

5. CALIBRACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo de esta sección es la interpretación de los resultados obtenidos con los dos algoritmos de alta resolución, Matrix Pencil y MUSIC, y la calibración de diversos parámetros mediante dichos resultados. Las ecuaciones (1) y (2) muestran los parámetros en los que estamos interesados.

$$\varepsilon = \varepsilon_r + j \tan \delta \quad (1)$$

$$R = \text{abs} \left(\frac{\sqrt{\varepsilon} \cos \theta_i - \cos \theta_t}{\sqrt{\varepsilon} \cos \theta_i + \cos \theta_t} \right) \quad (2)$$

donde

ε = Epsilon

ε_r = Epsilon relativa

$\tan \delta$ = Tangente de pérdidas

θ_i = Ángulo Incidente

θ_t = Ángulo transmitido

R = Reflexión

El objetivo es la calibración de ε_r . Para ello vamos a utilizar dos métodos diferentes. Dichos métodos son,

- **Con Respuesta Impulsiva**
- **Con Potencia Recibida**

5.1 RESPUESTA IMPULSIVA

En esta parte se compara la Respuesta Impulsiva obtenida con el Analizador de Red, una vez hecha la transformada inversa de Fourier, con los resultados obtenidos de los algoritmos Matrix Pencil y MUSIC. Se estudiará el tiempo de llegada para todas las trayectorias, en particular para la directa y para la reflejada en cada una de las paredes de la habitación. Estas trayectorias reflejadas variarán en cada uno de los apartados, centrándonos en cada una de ellas.

Como hemos comentado en cada uno de los apartados nos centraremos en una pared distinta. En este estudio las cuatro paredes que rodean la habitación y que en consecuencia mediremos serán; GLASS (H3), BLACKBOARD (VD), CONCRETE WALL (H6) y STONE WALL (VA). Cada una de las paredes tendrá unas características propias. El estudio comenzará con el análisis de la trayectoria directa y reflejada de forma independiente, para después continuarlo viendo el comportamiento de todas las trayectorias de forma conjunta dentro de la habitación.

5.1.1 PÉRDIDAS EN ESPACIO LIBRE (FREE SPACE LOSS)

Para entender los resultados obtenidos con Matrix Pencil y MUSIC, es necesario primero la comprensión y calibración de la trayectoria directa. En esta sección se estudiará dicha trayectoria directa entre la antena TX y la RX y se realizará una comparación entre tres situaciones diferentes,

- **Outdoor**
- **Indoor**
- **Simulación**

La distancia entre Tx y Rx variará desde los 2 hasta los 7 metros. Nos basaremos en los resultados obtenidos con Matrix Pencil para dicha calibración. La Fig 5.1 muestra un esquema de las medidas a realizar.

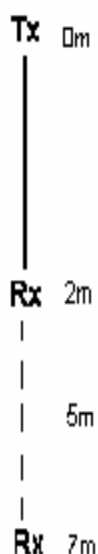


Figura 5.1 Distancia entre Tx y Rx

5.1.1.1 Outdoor

Dichas medidas se realizaron en la terraza del edificio donde realizaremos el estudio. En el terreno donde realizamos estas mediciones no encontramos obstáculo alguno. Los rayos reflejados que obtenemos son los provenientes de edificios cercanos. Para esta situación en concreto (Outdoor), la distancia entre Tx y Rx aumenta desde los 3 hasta los 7 metros en incremento de 2.

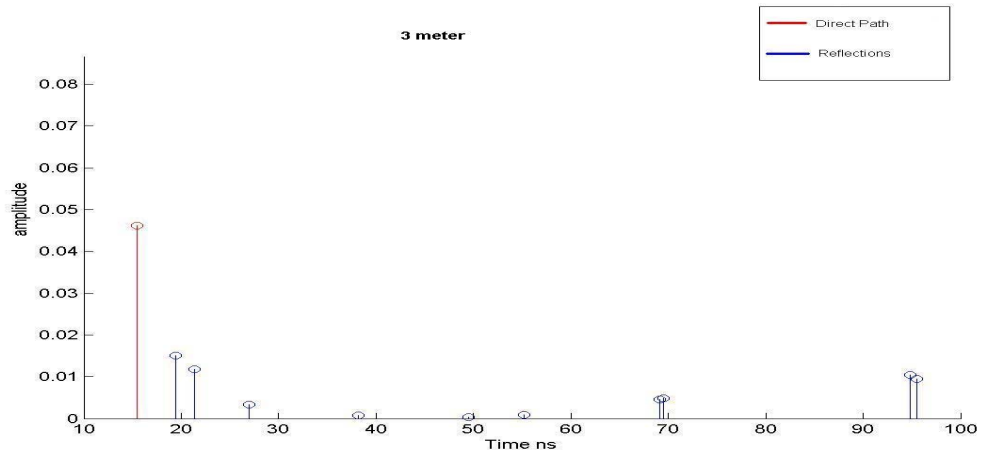


Figura 5.2 Distancia entre Tx y Rx 3 m.

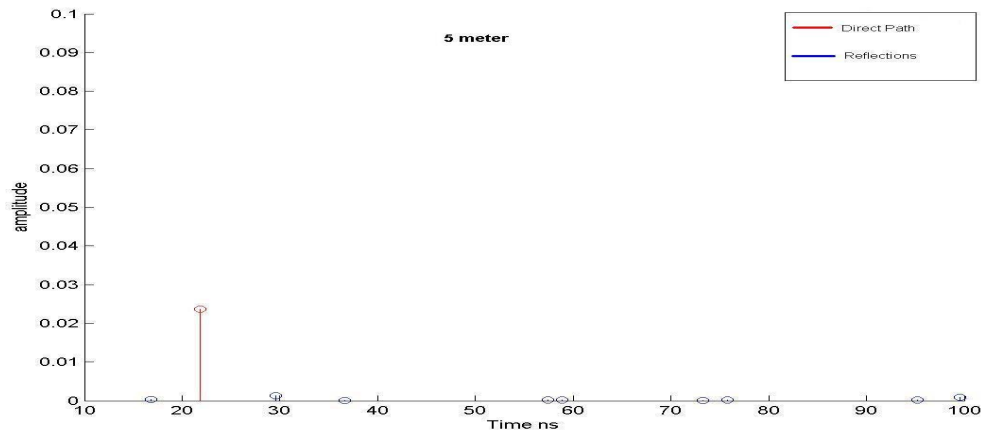


Figura 5.3 Distancia entre Tx y Rx 5 m

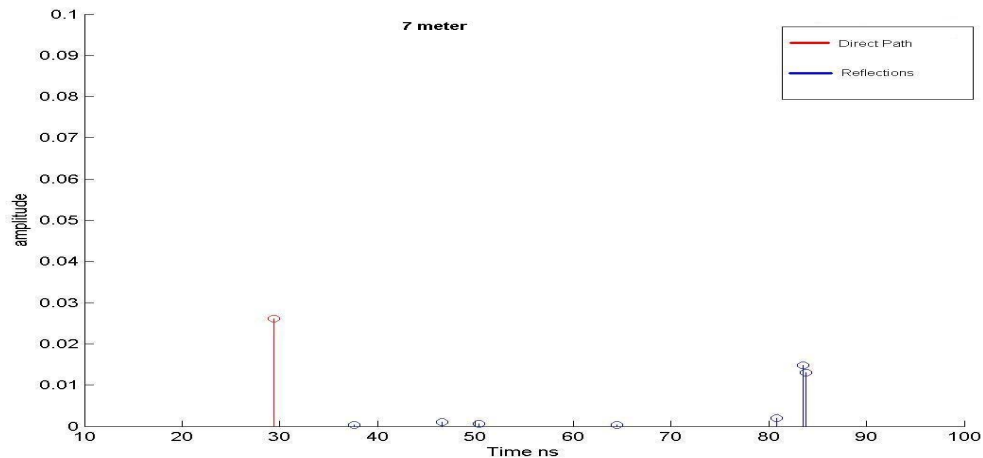


Figura 5.4 Distancia entre Tx y Rx 7 m.

La línea roja representa la trayectoria directa, mientras que las azules son el resto de reflexiones. Estas reflexiones pueden provenir de otros edificios, del propio suelo o incluso de una pequeña chimenea existente en la terraza. Normalmente cuando la amplitud de la reflexión es muy grande, significa que proviene de uno de los edificios cercanos. Mediante el cálculo de este tiempo de llegada y sabiendo la velocidad a la que viaja la señal podemos calcular fácilmente la distancia a la que se encuentra el edificio,

$$\text{Distancia} = C * TOA$$

donde $C = 3 * 10^8$. La Tabla 5.1 representa los resultados obtenidos en las figuras 5.2, 5.3 y 5.4. En la teoría de pérdidas en el espacio libre hemos estudiado que a medida que aumenta la distancia entre Tx y Rx, disminuye la amplitud que recibe la antena Rx. En este caso (Outdoor) vemos que para una distancia de 7 metros obtenemos una amplitud mayor que para 5 metros. Esto puede ser debido a un solapamiento de los distintos rayos, como el proveniente de la reflexión sobre el suelo y el directo.

OUTDOOR	Tiempo llegada (ns)	Amplitud	Amplitud normalizada
3m	15.49	0.0462	1
5m	21.87	0.0237	0.513
7m	29.34	0.0261	0.565

Tabla 5.1 Tiempo de llegada y Amplitud usando Matrix Pencil (OUTDOOR)

5.1.1.2 Indoor

En este caso las medidas se realizaron en el interior del aula SN.22.2. Se seguirá el mismo modo que el establecido para las medidas outdoor. En este caso las distancias entre el Tx y el Rx serán de 2, 3, 5, 6 y 7 metros respectivamente.

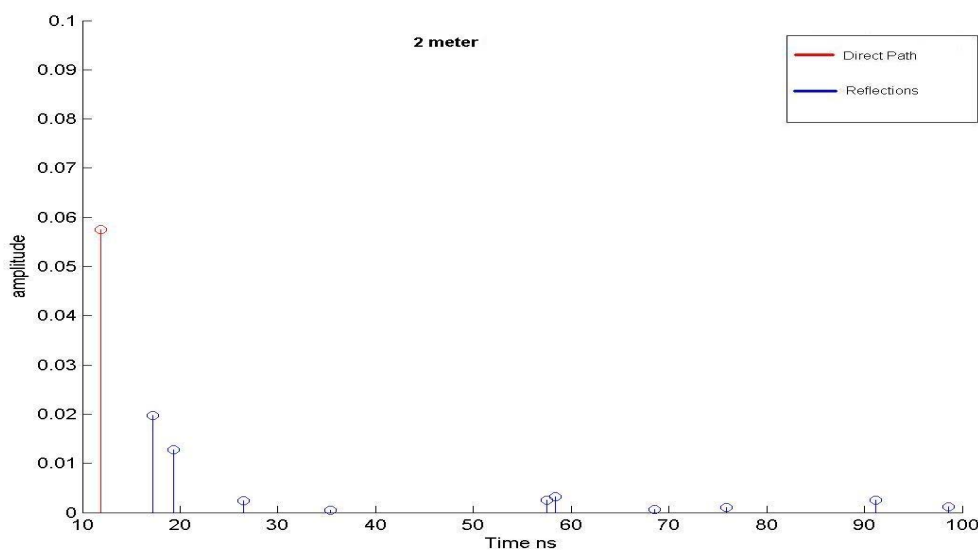


Figura 5.5 Distancia entre Tx y Rx 2 m.

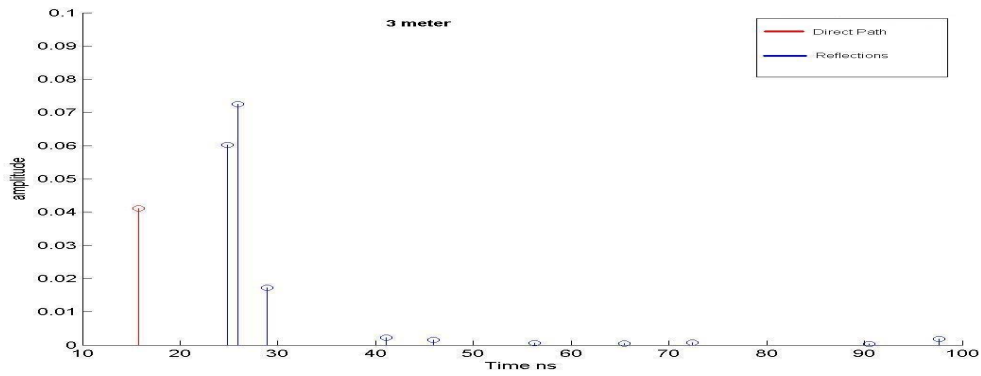


Figura 5.6 Distancia entre Tx y Rx 3 m.

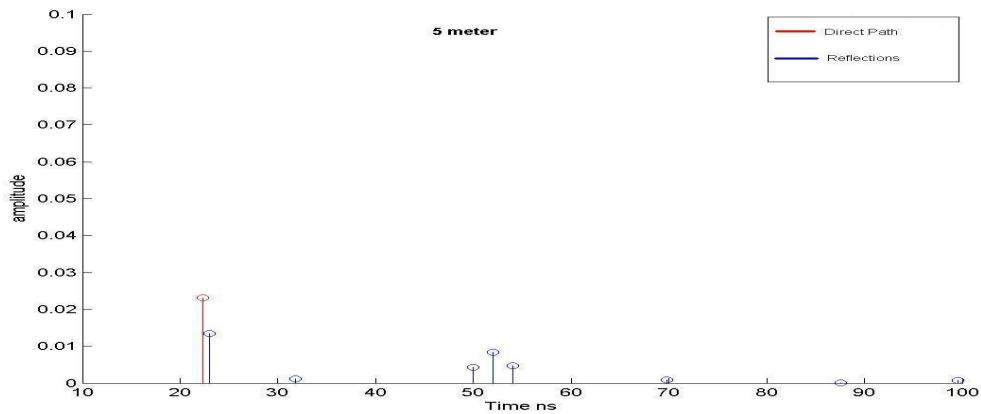


Figura 5.7 Distancia entre Tx y Rx 5 m.

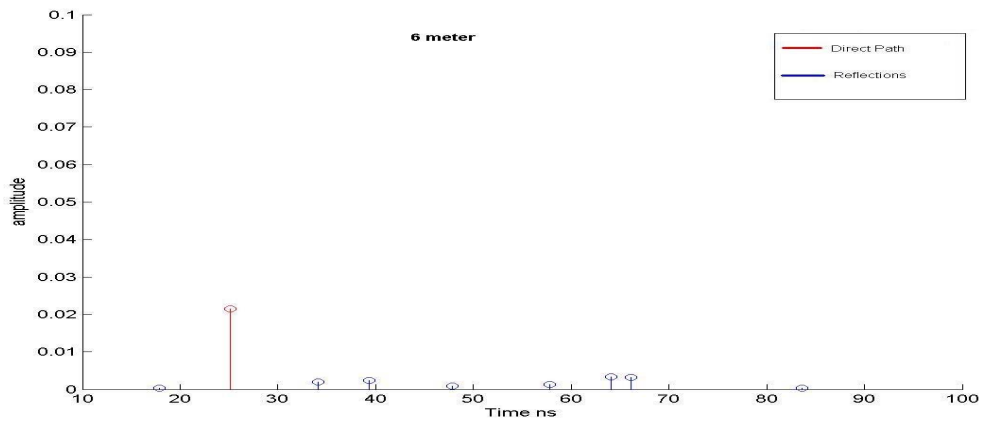


Figura 5.8 Distancia entre Tx y Rx 6 m.

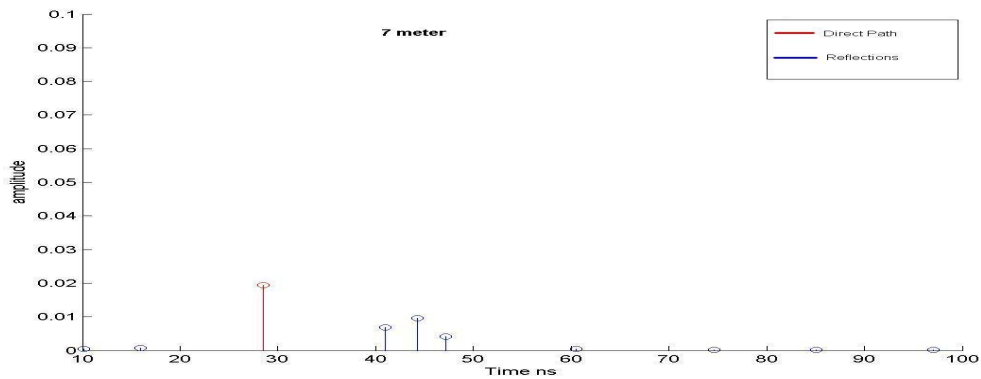


Figura 5.9 Distancia entre Tx y Rx 7 m.

La Tabla 5.2 representa los resultados de las figuras anteriores. En esta ocasión Matrix Pencil nos proporciona los resultados esperados, es decir, a medida que la distancia entre Tx y Rx es mayor, la amplitud recibida en la antena Rx es menor. En este caso los rayos perturbadores son mayores debido a los numerosos obstáculos existentes en el interior de la clase (mesas, sillas...). Los rayos provenientes de las diferentes paredes de la habitación y los reflejados en los distintos obstáculos llegan a Rx un poco después debido a que tienen que recorrer un espacio mayor.

INDOOR	Tiempo llegada (ns)	Amplitud	Amplitud normalizada
2m	11.9	0.0575	1
3m	15.73	0.0411	0.714
5m	22.3	0.023	0.4
6m	25.13	0.0215	0.37
7m	28.53	0.0195	0.33

Tabla 5.2 Tiempo de llegada y amplitud usando Matrix Pencil (INDOOR)

5.1.1.3 Simulación

La Tabla 5.3 se obtiene utilizando la simulación teórica de Ray Tracing. Se simula una distancia entre Tx y Rx de 2, 3,...,7 metros. Como vimos en teoría a medida que aumenta la distancia, la amplitud recibida es menor.

SIMULACIÓN	Tiempo llegada (ns)	Amplitud
2m	6.66	0.0036
3m	10	0.0024
4m	13.33	0.0018
5m	16.66	0.0014
6m	20	0.0012
7m	23.33	0.001

Tabla 5.3 Tiempos de llegada y Amplitud usando RAY TRACING

5.1.1.4 Comparación

Las siguientes gráficas son unas comparaciones entre cada una de las tres situaciones anteriores; Outdoor, Indoor y Simulación. No tenemos realizadas las mismas medidas para las tres situaciones, por ello vamos a comparar en un primer momento Outdoor y Simulación para 3, 5 y 7 metros y después compararemos la Simulación con Indoor para 2, 3, 5, 6 y 7 metros. En la figura 5.10 no obtenemos los resultados esperados debido a las condiciones de solapamiento anteriormente comentadas que hacen que aunque aumente la distancia se produzca también un pequeño aumento en la amplitud.

- **Simulación / Outdoor**

La curva se encuentra normalizada por el valor de la amplitud para una distancia de 3 metros.

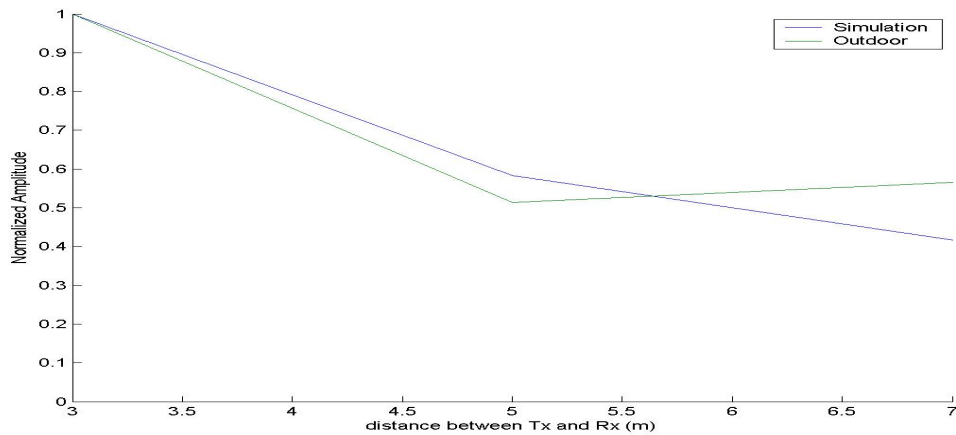


Figura 5.10 Comparación entre Simulación y Outdoor

- **Simulación / Indoor**

En esta gráfica ambas curvas se encuentran normalizadas por el valor de la amplitud para una distancia de 2 metros entre el Tx y el Rx.

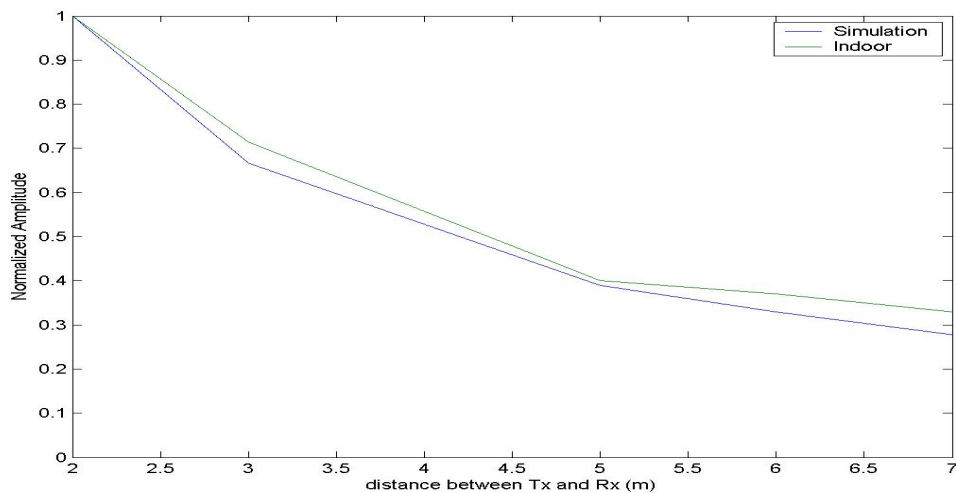


Figura 5.11 Comparación entre Simulación e Indoor

Como se puede observar, la amplitud de la simulación decrece a medida que aumenta la distancia entre ambas antenas. En esta ocasión para el caso Indoor obtenemos los mismos resultados. Mientras mayor es la distancia entre ambos, menor es la amplitud. Debemos de calibrar las amplitudes de Simulación e Indoor de manera que obtengamos los mismos resultados.

5.1.1.5 Calibración de la trayectoria directa

La Tabla 5.4 es una comparativa entre los tiempos de llegada (TOA) y amplitudes obtenidos mediante Ray Tracing en la simulación y mediante Matrix Pencil. De nuevo podemos observar esa diferencia constante de unos 5 o 6 ns.

METER	SIM.TIME	SIM.AMP (A2)	MAT. TIME	MAT.AMP (A1)	A1/A2
2	6.66	0.0036	11.9	0.0575	15.97
3	10	0.0024	15.73	0.0411	17.12
5	16.66	0.0014	22.3	0.023	16.42
6	20	0.0012	25.13	0.0215	17.91
7	23.33	0.0010	28.53	0.019	19

Tabla 5.4 Comparación de TOA y amplitud usando RAY TRACING y Matrix Pencil

La teoría dice que el tiempo invertido por un rayo en recorrer un metro es de,

$$Time = \frac{Distance}{C} = \frac{1m}{3*10^8 m/s} = 3.33ns$$

donde $C = 3*10^8$. En la Tabla 5.4 podemos observar este incremento en el TOA a medida que vamos aumentando la distancia entre TX y RX. La Fig 5.12 representa la calibración del factor A1/A2. Multiplicando la amplitud simulada obtenida con Ray Tracing por dicho factor A1/A2 obtenemos los resultados obtenidos con Matrix Pencil.

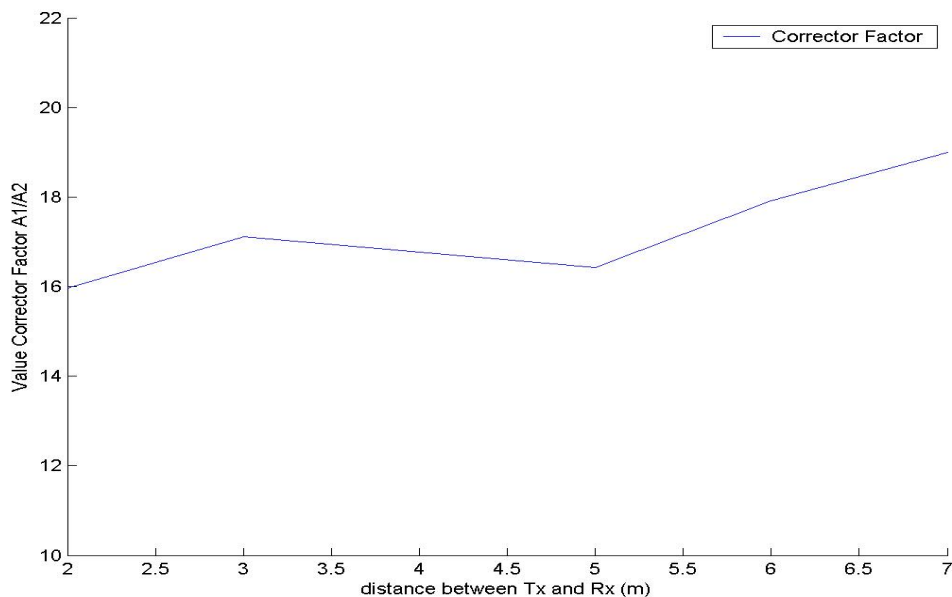


Figura 5.12 Factor de Calibración (A1/A2)

5.1.2 CALIBRACIÓN DE LA REFLEXIÓN

En este apartado nos vamos a centrar en la calibración del rayo reflejado. Para ello se considerará la situación mostrada en la Fig 5.13

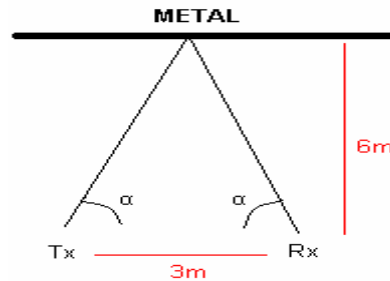


Figura 5.13 Esquema de calibración

La distancia entre la antena transmisora y la receptora es de 3 metros, mientras que la distancia hasta el metal será de 6 metros. El tiempo de llegada del rayo directo será por tanto,

$$Arrival_time_direct_path = \frac{3m}{3 \cdot 10^8 m/s} = 10ns$$

mientras que el tiempo estimado de llegada del rayo reflejado, suponiendo que recorre un trayecto de 12.37m. es de,

$$Arrival_reflected_path = \frac{12.37m}{3 \cdot 10^8 m/s} = 41.23ns$$

El ángulo α para el Tx y el Rx variará desde los 30° hasta los 90° en incrementos de 20°. La siguiente figura muestra las trayectorias obtenidas usando Matrix Pencil para los ángulos anteriormente citados. De nuevo podemos observar que el rayo reflejado vuelve a llegar 5 o 6 ns. después de lo esperado debido al tiempo de adquisición de datos del Analizador de Red

- **Resultados gráficos**

La reflexión teóricamente llega a los 41.23ns. Como comentamos anteriormente es necesario sumarle 5 o 6 ns. La línea roja representa la reflexión

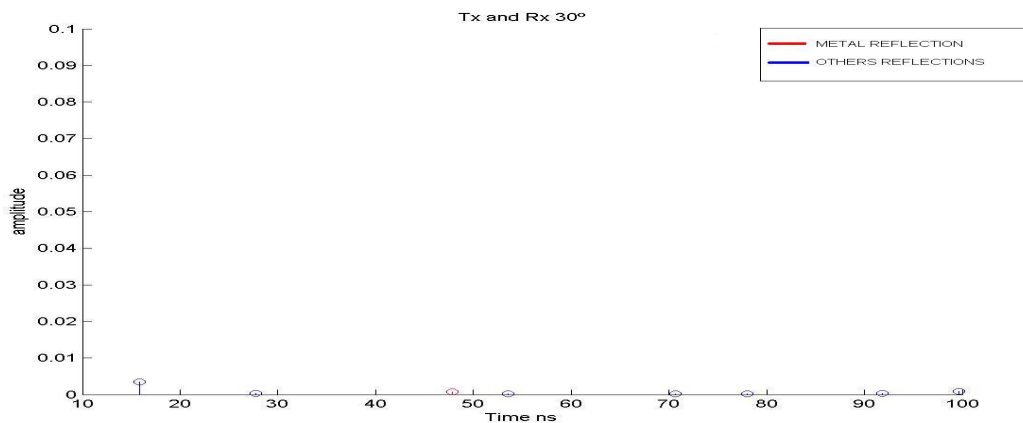


Figura 5.14 Tx y Rx con ángulo 30°

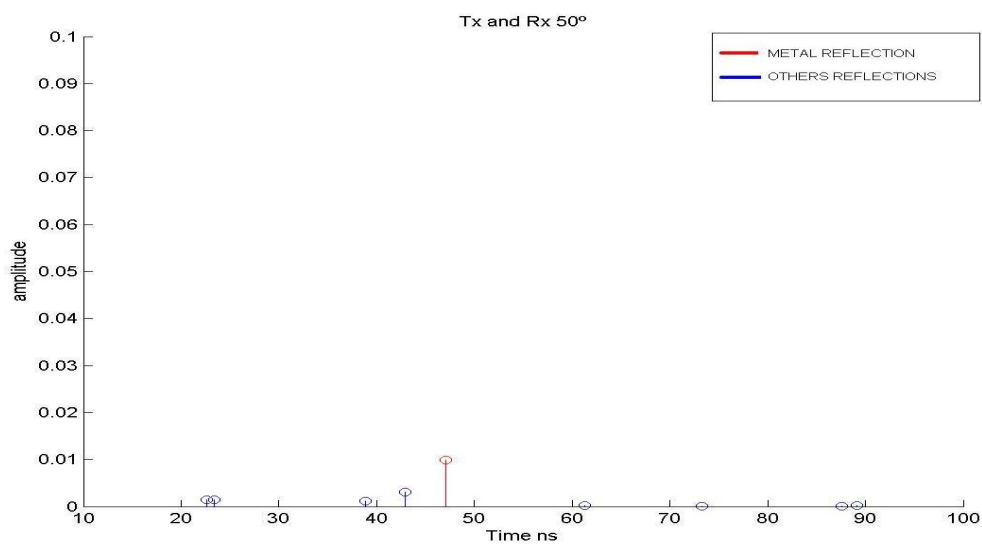


Figura 5.15 Tx y Rx con ángulo 50°

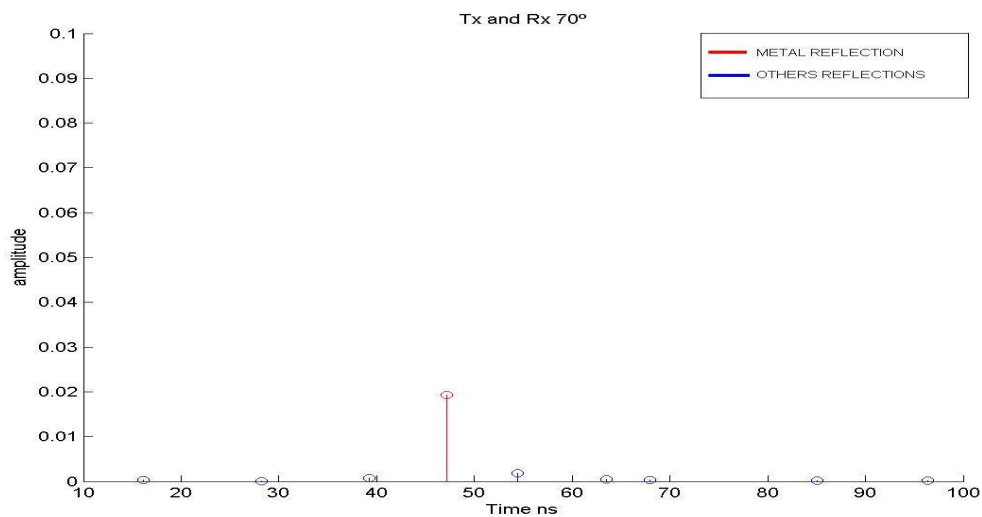


Figura 5.16 Tx y Rx con ángulo 70°

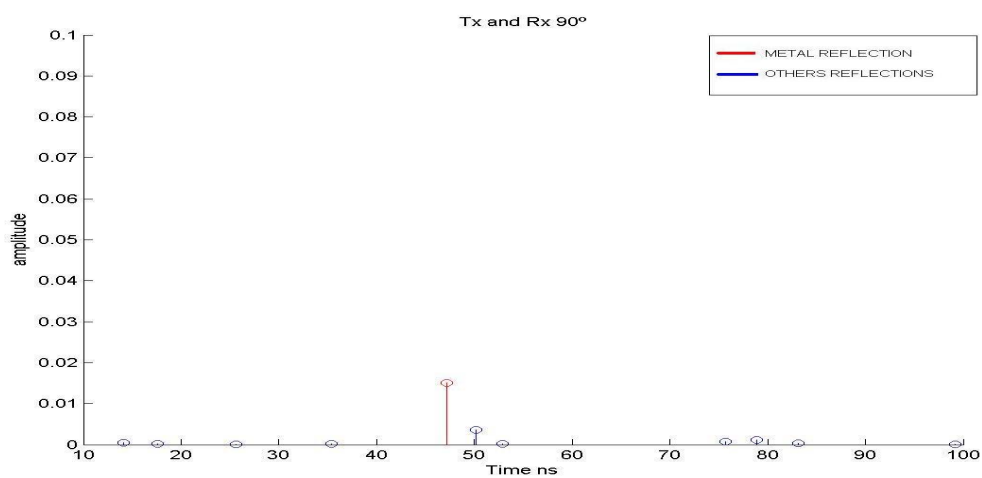


Figura 5.17 Tx y Rx con ángulo 90°

- **Resultados numéricos**

La Tabla 5.5 es una comparativa entre Matrix Pencil (MP) y los resultados teóricos obtenidos mediante la simulación (SIM) en las mismas condiciones.

ÁNGULO	TIEMPO DE LLEGADA DE REFLEXION (MP)	AMPLITUD NORMALIZADA (MP)	TIEMPO DE LLEGADA DE REFLEXION (SIM)	AMPLITUD NORMALIZADA (SIM)
30°	47.81	0.205	41.23	0.0022
50°	47.062	10.88	41.23	3.77
70°	47.16	64.66	41.23	20.98
90°	47.205	37.75	41.23	107

Tabla 5.5 Comparación entre simulación y Matrix Pencil

La figura 5.18 representa dicha reflexión. En la simulación vemos como la reflexión aumenta a medida que aumenta el ángulo desde 30° hasta 90°, alcanzando un máximo para 90°. En la práctica podemos observar como este máximo no se produce para los 90°, sino que existe un ángulo intermedio para el cual se produce dicho máximo. Este resultado parece lógico ya que cuando ambas antenas alcanzan este ángulo, sus patrones de radiación presentan sus máximos en dirección a la trayectoria de la reflexión. En este caso el ángulo para el cual la reflexión es máxima es de 70°. Para calibrar los parámetros de las distintas paredes que estudiaremos, intentaremos siempre usar la reflexión para ángulos cercanos a dicho máximo, ya que en ellos se aprecia con mayor claridad la amplitud de la señal recibida. En la figura 5.18 ambas amplitudes se encuentran normalizadas con la amplitud del rayo directo.

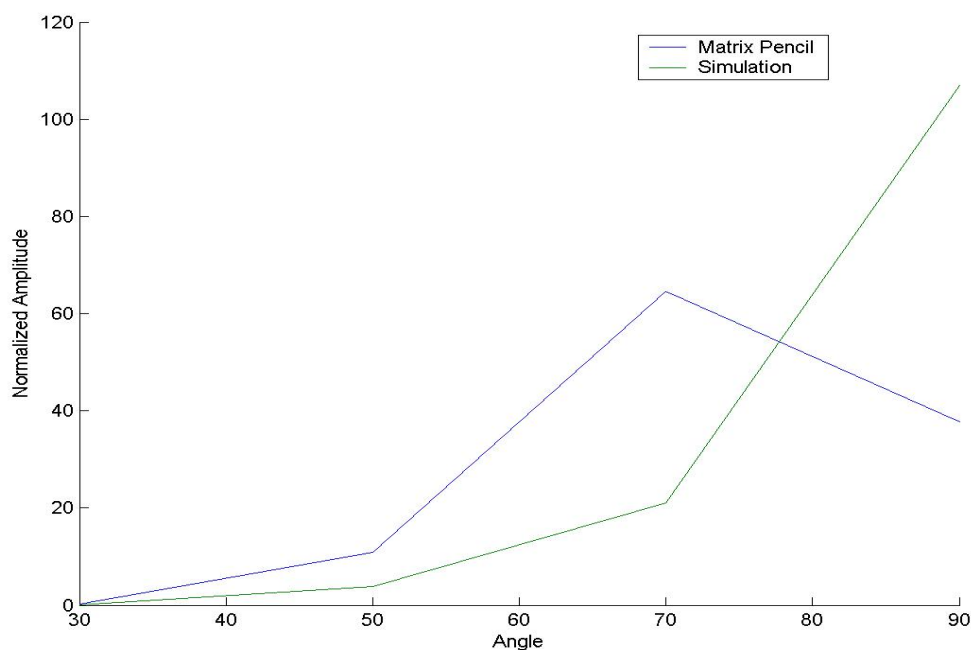


Figura 5.18 Relación entre Simulación y Matrix Pencil

5.1.3 CALIBRACIÓN DE LA PARED GLASS (H3)

Las primeras medidas fueron tomadas de la pared GLASS H3. Para la realización de estas primeras mediciones la posición de Tx y Rx están fijadas en las posiciones de la Fig 5.19. El ángulo para el Tx y el Rx variará para las distintas mediciones. La Tabla 5.6 contiene dichos ángulos.

MEDIDAS	ÁNGULO Tx	ÁNGULO Rx
1	0°	180°
2	60°	120°
3	70°	110°
4	80°	100°
5	90°	80°

Tabla 5.6 Ángulos para las diferentes medidas

5.1.3.1 Protocolo de las medidas

- Posicionamiento en el aula SN.22

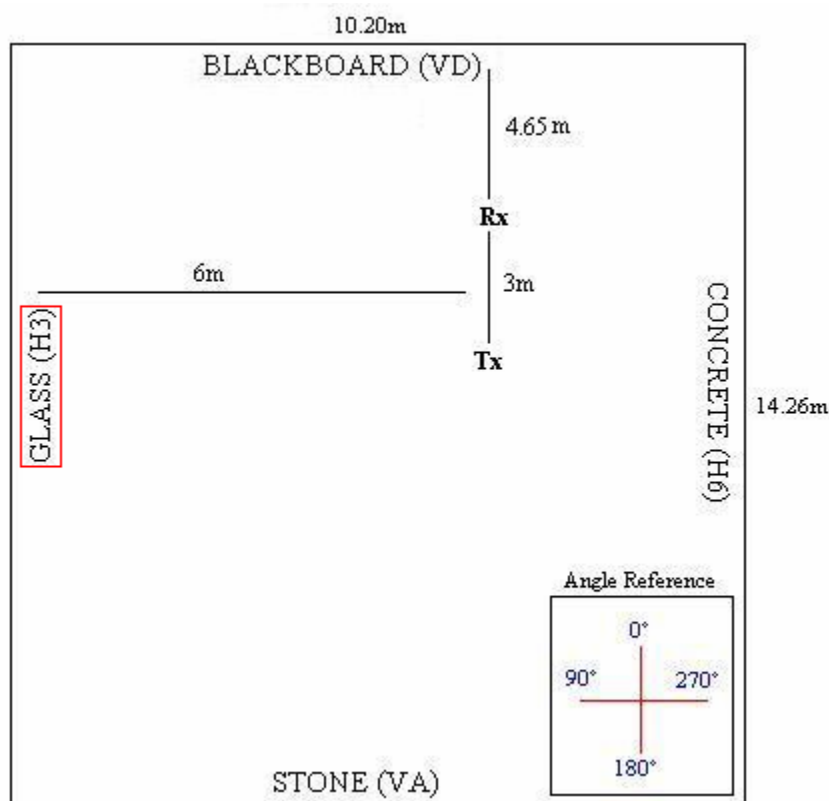


Figura 5.19 Posicionamiento en el aula SN.22.2

En este apartado se considera que la distancia existente entre la pared bajo estudio, GLASS H3, y ambas antenas es de 6m. La distancia entre Tx y Rx es de 3m.

- **Posicionamiento general en el edificio**

Las muestras son tomadas en la 4ª planta del edificio, concretamente dentro del aula SN.22.2. La Fig 5.20 es un gráfico en 3-D que representa en color verde la reflexión de la señal en cada una de las paredes del edificio. En este caso el rayo azul representa la trayectoria directa entre Tx y Rx. Las antenas Tx y Rx vienen representadas por unas líneas pequeñas en color rojo. En este gráfico representamos solo trayectorias con una sola reflexión, pero el programa esta capacitado para representar hasta la tercera reflexión.

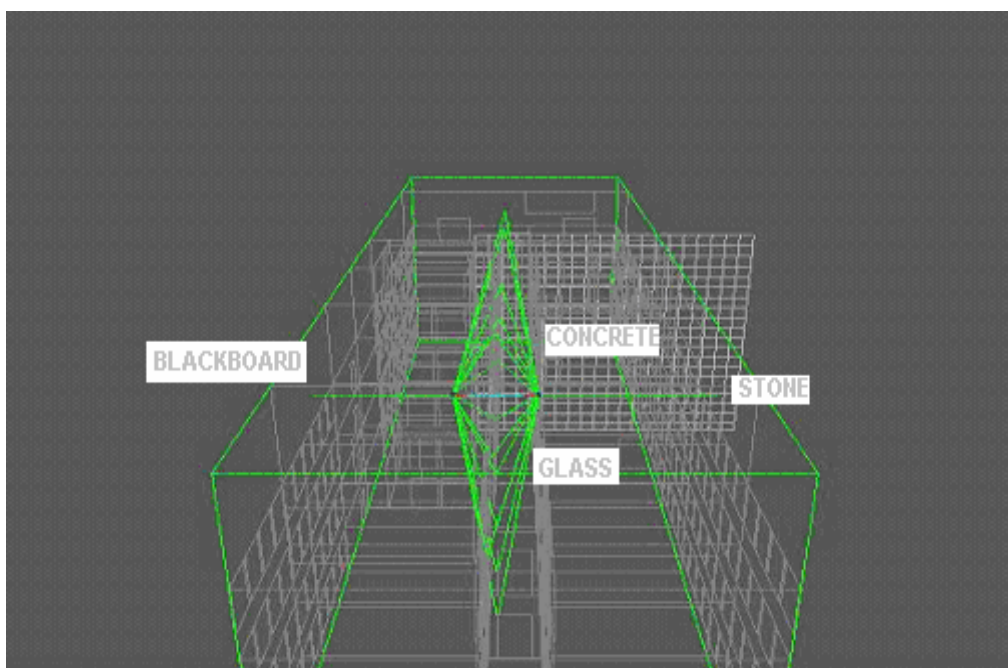


Figura 5.20 Esquema de las trayectorias directa y reflejadas

5.1.3.2 Resultados teóricos

Los resultados teóricos se obtienen utilizando en MATLAB un programa denominado Impulse Response. Mediante dicho programa obtenemos el tiempo de llegada (TOA), la amplitud de las diferentes trayectorias, las pérdidas etc... Estos resultados teóricos están realizados para unos ángulos en las antenas de valores $T_x=0^\circ$ y $R_x=180^\circ$.

La trayectoria en la que nos vamos a centrar en este apartado será la proveniente del cristal, GLASS H3. El tiempo de llegada TOA para esta trayectoria es de 41.23 ns, como la velocidad de propagación de la señal es de $3 \cdot 10^8$ m/s, podemos calcular fácilmente que el trayecto recorrido por dicha señal es de 12.369 m. Como podemos observar en la Tabla 5.7, en negrilla se encuentra remarcado dicho rayo, mientras que el resto de señales llegarán en distintos instantes, dependiendo de la distancia entre las antenas y dichas paredes.

TRAYECTORIA	TIEMPO LLEGADA (ns)	AMPLITUD NORMALIZADA
DIRECT	10	1
FLOOR	13.02	0.0035
CEILING	22.06	0.0022
STONE (VA)	52.07	0.001
CONCRETE (H6)	29.73	0.001
BLACKBOARD (VD)	43	0.0013
GLASS (H3)	41.23	0.0004

Tabla 5.7 Glass (H3): Tx= (631, 4160, 1245) Rx= (931, 4160, 1245) Tx=0° Rx=180°

5.1.3.3 Resultados de Matrix Pencil y MUSIC

- Interpretación de las diferentes trayectorias

Se representarán las gráficas para distintos ángulos tanto de la antena Tx como Rx usando el algoritmo Matrix Pencil. Estos resultados serán comparados con los obtenidos usando MUSIC y la simulación teórica de Ray Tracing

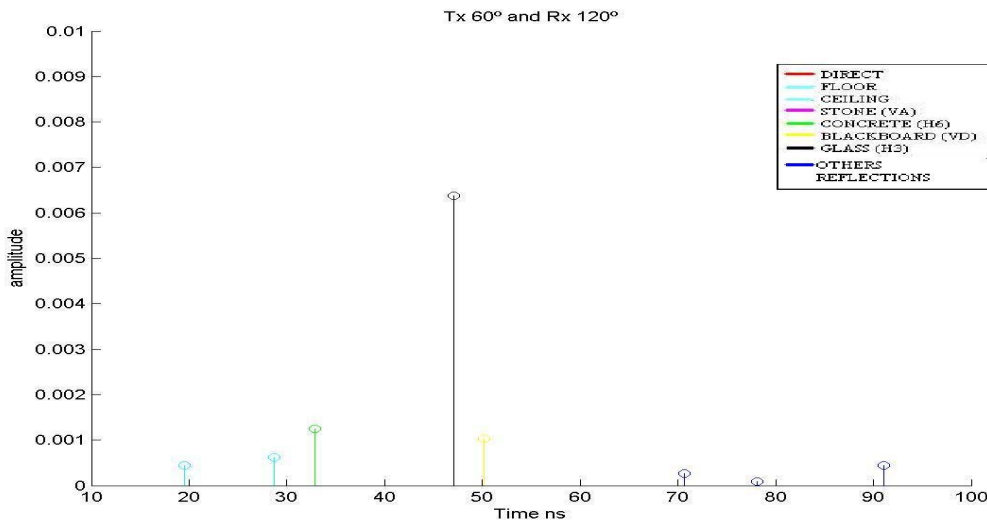


Figura 5.21 Resultados Matrix Pencil Tx=60° Rx=120°

La Tabla 5.8 representa los resultados de Fig 5.21.

Tx=60° Rx=120°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT			
FLOOR	19.53	0.0004	
CEILING	28.67	0.0006	
STONE			
CONCRETE	32.83	0.0012	34
BLACKBOARD	50.18	0.001	
GLASS	47.1	0.0064	48

Tabla 5.8 Glass (H3): Tx= (631, 4160, 1245) Rx= (931, 4160, 1245) Tx=60° Rx=120°

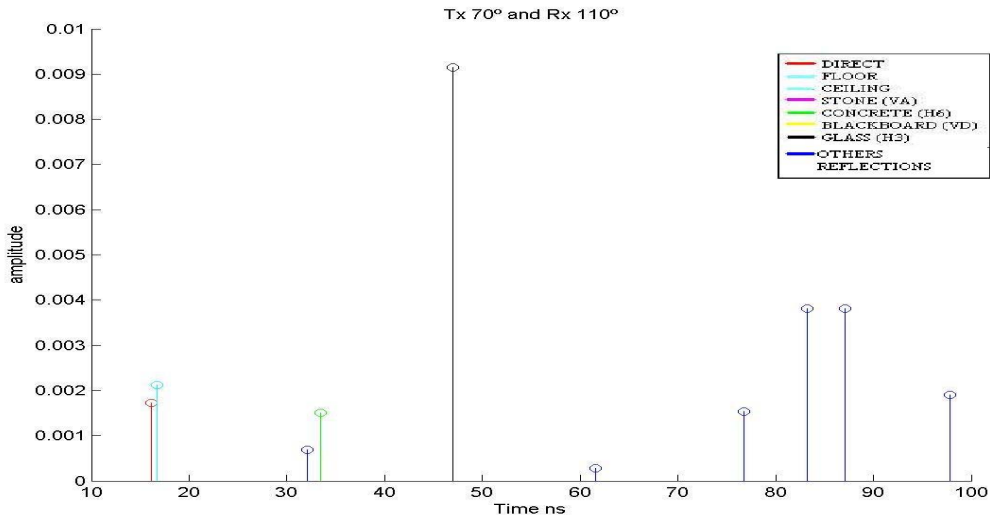


Figura 5.22 Resultados Matrix Pencil Tx=70° Rx=110°

La Tabla 5.9 representa los resultados de la Fig 5.22.

Tx=70° Rx=110°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT	16.14	0.0017	
FLOOR	16.73	0.0021	
CEILING			
STONE			
CONCRETE	33.43	0.0015	35
BLACKBOARD			
GLASS	46.99	0.0091	48

Tabla 5.9 Glass (H3): Tx= (631, 4160, 1245) Rx= (931, 4160, 1245) Tx=70° Rx=110°

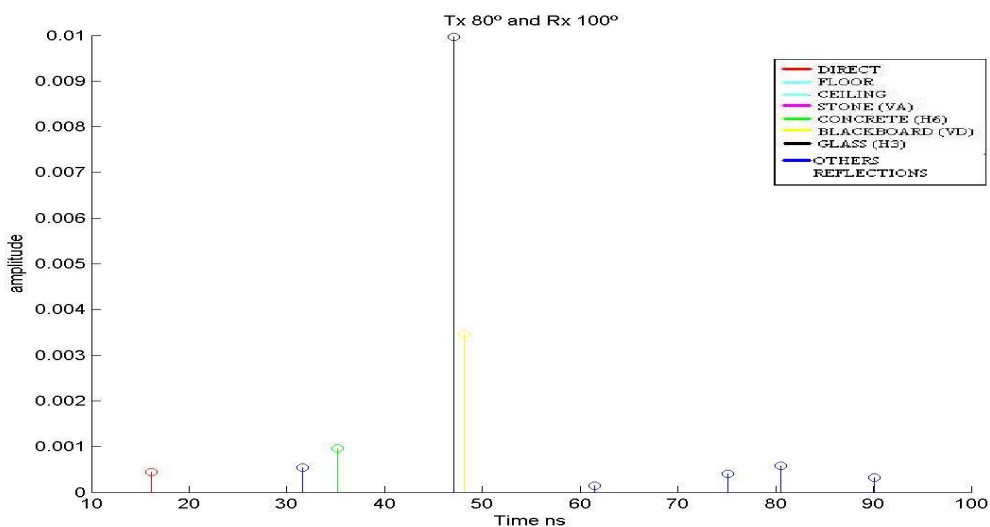


Figura 5.23 Resultados Matrix Pencil Tx=80° Rx=100°

La Tabla 5.10 representa los resultados de Fig 5.23.

Tx=80° Rx=100°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT	16.12	0.0004	17
FLOOR			
CEILING			
STONE			
CONCRETE	35.15	0.001	37
BLACKBOARD	48.15	0.0035	
GLASS	47.099	0.01	48

Tabla 5.10 Glass (H3): Tx= (631, 4160, 1245) Rx= (931, 4160, 1245) Tx=60° Rx=120°

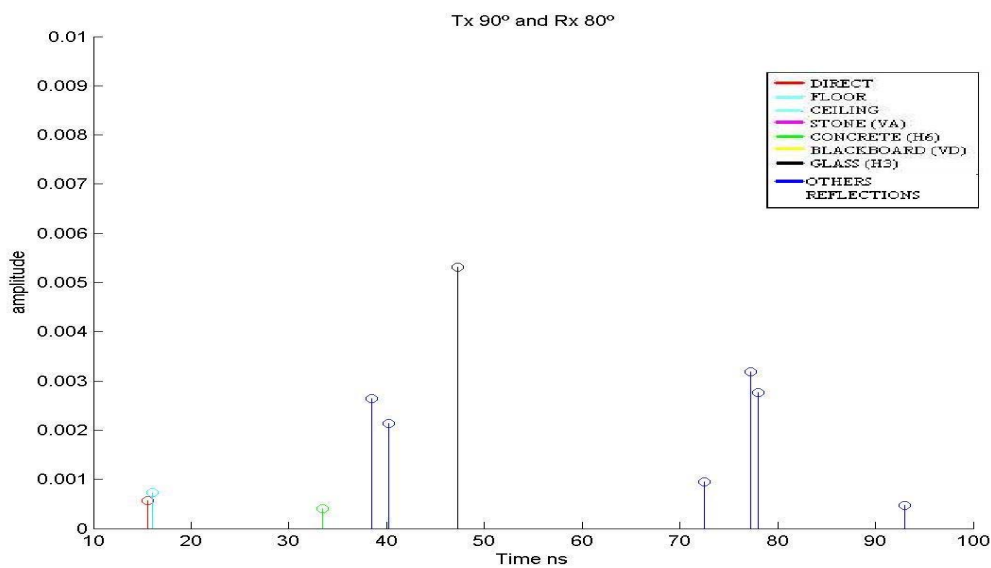


Figura 5.24 Resultados Matrix Pencil Tx=90° Rx=80°

La Tabla 5.11 representa los resultados de Fig 5.24

Tx=90° Rx=80°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT	15.57	0.0006	17
FLOOR	16.0026	0.0007	
CEILING			
STONE			
CONCRETE	33.48	0.0004	
BLACKBOARD			
GLASS	47.3	0.0053	48

Tabla 5.11 Glass (H3): Tx= (631, 4160, 1245) Rx= (931, 4160, 1245) Tx=60° Rx=120°

Como se puede observar en las diferentes tablas y gráficas, la trayectoria sobre la cual ahora nos centramos; la proveniente de GLASS H3, es detectada a los 47 ns usando Matrix Pencil y a los 48 ns usando MUSIC. Teóricamente hemos calculado que

dicha señal debería ser detectada a los 41.23 ns, pero de nuevo tenemos que añadirle ese tiempo constante en la adquisición de datos del Analizador de Red. Como se puede observar la exactitud de ambos métodos es muy elevada en todas las medidas realizadas.

5.1.3.4 Calibración

Una vez que se han obtenido los resultados tanto teóricos como prácticos, pasamos a realizar la calibración del parámetro E_r . En un principio las paredes del edificio tienen un valor estimado de dicho parámetro. Se comparará dicho valor teórico a priori con el obtenido en las nuevas mediciones y mediante esta comparación se intentará estimar un valor nuevo de E_r .

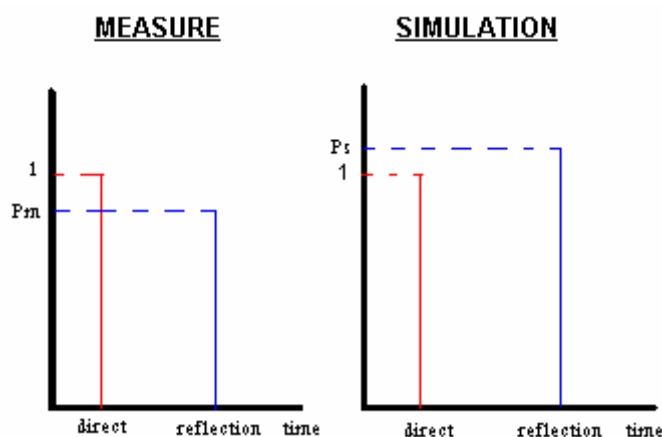


Figura 5.25 Relación entre Amplitud Medida y Amplitud Simulada

La relación para obtener el parámetro que estamos buscando es la siguiente;

$$P_m/P_s=R_m/R_s$$

donde,

- P_m = Amplitud de la Reflexión medida
- P_s = Amplitud de la Reflexión simulada
- R_s = Coeficiente de Reflexión simulado
- R_m = Coeficiente de Reflexión medido

El único parámetro que nos es desconocido es R_m , por lo que puede ser fácilmente calculado haciendo

$$R_m=(P_m/P_s)*R_s$$

Una vez que hemos obtenido dicho parámetro, utilizaremos otro programa en MATLAB que nos proporcionará el nuevo valor de E_r a partir del antiguo y de una serie de parámetros que le introducimos. Con este nuevo valor de E_r calibramos la pared sobre la que hemos realizado las mediciones. El programa para dicho cálculo utiliza como uno de los parámetros de entrada el ángulo incidente. Este ángulo es calculado siguiendo el esquema de la Fig 5.26.

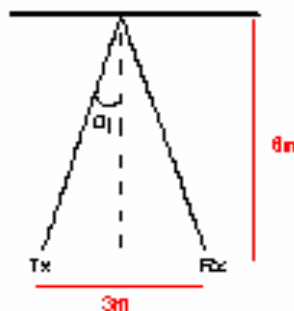


Figura 5.26 Ángulo incidente

Se obtiene un ángulo de valor $\alpha_i = 14.036^\circ$. Con dicho ángulo y para unos ángulos de transmisión para la antena $T_x = 70^\circ$ y $R_x = 110^\circ$ obtenemos el nuevo valor de E_r ;

ANGLE	Ps(norm)	Pm(norm)	Rs	Er
$T_x = 70^\circ R_x = 110^\circ$	13.78	5.35	0.42	6.38

Tabla 5.12 Datos utilizados para calcular E_r

El valor exacto para el nuevo E_r es de,

$$E_r (\text{New}) = 3.06$$

Los ángulos de la antena T_x y R_x se escogen de manera que sea lo más fácil posible la detección de la trayectoria reflejada en la pared bajo estudio, por tanto no serán los mismos en todos los apartados.

5.1.4 CALIBRACIÓN DE LA PARED CONCRETE WALL (H6)

Las segundas medidas fueron tomadas de la pared CONCRETE WALL H6. En esta ocasión la antena T_x y R_x se encuentran en la siguiente posición;

$$T_x = (851, 4340, 1245)$$

$$R_x = (1151, 4340, 1245)$$

Los ángulos de transmisión y recepción de ambas antenas variarán y se representan en la siguiente Tabla 5.13.

MEDIDA	ÁNGULO T_x	ÁNGULO R_x
1	0°	180°
2	290°	250°
3	300°	240°
4	340°	200°

Tabla 5.13 Ángulo para diferentes medidas

5.1.4.1 Protocolo de las medidas

- Posicionamiento en el aula SN.22

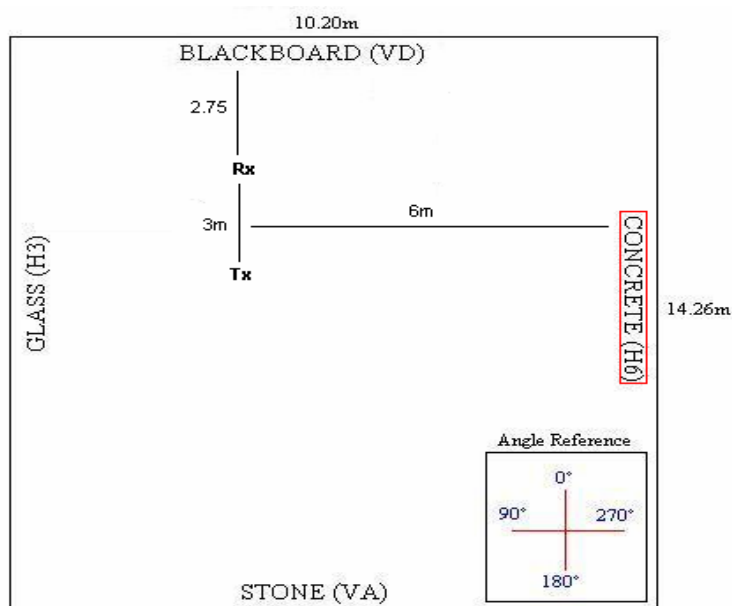


Figura 5.27 Disposición de las antenas en SN.22.2

La distancia entre las antenas y la pared bajo estudio (CONCRETE WALL H6) vuelve a ser de 6 metros. Por lo tanto, la reflexión de la señal transmitida en la pared H6 debería llegar al mismo tiempo que en la sección anterior con el caso del cristal GLASS, es decir, 41.23 ns, debido a que la distancia desde la antena a la pared es la misma.

- Posicionamiento general en el edificio

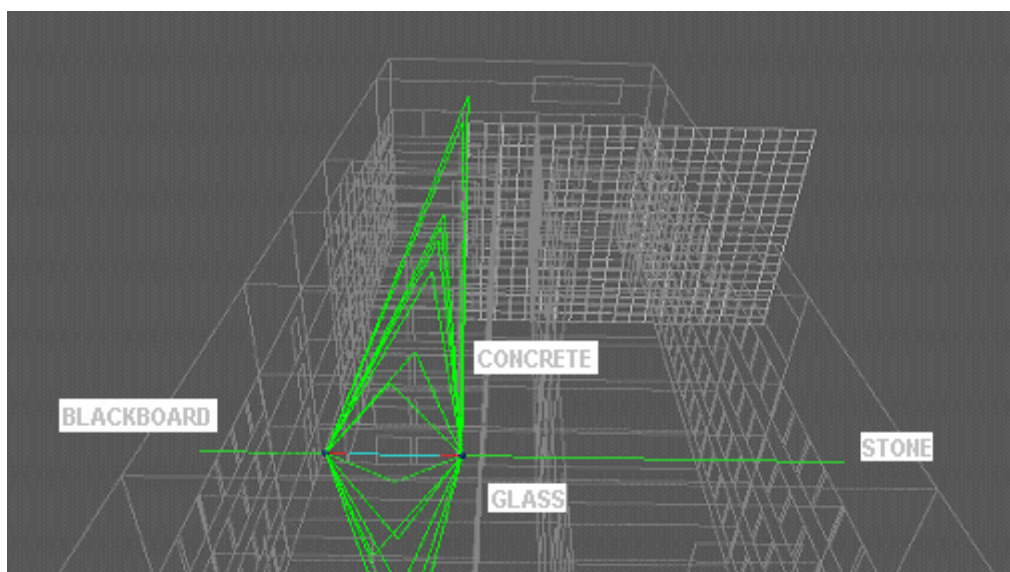


Figura 5.28 Esquema del rayo directo y reflejados

La trayectoria en azul representa el rayo directo, mientras que las trayectorias verdes son las reflexiones en las distintas paredes. Las líneas rojas representan a TX y Rx.

5.1.4.2 Resultados teóricos

Usando el programa Impulse Response obtenemos los resultados de la simulación representados en la Tabla 5.14

TRAYECTORIA	TIEMPO LLEGADA (ns)	AMPLITUD NORMALIZADA
DIRECT	10	1
FLOOR	13.02	0.2109
CEILING	22.06	0.2122
STONE (VA)	66.73	0.099
CONCRETE (H6)	41.23	0.0066
BLACKBOARD (VD)	28.33	0.0001
GLASS (H3)	29.73	0.3777

Tabla 5.14 Concrete (H6) Tx= (851, 4340, 1245) Rx= (1151, 4340, 1245) Tx=0° Rx=180

En esta ocasión la trayectoria que queremos estudiar es la proveniente de la pared CONCRETE WALL H6. Como se puede observar el tiempo de llegada es el mismo que para el cristal en el apartado anterior, debido a la similitud de distancias. El resto de reflexiones llegan en tiempos diferentes, porque en esta ocasión las distancias con respecto al resto de paredes habrán cambiado. Como podemos observar en la Tabla 5.14 la trayectoria mayor es la directa. Esto es lógico debido al ángulo de transmisión de ambas antenas. Están colocadas de manera que los patrones de radiación coinciden con su máximo en la dirección a la otra antena. La distancia que recorre la trayectoria en la que estamos interesados es de 12.369 m., al igual que el apartado anterior para el cristal GLASS.

5.1.4.3 Resultados de Matrix Pencil y MUSIC

- Interpretación de las diferentes trayectorias

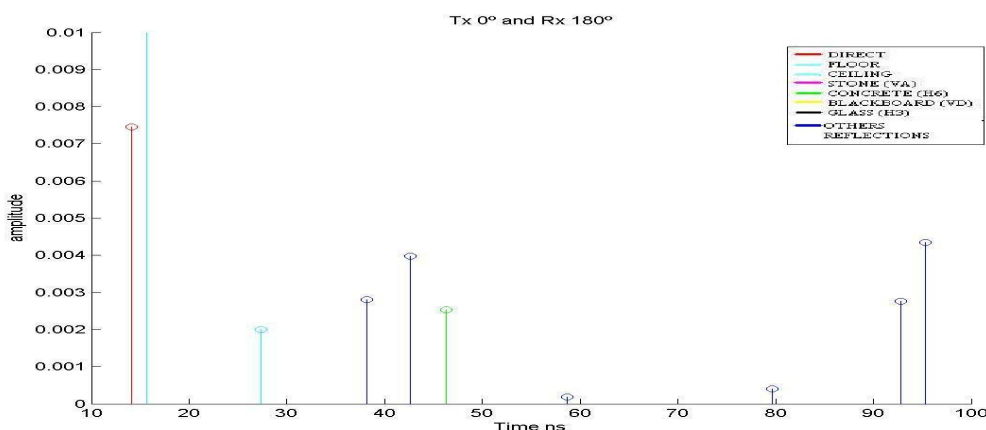


Figura 5.29 Resultados de Matrix Tx=0° Rx=180°

5. CALIBRACIÓN DE RESULTADOS

Representaremos estas gráficas para distintos ángulos del Tx y Rx utilizando el algoritmo Matrix Pencil. Estos resultados se compararán con los obtenidos utilizando Music y el programa de simulación Impulse Response.

La Tabla 5.15 representa los resultados de la Fig 5.29

Tx=0° Rx=180°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT	15.63	0.0438	17
FLOOR			
CEILING	27.39	0.002	
STONE			
CONCRETE	46.3042	0.0025	
BLACKBOARD			
GLASS			

Tabla 5.15 Concrete (H6) Tx= (851, 4340, 1245) Rx= (1151, 4340, 1245) Tx=0° Rx=180

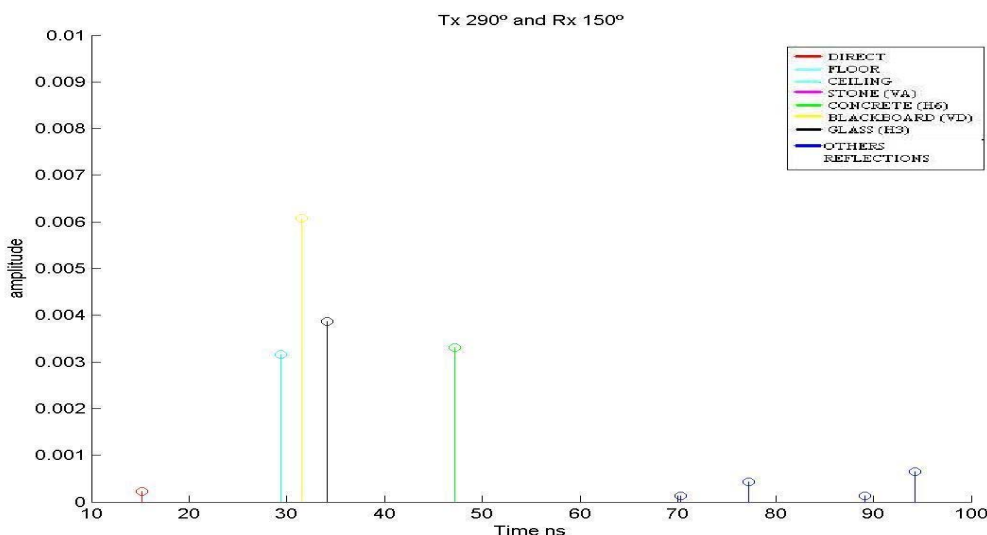


Figura 5.30 Matrix Results Tx=290° Rx=150°

La Tabla 5.16 representa los resultados de la Fig 5.30.

Tx=290° Rx=250°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT	15.1247	0.0002	16
FLOOR			
CEILING	29.4	0.0032	
STONE			
CONCRETE	41.19	0.0033	48
BLACKBOARD	31.46	0.0061	
GLASS	34.09	0.0039	35

Tabla 5.16 Concrete (H6) Tx= (851, 4340, 1245) Rx= (1151, 4340, 1245) Tx=290° Rx=250

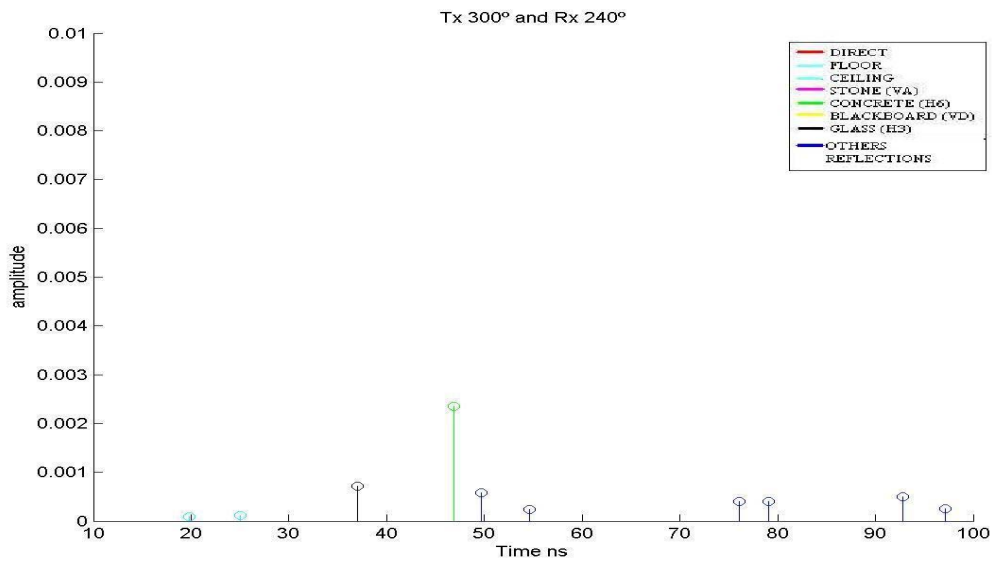


Figura 5.31 Matrix Results Tx=300° Rx=240°

La Tabla 5.17 representa los resultados de la Fig 5.31

Tx=300° Rx=240°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT			
FLOOR	19.79	0.0001	
CEILING	25.075	0.0001	
STONE			
CONCRETE	46.85	0.0024	48
BLACKBOARD			
GLASS	37.03	0.0007	38

Tabla 5.17 Concrete (H6) Tx= (851, 4340, 1245) Rx= (1151, 4340, 1245) Tx=300° Rx=240

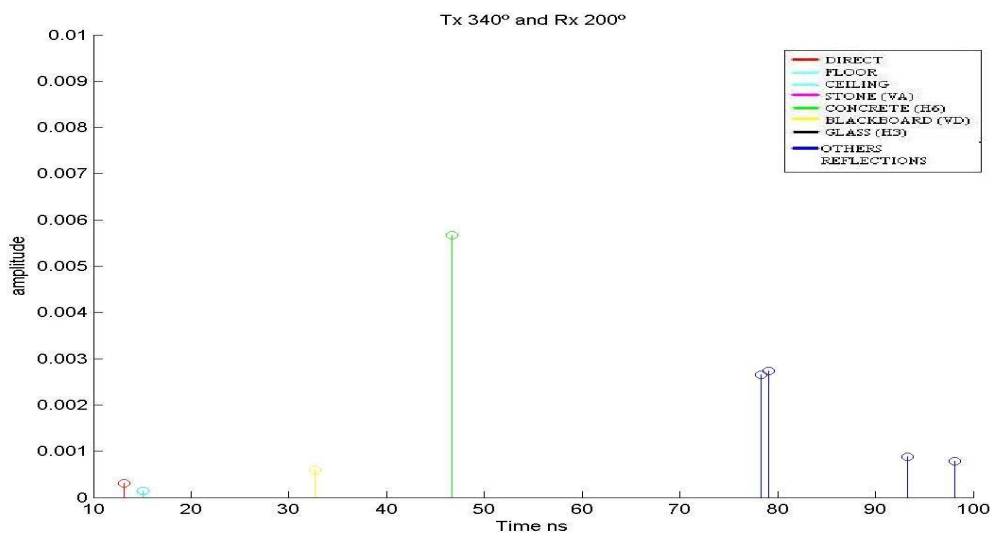


Figura 5.32 Matrix Results Tx=340° Rx=200°

La Tabla 5.18 representa los resultados de la Fig 5.32.

Tx=340° Rx=200°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT	13.13	0.0003	15
FLOOR	15.03	0.0001	
CEILING			
STONE			
CONCRETE	46.678	0.0057	48
BLACKBOARD	32.637	0.0006	35
GLASS			

Tabla 5.18 Concrete (H6) Tx= (851, 4340, 1245) Rx=(1151, 4340, 1245) Tx=340° Rx=200

Como podemos observar en las distintas gráficas, la trayectoria en la que estamos interesados es la de color verde. Dicho rayo posee un TOA de 47 ns. Debemos tener en cuenta de nuevo esos 5 ns de diferencia que son usados por el analizador de red. Por tanto vemos que la teoría y la práctica coinciden de forma casi exacta, ya que teóricamente el rayo debería de llegar a los 41.23 ns.

5.1.4.4 Calibración

Como en la sección anterior, comparamos la teoría con los resultados de la simulación. Lo primero en ser calculado es el parámetro R_m ,

$$R_m = (P_m/P_s) * R_s$$

La Fig. 5.27 representa el significado de cada uno de los parámetros,

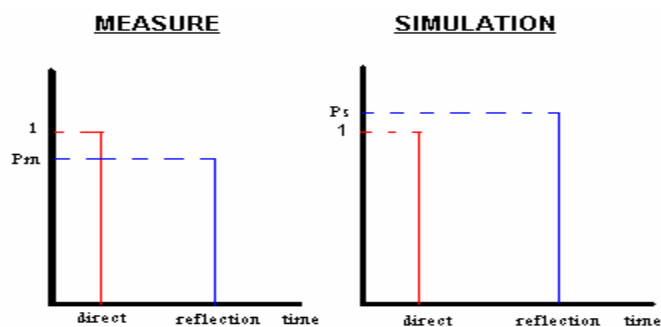


Figura 5.33 Relación entre amplitud medida y simulada

Una vez que el parámetro R_m ha sido obtenido, se utiliza un programa que nos proporcionará el nuevo valor de E_r estimado. Con este nuevo valor de E_r se calibrará la pared bajo estudio en esta sección. Dicho programa para la estimación del nuevo E_r utiliza el ángulo incidente. Este ángulo se calcula fácilmente siguiendo el esquema mostrado.



Figura 5.34 Ángulo incidente

Obtenemos un $\alpha_i = 14.036^\circ$. Con este ángulo incidente y con las antenas transmitiendo con los ángulos mostrados en la Tabla 5.19, obtenemos el siguiente E_r ;

ANGLE	Ps(norm)	Pm(norm)	Rs	Er
$T_x=290^\circ R_x=250^\circ$	12.9	16.5	0.37	4.95

Tabla 5.19 Comparación entre Amplitud Matrix Pencil y Ray Tracing

El valor exacto para el nuevo E_r es de,

$$E_r(\text{new}) = 6.385$$

5.1.5 CALIBRACIÓN DE LA PARED BLACKBOARD (VD)

Las siguientes medidas fueron tomadas de la pared BLACKBOARD (VD). La posición general para ambas antenas es en este caso;

$$T_x = (826, 4360, 1245)$$

$$R_x = (826, 4060, 1245)$$

Los ángulos para ambas antenas serán

MEASURE	ANGLE Tx (degrees)	ANGLE Rx(degrees)
1	310°	50°
2	320°	40°
3	340°	20°
4	360°	0°

Tabla 5.20 Ángulos para diferentes medidas

5.1.5.1 Protocolo de las medidas

- Posicionamiento en el aula SN.22

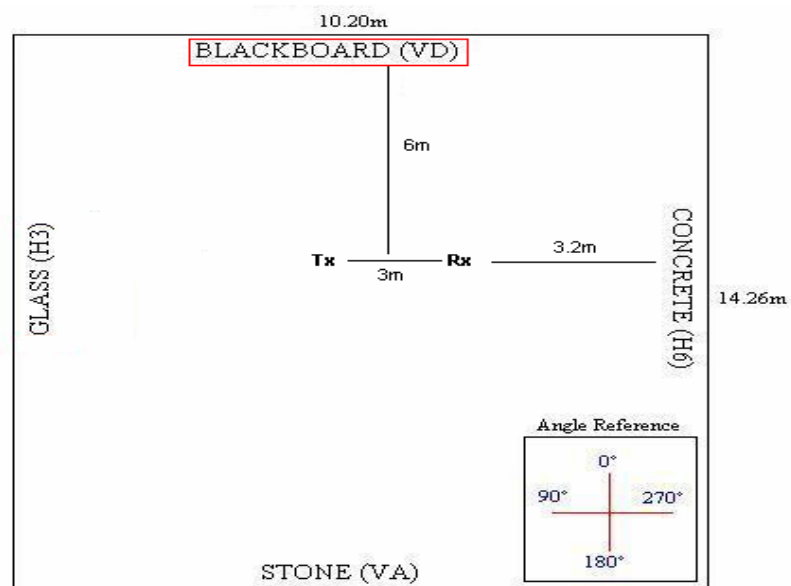


Figura 5.35 Disposición de las antenas en SN.22.2

En esta ocasión la distancia entre ambas antenas y la pared bajo estudio es otra vez de 6 metros, así mismo la distancia entre ambas antenas es de 3 m.

- Posicionamiento general en el edificio

Las medidas serán tomadas en la 4ª planta del edificio, dentro de la habitación SN.22.2

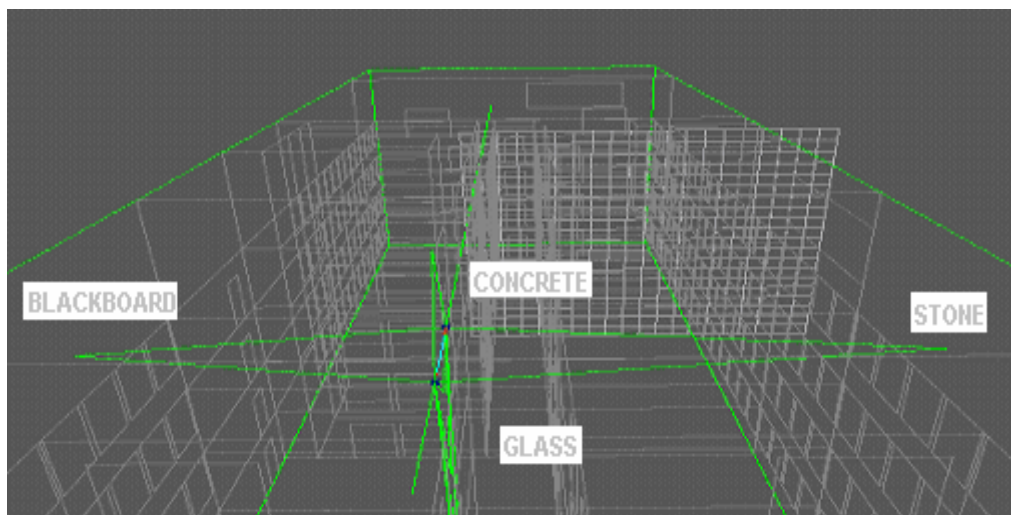


Figura 5.36 Esquema del rayo directo y reflejado

5.1.5.2 Resultados teóricos

Resultados obtenidos mediante la simulación de Ray Tracing.

TRAYECTORIA	TIEMPO LLEGADA (ns)	AMPLITUD NORMALIZADA
DIRECT	10	1
FLOOR	13.02	1.2977
CEILING	22.06	0.1664
STONE (VA)	55.97	0.1387
CONCRETE (H6)	31.33	0.2109
BLACKBOARD (VD)	41.23	0.0001
GLASS (H3)	36.67	0.1922

Tabla 5.21 Blackboard (VD): Tx= (826, 4360, 1245) Rx= (826, 4060, 1245) Tx=270° Rx=90°

Como se puede ver de nuevo en este apartado, la trayectoria sobre la que nos centramos, BLACKBOARD, alcanza la antena Rx a los 41.23 ns. De nuevo volvemos a obtener el mismo tiempo que en los ejemplos anteriores, debido a que la posición de las antenas con respecto a la pared bajo estudio permanece constante. Por tanto el espacio recorrido por dicha trayectoria es de 12.369 m.

5.1.5.3 Resultados de Matrix Pencil y MUSIC

- Interpretación de las diferentes trayectorias

Se representará como en todos los casos anteriores las gráficas de Matrix Pencil para diferentes ángulos de las antenas Tx y Rx. Dichos resultados obtenidos se comparan con los obtenidos mediante MUSIC y los teóricos de Ray Tracing.

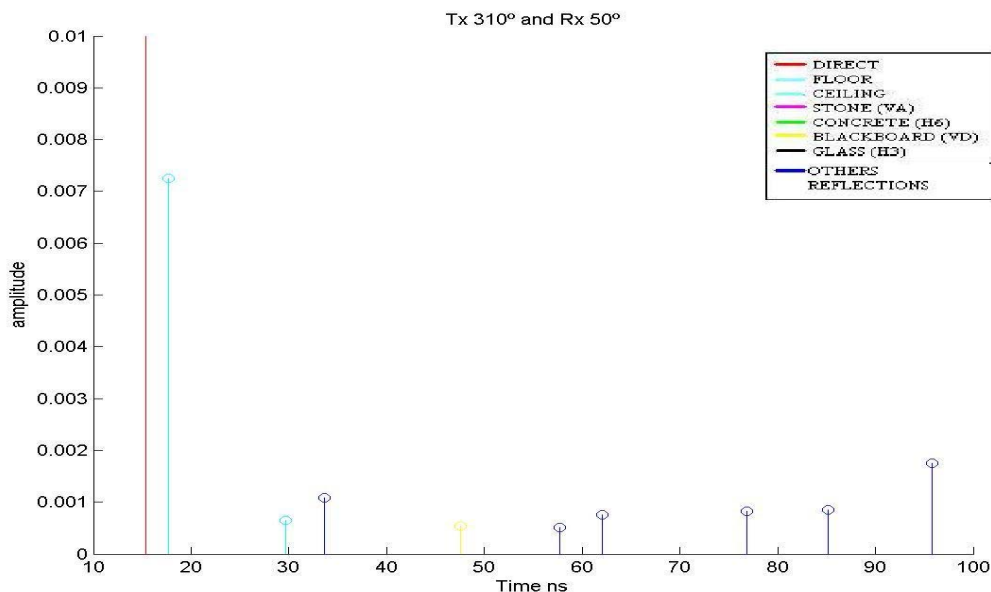


Figura 5.37 Resultados de Matrix Pencil Tx=310° Rx=50°

La Tabla 5.22 representa los resultados de la Fig 5.37

Tx=310° Rx=50°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT	15.3243	0.0484	16
FLOOR	17.647	0.0075	
CEILING	29.65	0.0006	30
STONE			
CONCRETE			
BLACKBOARD	47.59	0.0005	48
GLASS			

Tabla 5.22 Blackboard (VD): Tx= (826, 4360, 1245) Rx= (826, 4060, 1245) Tx=310° Rx=50°

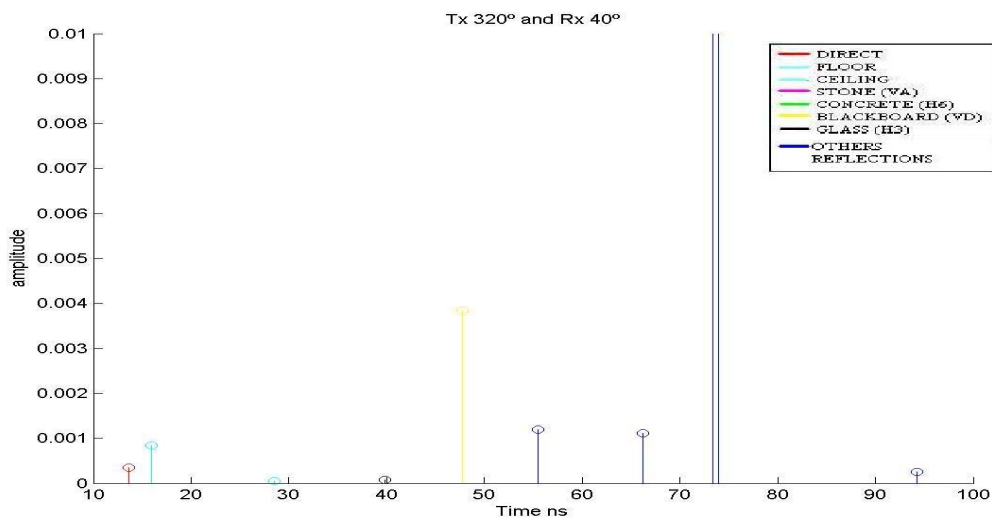


Figura 5.38 Resultados Matrix Pencil Tx=320° Rx=40°

La Tabla 5.23 representa los resultados de la Fig 5.38

Tx=320° Rx=40°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT	13.66	0.0004	17
FLOOR	15.98	0.0008	
CEILING	28.47	0.0001	
STONE			
CONCRETE			
BLACKBOARD	47.79	0.0038	49
GLASS	39.38	0.0001	

Tabla 5.23 Blackboard (VD): Tx= (826, 4360, 1245) Rx= (826, 4060, 1245) Tx=320° Rx=40°

5. CALIBRACIÓN DE RESULTADOS

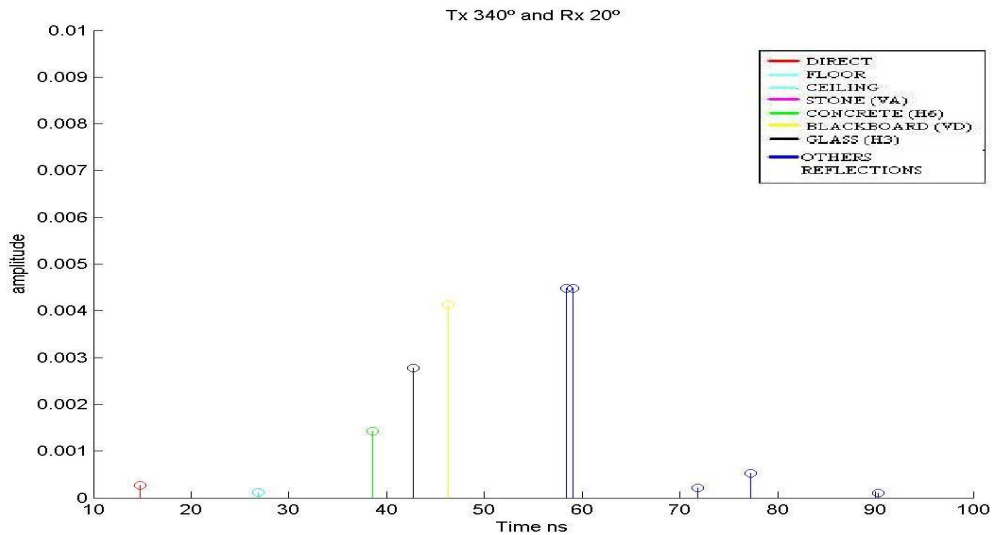


Figura 5.39 Resultado de Matrix Pencil Tx=340° Rx=20°

La Tabla 5.24 representa los resultados de la Fig 5.39

Tx=340° Rx=20°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT	14.81	0.0003	16
FLOOR			
CEILING	26.84	0.0001	
STONE			
CONCRETE	38.55	0.0014	
BLACKBOARD	46.26	0.0041	47
GLASS	42.75	0.0028	

Tabla 5.24 Blackboard (VD): Tx= (826, 4360, 1245) Rx= (826, 4060, 1245) Tx=340° Rx=20°

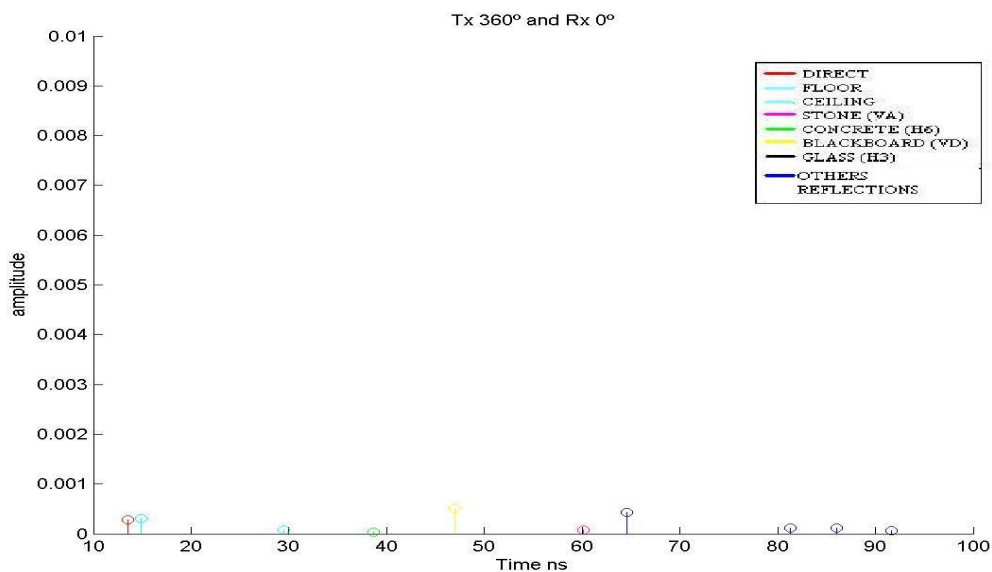


Figura 5.40 Resultados de Matrix Pencil Tx=360° Rx=0°

La Tabla 5.25 representa los resultados de la Fig 5.40

T_x=360° R_x=0°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT	13.52	0.0003	17
FLOOR	14.83	0.0003	
CEILING	29.45	0.0001	30
STONE	60.1025	0.0001	
CONCRETE	38.65	0.0001	
BLACKBOARD	46.97	0.0005	48
GLASS			

Tabla 5.25 Blackboard (VD): T_x= (826, 4360, 1245) R_x= (826, 4060, 1245) T_x=360° R_x=0°

5.1.5.4 Calibración

Al igual que en las secciones anteriores comparamos los resultados teóricos con los simulados. El primer parámetro en ser calculado es R_m,

$$R_m = (P_m/P_s) * R_s$$

La Fig 5.41 representa el significado para cada uno de los parámetros de la ecuación anterior,

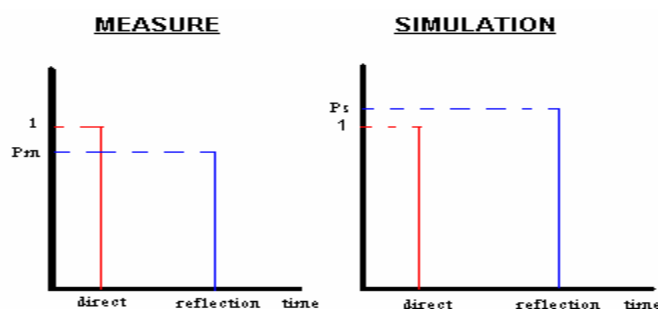


Figura 5.41 Relación entre la amplitud teórica y simulada

Una vez calculado dicho parámetro volvemos a utilizar un programa que nos proporciona el nuevo valor para la variable E_r. Mediante este valor podemos calibrar la pared con el nuevo valor obtenido. Como en los casos anteriores, es necesario el cálculo del ángulo incidente para esta nueva estimación. Como la posición de las antenas con respecto a la pared bajo estudio es la misma que en los apartados anteriores, volvemos al mismo resultado que antes siguiendo el esquema de la siguiente figura.

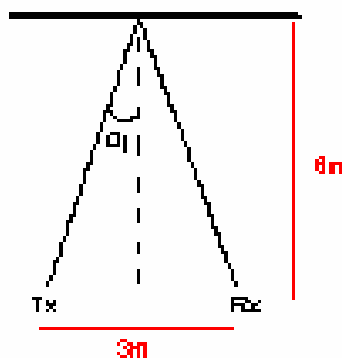


Figura 5.42 Ángulo incidente

Volvemos a obtener como hemos comentado un $\alpha_i = 14.036^\circ$. Con dicho ángulo y con las posiciones de las antenas según la Tabla 5.26 obtenemos el nuevo valor de E_r ;

ANGLE	Ps(norm)	Pm(norm)	Rs	Er
$T_x=340^\circ R_x=20^\circ$	13.57	13.66	0.41	6

Tabla 5.26 Comparación entre la amplitud de Matrix Pencil y Ray Tracing

El valor exacto para E_r es,

$$E_r(\text{new})=6.05$$

5.1.6 CALIBRACIÓN DE LA PARED STONE (VA)

En este caso las medidas fueron tomadas de la pared STONE (VA). La posición de ambas antenas es,

$$T_x = (400, 4250, 1245)$$

$$R_x = (400, 4050, 1245)$$

Los ángulos para las antenas T_x y R_x son;

MEDIDAS	ÁNGULO T_x	ÁNGULO R_x
1	220°	140°
2	230°	130°
3	250°	130°

Tabla 5.27 Ángulos para distintas medidas

5.1.6.1 Protocolo de las medidas

- Posicionamiento en el aula SN.22.2

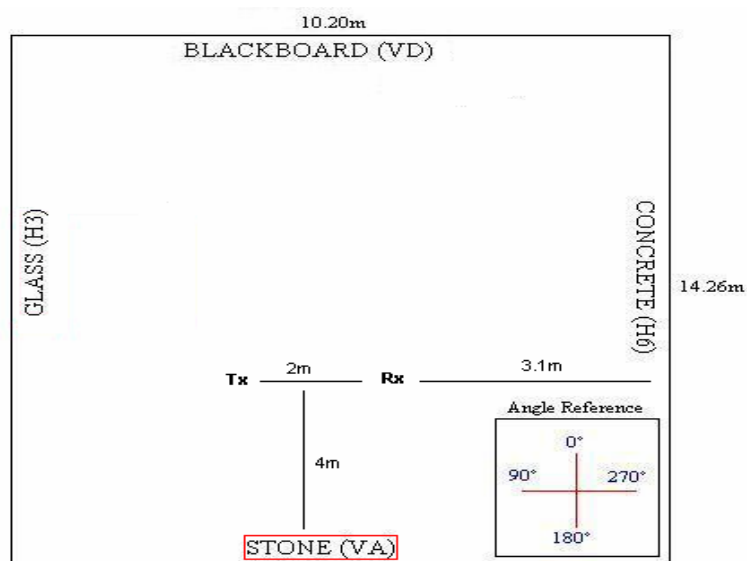


Figura 5.43 Disposición de las antenas en SN.22.2

En este caso la situación de las antenas con respecto a la pared STONE (VA) es diferente que en los casos anteriores. En este caso la distancia entre ambas antenas es de 2 metros, mientras que la distancia de éstas con respecto a la pared es de 4 metros. Por ello ahora tanto el rayo directo como el reflejado deberían alcanzar la antena receptora en un tiempo inferior a los casos anteriores.

- Posicionamiento general en el edificio

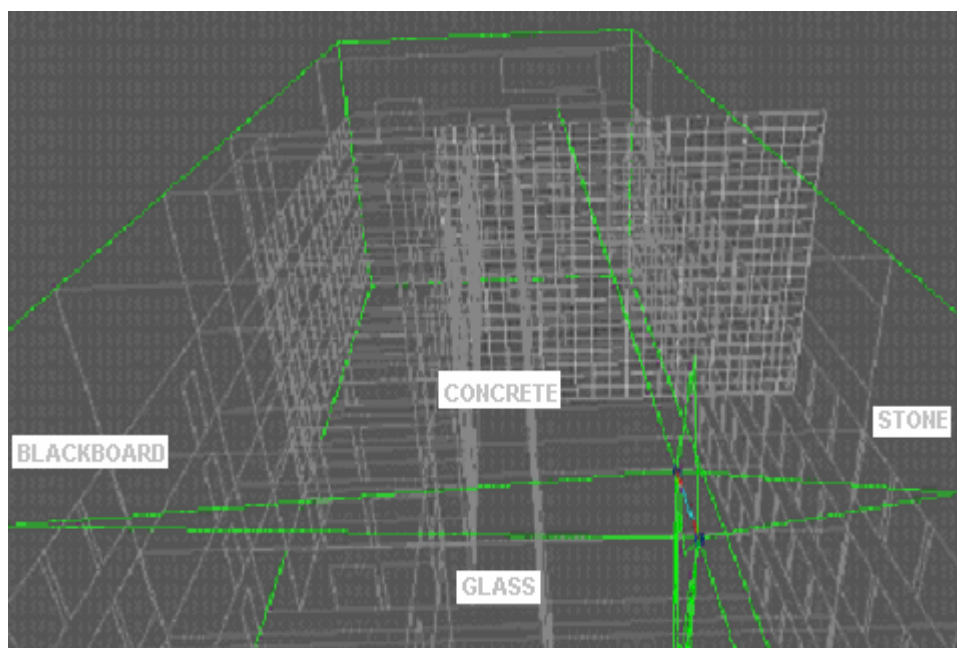


Figura 5.44 Esquema de la trayectoria directa y reflejada

La trayectoria azul como siempre representa el rayo directo entre ambas antenas, mientras que los verdes representan la reflexión en las diferentes paredes del edificio.

5.1.6.2 Resultados teóricos

Usando el programa de simulación de Ray Tracing en MATLAB obtenemos los siguientes resultados,

TRAYECTORIA	TIEMPO LLEGADA (ns)	AMPLITUD NORMALIZADA
DIRECT	6.66	1
FLOOR	10.67	0.39
CEILING	20.77	0.0054
STONE (VA)	27.49	0.1446
CONCRETE (H6)	27.33	0.0982
BLACKBOARD (VD)	68.72	0.0271
GLASS (H3)	40.67	0.08

Tabla 5.28 Stone (VA) Tx= (400, 4250, 1245) Rx= (400, 4050, 1245) Tx=220° Rx=140°

En este apartado nos vamos a centrar en la trayectoria proveniente de la pared STONA (VA). El tiempo de llegada TOA teórico en este caso es de 27.49 ns. Como podemos observar es menor que en los casos anteriores debido a que la distancia recorrida es también menor. Si la señal se desplaza a una velocidad de $3 \cdot 10^8$ m/s, podemos calcular fácilmente que la distancia recorrida es de 8.247 m

5.1.6.3 Resultados de Matrix pencil y MUSIC

- Interpretación de las diferentes trayectorias

Representaremos una vez más los resultados obtenidos con el algoritmo Matrix Pencil para distintos ángulos de las antenas Tx y Rx. Los resultados serán nuevamente comparados con los obtenidos usando MUSIC y los teóricos de Ray Tracing.

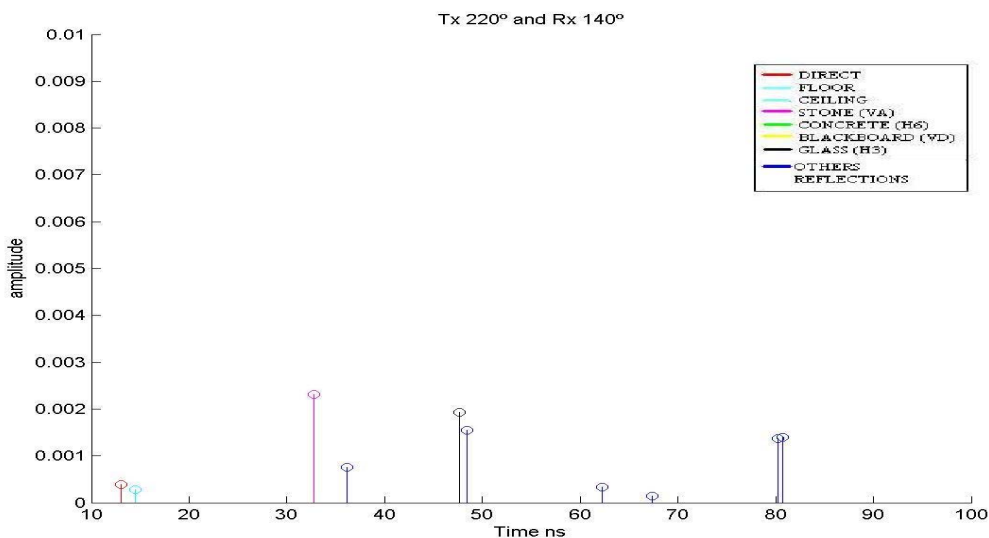


Figura 5.45 Resultados de Matrix Pencil Tx=220° Rx=140°

La Tabla 5.29 representa los resultados de la Figura 5.45

T_x=220° R_x=140°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT	13.06	0.0004	14
FLOOR	14.47	0.0003	
CEILING			
STONE	32.74	0.0023	34
CONCRETE			
BLACKBOARD			
GLASS	47.65	0.0019	

Tabla 5.29 Stone (VA) T_x= (400, 4250, 1245) R_x= (400, 4050, 1245) T_x=220° R_x=140°

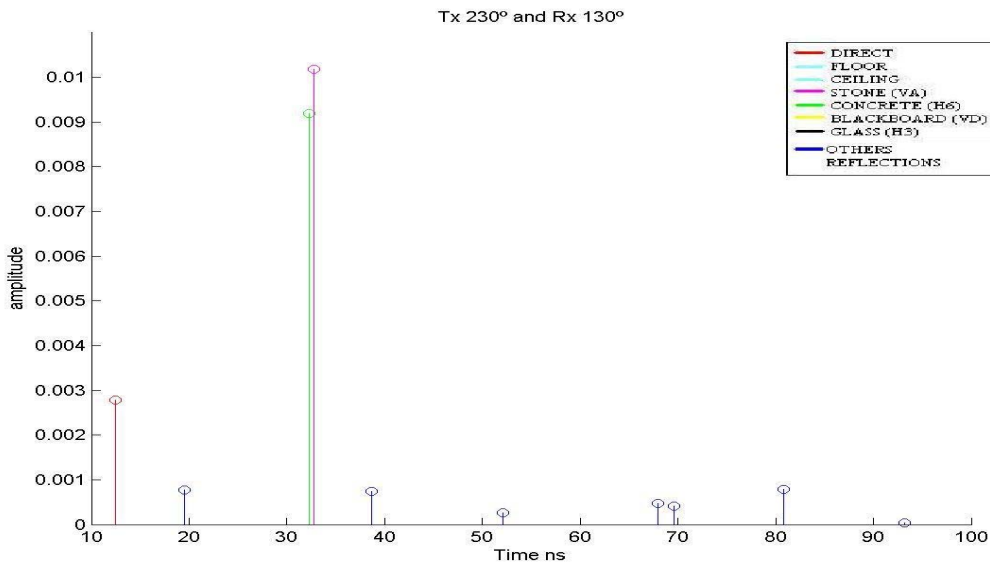


Figura 5.46 Resultados de Matrix Pencil T_x=230° R_x=130°

La Tabla 5.30 representa los resultados de la Figura 5.46

T_x=230° R_x=130°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT	12.44	0.0028	14
FLOOR			
CEILING			
STONE	32.75	0.0102	34
CONCRETE	32.248	0.0092	
BLACKBOARD			
GLASS			

Tabla 5.30 Stone (VA) T_x= (400, 4250, 1245) R_x= (400, 4050, 1245) T_x=230° R_x=130°

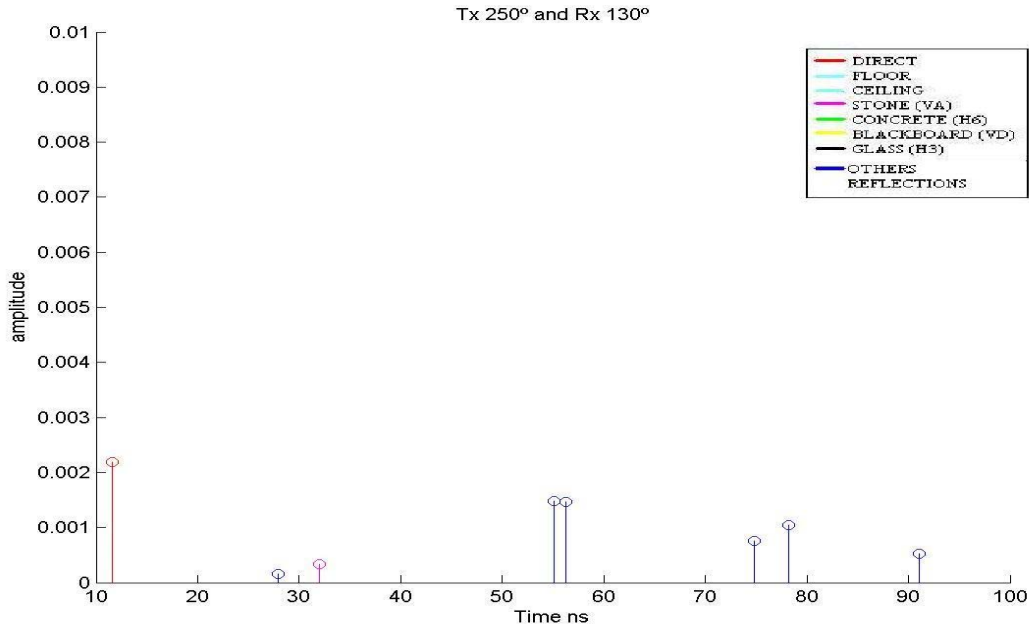


Figura 5.47 Resultados de Matrix Pencil Tx=250° Rx=130°

La Tabla 5.31 representa los resultados de la Figura 5.47

Tx=250° Rx=130°	MATRIX TIME (ns)	AMPLITUDE	MUSIC TIME (ns)
DIRECT	11.63	0.0022	13
FLOOR			
CEILING			
STONE	32.0284	0.0003	34
CONCRETE			
BLACKBOARD			
GLASS			

Tabla 5.31 Stone (VA) Tx= (400, 4250, 1245) Rx= (400, 4050, 1245) Tx=250° Rx=130°

Como podemos observar en las distintas figuras anteriores, la trayectoria en la cual estamos interesados en este apartado alcanza la antena receptora a los 32 ns. Como vimos en la teoría, dicho rayo reflejado debería alcanzarla a los 27.49 ns, por tanto aquí podemos observar nuevamente esa diferencia de 5 ns. debidos al tiempo de adquisición de datos empleado por el analizador de red.

5.1.6.4 Calibración

Como en todas las secciones anteriores compararemos los resultados teóricos con los simulados. El primer parámetro en calcularse es como siempre R_m ,

$$R_m = (P_m/P_s) * R_s$$

La Fig.5.48 representa el significado de cada uno de los parámetros de la ecuación,

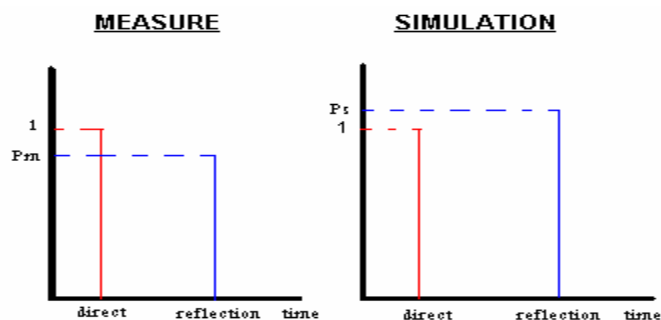


Figura 5.48 Relación entre la amplitud medida y simulada

En esta ocasión el ángulo incidente es,

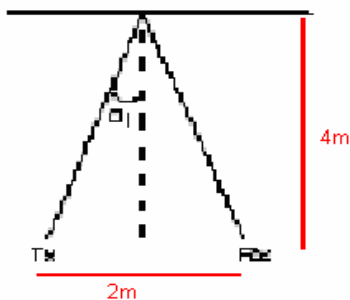


Figura 5.49 Ángulo incidente

se obtiene un $\alpha_i = 13.26^\circ$. Con dicho ángulo incidente y las antenas en la siguiente posición obtenemos el nuevo E_r

ANGLE	Ps(norm)	Pm(norm)	Rs	Er
$T_x=270^\circ R_x=90^\circ$	0.44	0.157	0.37	4.95

Tabla 5.32 Comparación entre la amplitud de Matrix Pencil y Ray Tracing

El nuevo valor para E_r es,

$$E_r(\text{new}) = 2.385$$

5.2 POTENCIA RECIBIDA

5.2.1 Introducción

Un segundo método que podríamos utilizar para la calibración de los parámetros sería a través de la potencia recibida. En concreto se intenta calibrar de nuevo el parámetro E_r . Dicho método no se ha implementado debido a la imposibilidad física de

cubrir la pared sobre la que queremos realizar las medidas con metal. De todas formas se realiza un estudio teórico siguiendo los siguientes pasos.

Para empezar obtenemos una tabla teórica con la variación de la potencia recibida, en función de la variación del parámetro E_r . Vamos a variar dicho parámetro en un rango desde 1 hasta 1000 (metal) con diferentes incrementos. Al principio, debido a la rápida variación de la potencia recibida, el incremento de E_r se realizará en pasos pequeños. Una vez hemos alcanzado un valor de E_r elevado, vemos como la variación de la potencia recibida en función de la variación del parámetro E_r es menor, por ello ahora los incrementos en E_r serán mayores. Esta tabla teórica se realizará con la potencia recibida usando la simulación de Ray Tracing. Es una tabla dependiente únicamente del valor de E_r , es decir, podrá ser tomada como referencia siempre que las antenas Tx y Rx mantenga su misma posición relativa con respecto a la pared bajo medida.

La idea principal para realizar este estudio se basa en la realización de dos medidas. La primera medida debería de ser realizada cubriendo completamente la pared sobre la cual queremos calibrar el parámetro E_r con metal. Emitiríamos una potencia con la antena Tx y mediante la ayuda del analizador de red, seríamos capaces de calcular la potencia recibida en Rx. Tras esta primera medida realizamos una segunda siguiendo los mismos pasos, pero en este caso eliminamos el metal de la pared. Es decir, recibimos la potencia reflejada directamente por la pared, sin metal.

Cuando en el caso de la tabla teórica le damos a E_r un valor aproximado de 1000, suponemos que se comporta como un metal. Por tanto se compara el valor teórico máximo de la potencia, con un valor de $E_r = 1000$, con el valor de potencia obtenido cuando hemos cubierto la pared con un metal. Si la potencia obtenida con metal es mayor que las predicciones obtenidas con la simulación Ray Tracing, tendríamos que obtener una nueva curva teórica para la calibración, sumando la diferencia de los dos máximos al resto de la curva. En caso contrario, potencia obtenida con metal menor que el máximo teórico, en vez de sumar habría que restar esta diferencia a la curva teórica anterior para obtener la nueva curva ya calibrada.

Una vez que tenemos calibrada dicha curva teórica es fácil la obtención del nuevo valor de E_r utilizando la potencia recibida por la antena Rx en la medida sin metal en la pared.

5.2.2 Resultados

La siguiente curva está realizada mediante las potencias recibidas en la antena Rx a medida que variamos el valor de E_r . La posición de las antenas es la siguiente,

- Tx=(731, 4360, 1245) con un ángulo de 70°
- Rx=(931, 4360, 1245) con un ángulo de 110°

El siguiente esquema representa la posición relativa de las antenas respecto del cristal.

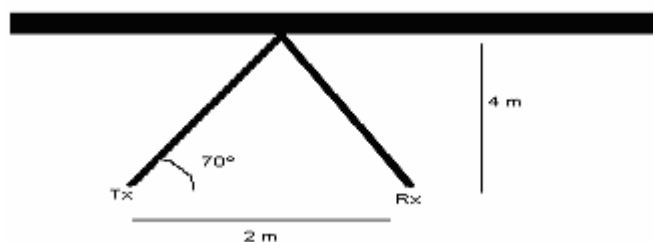


Figura 5.50 Posición del Tx y Rx

La Tabla 5.33 representa los resultados obtenidos,

Epsilon R	REFLEXIÓN	POTENCIA RECIBIDA dB
1	0.09	-88.11
2	0.17	-83.36
3	0.26	-78.69
4	0.32	-76.03
5	0.37	-74.31
6	0.41	-73.08
7	0.44	-72.15
8	0.47	-71.41
9	0.49	-70.81
10	0.51	-70.31
15	0.58	-68.63
20	0.63	-67.66
25	0.66	-67
30	0.68	-66.52
35	0.70	-66.15
40	0.72	-65.85
50	0.75	-65.40
60	0.77	-65.06
70	0.78	-64.80
80	0.79	-64.59
90	0.80	-64.42
100	0.81	-64.28
200	0.86	-63.49
300	0.89	-63.15
500	0.91	-62.80
700	0.93	-62.62
1000	0.94	-62.46

Tabla 5.33 Comparación entre Er, Reflexión y Potencia Recibida

Como puede observarse a medida que incrementamos Er también aumenta la reflexión. Con la potencia recibida ocurre algo parecido, a medida que aumentamos Er, también aumenta la potencia proveniente de la pared recibida por la antena Rx.

La figura 5.51 representa la potencia recibida en función del parámetro ϵ_r . Como podemos observar en el comienzo de dicha curva, el incremento de la potencia recibida es muy elevado hasta llegar a un valor aproximado de $\epsilon_r=50$, a partir de este punto el incremento es menor, tendiendo a un valor constante para valores de ϵ_r muy elevados. En la figura 5.52 ocurre algo parecido. En este caso se representa el coeficiente de reflexión en función de ϵ_r . Para un $\epsilon_r=1$ obtenemos una reflexión de 0.09, eso significa que solo una pequeña parte de la señal incidente es reflejada. Por otra parte para valores de ϵ_r elevados, como por ejemplo $\epsilon_r=1000$, el coeficiente de reflexión $R=0.94$, lo que quiere decir que la mayor parte de la señal incidente es reflejada, estaríamos en el caso del metal.

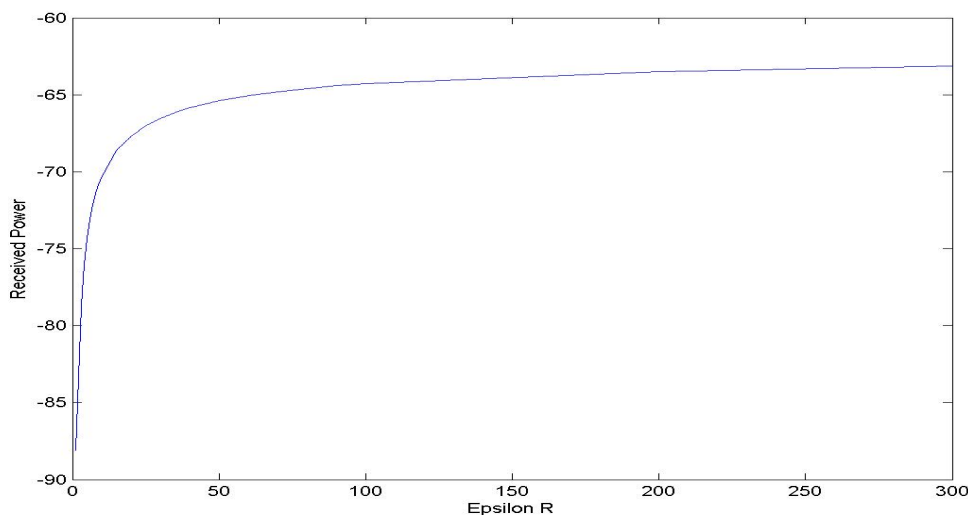


Figura 5.51 Received Power / Epsilon R

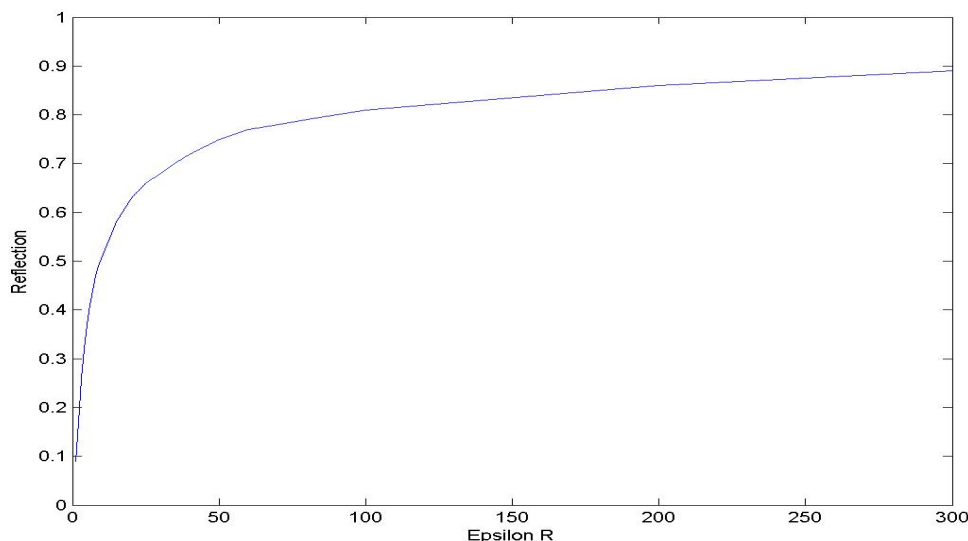


Figura 5.52 Reflection / Epsilon R

Recordamos que este apartado es solo teórico debido a la imposibilidad de cubrir con metal la pared completa, pero sería un método adecuado para la calibración de distintos parámetros.

