la pantalla al receptor.

Esta aproximación es válida para $d1, d2 \gg r_n$.

La trayectoria que viaja a través del círculo mas pequeño corresponde a $n = 1$ en la figura 2.3 se tiene un exceso de camino de $\lambda/2$ comparado con la línea de vista, así los círculos correspondientes a $n = 2, 3$ etc. tendrán un exceso de longitud de camino de $\lambda, 3\lambda/2, etc.$ el radio de los círculos concéntricos depende de la posición del plano. Las zonas

de Fresnel mostradas en la figura 2.4 tendrán un máximo de radio si el plano se encuentra a la mitad del receptor y el transmisor y viene siendo más pequeño a medida que se acerca a cualquiera de las dos antenas.[2]

Este efecto muestra como la sombra es sensible a la frecuencia, así también a la posición de la obstrucción con relación del transmisor y receptor.

En los sistemas de comunicación, las pérdidas por difracción ocurren por el bloqueo de ondas secundarias tal que sólo una porción de la energía es difractada alrededor el obstáculo. Esto es, una obstrucción causa el bloqueo de la energía de alguna de las zonas de Fresnel. Por esto, solo una parte de la energía transmitida es alcanzada por el receptor. Dependiendo de la geometría de la obstrucción, la energía recibida es la suma de vectores de contribuciones de energía de todas las zonas de Fresnel no obstruidas.

Como se muestra en las figuras 2.5, 2.6 y 2.7 un obstáculo puede bloquear el camino de transmisión y una familia de elipsoides pueden ser construidas entre el transmisor y receptor. Los elipsoides representan las zonas de Fresnel y se puede observar que las zonas de Fresnel tienen una forma elíptica con la antena transmisora y receptora en sus extremos. En general, si una obstrucción no bloquea el volumen contenido en la primera zona de Fresnel, las pérdidas por difracción son mínimas y los efectos de difracción pueden ser cancelados.[2]

Así la regla usada para el diseño de línea de vista para enlaces de microondas es que si al menos el 55% de la primera zona de Fresnel es librado, no se altera significativamente la pérdida por difracción. [2]

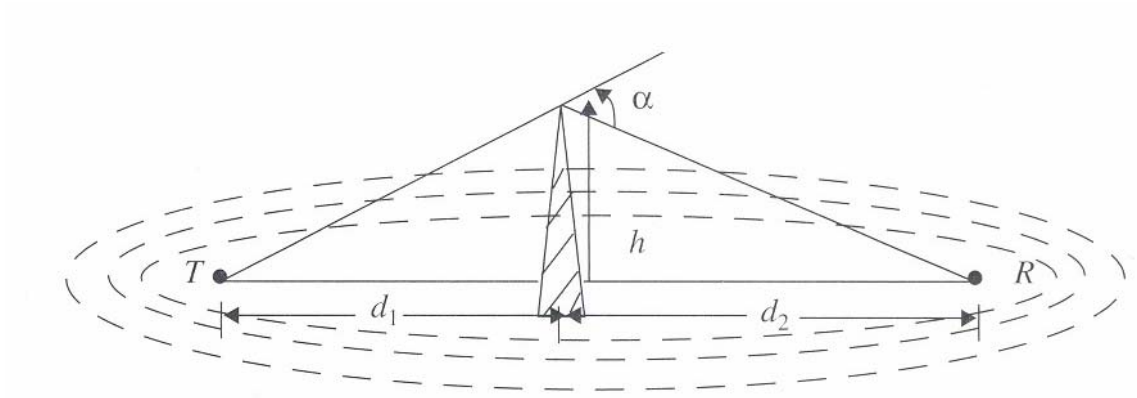


Figura 2.5 Ilustración de las zonas de Fresnel en diferentes posiciones del obstáculo en el que α y v son positivas debido a que h es positiva.

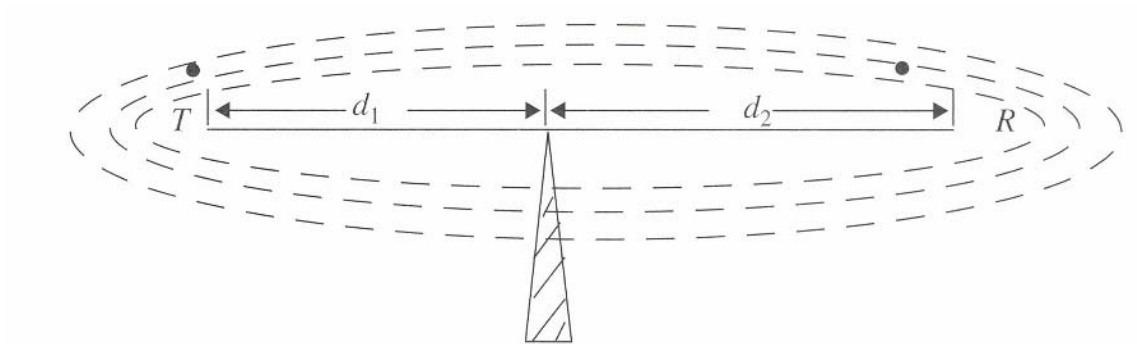


Figura 2.6 Ilustración de las zonas de Fresnel en diferentes posiciones del obstáculo en el que α y v son cero debido a que h es cero.

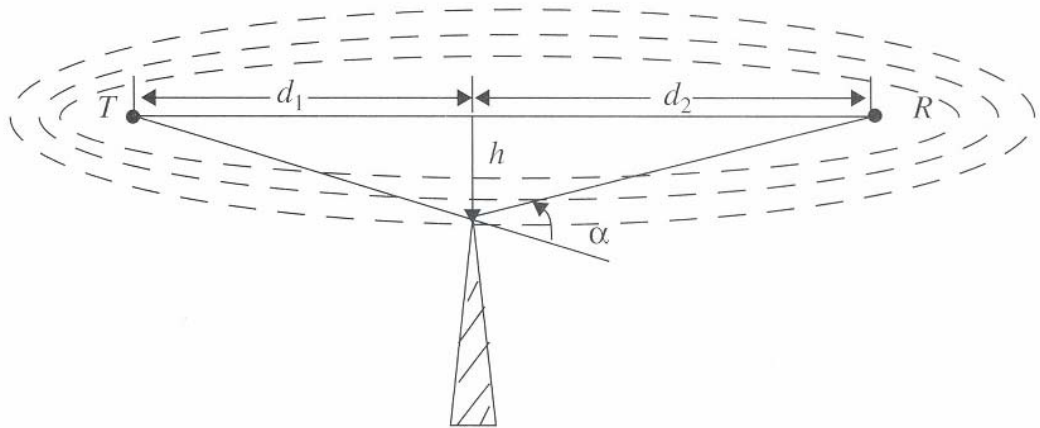


Figura 2.7 Ilustración de las zonas de Fresnel en diferentes posiciones del obstáculo en el que α y v son negativas debido a que h es negativa.

2.1.2.2.- Modelo de difracción Knife-edge.

Estimando la atenuación de la señal causada por la difracción de las ondas de radio sobre colinas o edificios, es esencial predecir el campo en un área determinada. Generalmente, es imposible hacer cálculos exactos de las pérdidas por difracción y en la práctica la predicción es un proceso teórico de aproximación modificado por correcciones empíricas.[2]

Para los cálculos por pérdidas por difracción sobre terrenos complejos e irregulares representa un problema matemático muy complejo, pero se han derivado expresiones por pérdidas por difracción para casos simples. Cuando la sombra es causada por un solo objeto como una colina o un edificio, la atenuación causada por la difracción puede ser estimada como difracción de knife edge. La pérdida por difracción puede ser calculada usando la solución clásica de Fresnel para el campo atrás del obstáculo.

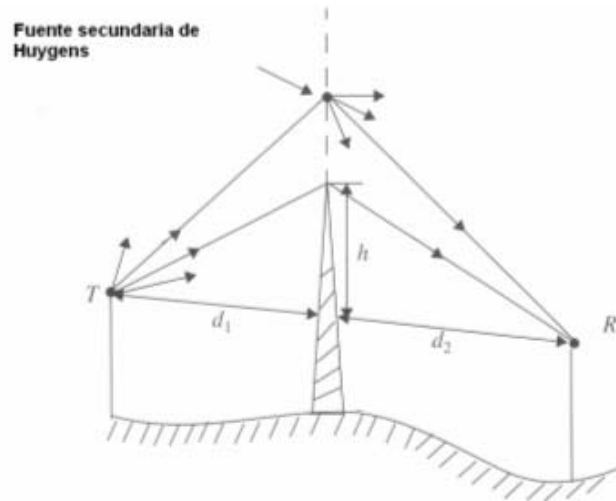


Figura 2.8 Ilustración de la geometría debida a la difracción de la punta del obstáculo en donde el receptor se encuentra en una región de sombra.

Considerando el receptor en un punto R, localizado en la región de sombra también llamada zona de difracción, el campo directo en el punto R mostrado en la figura 2.8, es la suma de vectores de los campos debido a todas las fuentes secundarias de Huygens en el plano sobre la punta del obstáculo. El campo eléctrico E_d de la onda difractada por el obstáculo es dado por.[2]

$$\frac{E_d}{E_o} = F(v) = \frac{(1+j)}{2} \int_v^{\infty} \exp\left(\frac{-j\pi t^2}{2}\right) dt \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde

E_o = campo en el espacio libre ante la ausencia de obstáculos o la superficie terrestre misma.

$F(v)$ = integral compleja de Fresnel.

t = tiempo en segundos

La integral compleja de Fresnel, $F(v)$, es una función del parámetro de difracción v ya definido y comúnmente es evaluado usando tablas o gráficas para valores dados de v . La

ganancia de difracción debido a la presencia del obstáculo comparado con el campo eléctrico en el espacio libre esta dado por.[2]

$$G_d(dB) = 20 \log|F(v)| \quad \text{Ecuación 2.5}$$

En la práctica, las soluciones graficas y numéricas son calculadas para obtener la ganancia de difracción. En la figura 2.9 se muestra una representación de $G_d(dB)$ como función de v . así también una solución aproximada para la ecuación anterior esta dada por.[2]

$$G_d(dB) = 0 \quad v \leq -1 \quad \text{Ecuación 2.6}$$

$$G_d(dB) = 20 \log(0.5 - 0.62v) \quad -1 \leq v \leq 0 \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$G_d(dB) = 20 \log(0.5 \exp(-0.95v)) \quad 0 \leq v \leq 1 \quad \text{Ecuación 2.8}$$

$$G_d(dB) = 20 \log(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 - 0.1v)^2}) \quad 1 \leq v \leq 2.4 \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$G_d(dB) = 20 \log\left(\frac{0.225}{v}\right) \quad v > 2.4 \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Donde

v = parámetro de difracción Fresnel-Kirchoff y esta dado por.

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Donde

h = altura del obstáculo.

d_1 = es la distancia del transmisor al obstáculo.

d_2 = distancia entre el obstáculo y la antena receptora.

λ = longitud de onda.

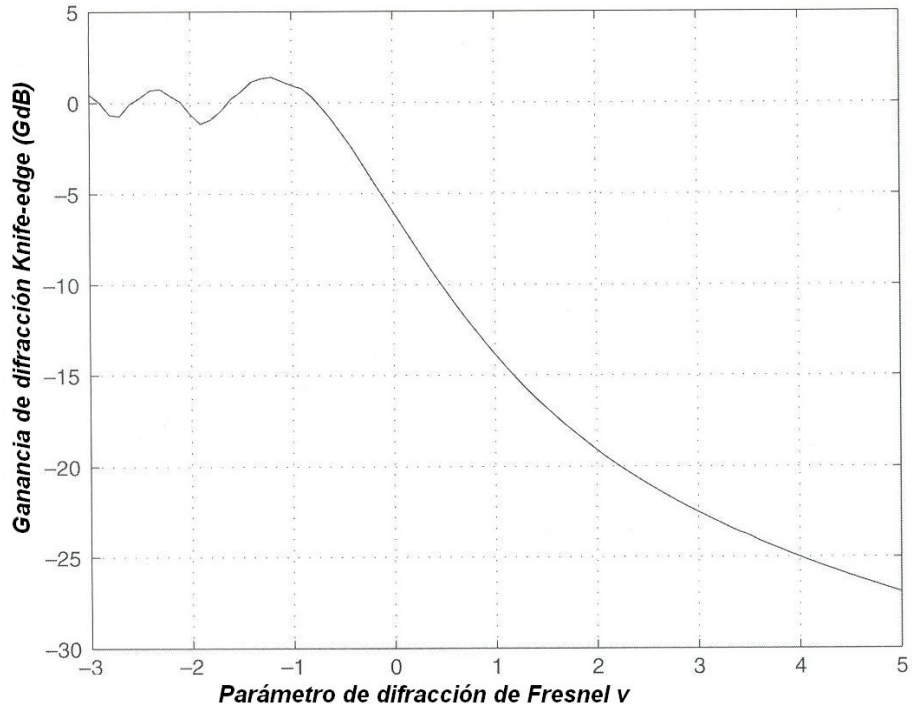


Figura 2.9 Representación grafica de Gd(dB) como función de v.

