



Universidad
Pública de Navarra

Nafarroako
Unibertsitate Publikoa

ANÁLISIS DE PRESTACIONES DE REDES INALÁMBRICAS DE ÁREA PERSONAL ON-BODY EN UN ENTORNO INTERIOR

Autor: Carmen Rivarés Garasa

Tutor: Francisco Javier Falcone Lanas

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a Francisco Falcone toda la paciencia y la ayuda prestada, así como a Leire, a Erik y a los compañeros con los que he compartido muchas y muchas simulaciones (Somo, Uxue, Cristobal...).

También por supuesto agradecer inmensamente a mis padres el esfuerzo, la paciencia y la confianza que han depositado para que esto sea posible. Y al resto de mi familia, a mis abuelos y a mi hermana Lucía que siempre han estado dando ánimos y ayudándome, sé que les hace tanta ilusión como a mí terminar esta etapa.

Y por último, agradecer a mis amigas y amigos que hayan confiado en todo momento (Ferranda, Peral, Pat, Gin, Cuki, Jara, Navarri, Jorgito, Juantxo...), las que me están dando fuerzas desde lejos (Chois!!) y la que siempre ha estado ahí, gracias Explorir.

*“Si puedes encontrar un camino sin obstáculos,
es probable que no lleve a ninguna parte”*

(Frank A. Clark)

Índice

Índice de figuras.....	5
Índice de tablas	8
Glosario.....	9
1.- Introducción	11
2.- Objetivo del proyecto.....	12
3.- Estado del arte	13
3.1.- Propagación RF	13
3.1.1.- Pérdidas por trayectoria	13
3.1.2.- Penetración de la señal.....	15
3.1.3.- Reflexión, Dispersión y Difracción.....	17
3.1.4.- Propagación multitrayecto	18
3.1.4.1.-Desvanecimiento	20
3.2.- Modelos de propagación indoor	21
3.2.1- Modelos empíricos	21
3.2.2.- Modelos deterministas	22
3.2.2.1.- Trazado de rayos	22
3.3.- ZigBee. Redes inalámbricas de área corporal (WBAN).....	24
3.3.1.- Zig Bee.....	24
3.3.1.1.- Tipos de redes inalámbricas de corto alcance	25
3.3.1.2.- Relación entre Zig Bee y 802.15.4	26
3.3.1.3.- Frecuencias de operación y velocidades	
de transmisión.....	26
3.3.1.4.- Interoperabilidad	29
3.3.1.5.- Topologías de red.....	31
3.3.1.5.1.- Topología de estrella.....	31
3.3.1.5.2.- Topología peer to peer	31
3.3.1.6.- Fundamentos básicos de la comunicación	33
3.3.1.6.1.- CSMA-CA.....	33
3.3.1.6.2.- Beacon enabled frente a Nonbeacon	
enabled.....	34
3.3.1.6.3.- Métodos de transferencia de datos ...	35
3.3.1.6.4.- Verificación de datos.....	37
3.3.1.6.5.- Direccionamiento	38
3.3.1.6.6.- Asociación, disociación	38
3.3.1.6.7.- Capas de estándar Zig Bee	
y 802.15.4.....	39

3.3.1.6.7.1.- Capa física.....	39
3.3.1.6.7.2.- Capa MAC	40
3.3.1.6.7.3.- Capa de red.....	42
3.3.1.6.7.4.- Capa de aplicación	42
3.3.1.6.7.5.- Seguridad	43
3.3.1.7.- Zig Bee frente a otras tecnologías.....	44
3.3.1.7.1.- Alternativas a Zig Bee	45
3.4.- Redes de Área Corporal.....	46
3.4.1. - WBAN (Wireless Body Area Network)	46
3.4.1.1.- Aplicaciones	48
3.4.2.1.1.- Aplicaciones médicas.....	48
3.4.2.1.2.- Aplicaciones deportivas	49
3.4.2.1.3.- Aplicaciones militares.....	49
4.- Análisis de simulación y medidas	50
4.1.- Instrumentación	50
4.1.1.- Analizador de espectros.....	51
4.1.2.- Antena giratoria Picea.....	52
4.1.3.- Dispositivos xBee pro.....	53
4.2.- Realización de medidas.....	53
4.3.- Simulaciones. Software de trazado de rayos.....	62
4.3.1.- Modelo de cuerpo humano	63
4.4.- Resultados de simulaciones y comparativas con medidas.....	64
4.4.1.- Caso 1: Antena Rx situada en cuerpo humano.....	65
4.4.2.- Caso 2: Antena Tx situada en cuerpo humano	70
5.- Conclusiones	75
6.- Líneas futuras.....	76
7.- Bibliografía	77
ANEXO I.- Ficha técnica del analizador de espectros	
<i>Agilent FieldFox N9912A.....</i>	78
ANEXO II.- Ficha técnica de la antena “Picea 2.4GHz Swivel”	85
ANEXO III.- Ficha técnica de los dispositivos Xbee-pro.....	92
ANEXO IV.- Software de trazado de rayos.	95
ANEXO V.- Función <i>fabricapersona</i>.....	99
ANEXO VI.- Casuística realizada.....	102
ANEXO VII.- APS URSI 2013 (Florida)	164

Índice de figuras

Figura 3.1. Efecto del entorno sobre la potencia [5]	14
Figura 3.2. Medida de la penetración de la señal en una pared de yeso [5].....	15
Figura 3.3. Potencia de señal recibida para distintos ángulos de transmisión [5].....	16
Figura 3.4. La señal transmitida puede alcanzar el receptor por (1) penetración, (2) difracción, (3) reflexión o (4) dispersión [5]	17
Figura 3.5. Escenario multitrayecto más simple [5]	18
Figura 3.6. (a) Interferencia constructiva. (b) Interferencia destructiva.....	19
Figura 3.7. Desvanecimiento	20
Figura 3.8. Trazado de rayos.....	22
Figura 3.9. Ray Launching.....	23
Figura 3.10. Tipos de redes inalámbricas de corto alcance [5].....	25
Figura 3.11. Protocolo de capas de redes inalámbricas Zig Bee [5].....	26
Figura 3.12. DSSS y PSSS ayudan a mejorar la SNR [5]	28
Figura 3.13. DSSS y PSSS ayudan a reducir el efecto de interferencias [5].....	29
Figura 3.14. Roles del dispositivo en el estándar 802.15.4 [5]	30
Figura 3.15. Roles del dispositivo en el estándar Zig Bee [5].....	30
Figura 3.16. Topología de estrella [5]	31
Figura 3.17. Topología de malla [5]	32
Figura 3.18. Topología de árbol [5].....	32
Figura 3.19. Transferencia de datos a un coordinador. (a) Beacon-enabled. (b) Nonbeacon-enabled [5]	36
Figura 3.20. Transferencia de datos desde un coordinador. (a) Beacon-enabled. (b) Nonbeacon-enabled [5]	37
Figura 3.21. Estructura de un paquete Zig Bee [5].....	39

Figura 3.22. Estructura de la trama piloto de la capa MAC [5]	40
Figura 3.23. Estructura de la trama de datos de la capa MAC [5]	41
Figura 3.24. Trama de ACK en capa MAC [5]	41
Figura 3.25. Estructura de la trama de comando MAC [5].....	42
Figura 3.26. Comparación de diferentes tecnologías inalámbricas [5]	44
Figura 3.27. Potencia consumida frente a velocidad de transmisión	46
Figura 3.28. Red inalámbrica de área corporal.....	47
Figura 3.29. WBAN aplicada a la telemedicina.....	48
Figura 3.30. Analizador de espectros [Anexo I]	51
Figura 3.31. Antena Picea [Anexo II]	52
Figura 3.32. Patrones de radiación de Antena Picea [Anexo II]	52
Figura 3.33. Dispositivo XBee-pro [Anexo III]	53
Figura 3.34. Planta baja del edificio Jerónimo de Ayanz	54
Figura 3.35. Orientaciones de la persona.....	55
Figura 3.36. Antena 1 (xBee).....	55
Figura 3.37. Antena 2(xBee).....	55
Figura 3.38. Interfaz del software de medida.....	56
Figura 3.39. Elección del número de paquetes	56
Figura 3.40. Relación PER-RSSI en CASO 1.....	57
Figura 3.41. Relación PER – RSSI en CASO 2.....	59
Figura 3.42. Medidas de potencia recibida con analizador de espectros	60
Figura 3.43. Antena Rx situada en el tobillo	60
Figura 3.44. Antena Tx	60
Figura 3.45. Modelo de cuerpo humano [Anexo V]	64
Figura 3.46. Antena Rx situada en cuerpo humano	65
Figura 3.47. Individuo de frente a la antena Tx	65

Figura 3.48. Distribución de potencia recibida (en dBm) a 0.16 m de altura.	66
Figura 3.49. Distribución de potencia recibida (en dBm) a 0.84 m de altura	66
Figura 3.50. Distribución de potencia recibida (en dBm) a 1.27 m de altura	67
Figura 3.51. Camino desde la antena Tx hasta los distintos puntos Rx	68
Figura 3.52. Potencia Tx-Rx (en dBm)	68
Figura 3.53. Persona (puntos Rx) de frente a antena Tx.....	69
Figura 3.54. Disposición Tx-Rx.....	70
Figura 3.55. Antena Tx situada en el pecho del individuo	71
Figura 3.56. Distribución de potencia recibida (en dBm) a 1.27 m de altura.	71
Figura 3.57. Radial que atraviesa el eje x de la planta	72
Figura 3.58. Potencia Recibida (dBm) en cada punto del radial eje x.	72
Figura 3.59. Escenario Tx-Rx	73

Índice de tablas

Tabla 3.1.- Velocidad de transmisión y frecuencias de operación en IEEE 802.15.4.	27
Tabla 3.2. Comparativa Zig Bee, Bluetooth, Wifi	45
Tabla 3.3. Resultados MEDIDAS 1 - CASO 1.....	57
Tabla 3.4. Resultados MEDIDAS 1 - CASO 2.....	58
Tabla 3.5. Resultados MEDIDAS 2 - CASO 1.....	61
Tabla 3.6. Resultados MEDIDAS 2 - CASO 2.....	61
Tabla 3.7. Resultados de <i>MEDIDAS 2 - CASO 1</i> comparados con los obtenidos en simulación con el software de trazado de rayos	70
Tabla 3.8. Resultados de <i>MEDIDAS 2 - CASO 2</i> comparados con los obtenidos en simulación con el software de trazado de rayos	74

Glosario

RF. Radio frecuencia (Radio Frequency)

ACK. Reconocimiento (Acknowledgement)

ASK. Modulación por desplazamiento de amplitud (Amplitude Shift Keying)

BPSK. Transmisión por desplazamiento binario de fase (Binary Phase Shift Keying)

OQPSK. Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (Offset Quadrature Phase Shift Keying)

PAN. Red de area personal (Personal Area Network)

WBAN. Red inalámbrica de área corporal (Wireless Body Area Network)

CRC. Código de redundancia cíclico (Cyclic Redundancy Check)

FCS. Secuencia de verificación de trama (Frame Check Sequence)

SHR. Cabecera de sincronización (Synchronization Header)

PHR. Encabezado de la capa física (Physic Header)

AES. Estándar de cifrado avanzado (Advanced Encryption Standard)

CSMA-CA. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

DSSS. Direct Sequence Spread Spectrum

PSSS. Parallel Sequence Spread Spectrum

FFD. Full-Function Device

RFD. Dispositivo de funcionalidad reducida (Reduced-Function Device)

KHz. Kilohercios

GHz. Gigahertzios

GTS. Intervalo de tiempo garantizado (Guarantee Time Slots)

POS. Espacio operativo personal (Personal Operative Space)

PHY. Capa física (Physical layer)

MAC. Capa de control de acceso al medio (Medium Access Control layer)

APL. Capa de aplicación (Application layer).

MFR. MAC Footer (secuencia de control)

MHR. Cabecera (MAC Header)

MHz. Mega Hertz

MIC. Código de integridad (Message Integrity Code)

TX. Transmisor

RX. Receptor

RSSI. Indicador de fuerza de señal de recepción (Received Signal Strength Indication)

PER. Tasa de paquetes erróneos (Packet Error Ratio)

SNR. Relación señal-ruido (Signal Noise Ratio)

1. Introducción

Tradicionalmente se han utilizado cables para interconectar aparatos personales. Por lo que fue indispensable el desarrollo de soluciones para la interconexión de aparatos de forma inalámbrica. Es así como gracias a las nuevas tecnologías emergentes, nació la necesidad de crear una forma eficiente, rápida y confiable de hacer transiciones de información de forma inalámbrica. Dichas soluciones se basan en el concepto de WPAN (Wireless Personal Area Network).

Estas redes de comunicación adquieren una gran importancia desde que se presentan como una solución al problema de la accesibilidad a los servicios por parte de personas con algún tipo de discapacidad o personas mayores, o directamente cuando estas redes se convierten en herramientas para la monitorización y el cuidado de la salud de las personas. A día de hoy se está apostando fuertemente para encontrar las mejores soluciones para el establecimiento de estas redes.

Numerosas tecnologías para dar soporte a la red han sido y están siendo desarrolladas, entre las cuales podemos destacar Bluetooth y Zig Bee. La red todavía necesita de soluciones en cuanto a protocolos de interconectividad de dispositivos y manejo de servicios, no obstante, numerosos proyectos se encuentran dedicados a la tarea del desarrollo de la red que finalmente hará al hombre formar parte de la red de información.

2.-Objetivo del proyecto

El objetivo de este proyecto es analizar las prestaciones de una red que se forma en un entorno cerrado. Una persona formará parte de dicha red, la cual portará la antena transmisora o receptora, dependiendo del caso a estudio. Dicha red inalámbrica de área corporal (WBAN) está formada por sensores que operan con tecnología Zig Bee. Por tanto, realizaremos un análisis observando cómo afecta la presencia de una persona como parte de la red a la hora de estudiar la potencia recibida.

Dentro del estudio de esta red de sensores, analizaremos además de la potencia recibida, el PER (Packet Error Ratio) y así se logrará tener una idea más acertada de la calidad del enlace transmisor – receptor de la red, llegando a saber cuántos paquetes se han transmitido y cuántos han llegado satisfactoriamente a la recepción.

Se supondrán varios escenarios mediante simulaciones basadas en el método de trazado de rayos y también mediante medidas realizadas in situ recreando dichos escenarios. Se realizará una comparativa entre ambas y se extraerán ciertas conclusiones sobre la fiabilidad del método de trazado de rayos.

Todo esto con una finalidad clara, la de extraer el máximo de información posible sobre la amplia casuística realizada, para entender y mejorar la tecnología a la hora de utilizarla en sus aplicaciones reales (monitorización, asistencia sanitaria...).

3.-Estado del arte

3.1.-Propagación RF

En las comunicaciones inalámbricas es necesario prestar mucha atención al canal de transmisión, puesto que es el aire y que carece de límites físicos, por tanto, eso puede afectar de forma negativa a la correcta comunicación debido a factores como el ruido y las interferencias de la correspondiente banda de frecuencias (2,4GHz) y por tanto dificultar la recepción del mensaje.

Entender las características de propagación de un entorno es esencial para implementar y solucionar problemas de una red inalámbrica. Los factores que influyen de una forma u otra a la propagación, serán los que determinen la calidad en la recepción, ya que pueden alterar la propagación influyendo en la potencia recibida y por tanto en la relación señal a ruido.

El objetivo de este tipo de comunicación es lograr controlar dichos factores que conformarán las pérdidas de transmisión, logrando una potencia de señal recibida que sea superior a la sensibilidad del receptor.

Por tanto para realizar una comunicación satisfactoria en una red que trabaja con tecnología Zig Bee, se deberán tener en cuenta los factores que puedan interferir en la propagación, que serán los siguientes:

3.1.1.- Pérdidas por trayectoria

En espacios interiores la señal será absorbida en diferentes materiales y puede ser reflejada por objetos y versiones de retraso de la señal que se pueden añadir a la original. Todas estas incidencias pueden modificar la potencia de la señal, que se calculará de la siguiente manera:

$$P_d = P_0 - 10 \times n \times \log_{10}(f) - 10 \times n \times \log_{10}(d) + 30 \times n - 32.44$$

Donde:

- P_d es la potencia de la señal (en dBm) a distancia d .
- P_o es la potencia de la señal (en dBm) a una distancia cero de la antena.
- f es la frecuencia de la señal en MHz.
- d es la distancia (en metros) desde la antena.
- n es el exponente de pérdida por trayectoria. Se determina experimentalmente.

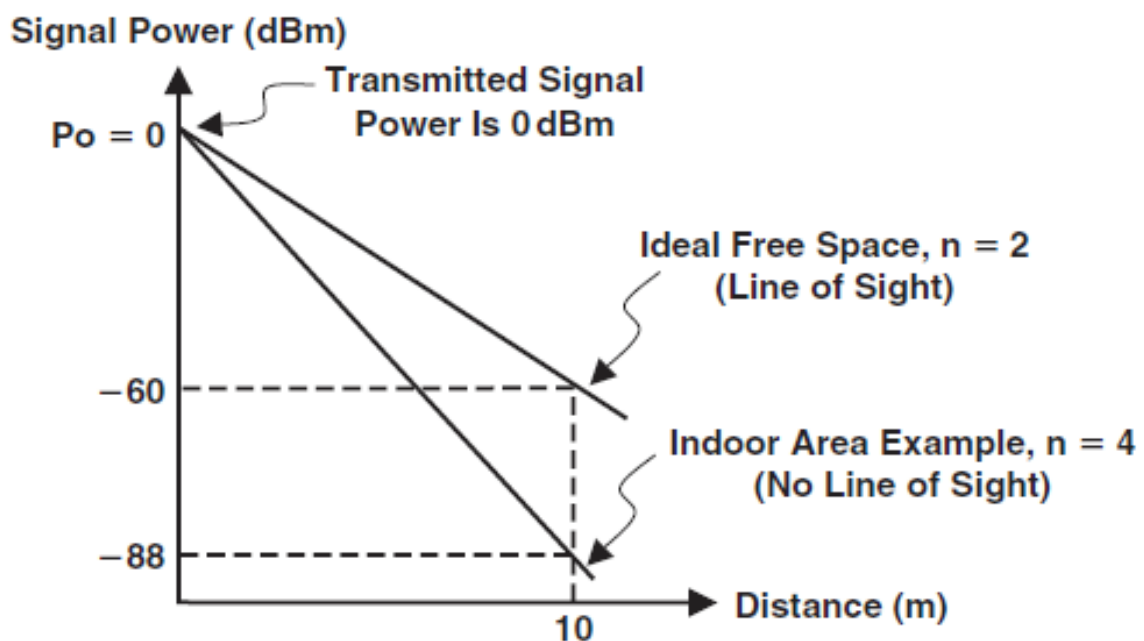


Figura 3.1. Efecto del entorno sobre la potencia.

Además de diferenciar la propagación dentro de un espacio cerrado que es el caso de este proyecto, se puede extraer de aquí la importancia de la distancia en la transmisión, ya que conforme ésta crece, disminuye el valor de la potencia recibida.

3.1.2.- Penetración de la señal

Cuando una señal penetra en un objeto, las características de absorción del material del objeto y su temperatura tanto como la frecuencia de la señal, determinarán cuánto se atenúa ésta. Cada material está asociado con una atenuación constante, a (dB/m).

Por ejemplo, la constante de atenuación del agua a temperatura ambiente para una señal de 2.4 GHz es aproximadamente 330 dB/m. El cuerpo humano está compuesto por un 70% de agua, lo que significa que atenuará la señal significativamente. Este dato es muy relevante debido a que en este proyecto se cuenta con una persona que formará parte de la red y que su presencia, como aquí se comenta, influirá de forma importante a la atenuación de la potencia de la señal.

El efecto de la frecuencia de la señal en la penetración, depende del tipo de material. Considerando los materiales que se encuentran en espacios cerrados como el que utilizamos en este proyecto, cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la atenuación de la señal. O lo que es lo mismo, señales de baja frecuencia penetran los materiales con mayor facilidad que las señales de alta frecuencia.

Se considera la siguiente figura:

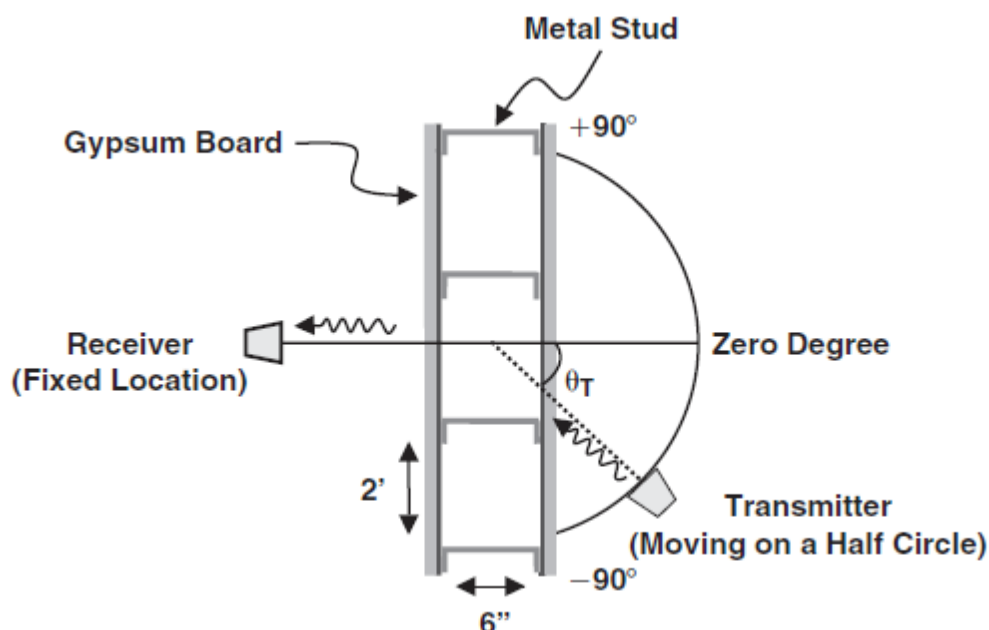


Figura 3.2. Medida de la penetración de la señal en una pared de yeso.

Se trata de una pared de yeso utilizada habitualmente en construcción como pared interior. La penetración de una señal en un objeto depende del ángulo con el que la señal llega a la superficie del objeto.

La señal incide con un ángulo θt . El ángulo entre la señal transmitida y la pared cambia por el movimiento semicircular del transmisor y la potencia recibida de la señal se mide en el otro lado de la pared.

A partir de aquí, se puede generar una gráfica que muestre la potencia de señal recibida en diferentes posiciones del transmisor, por tanto en distintos ángulos de incidencia. En la figura 3.3 se muestra que el máximo de señal recibida ocurre cuando la señal incide en la pared con un ángulo de 0° y la cantidad de señal se aproxima a 0 cuando el ángulo de la señal que se transmite se aproxima a $\pm 90^\circ$.

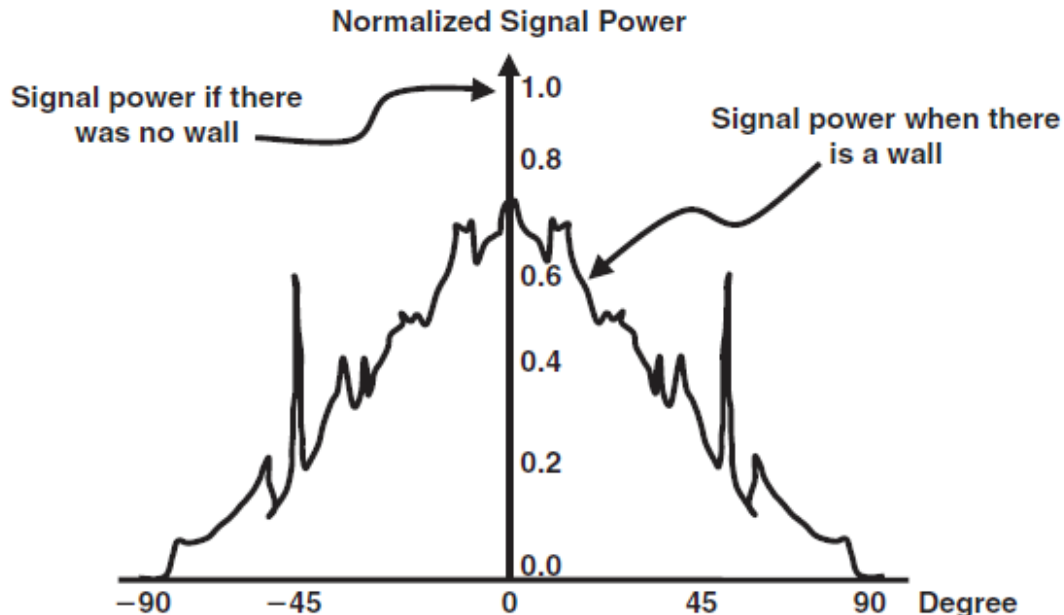


Figura 3.3. Potencia de señal recibida para distintos ángulos de transmisión.

3.1.3.- Reflexión, Dispersión y Difracción

En el siguiente ejemplo (figura 3.4), hay al menos cuatro formas diferentes en las que la señal transmitida llega al receptor.

- 1) Penetración de la señal a través de la casa.
- 2) Difracción. Ésta se produce cuando la ruta de acceso de una onda electromagnética está bloqueada por un obstáculo con bordes relativamente afilados. El borde afilado en este ejemplo es la esquina de la casa. Este borde hará que la señal se doble hacia el objeto y como resultado, la señal puede llegar al receptor, aunque no hay una línea de visión entre el receptor y el transmisor.
- 3) Reflexión desde una pared del bloque y alcanza el receptor.
- 4) Dispersión incidente. Se produce cuando una onda electromagnética es incidente a una superficie rugosa. La rugosidad de la superficie depende de la longitud de onda de la señal. En general, si la variación en una superficie es más de $\lambda/8$ dispersa la señal en muchas direcciones.

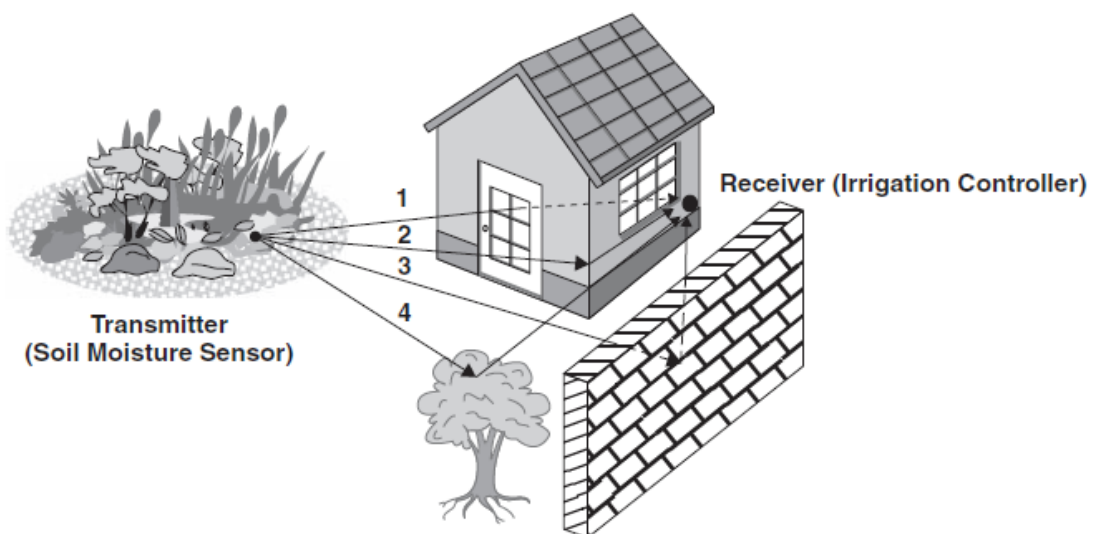


Figura 3.4. La señal transmitida puede alcanzar el receptor por (1) Penetración, (2) Difracción, (3) Reflexión o (4) Dispersión.

3.1.4.- Propagación multitrayecto

Como hemos comentado en el apartado anterior, la señal transmitida puede llegar al receptor por caminos diferentes debido a las reflexiones, difracciones y dispersiones.

El siguiente ejemplo muestra de una forma simplificada el caso que se estudia en el proyecto, un transmisor y receptor estáticos y el medio presente que es el aire. Por cada uno de estos caminos la señal llegará en un momento determinado, con una potencia y una fase determinadas que se sumarán en el receptor formando la señal recibida.

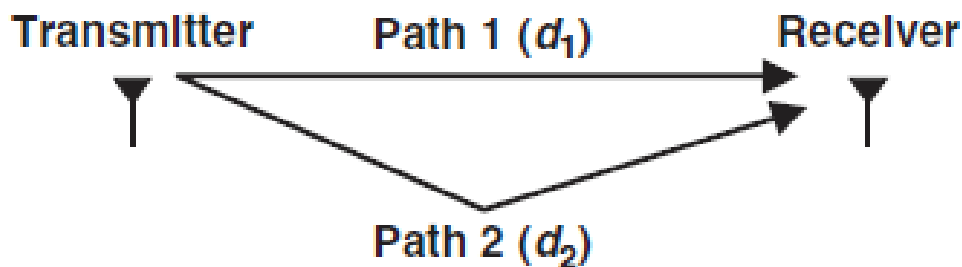


Figura 3.5. Escenario multitrayecto más simple.

El retardo de propagación (d/C) es el tiempo que tarda la señal en llegar al receptor. Dado que las distancias d_1 y d_2 (en metros) no son iguales, las señales recibidas de los trayectos 1 y 2 tendrán diferentes retardos, por tanto sus fases serán diferentes también.

La diferencia de fase (en radianes) entre las señales recibidas, puede ser calculada por:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi f}{C}(d_1 - d_2) = \frac{2\pi f}{C}\Delta d$$

C es la velocidad de la luz (340m/s)

Como se ha comentado, un nodo recibe la suma de varias versiones de la señal transmitida (reflexión, difracción, dispersión), estas señales tienen diferentes retardos y cambios de fase, por tanto, la suma será una señal distorsionada. Esto se conoce como la distorsión por multitrayecto. La adición de diferentes versiones de la señal puede aumentar la intensidad de la señal, pero la calidad de ésta puede llegar a ser pobre. Y una señal de baja calidad puede dar lugar a una mala comunicación.

El cambio de fase adicional debido al multitrayecto puede ser cualquier fase aleatoria entre -180° y 180° , pero si el receptor y el transmisor no están en movimiento y el medio ambiente es estacionario (como es el caso), esta fase aleatoria adicional es un valor constante. Debido a lo anterior se producirán dos tipos de interferencia: constructiva o destructiva. La primera se produce cuando la suma vectorial de las señales, produce un aumento en la amplitud de la señal recibida. Y la segunda se produce cuando la suma vectorial de las señales, produce una disminución de la señal recibida.

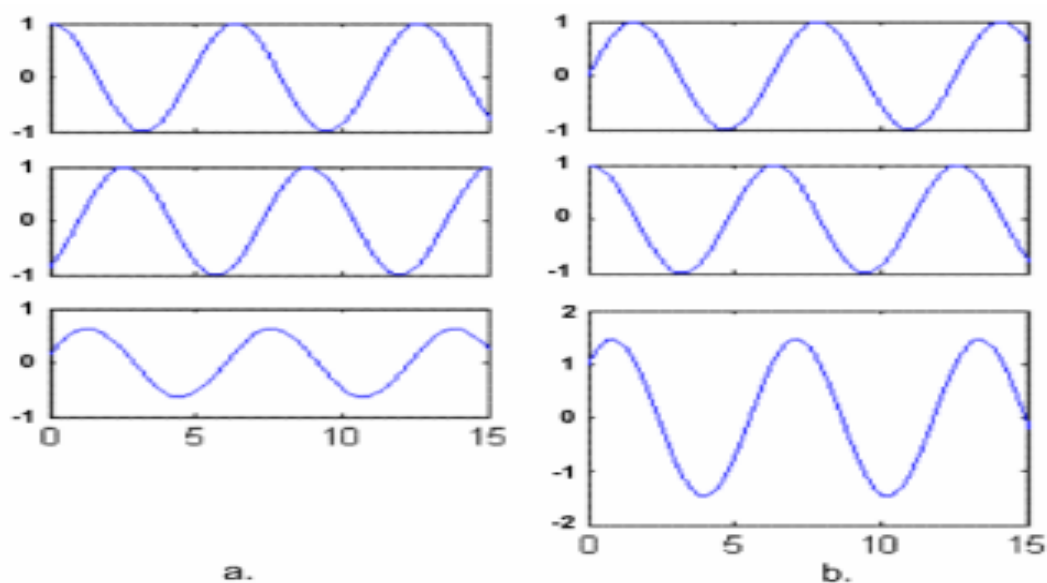


Figura 3.6. (a) Interferencia constructiva. (b) Interferencia destructiva.

3.1.4.1.-Desvanecimiento

El término desvanecimiento se refiere a que la señal transmitida es atenuada debido a la pérdida en el espacio, los obstáculos y la resistencia que debe traspasar durante toda su trayectoria y hasta llegar a su destino. También se puede definir como una variación temporal de la amplitud, fase y polarización de la señal recibida con relación a la señal nominal, debido al trayecto de propagación: multitrayecto, reflexión, difracción y dispersión. Refleja la baja o mala potencia recibida en el terminal receptor.

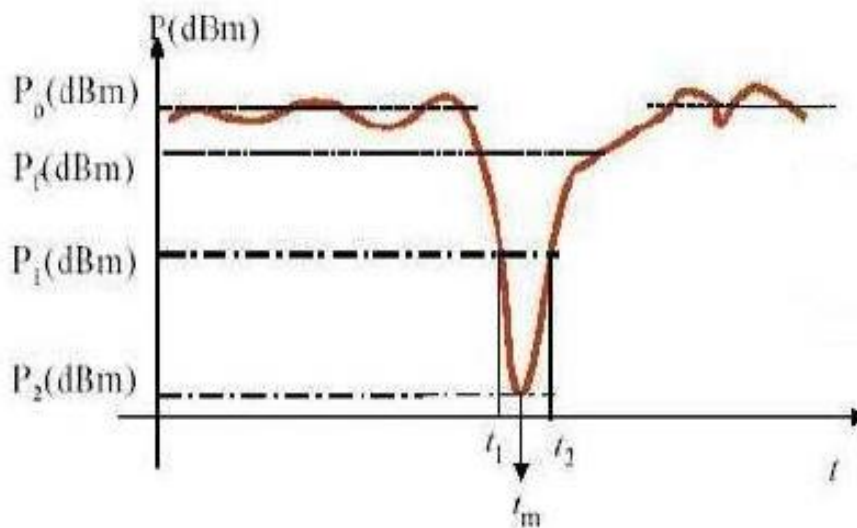


Figura 3.7. Desvanecimiento.

P_0 es el valor nominal de la señal (en dBm).

P_2 es el valor mínimo de la señal desvanecida (en dBm).

t_m es el tiempo de desvanecimiento (en s).

El desvanecimiento multitrayecto es la forma más común de desvanecimiento. Es relativamente rápido y selectivo en frecuencia, causado por la interferencia entre uno o más rayos en la atmósfera.

3.2.-Modelos de propagación indoor

Día a día, cobra vital importancia la comprensión y el desarrollo de modelos de propagación a nivel indoor (en interiores), debido a la masiva incursión de tecnología y sistemas de comunicación que operan en éste ambiente, tales como: WLAN, Bluetooth, Wi-Fi, ISM...

Estos modelos son la base de herramientas, como softwares de simulación que permiten planificar la configuración de un sistema de comunicación inalámbrico, que ofrezca un óptimo desempeño en un ambiente determinado. De este modo, se evita la tediosa tarea de “prueba y error” para determinar la mejor ubicación de las radio bases en un sistema inalámbrico.

Los modelos de propagación permiten predecir el comportamiento de las señales electromagnéticas en un ambiente determinado, lo cual es indispensable en procesos de planificación de redes inalámbricas y en general cualquier tipo de sistema de comunicación inalámbrico. Se diferencian dos tipos de modelos.

3.2.1.- Modelos empíricos

Se basan en la extrapolación estadística de resultados a partir de medidas realizadas sobre el terreno. Las influencias propias del entorno son tenidas en cuenta de manera implícita en su conjunto, sin ser reconocidas cada una de ellas de manera aislada. Su precisión depende no sólo de la precisión de las medidas, sino de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas a cabo las medidas y el entorno a analizar. La eficiencia de este modelo es satisfactoria computacionalmente.

3.2.2.- Modelos deterministas

Se basan en principios fundamentales de la física en cuanto a propagación de ondas de radio y los fenómenos que la rodean. Pueden ser aplicados en diferentes entornos sin afectar a su precisión. Los algoritmos usados por estos modelos son generalmente muy complejos y computacionalmente poco eficientes. Por esta razón su implementación se restringe a pequeñas áreas. Si su implementación es correcta, proporcionan gran precisión en su predicción comparados con los modelos empíricos. Actualmente son los más utilizados debido a que ofrecen mejores resultados que los estadísticos en cuanto a precisión. Se trabaja íntimamente con todas las variables que rodean el entorno y se emplean principios físicos y matemáticos.

3.2.2.1.- Trazado de rayos

Estos modelos son deterministas, es decir, simulan el comportamiento físico de las ondas electromagnéticas, las cuales pueden tratarse igual que rayos ópticos como se muestra en la figura. Los modelos Ray Optical se fundamentan en la teoría de geometría óptica y en la teoría uniforme de difracción. Al simular con mayor fidelidad los fenómenos de las ondas electromagnéticas, se obtiene mayor exactitud que con los modelos anteriormente mencionados, sin embargo, esto conlleva un alto costo computacional.

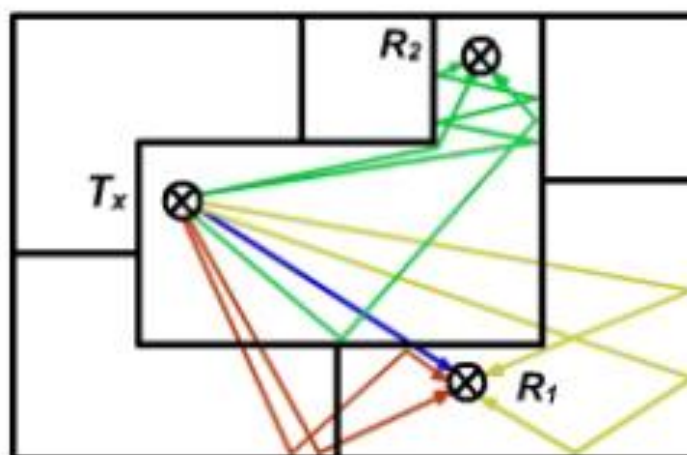


Figura 3.8. Trazado de rayos.

El algoritmo de trazado de rayos calcula los posibles caminos desde el transmisor al receptor incluyendo mecanismos de difracción, dispersión difusa y penetración a través de diversos materiales. Permite calcular parámetros como potencia recibida y pérdidas de trayecto.

Existe una variación de este modelo que también se utiliza en este proyecto.

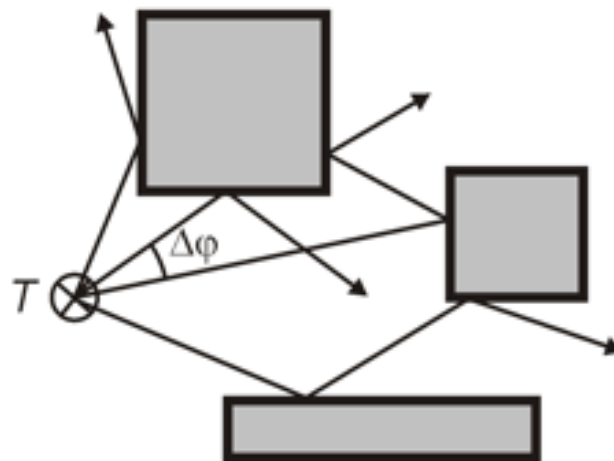


Figura 3.9. Ray Launching.

Es el **Ray Launching**, que consiste en la distribución espacial uniforme, a partir de un transmisor, de un número finito de rayos, con los que se pretende modelar la propagación de los frentes de ondas, así como su interacción con el entorno (ANEXO IV).

3.3.- Zig Bee. Redes inalámbricas de área corporal (WBAN)

3.3.1.- Zig Bee

Es un estándar que define un conjunto de protocolos de comunicación de baja velocidad de transmisión en redes de corto alcance inalámbrico.

Está basado en dispositivos que operan a distintas bandas de frecuencia. Está dirigido principalmente a aplicaciones alimentadas por baterías donde la baja velocidad de transmisión, bajo coste y larga vida de la batería son los principales requerimientos.

En muchas aplicaciones de Zig Bee, el tiempo total que se dedica el dispositivo móvil en cualquier tipo de actividad es muy limitado; el dispositivo pasa la mayor parte del tiempo en modo ahorro energía, con esto se consigue un alargamiento de la vida de las baterías.

El estándar ha adoptado IEEE 802.15.4 como su capa física y sus protocolos de control de acceso al medio, por lo tanto un dispositivo compatible con Zig Bee también es compatible con IEEE 802.15.4.

Reduce el coste de implementación simplificando los protocolos de comunicación y reduciendo la velocidad de datos. Los requisitos mínimos para cumplir con las especificaciones de Zig Bee y IEEE 802.15.4 no son tan exigentes como los de otros estándares, lo que reduce la complejidad y el costo de la aplicación compatible con transceptores Zig Bee.

3.3.1.1.- Tipos de redes inalámbricas de corto alcance

Se dividen en dos categorías principales: WLANs (Wireless Local Area Network) y WPANs (Wireless Personal Area Network).

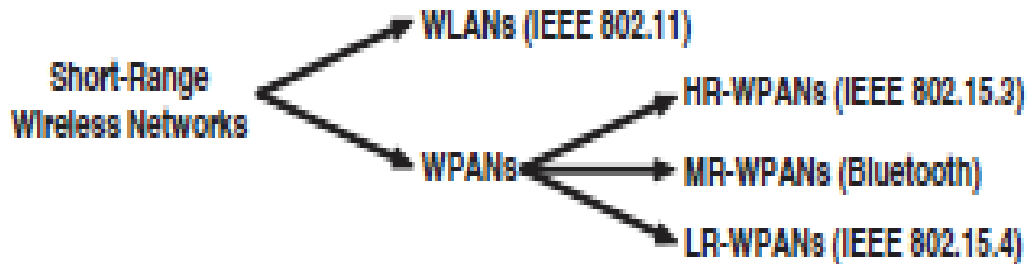


Figura 3.10. Tipos de redes inalámbricas de corto alcance.

WLAN es un reemplazo o extensión de redes cableadas de área local (LANs). El objetivo de una WLAN es maximizar la tasa de alcance y datos.

WPAN en contraste, no se han desarrollado para reemplazar cualquier LAN cableada existente, sino que se creó para proporcionar los medios para la comunicación inalámbrica eficiente dentro del espacio operativo personal, sin la necesidad de cualquier infraestructura. Se divide en tres clases: alta velocidad (HR), WPAN de velocidad media (MR) Y WPAN de baja velocidad (LR).

La red inalámbrica que se utiliza en este proyecto en particular es la LW-WPAN donde se incluye el estándar Zig Bee, con una velocidad de transmisión máxima de 250 Kbps.

3.3.1.2.- Relación entre Zig Bee y 802.15.4

Una de las formas más comunes para establecer un área de comunicación es mediante capas. Como se observa en la figura 3.11 las redes de Zig Bee inalámbricas se establecen mediante un protocolo con las capas inferiores determinadas por el estándar IEEE 802.15.4 y las capas superiores definidas por el estándar Zig Bee.

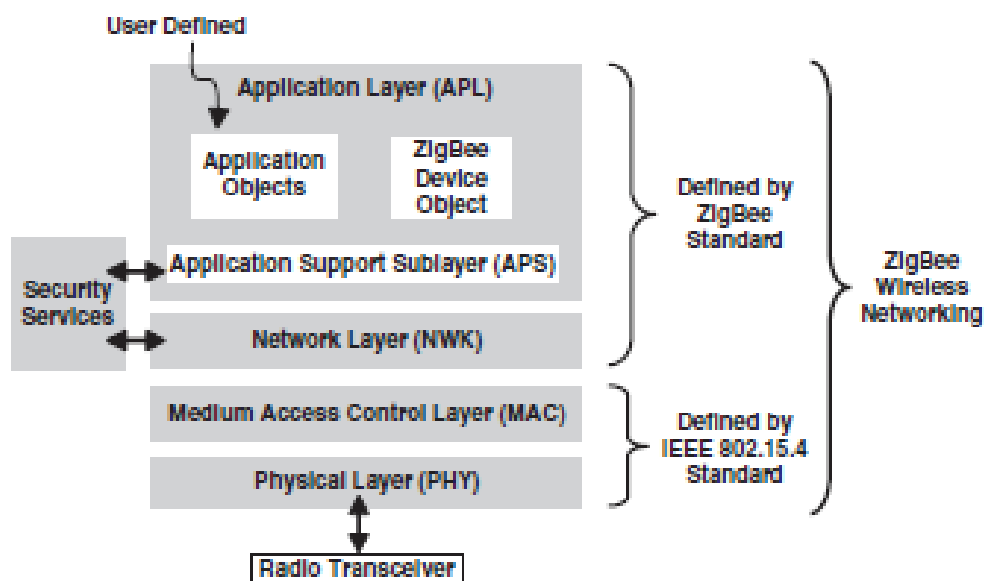


Figura 3.11. Protocolo de capas para redes inalámbricas Zig Bee.

Las características de nivel físico de la red se determinan por las especificaciones de la capa física. Por lo tanto, los parámetros tales como las frecuencias de operación, velocidad de datos, los requisitos de sensibilidad del receptor y los tipos de dispositivos, se especifican en la norma IEEE 802.15.4.

3.3.1.3.- Frecuencias de operación y velocidades de transmisión

Se contemplan 3 bandas de frecuencia en el IEEE 802.15.4.

- 868 – 868.6 MHz (Banda de 868 MHz)
- 902 – 928 MHz (Banda de 915 MHz)
- 2400 – 2483.5 MHz (Banda de 2.4 GHz)

La banda de 868 MHz es utilizada en Europa para una serie de aplicaciones incluyendo la creación de redes inalámbricas de corto alcance.

Las bandas de 915MHz y 2.4GHz son parte de la industria científica y las bandas de frecuencia médicas.

	Frequency (MHz)	Number of Channels	Modulation	Chip Rate (Kchip/s)	Bit Rate (Kb/s)	Symbol Rate (Ksymbol/s)	Spreading Method
	868-868.6	1	BPSK	300	20	20	Binary DSSS
	902-928	10	BPSK	600	40	40	Binary DSSS
Optional	868-868.6	1	ASK	400	250	12.5	20-bit PSSS
	902-928	10	ASK	1600	250	50	5-bit PSSS
Optional	868-868.6	1	O-QPSK	400	100	25	16-array orthogonal
	902-928	10	O-QPSK	1000	250	62.5	16-array orthogonal
	2400-2483.5	16	O-QPSK	2000	250	62.5	16-array orthogonal

Tabla 3.1. Velocidad de transmisión y frecuencias de operación en IEEE 802.15.4.

IEEE.802.15.4 postula que si un transceptor es compatible con la banda de 868 MHz, también lo será con la de 915 MHz. Por tanto estas dos bandas quedan agrupadas. Existe una especificación obligatoria para estas bandas de 868/915 MHz y dos especificaciones opcionales. El requisito obligatorio es más fácil de implementar, pero con menor velocidad de transmisión (20 Kbps y 40 Kbps).

Antes de la introducción de estos dos modos de operación opcional, la única manera de tener una velocidad de transmisión mejor que 40 Kbps era utilizar la banda de frecuencia de 2.4 GHz. Ahora, si por alguna razón no es posible operar en 2.4 GHz o si la velocidad de transmisión de 40 Kbps no es suficiente, el usuario tiene la opción de alcanzar la velocidad de transmisión de 250 Kbps a 868/915 MHz.

La banda de 2.4 GHz ISM es aceptada en todo el mundo y tiene la máxima velocidad de transmisión y número de canales. Por estas razones el desarrollo de los transceptores de la banda de 2.4 GHz es una opción popular para muchos fabricantes. Sin embargo, IEEE 802.11.b opera en la misma banda y la convivencia puede ser un problema en algunas aplicaciones.

Como se observa en la figura 3.12, se utilizan tres tipos de modulaciones: BPSK, ASK y QPSK. En BPSK y O-QPSK los datos viajan en la fase de la señal y en ASK los datos viajan en la amplitud de la señal.

Todos los métodos de comunicación inalámbrica de IEEE 802.15.4 usan las técnicas de DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) o PSSS (Parallel Sequence Spread Spectrum) para mejorar el rendimiento del receptor.

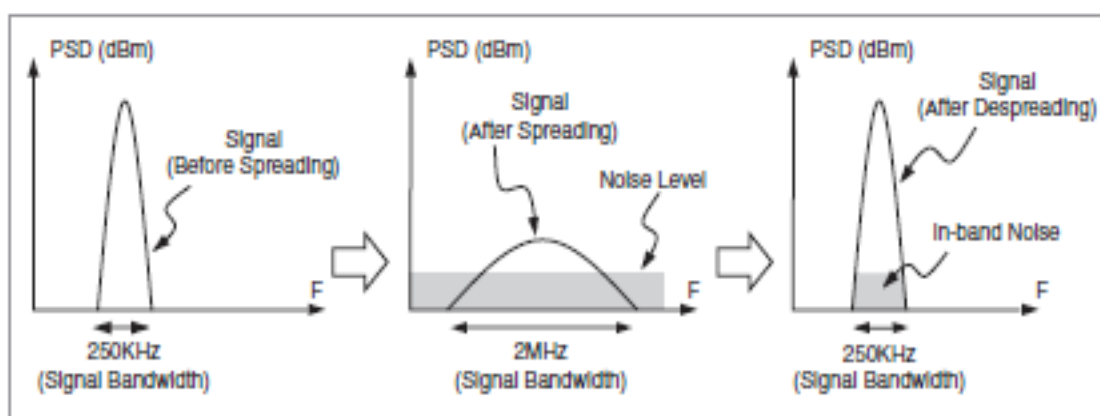


Figura 3.12. DSSS y PSSS ayudan a mejorar la SNR.

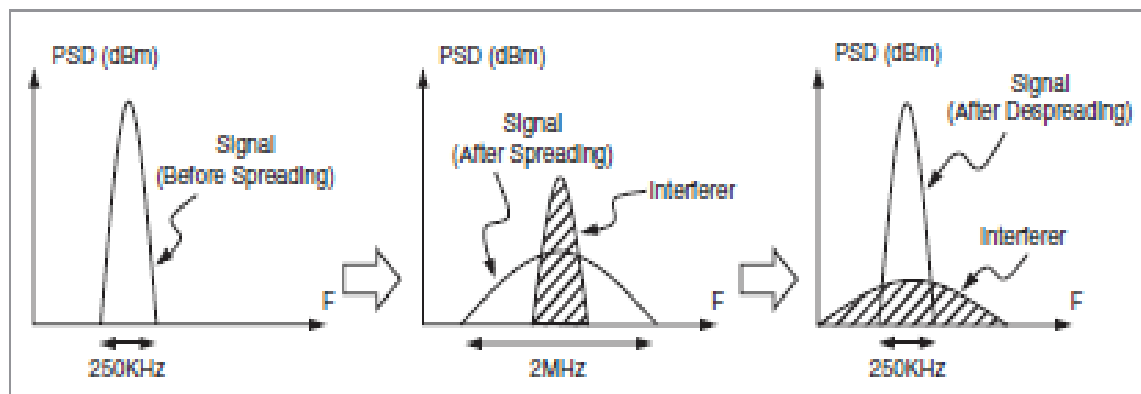


Figura 3.13. DSSS y PSSS ayudan a reducir el efecto de interferencias.

3.3.1.4.- Interoperabilidad

Zig Bee tiene una amplia variedad de aplicaciones y un gran número de empresas desarrollan distintas soluciones Zig Bee. Es importante que todos estos dispositivos basados en esta tecnología sean capaces de interactuar entre sí, sin importar su origen.

Tipos de dispositivos

Hay dos tipos de dispositivos en una red inalámbrica IEEE 802.15.4

- FFD (Full Function Device): Capaz de realizar todas las funciones y de tomar cualquier rol en la red.
- RFD (Reduce Function Device): Capacidad limitada. Sólo puede comunicarse con un FFD en la red. La capacidad de procesamiento y memoria son menores que en los FFD.

Roles del dispositivo

En una red IEEE 802.15.4, un dispositivo FFD puede tomar tres diferentes roles:

- *Coordinador*: es un dispositivo FFD que es capaz de transmitir mensajes.
- *Coordinador del PAN*: cuando el coordinador es también el controlador principal de una red de área personal (PAN).
- *Dispositivo*: Si no está actuando como un coordinador.

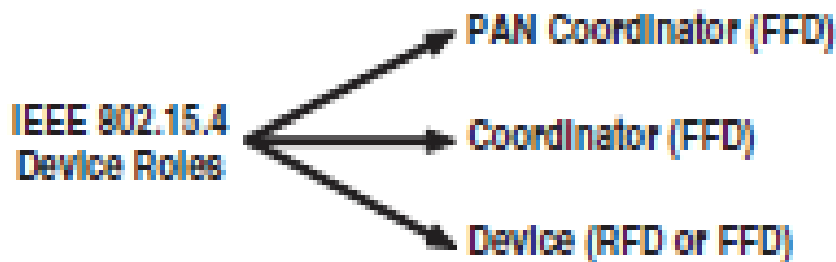


Figura 3.14. Roles del dispositivo en el estándar 802.15.4

El estándar ZigBee utiliza terminología ligeramente diferente:

- Un *coordinador ZigBee* es en un estándar IEEE 802.15.4 un coordinador PAN.
- Un *router ZigBee* es un dispositivo que puede actuar como un coordinador IEEE 802.15.4.
- Un dispositivo final ZigBee es un dispositivo que no es ni un coordinador ni un router. Tiene el tamaño mínimo de memoria y capacidad de procesamiento. Es el dispositivo menos caro en la red.

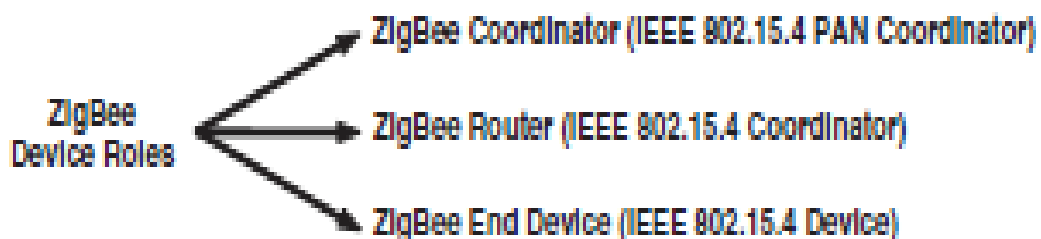


Figura 3.15. Roles del dispositivo en el estándar Zig Bee.

3.3.1.5.- Topologías de Red

La formación de la red está gestionada por la capa de red ZigBee. La red debe estar en una de las dos topologías especificadas en el estándar IEEE 802.15.4: *estrella* y *peer-to-peer*.

3.3.1.5.1.- Topología de estrella

En la *topología en estrella*, que se muestra en la figura 3.16, cada dispositivo en la red sólo se puede comunicar con el coordinador PAN. Un escenario típico en una formación de red en estrella es que un FFD, programado para ser un coordinador PAN, se activa y comienza a establecer su red. La primera cosa que este coordinador PAN hace es seleccionar un identificador de PAN único que no es utilizado por cualquier otra red en su esfera de radio de influencia, se garantiza que el identificador de PAN no es utilizado por ninguna otra red cercana.

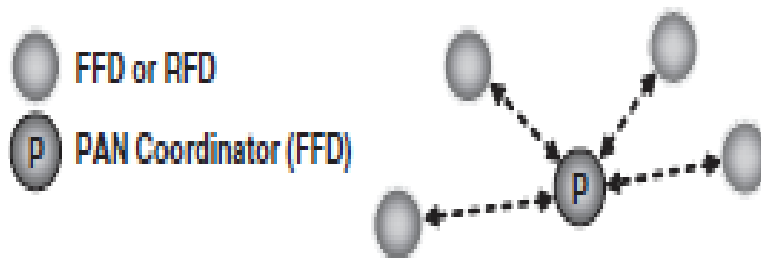


Figura 3.16. Topología en estrella.

3.3.1.5.2.- Topología peer to peer

En una *topología peer to peer* (véase la figura 3.18), cada dispositivo puede comunicarse directamente con cualquier otro dispositivo. Cualquier FFD en una red peer-to-peer puede desempeñar el papel de coordinador del PAN. Una manera de decidir qué dispositivo será el coordinador de PAN es escoger el primer dispositivo FFD que inicia la comunicación como el coordinador de

PAN. Todos los dispositivos que participan en la transmisión de los mensajes son FFDs porque los RFDs no son capaces de transmitir los mensajes. Sin embargo, un RFD puede ser parte de la red y comunicarse sólo con un dispositivo particular (un coordinador o un router) en la red.

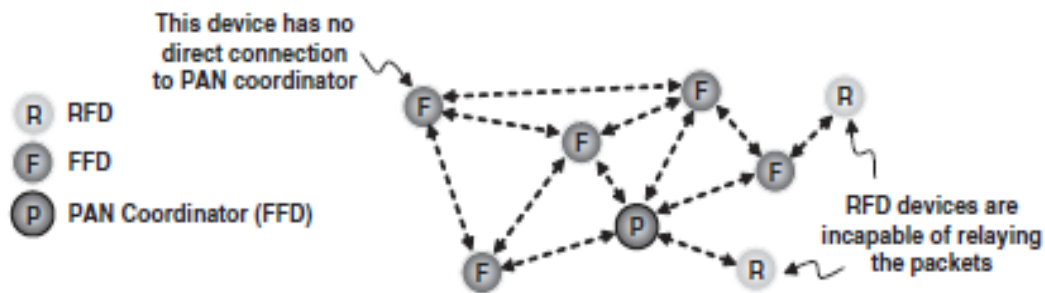


Figura 3.17. Topología de malla.

Una red peer-to-peer sin restricciones en cuanto a comunicación de dispositivos se conoce como una topología de malla. Otra forma de red compatible con peer-to-peer ZigBee es una topología de árbol (ver figura 3.19). En este caso, un coordinador ZigBee (PAN coordinador) establece la red inicial. Routers ZigBee forman las ramas y transmiten los mensajes. Dispositivos ZigBee finales actúan como hojas del árbol y no participan en el enrutamiento de mensajes. Los Routers ZigBee pueden hacer crecer la red más allá de la red inicial establecida por el coordinador ZigBee.

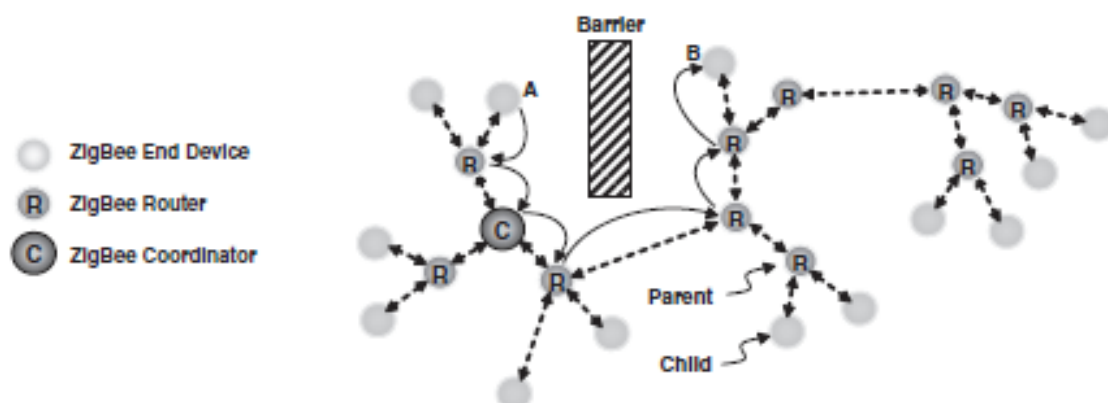


Figura 3.18. Topología de árbol.

La figura 3.19 también muestra un ejemplo de cómo la transmisión de un mensaje puede ayudar a extender el alcance de la red e incluso ir alrededor de los obstáculos. Por ejemplo, el dispositivo “A” necesita enviar un mensaje al dispositivo “B”, pero hay una barrera entre ellos que es difícil de penetrar para la señal. La topología de árbol ayuda a transmitir el mensaje en torno a la barrera y alcanzar el dispositivo “B”. Esto se refiere a veces como *multihopping* porque un mensaje salta de un nodo a otro hasta que llega a su destino.

Una red IEEE 802.15.4, independientemente de su topología, siempre se crea por un coordinador PAN que controla la red y realiza las siguientes tareas:

- Asignar una dirección única de 16 o 64 bits a cada dispositivo de la red.
- Iniciar, terminar, y enrutar los mensajes a través de la red.
- Seleccionar un único identificador PAN para la red.

Sólo hay un coordinador de PAN en toda la red. Un coordinador de PAN puede necesitar largos períodos activos, por lo que es normalmente conectado a un suministro principal en lugar de una batería. Todos los demás dispositivos son normalmente con pilas. La red más pequeña posible incluye dos dispositivos: un coordinador PAN y un dispositivo.

3.3.1.6.- Fundamentos básicos de la comunicación

3.3.1.6.1.- CSMA – CA

IEEE 802.15.4 implementa un método simple que permite a múltiples dispositivos utilizar el mismo canal de frecuencias para comunicarse. Este método es el llamado CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance).

ZigBee es asíncrono, por lo que cualquier nodo puede transmitir en cualquier instante. CSMA-CA, que es un mecanismo a nivel MAC, previene de que los mensajes enviados por los nodos colisionen entre sí en el canal. En CSMA-CA, cada vez que un dispositivo quiere transmitir, primero se asegura que el canal que va a usar no está siendo usado por otro dispositivo. Una vez que comprueba que el canal está libre, transmite su mensaje. Si el canal no está libre, el dispositivo espera un tiempo definido con anterioridad y lo intenta de nuevo. Este proceso se repite hasta que el canal esté libre o hasta alcanzar el máximo número de intentos definido por el usuario.

3.3.1.6.2.- Beacon Enabled frente a Nonbeacon Networking

Los dispositivos pueden acceder al canal mediante: método basado en contención o método sin contención. En el primero, todos los dispositivos que desean transmitir en el mismo canal de frecuencia utilizan el mecanismo CSMA-CA y el primero que se encuentra el canal libre comienza a transmitir. En el método sin contención el coordinador PAN dedica un intervalo de tiempo específico para un dispositivo en particular. Esto se llama un intervalo de tiempo garantizado (GTS). Por lo tanto un dispositivo empezará a transmitir durante ese tiempo, sin utilizar ese mecanismo CSMA-CA.

Para proporcionar un GTS, el coordinador PAN tiene que garantizar que todos los dispositivos en la red están sincronizados. *Beacon* o trama piloto, es un mensaje con formato específico que se utiliza para sincronizar los relojes de los nodos de la red. Un coordinador tiene la opción de transmitir *tramas piloto* para sincronizar los dispositivos conectados a él. Esto se llama *beacon-enabled PAN*. La desventaja de utilizar tramas piloto es que todos los dispositivos en la red deben despertar para escuchar la trama, sincronizar sus relojes, y volver a dormir. Esto significa que muchos de los dispositivos en la red pueden despertar sólo para la sincronización y no realizar ninguna otra

tarea mientras están activos. Por lo tanto, la vida de la batería de un dispositivo en una red *beacon-enabled* es normalmente inferior a una red *nonbeacon-enabled*.

Una red *nonbeacon* no puede tener GTS, los dispositivos no pueden ser sincronizados entre sí. La vida de la batería en una red *nonbeacon* puede ser notablemente mejor que en una red *beacon-enabled* porque en una red *nonbeacon*, los dispositivos han de despertar con menos frecuencia.

3.3.1.6.3.- Métodos de transferencia de datos

Hay tres tipos de transferencia de datos en IEEE 802.15.4

- Transferencia de datos desde un dispositivo hacia un coordinador.
- Transferencia de datos desde un coordinador hacia un dispositivo.
- Transferencia de datos entre dos dispositivos.

Los tres se pueden utilizar en una topología *peer to peer*. En topología estrella sólo las dos primeras están permitidas.

Transferencia de datos a un coordinador

En una red *beacon-enabled*, cuando un dispositivo decide transmitir datos al coordinador, el dispositivo se sincroniza y transmite los datos al coordinador mediante el método CSMA-CA. El coordinador mandará un ACK sólo si el transmisor lo requiere.

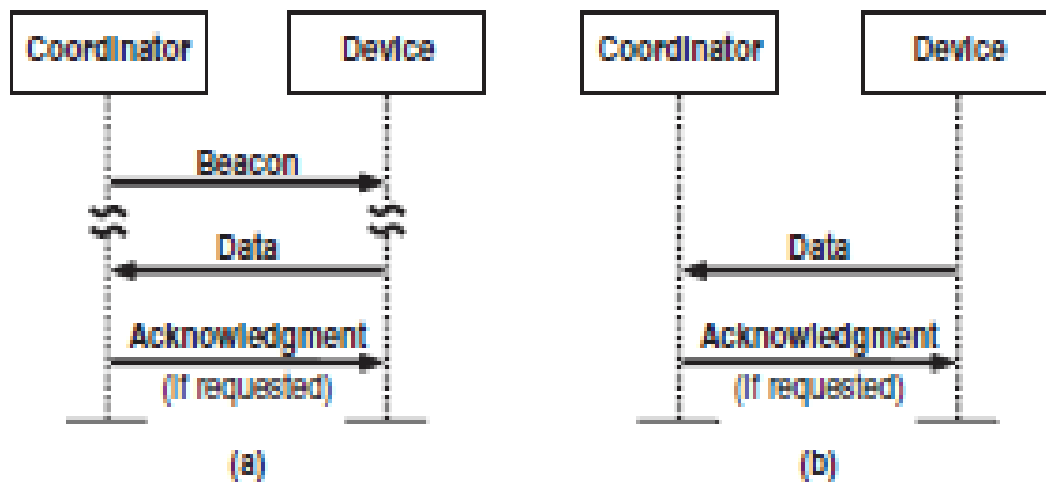


Figura 3.19. Transferencia de datos a un coordinador. (a) Beacon-enabled. (b) Nonbeacon-enabled.

Transferencia de datos desde un coordinador

La figura 3.21 (a) muestra la secuencia de mensajes en una transmisión de datos de un coordinador a un dispositivo en una red *beacon-enabled*. Si el coordinador necesita transmitir a un dispositivo en concreto, en la trama piloto o *beacon* indica que hay un mensaje pendiente para dicho dispositivo. El dispositivo envía entonces un mensaje de solicitud de datos al coordinador que indica que está activo y listo para recibir los datos. El coordinador confirma la recepción de la petición de datos y envía los datos al dispositivo. El envío de ACK por parte del dispositivo es opcional.

En una red *nonbeacon-enabled* (figura 3.21 (b)), el coordinador tiene que esperar a que el dispositivo solicite los datos. Si el dispositivo solicita los datos, pero no hay datos pendientes para ese dispositivo, el coordinador envía un mensaje de confirmación con un formato específico que indica que no hay datos pendientes para ese dispositivo. Por otra parte, el coordinador podrá enviar un mensaje de datos con una carga útil de longitud cero.

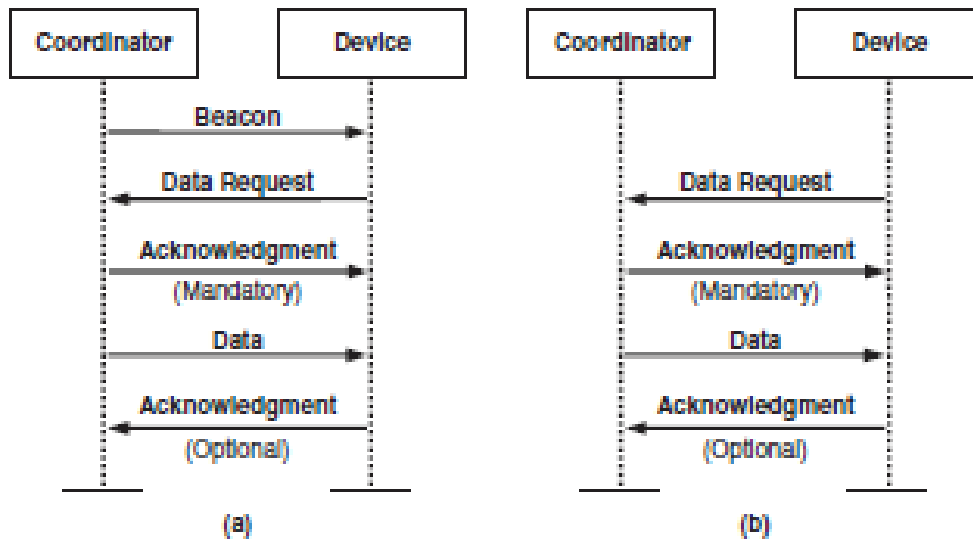


Figura 3.20. Transferencia de datos desde un coordinador a un dispositivo.
(a) Beacon enabled. (b) Nonbeacon enabled.

Transferencia de datos peer to peer (entre iguales)

En una topología *peer-to-peer*, cada dispositivo puede comunicarse directamente con cualquier otro dispositivo.

En muchas aplicaciones, los dispositivos que participan en la transmisión de datos *peer-to-peer* y en la recepción están sincronizados.

3.3.1.6.4.- Verificación de datos

Un paquete es un número de bits transmitidos junto con un formato específico. El receptor debe tener un mecanismo para verificar que los bits recibidos se recuperan sin error. IEEE 802.15.4, utiliza un mecanismo basado en un código cíclico CRC (Cyclic Redundancy Check) llamado FCS (Frame Check Sequence) de 16 bits, para detectar estos posibles errores en el paquete de datos.

3.3.1.6.5.- Direccionamiento

Cada dispositivo en una red necesita una dirección única. IEEE 802.15.4 utiliza dos métodos de direccionamiento:

- 16 bits (direccionamiento corto)
- 64 bits (direccionamiento largo)

Una red puede optar por utilizar cualquiera de los dos, 16-bit o 64-bit de direccionamiento. La dirección corta permite la comunicación dentro de una red única. El mecanismo de direccionamiento corto permite una reducción en la longitud de los mensajes y ahorra en espacio de memoria necesario que se asigna para almacenar las direcciones. La combinación de un identificador de PAN único y una dirección corta se puede utilizar para la comunicación entre redes independientes.

Con el direccionamiento de 64 bits, el número máximo de dispositivos en una red puede ser 264. Por lo tanto, una red inalámbrica IEEE 802.15.4 no tiene prácticamente ningún límite en el número de dispositivos que pueden unirse a la red.

La capa de red (NWK) del protocolo ZigBee asigna una dirección NWK 16-bit, además de la dirección IEEE. Una tabla de búsqueda simple se utiliza para asignar cada dirección 64-bit IEEE a una dirección NWK única. Las transacciones de capa NWK requieren el uso de la dirección NWK.

3.3.1.6.6.- Asociación y disociación

Son servicios de IEEE 802.15.4 que pueden usarse por los dispositivos para unirse o abandonar una red. Por ejemplo, si un dispositivo quiere unirse, le envía a PAN coordinador una solicitud de asociación. El coordinador puede aceptarla o rechazarla. Del mismo modo el dispositivo utiliza la disociación para notificar al coordinador que quiere salir de la red.

3.3.1.6.7.- Capas del estándar Zig Bee y 802.15.4

3.3.1.6.7.1.- Capa física (PHY)

La más cercana al hardware. Controla directamente y se comunica con el receptor. Es responsable de activar la comunicación radio que transmite o recibe paquetes. También selecciona la frecuencia del canal y se asegura de que el canal no sea utilizado por ningún otro dispositivo en otra red.

Estructura general de paquetes: Datos y comandos se comunican entre varios dispositivos en forma de paquetes. El paquete PHY consta de tres componentes: la cabecera de sincronización (SHR), el encabezado de la capa física (PHR) y la carga PHY.

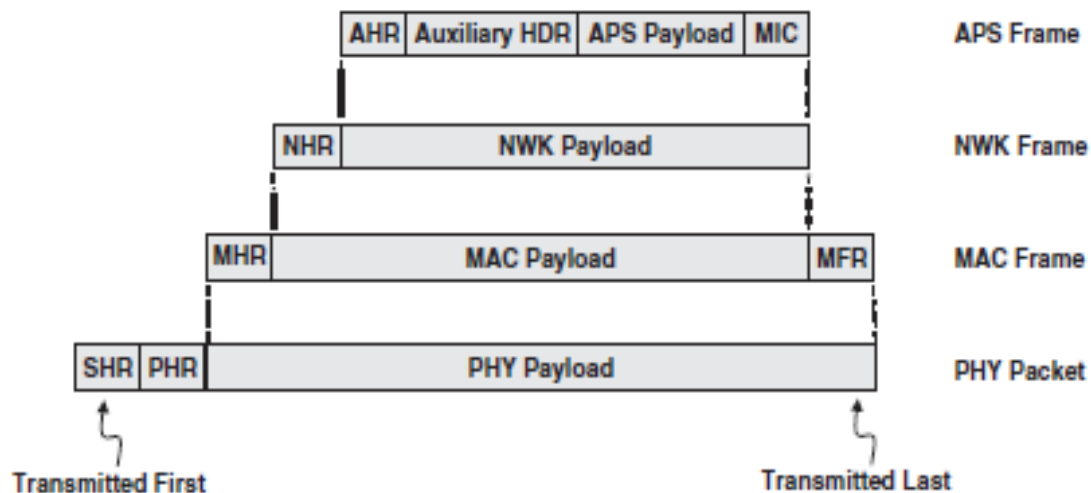


Figura 3.21. Estructura de un paquete Zig Bee.

El SHR permite al receptor sincronizar y controlar el flujo de bits. El PHR contiene información sobre el marco de longitud y la carga PHY incluye datos o comandos para el dispositivo receptor.

3.3.1.6.7.2.- Capa MAC

Proporciona la interfaz entre la capa física y la capa de enlace. Es responsable de la generación de *beacons* y la sincronización de éstos con los dispositivos. También proporciona servicios de asociación y disociación.

IEEE 802.15.4 define cuatro estructuras diferentes de tramas MAC:

- Trama piloto (*beacon frame*).
- Trama de datos.
- Trama de ACK.
- Trama de comando MAC.

Trama piloto: Las tramas piloto son importantes para mantener todos los nodos sincronizados sin requerir que los nodos consuman demasiado.

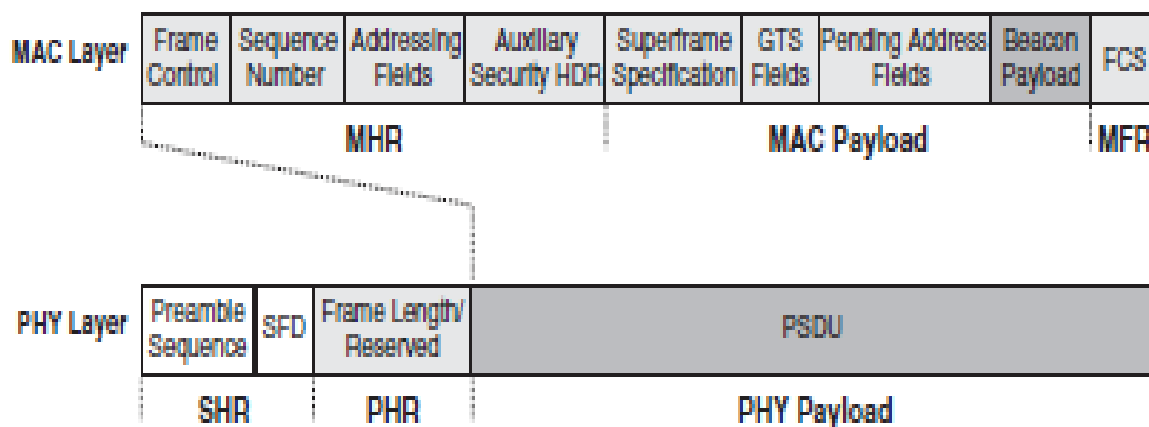


Figura 3.22. Estructura de trama piloto de la capa MAC.

No sólo se utiliza para sincronizar los dispositivos de una red, también es utilizado por el coordinador para permitir a un dispositivo específico en una red saber que hay datos pendientes para ese dispositivo en el coordinador. El dispositivo se comunicará con el coordinador y solicitará que se transmitan los datos a ese dispositivo. Esto se denomina transmisión indirecta.

Trama de datos

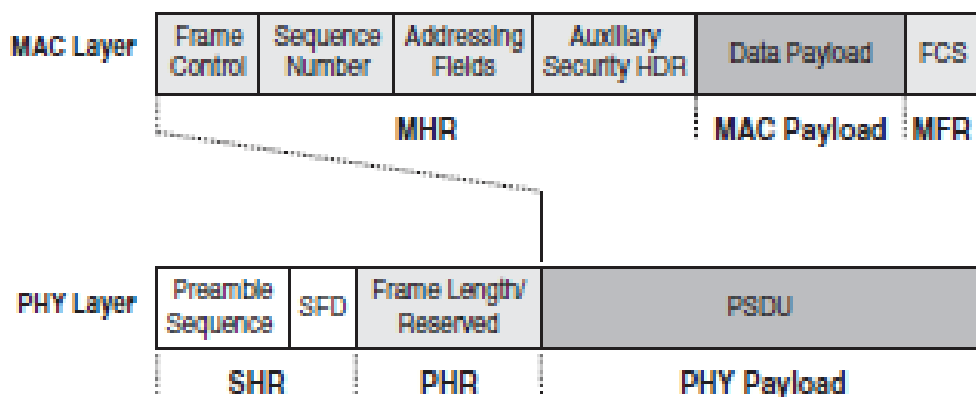


Figura 3.23. Estructura de la trama de datos de la capa MAC.

Trama de ACK: Es enviado por un dispositivo a otro para confirmar la recepción exitosa de un paquete.

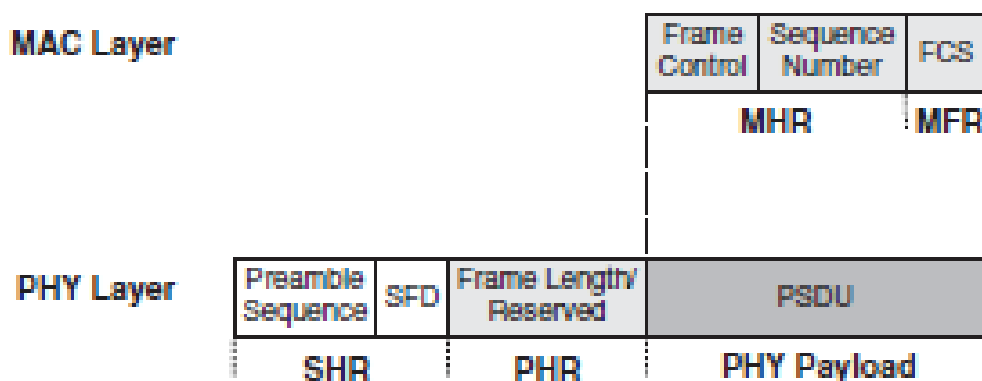


Figura 3.24. Trama de ACK en capa MAC.

Trama de comando MAC: Comandos como, la solicitud de asociación o de vinculación a una red, se transmiten utilizando esta trama.

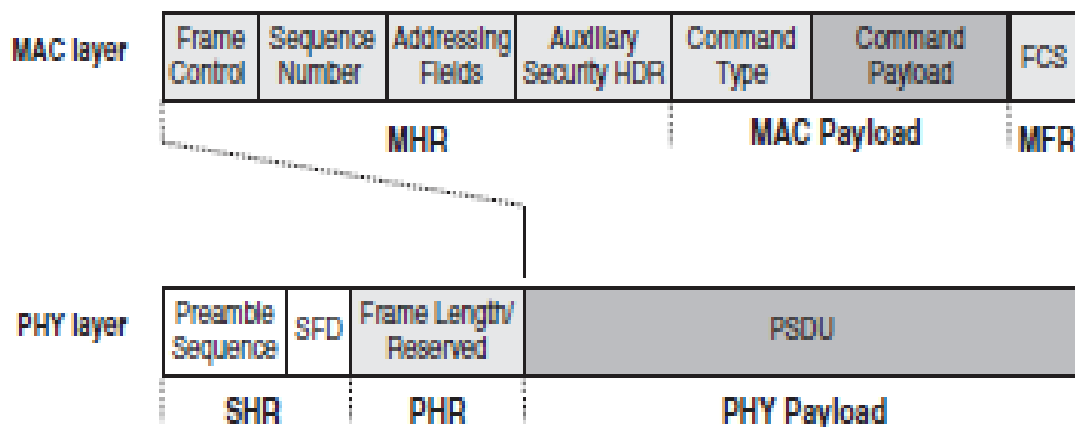


Figura 3.25. Estructura de la trama de comando MAC.

3.3.1.6.7.3.- Capa de red NWK

Se encuentra entre la capa Mac y la de Aplicación. Es responsable de la gestión de la formación de redes y enrutamiento. El enrutamiento es el proceso de selección de la ruta a través de la cual irá el mensaje transmitido a su dispositivo de destino. El coordinador Zig Bee y los routers son responsables de descubrir y mantener las rutas de la red. Un dispositivo final Zig Bee no puede realizar el descubrimiento de la ruta, por lo que el coordinador o un router lo harán en nombre del dispositivo final. La capa NWK es responsable de seleccionar la topología de la red (árbol, estrella, malla).

3.3.1.6.7.4.- Capa de aplicación (APL)

Es la capa más alta del protocolo en la red inalámbrica Zig Bee y alberga los objetos de aplicación. Los fabricantes desarrollan los objetos de aplicación para personalizar el dispositivo. El estándar ofrece la opción de utilizar perfiles de aplicación en el desarrollo de una aplicación. Un perfil de aplicación es un conjunto de acuerdos sobre los formatos de mensaje específico de la

aplicación y las acciones de procesamiento. El uso de un perfil permite una mayor interoperabilidad entre los productos desarrollados por diferentes fabricantes para una aplicación específica.

3.3.1.6.7.5.- Seguridad

En una red inalámbrica, los mensajes transmitidos pueden ser recibidos por intrusos. Existen dos preocupaciones principales de seguridad en la red:

- **Confidencialidad de los datos:** El dispositivo intruso puede obtener información simplemente escuchando los mensajes transmitidos. El cifrado de los mensajes antes de la transmisión va a resolver este problema. Un algoritmo de cifrado modifica un mensaje con una cadena de bits conocida como la clave de seguridad y sólo el destinatario será capaz de recuperar el mensaje original. El estándar IEEE 802.15.4 soporta el uso de AES (Advanced Encryption Standard) para cifrar sus mensajes salientes.
- La segunda preocupación es que el dispositivo intruso puede modificar y volver a enviar uno de los mensajes anteriores, incluso si los mensajes están encriptados. Incluyendo un MIC (Código de integridad de Mensaje) en cada paquete enviado, el receptor sabrá si un paquete ha sido modificado durante la transmisión. A ese proceso se le llama autenticación del mensaje.

Uno de los principales obstáculos en la ejecución de las funciones de seguridad en una red inalámbrica Zig Bee es que es de recursos limitados. Está destinada a aplicaciones de bajo costo y el hardware de los nodos en general no puede ser a prueba de manipulaciones, aunque existen algunos que sí lo son y que pueden borrar la información sensible si se detecta la manipulación.

3.3.1.7.- Zig Bee frente a otras tecnologías

El estándar de red inalámbrica de ZigBee se ajusta a un mercado en el que coexiste con otras tecnologías inalámbricas (figura 3.27). Aunque la mayoría de los estándares inalámbricos están tratando de conseguir tasas de transmisión más elevadas, ZigBee apunta a velocidades de datos bajas. Mientras que otros protocolos inalámbricos intentan añadir más y más características, ZigBee apunta a una pila de protocolo simplificada. Mientras que otras tecnologías inalámbricas intentan proporcionar mejoras como por ejemplo la posibilidad de integrar streaming en alta definición, ZigBee busca controlar una luz o enviar datos de temperatura a un termostato, es decir funciones mucho más básicas. Mientras que otras tecnologías inalámbricas están diseñadas para funcionar durante horas o quizá días en las baterías, ZigBee está diseñado para funcionar durante años. Y mientras que otras tecnologías inalámbricas proporcionan de 12 a 24 meses de vida útil de un producto, productos ZigBee pueden proporcionar décadas de uso.

El mercado denomina ZigBee como "redes de sensores inalámbricos y control", o simplemente, "control inalámbrico". De hecho, el lema de ZigBee es, "Control inalámbrico que simplemente funciona".

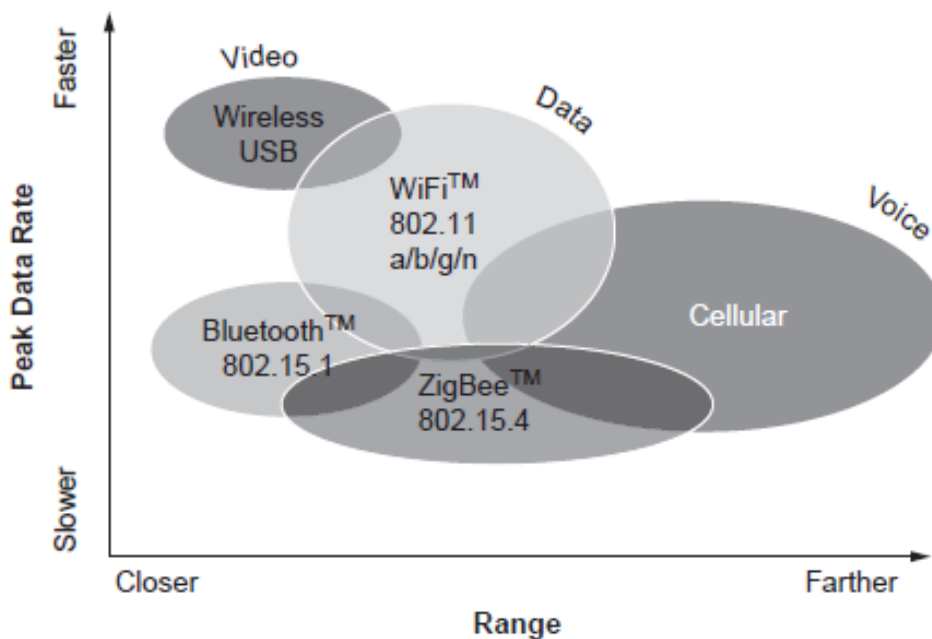


Figura 3.26. Comparación de diferentes tecnologías inalámbricas.

3.3.1.7.1.- Alternativas a ZigBee

Existen diversas alternativas inalámbricas, se compara Zig Bee con algunos de los estándares más populares que comparten la banda de 2.4 GHz. Los parámetros mostrados en la tabla 3.1 incluyen la máxima velocidad de transmisión, el consumo de potencia en transmisión y en “standby”, los requisitos de memoria de programa para un dispositivo típico, aplicaciones y opciones de conexión de la red.

Bluetooth es un sistema de comunicación inalámbrico basado en el estándar IEEE 802.15.1. Trabaja a una velocidad de transmisión de 1Mbps. Esta tecnología junto con Zig Bee tienen similares potencias de transmisión, pero Zig Bee tiene un valor más bajo, el correspondiente a la potencia en standby. Esto se debe a que los dispositivos en redes Bluetooth deben dar frecuentemente información a la red para mantener la sincronización, así que realiza mayor consumo de potencia al alternar de modo “escucha” y modo “sleep” constantemente.

Wifi (WLAN) proporciona conexión inalámbrica a internet. Requiere la actividad casi ininterrumpida de los dispositivos en la red. Se pueden transferir gran cantidad de datos de un punto a múltiples puntos, por lo que la potencia de transmisión es alta.

ZigBee (WPAN)	Bluetooth (WLAN/WPAN)	Wi-Fi (WLAN)
<ul style="list-style-type: none"> • Estándar 802.15.4 • 250 kbps • TX: 35 mA • Standby: 3µA • 32-60KB memoria • Iluminación, sensores, control remoto, etc. • Red en malla, punto a punto o punto a multipunto 	<ul style="list-style-type: none"> • Estándar 802.15.1 • 1 Mbps • TX: 40 mA • Standby: 200µA • >100KB memoria • Telecomunicaciones, audio, etc. • Punto a multipunto 	<ul style="list-style-type: none"> • Estándar 802.11 • Hasta 54Mbps • TX: >400 mA • Standby: 20mA • >100KB memoria • Internet, etc. • Punto a multipunto

Tabla 3.2. Comparativa Zig Bee, Bluetooth, Wifi.

Dependiendo en gran medida de la aplicación se necesita una velocidad de transmisión determinada, pero si el objetivo de la comunicación inalámbrica es transmitir y recibir comandos simples y o recabar información de los sensores (como es el caso del proyecto). Zig Bee ofrece la mejor solución y la más rentable en comparación con Bluetooth y Wifi.

3.4.-Redes de Área Corporal

En la siguiente gráfica se puede observar la relación entre la potencia consumida y la velocidad de transmisión. Cómo responden determinadas tecnologías a este compromiso entre ambos parámetros.

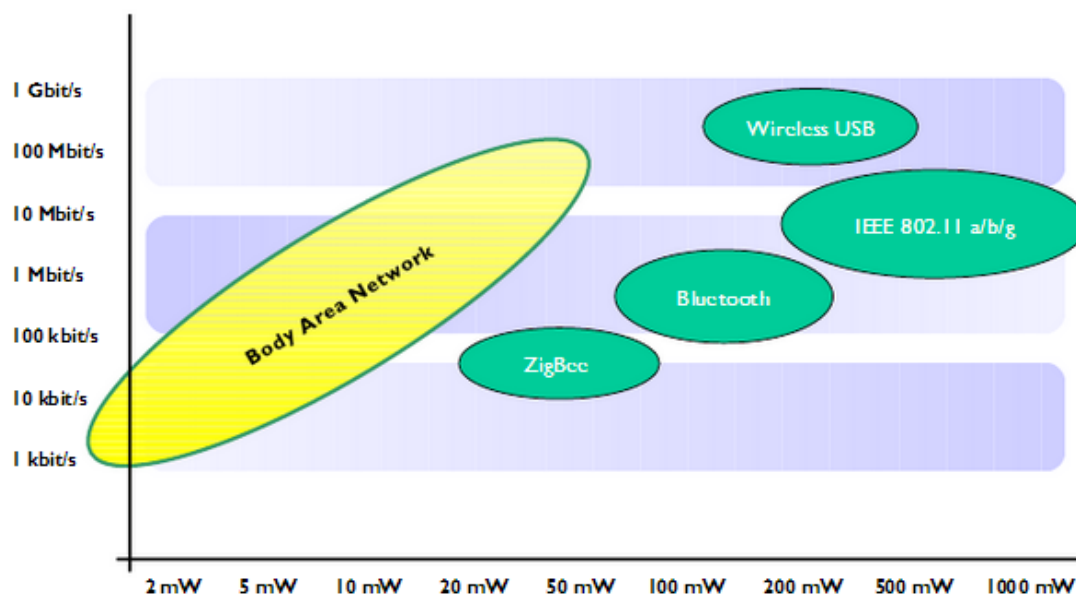


Figura 3.27. Potencia consumida frente a velocidad de transmisión.

3.4.1.- WBAN (Wireless Body Area Network)

Una red de área corporal es un sistema de dispositivos inteligentes, próximos al cuerpo de una persona, que son capaces de establecer un enlace de comunicación inalámbrica. Estos dispositivos llamados sensores se utilizan para medir ciertos parámetros del cuerpo humano que se enviarán y recogerán en un ordenador remoto.



Figura 3.28. Red inalámbrica de área corporal.

Como ya se ha visto, IEEE 802.15.4 es un estándar definido por el IEEE para WPAN (redes inalámbricas de área personal) de baja velocidad (LR-WPAN). Estas redes operan con tecnología Zig Bee, por tanto, son de bajo costo y permiten la comunicación inalámbrica en aplicaciones con potencia limitada y requerimientos no muy exigentes de rendimiento. El objetivo de las WPANs es proporcionar los medios para la comunicación inalámbrica eficiente de la energía dentro del espacio operativo personal (POS), sin necesidad de ninguna infraestructura. El POS es la región esférica que rodea a un dispositivo inalámbrico y tiene un radio de 10 metros.

3.4.1.1.- Aplicaciones

Entre las muchas aplicaciones posibles que han sido ideados para estas redes, están: la vigilancia de pacientes en el hogar, seguimiento y análisis de atletas entre otros.

3.4.1.1.1.- Aplicaciones médicas

Las WBANs se pueden utilizar para el diagnóstico y monitoreo remoto de los seres humanos. En el futuro, será posible controlar a los pacientes de forma continua y dar la necesaria medicación si están en casa, en un hospital o en otro lugar. Los pacientes ya no tendrán que estar conectados a máquinas para ser controlados.

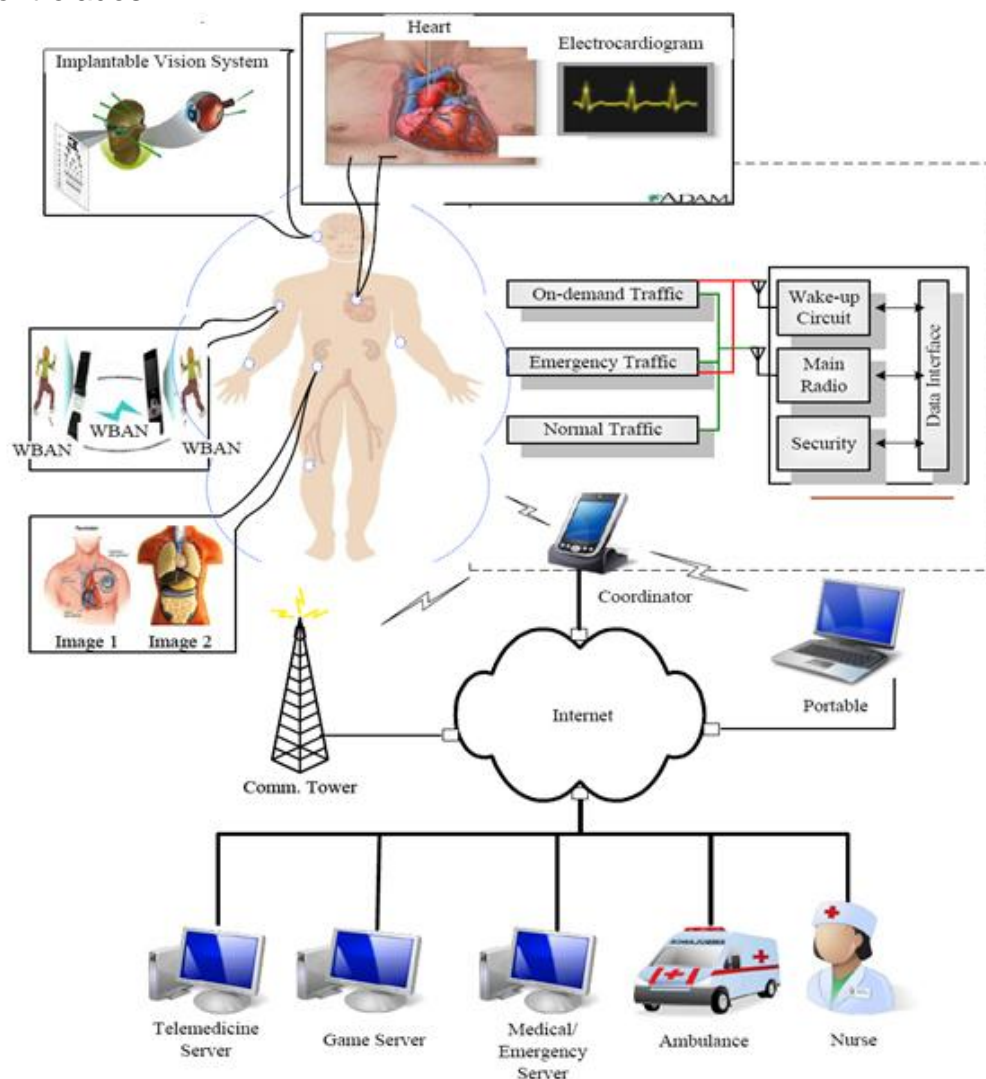


Figura 3.29. WBAN aplicada a la telemedicina.

3.4.1.1.2.- Aplicaciones Deportivas

En el ámbito deportivo se podrá tomar muchas lecturas diferentes de un atleta sin tenerlo en una cinta en una consulta. Mediante la aplicación de WBAN se puede monitorear al deportista y medir sus cualidades físicas, su respuesta ante esfuerzos físicos y todo tipo de información relativa a su estado físico y sus constantes vitales.

3.4.1.1.3.- Aplicaciones Militares

Las oportunidades para el uso de las WBAN en las fuerzas armadas son numerosas. Algunas de las aplicaciones de WBAN incluyen vigilancia de la salud, la ubicación, la temperatura y los niveles de hidratación.

4.- Análisis de simulación y medidas

En este apartado se analizarán todos los elementos de relevancia utilizados tanto en las simulaciones como en las mediciones realizadas in situ. También se expondrán, analizarán y compararán los resultados obtenidos por ambos caminos, principalmente los de Potencia recibida y PER.

4.1.- Instrumentación.

A continuación se presentarán los aparatos que se han utilizado para realizar las correspondientes medidas.



Analizador de espectros



Ordenador portátil



Antena Picea



Dispositivo XBee

4.1.1.- Analizador de espectros

Se ha utilizado el analizador de espectros en las medidas realizadas in situ, se ha colocado en cada punto de recepción obteniendo así el valor de la potencia recibida en cada uno de esos puntos de interés.

El analizador de espectros utilizado ha sido el Agilent FieldFox N9912A.

Es un analizador portátil, de reducido tamaño y peso, ya que para obtener datos en multitud de posiciones sería inviable desplazar un analizador de espectros de gran tamaño y peso.



Figura 3.30. Analizador de espectros.

Sus características principales son las siguientes:

- Sensibilidad: -148dBm
- Rango de frecuencia: 9KHz a 6GHz
- Conectores: 2xUSB 2.0, 1xminiUSB, 1xLAN, 1xminiSD slot.
- Calibración en el Puerto de salida RF: Sí.

Más información en ANEXO I.

4.1.2.- Antena giratoria Picea

Es una antena de alta eficiencia diseñada especialmente para funcionar con aplicaciones inalámbricas en espacios interiores y trabajar a una frecuencia de 2.4 GHz. Ofrece una señal estable y extiende su cobertura.

A la hora de realizar las medidas la antena se colocó tal cual se muestra en la figura, en su punto más óptimo de omnidireccionalidad.



Figura 3.31. Antena Picea.

Sus principales características son las siguientes:

- Ganancia máxima: 2.1 dBi
- Ganancia media: -1.5 dBi
- Eficiencia media: 70%
- Pérdidas de retorno máximas: -12 dB
- Patrones de radiación:

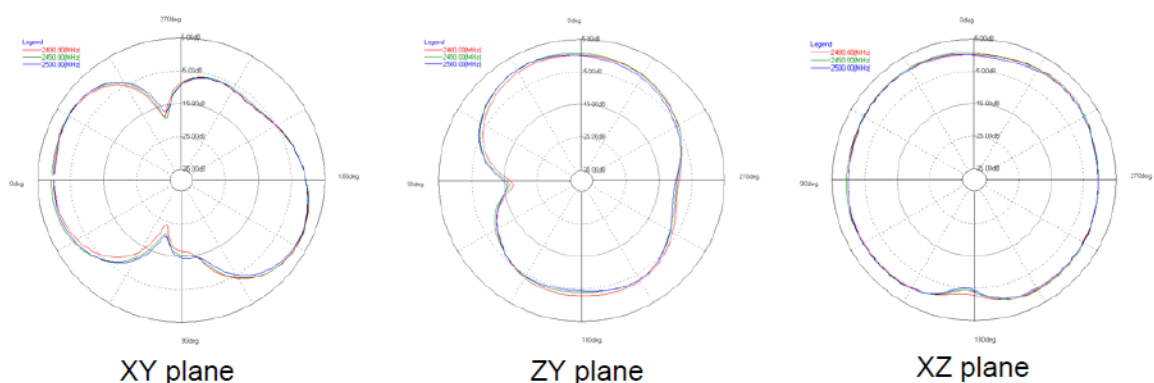


Figura 3.32. Patrones de radiación de Antena Picea.

Más información en ANEXO II.

4.1.3.- Dispositivos XBee-Pro

Módulo integrado que proporciona soluciones inalámbricas de conectividad entre dispositivos. Utilizan el estándar IEEE 802.15.4. Consiguen un buen alcance y tienen un consumo reducido.



Figura 3.33. Dispositivo XBee-pro.

Sus principales características son las siguientes:

- Frecuencia de operación: 2.4GHz
- Alcance en entornos interiores: 300 metros.
- Potencia transmitida máxima: 18dBm
- Sensibilidad: -100dBm
- Tasa de datos máxima: 250 Kbps.
- Modo de comunicación: Non beacon
- Compatible con topologías malla, árbol y estrella.
- Bajo consumo

Más información en ANEXO III.

4.2.- Realización de medidas

El recinto donde se han realizado las medidas es la planta baja del edificio de I+D+I Jerónimo de Ayanz de la Universidad Pública de Navarra. Consta de una planta de dimensiones 19.6m x 16.6m x 3.8m formada por varias habitaciones. En la sala se encuentra situada una persona que cuenta con 1,75 metros de altura y cuya posición variará dependiendo del caso a estudio.

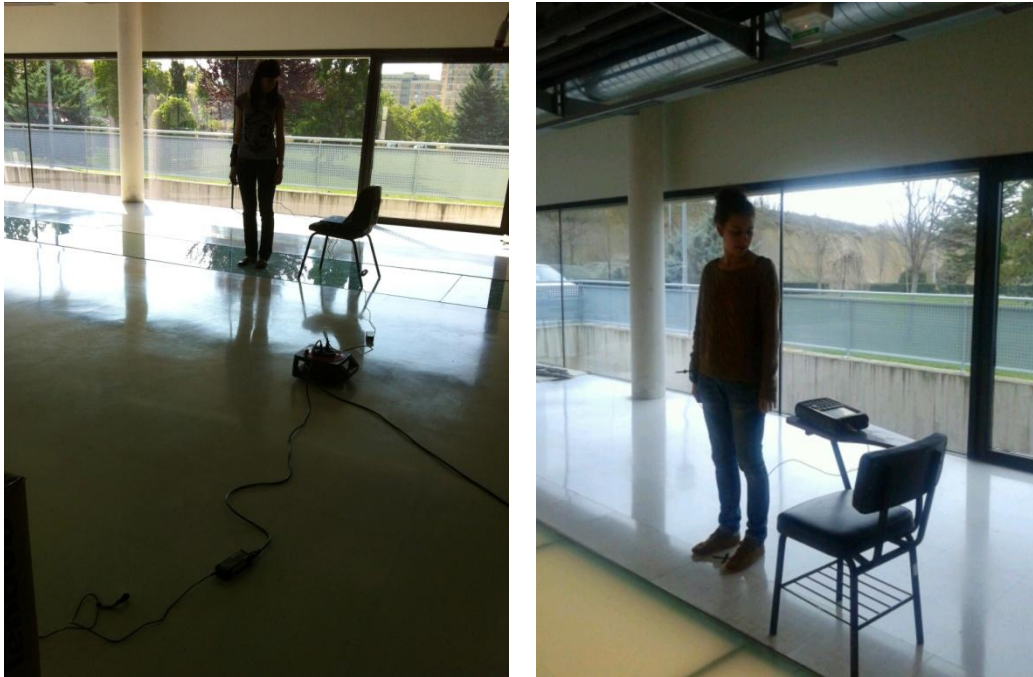


Figura 3.34. Planta baja del edificio Jerónimo de Ayanz.

Tanto en las medidas como en las simulaciones se ha tener en cuenta que existen dos casos claramente diferenciados en el proyecto:

CASO 1: Se sitúa la antena transmisora en la sala, a 4.5 metros del individuo y a una altura de 0.7 metros, mientras que los puntos de interés de recepción serán las distintas partes del cuerpo humano, más específicamente el tobillo, la muñeca y el pecho.

CASO 2: Se intercambian los papeles. La que antes era la antena transmisora ahora pasa a ser la receptora y la antena transmisora se sitúa en las distintas partes del cuerpo (tobillo, muñeca, pecho).

Con respecto a la posición de la persona anteriormente comentada, se ha de precisar que la *posición 4* es la que aparece en la figura 3.35, de frente a la antena, es decir a 0° . La *posición 1* se consigue rotando 90° . Para la *posición 2* se rotan 270° y para la *posición 3* 180° . De tal forma que se realizan medidas de cada orientación de la persona.

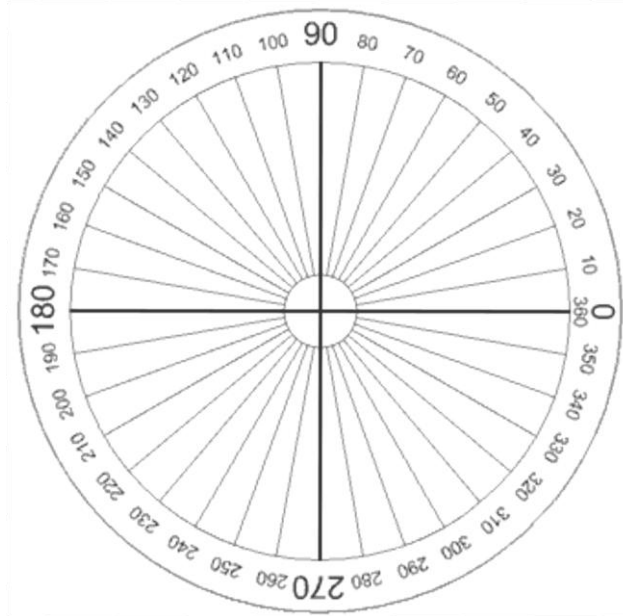


Figura 3.35. Orientaciones de la persona.

Medidas 1

En las primeras medidas realizadas para obtener resultados de RSSI y PER se utilizaron dos módulos XBee, cada uno situado en el lugar que corresponde a la antena Tx o Rx de tal forma que ambos se conectaban a un portátil de la siguiente forma.



Figura 3.36. Antena 1 (xBee).



Figura 3.37. Antena 2 (xBee).

Así mediante un software, se ponía a transmitir la correspondiente antena y en el punto de recepción se obtenían datos de RSSI y PER, ya que el programa daba la posibilidad de escoger la potencia de emisión y también la cantidad de paquetes que se envían.

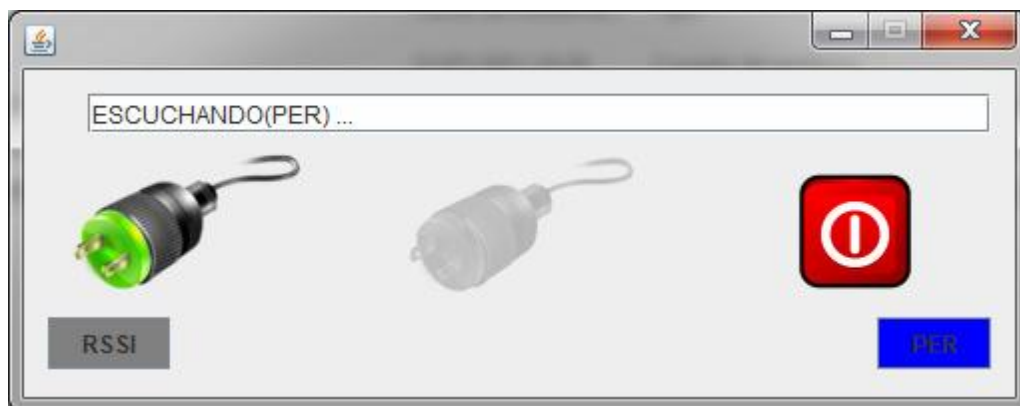


Figura 3.38. Interfaz del software de medida.

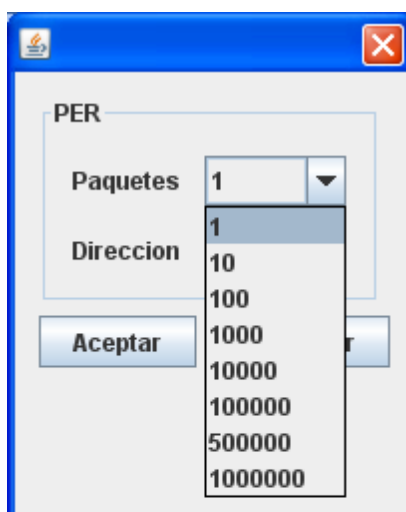


Figura 3.39. Elección del número de paquetes.

Los datos de RSSI no han sido utilizados para estimar la potencia recibida, ya que las posteriores medidas realizadas con el analizador de espectros nos dan valores más acertados. Pero sí se utilizan junto con los valores de PER extraídos para realizar una estimación sobre la calidad de la transmisión, la cantidad de paquetes que se entregan al receptor satisfactoriamente y los que se pierden por el camino durante la transmisión.

Se decidió transmitir 100.000 paquetes, la potencia transmitida fue de 10 dBm, y se desactivaron los ACK, por lo que los datos obtenidos son los del peor caso posible.

CASO 1: Antena Tx figura 3.37. Antena Rx cuerpo (figura 3.38).

Punto de Rx	RSSI (dBm)	Paquetes recibidos	PER
Tobillo posición 1	-64.74	99809	0,191
Tobillo posición 2	-68.72	98521	1,479
Tobillo posición 3	-71.44	98296	1,704
Tobillo posición 4	-58.71	99892	0,108
Muñeca posición 1	-65.32	99791	0,209
Muñeca posición 2	-73.85	96901	3,099
Muñeca posición 3	-76.38	94013	5,987
Muñeca posición 4	-63.33	99782	0,218
Pecho posición 1	-72.44	94072	5,928
Pecho posición 2	-62.59	99979	0,21
Pecho posición 3	-64.61	99809	0,191
Pecho posición 4	-65.59	98738	1,262

Tabla 3.3. Resultados MEDIDAS 1 - CASO 1.

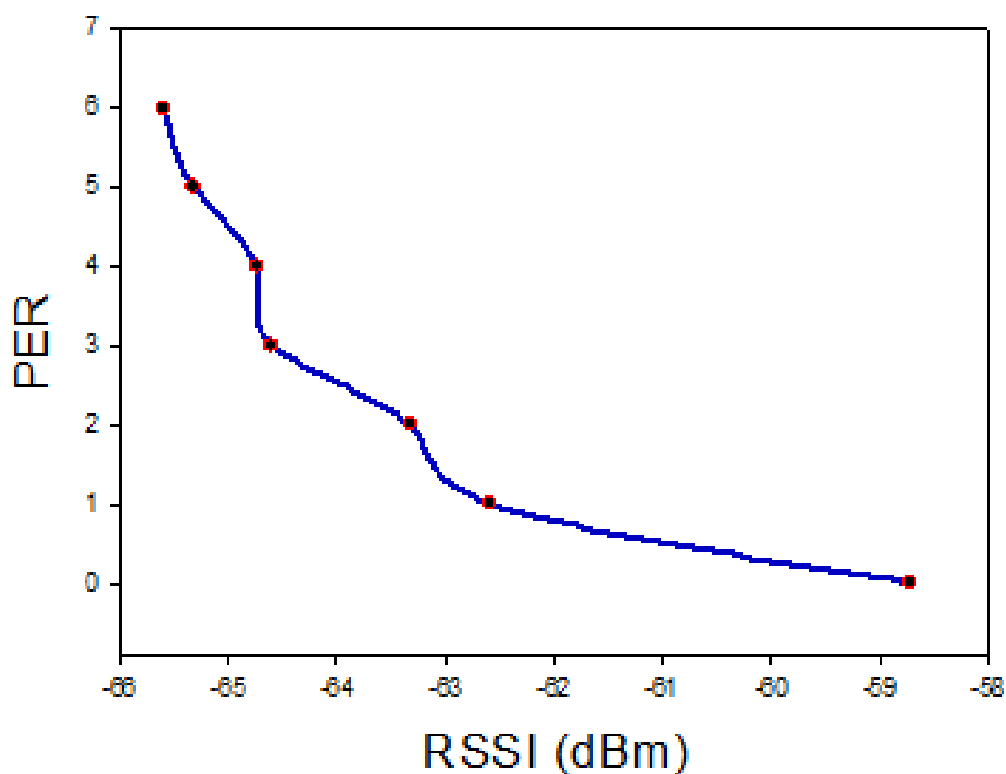


Figura 3.40. Relación PER-RSSI en CASO 1.

En la figura 3.40 se observa la relación entre el RSSI y el PER. Los puntos marcados en rojo son los datos específicos de las medidas.

Queda bastante claro que la tendencia es que el PER aumenta de forma inversa al RSSI. Esta subida del PER se hace más radical conforme disminuyen los valores del RSSI. Para valores menores a -64 dB se obtendrían datos de PER más elevados, la transmisión no sería todo lo eficiente que debiera, mientras que para valores inferiores a esta cifra, el PER es bastante bajo, es decir de los 100000 paquetes que se envían, es una cantidad muy pequeña la que se pierde en la transmisión.

Por tanto de todas las medidas realizadas podemos asegurar que la mayor calidad de enlace, el caso en que más paquetes se entregan al receptor satisfactoriamente, se produce cuando se coloca la antena receptora en el tobillo y con la persona en orientación 0°, es decir, de frente a la antena transmisora.

CASO 2: Antena Tx cuerpo (figura 3.38). Antena Rx (figura 3.37).

Punto de Tx	RSSI (dBm)	Paquetes recibidos	PER
Tobillo posición 1	-66.40	96199	3,801
Tobillo posición 2	-69.79	94326	5,674
Tobillo posición 3	-74.31	87622	12,378
Tobillo posición 4	-76.99	84734	15,266
Muñeca posición 1	-69.39	94519	5,481
Muñeca posición 2	-65.98	97161	2,839
Muñeca posición 3	-73.23	90189	9,811
Muñeca posición 4	-62	99443	0,557
Pecho posición 1	-76.99	92633	7,367
Pecho posición 2	-64.84	97754	2,246
Pecho posición 3	-77.64	84042	15,958
Pecho posición 4	-57.35	99881	0,119

Tabla 3.4. Resultados MEDIDAS 1 - CASO 2.

En este caso al disminuir el RSSI aumenta la tasa de PER, por lo que algunos enlaces Tx-Rx resultan algo deficientes, en parte porque la presencia de la antena Tx sobre el cuerpo humano afecta a la transmisión de forma significativa.

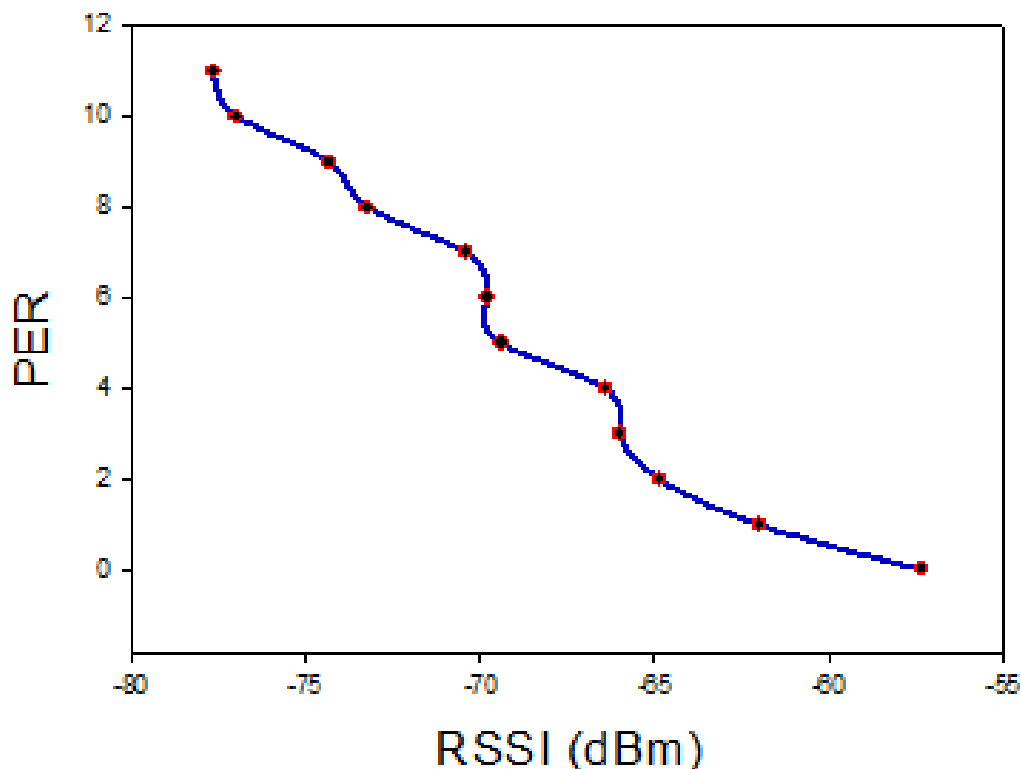


Figura 3.41. Relación PER-RSSI en CASO 2.

Como se observa en la tabla 3.3, se obtiene el mejor dato de PER en el enlace formado por la antena Tx situada en el pecho del individuo y de frente a la antena receptora situada en línea recta.

Medidas 2

Se realizaron medidas para obtener datos de potencia recibida. Para ello se utilizó para el CASO 1 (antena Rx situada en el cuerpo) una antena transmisora (figura 3.44) y situada en un punto de la sala (a 4.5m en línea recta, de frente a la persona y a 0.7 metros de altura), que se conecta a un PC para generar la señal y una antena receptora conectada a un analizador de espectros, el cual nos ofrece valores de potencia recibida (dBm) en los distintos puntos de recepción (figura 3.42). Para el CASO 2 el montaje fue a la inversa.

La antena Tx implementada sobre la placa y conectada al PC (figura 3.44), se situó en el cuerpo de la persona (tobillo, muñeca o pecho) y la antena Rx conectada al analizador de espectros se situó en dicho punto de la sala que se acaba de comentar.



Figura 3.42. Medidas de Potencia recibida con analizador de espectros.



Figura 3.43. Antena Rx situada en el tobillo.



Figura 3.44. Antena Tx.

Como se ha comentado con anterioridad los valores de RSSI obtenidos no son óptimos para estimar la potencia recibida. Por tanto, se toma la *Picea 2.4GHz Swivel Antena* conectada al analizador de espectros portátil como se observa en la figura 3.42 y en cada caso se obtiene el dato de potencia recibida. Los resultados obtenidos son los siguientes:

CASO 1: Antena Tx en la sala a 0.7m de altura y 4.5m de distancia de frente a la persona (figura 3.44). Antena Rx cuerpo (figura 3.42).

Punto de Rx	Potencia (dBm)
Tobillo posición 1	-45.82
Tobillo posición 2	-51.78
Tobillo posición 3	-54.35
Tobillo posición 4	-42.35
Muñeca posición 1	-44.55
Muñeca posición 2	-53.71
Muñeca posición 3	-54.44
Muñeca posición 4	-44.39
Pecho posición 1	-47.02
Pecho posición 2	-45.42
Pecho posición 3	-49.69
Pecho posición 4	-44.43

Tabla 3.5. Resultados MEDIDAS 2 - CASO 1.

CASO 2: Antena Tx cuerpo (figura 3.42). Antena Rx en la sala a 0.7m de altura y 4.5m de distancia, de frente a la persona.

Punto de Tx	Potencia (dBm)
Tobillo posición 1	-54.13
Tobillo posición 2	-55.21
Tobillo posición 3	-57.03
Tobillo posición 4	-54.17
Muñeca posición 1	-54.85
Muñeca posición 2	-54.06
Muñeca posición 3	-54.12
Muñeca posición 4	-53.74
Pecho posición 1	-57.41
Pecho posición 2	-56.46
Pecho posición 3	-57.02
Pecho posición 4	-52.76

Tabla 3.6. Resultados MEDIDAS 2 - CASO 2.

En el apartado 4.4 se realizará una comparativa entre estas medidas y las obtenidas en las simulaciones, para poder estimar cuanto se asemejan los resultados en ambos métodos de medida.

4.3.- Simulaciones. Software de trazado de rayos

Se ha utilizado un software de trazado de rayos en 3D, el cual ha sido desarrollado íntegramente en la Universidad Pública de Navarra. Este software ha sido programado en lenguaje Matlab con la finalidad de poder ser utilizado como simulador de propagación de ondas en espacios interiores.

El método de trazado de rayos 3D que se ha utilizado, se basa en el ya comentado algoritmo de Ray Lanching (ANEXO IV) que consiste en la distribución espacial uniforme, a partir de un trasmisor, de un número finito de rayos, con los que se pretende modelar la propagación de los frentes de ondas, así como su interacción con el entorno. Por tanto tiene en cuenta reflexiones y refracciones de los rayos en el espacio cerrado donde se realiza la simulación.

En este caso particular se han utilizado los 5 primeros rebotes de los rayos para conseguir cierta precisión. Según incrementa este número, aumenta el tiempo de cálculo, simulación y requerimiento computacional. Aunque estos factores también variarán dependiendo de otros parámetros como por ejemplo el tamaño del recinto en cuestión.

Dentro del escenario se componen todas las formas mediante cubos, ya sean paredes, mesas, sillas o cualquier otro tipo de objeto. También se precisa su constante dieléctrica. Todo ello para que el escenario en simulación sea lo más cercano posible a la realidad.

En el mismo software se especifica el tipo de antena o antenas que se utilizarán y sus parámetros (frecuencia, directividad, etc.).

La cantidad de datos dependerá de la resolución. Éste también es un parámetro que se puede modificar dependiendo de las zonas de interés. A mayor interés de la zona, se pondrá una mayor resolución y se extraerán una mayor cantidad de datos de esa zona de interés.

Como resultado se obtienen datos como la potencia recibida en cada punto de la sala.

4.3.1.- Modelo de cuerpo humano

Debido a que en el proyecto se implementa una red inalámbrica de área personal, a la hora de realizar las simulaciones se ha contado con un modelo de cuerpo humano implementado en el software y cedido por su diseñador, Erik Aguirre, compañero de la Universidad Pública de Navarra.

Se trata de un modelo que busca el realismo dentro de las limitaciones del propio software, (como puede ser la imposibilidad de dibujar basándonos en otra forma geométrica que no sea un cubo).

En su diseño se han tenido en cuenta factores como las proporciones y la morfología humanos, el grosor de la piel y las constantes dieléctricas de todos los tejidos que componen las partes del cuerpo humano.

A la hora de implementar el modelo de cuerpo humano simplificado se ha intentado dotarlo de cierta practicidad, con varias características configurables por el usuario. La más simple es la posibilidad de orientarlo en las cuatro direcciones posibles, que junto con la posibilidad de sentarlo, ofrece una gran adaptabilidad a los diferentes escenarios.

También existe la posibilidad de dotarlo con mayor o menor “resolución”. En este caso la resolución se refiere al detalle del modelo, pudiendo generar una persona que cuenta con huesos, órganos, músculos, capa de piel y sangre o simplemente usando un modelo simple mediante una carcasa de piel. El fin de esta posibilidad es decrementar los datos a procesar al estar compuesto de menos cubos diferentes.

Estos parámetros que se acaban de mencionar: la resolución de la persona, la posición y la orientación, se deben definir también en el programa. (Más información en ANEXO V).

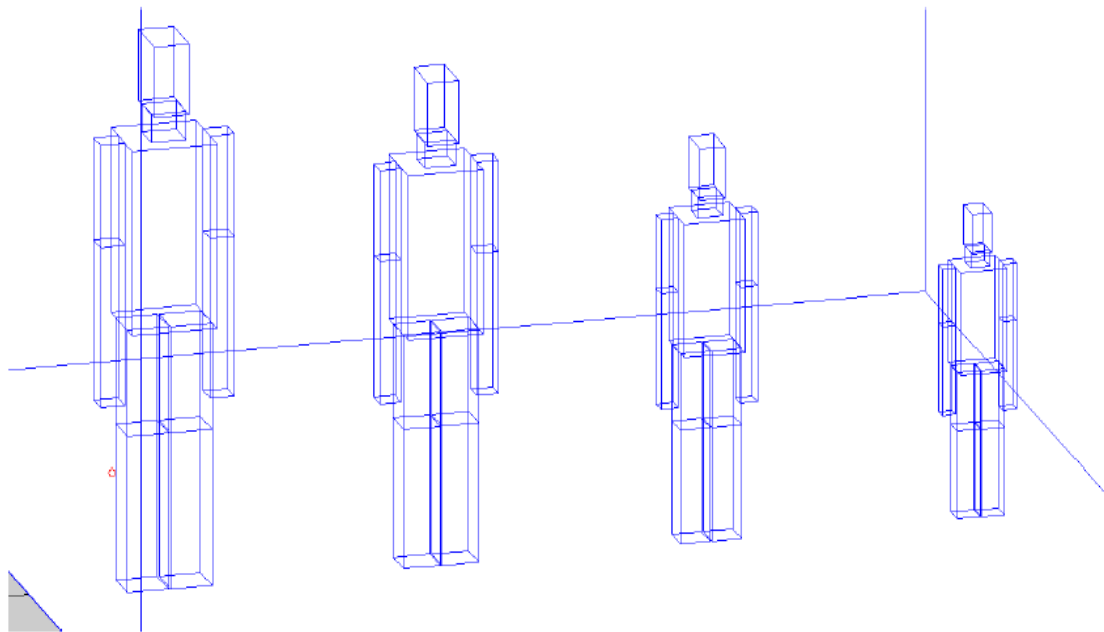


Figura 3.45. Modelo de cuerpo humano.

4.4.- Resultados de simulaciones

El objetivo de estas simulaciones es el análisis de una red inalámbrica de área corporal (WBAN) en un entorno interior. Mediante el software, se modelan los distintos escenarios. El recinto es la planta baja del edificio de I+D+I Jerónimo de Ayanz de la Universidad Pública de Navarra. Consta de una planta de dimensiones 19.6m x 16.6m x 3.8m formada por varias habitaciones. En la sala se encuentra situada una persona que cuenta con 1,75 metros de altura y cuya posición variará dependiendo del caso a estudio.

Durante la realización de este proyecto se han estudiado los casos en los que la antena Tx se sitúa en tobillo, muñeca y pecho del individuo, así como los casos en los que en dichas extremidades se sitúa la antena Rx. (Toda la casuística realizada se encuentra en el ANEXO VI).

4.4.1.- CASO 1: Antena Rx situada en cuerpo humano.

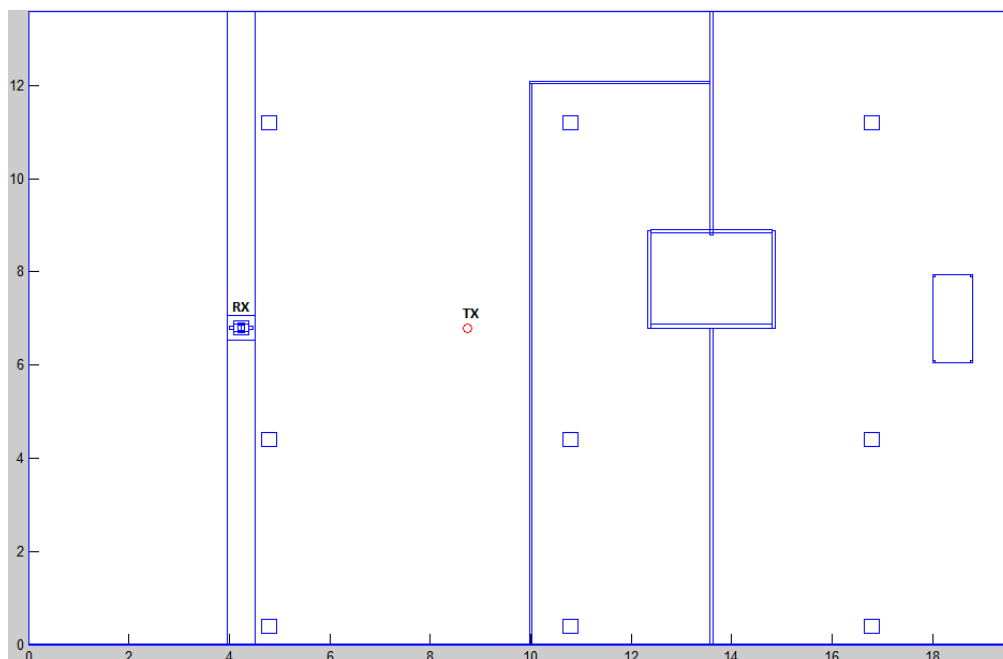


Figura 3.46. Antena Rx situada en cuerpo humano.

La antena transmisora tiene una potencia de 0,01 W, se encuentra situada a 0,7 m de altura y opera a una frecuencia de 2,410 GHz. Se sitúa al individuo de frente a la antena transmisora como se indica en la siguiente figura.

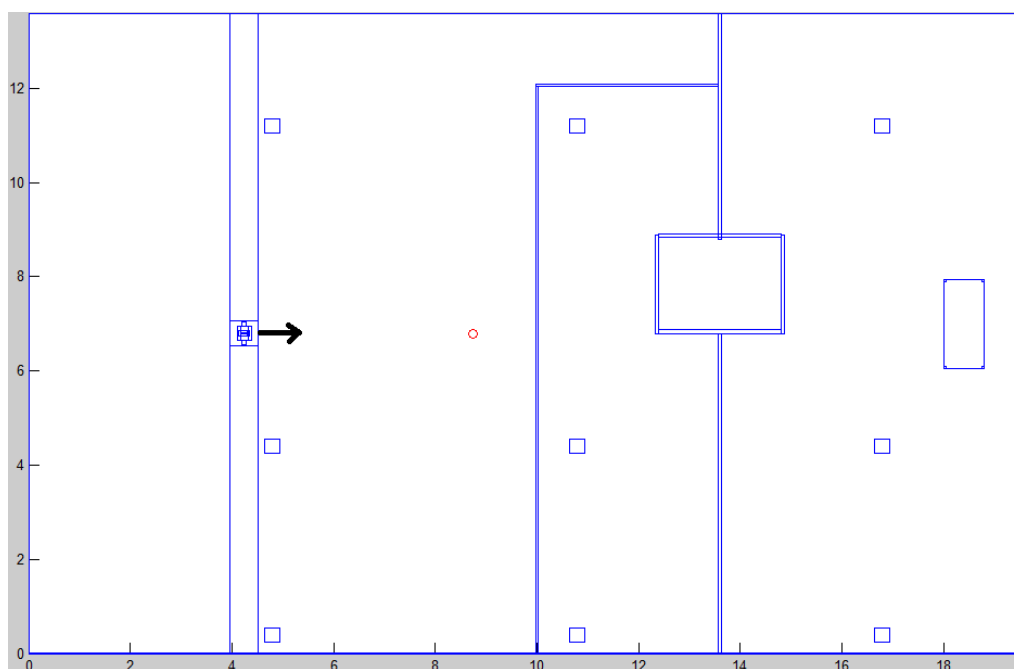


Figura 3.47. Individuo de frente a la antena Tx.

Tras la simulación, se obtienen los datos correspondientes a la distribución de potencia recibida (en dBm). En este caso se toman los valores de potencia recibida a distintas alturas de interés, correspondientes a las distintas partes del cuerpo que nos interesa analizar (tobillo = 0.16m, muñeca = 0.84m, pecho = 1.27 m).

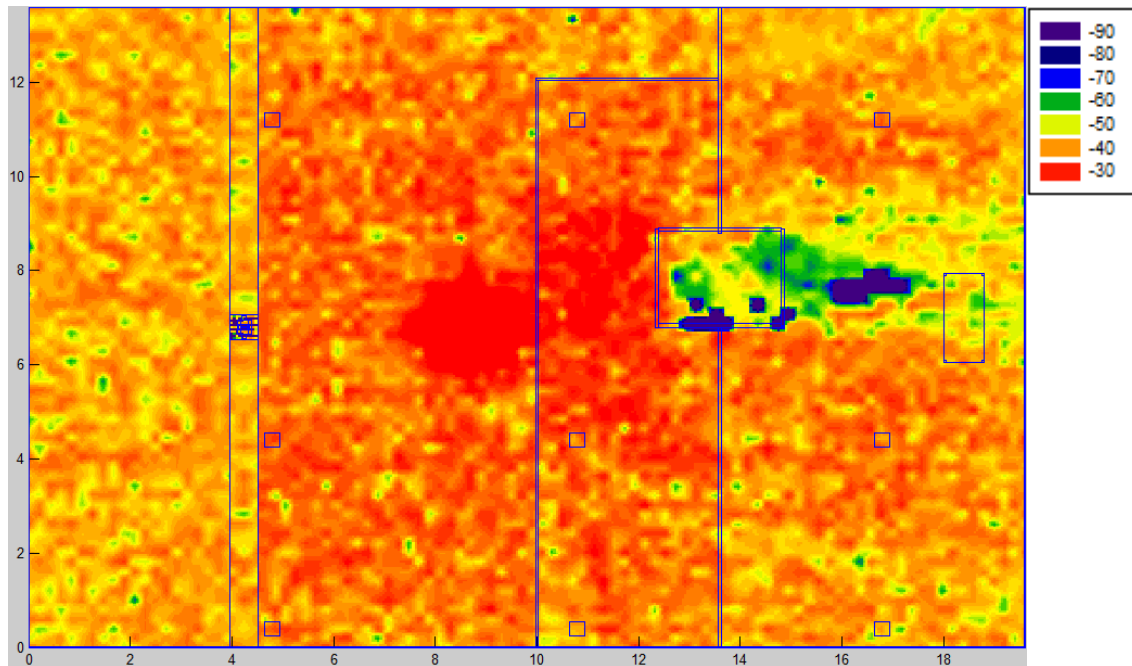


Figura 3.48. Distribución de potencia recibida (en dBm) a 0.16 m de altura.

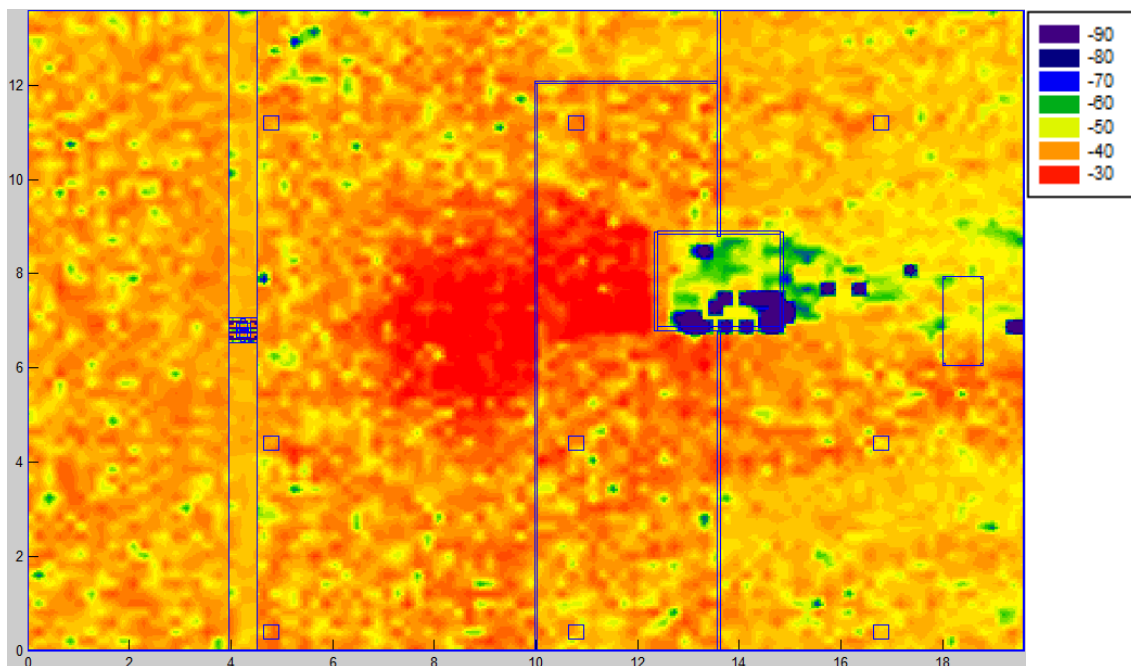


Figura 3.49. Distribución de potencia recibida (en dBm) a 0.84 m de altura.

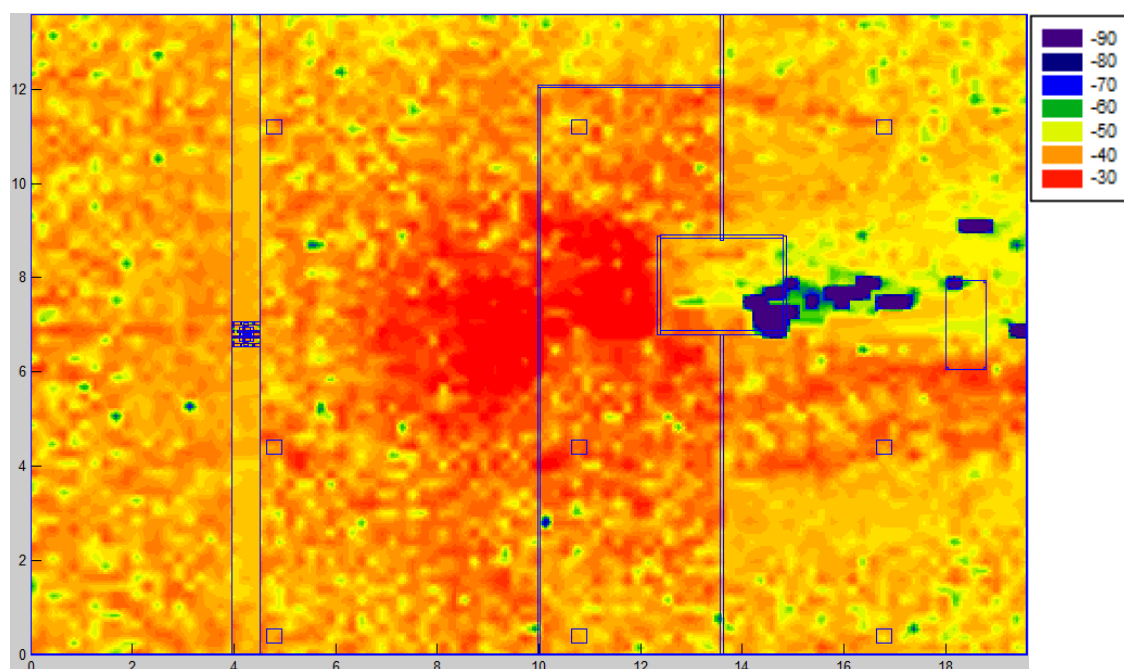


Figura 3.50. Distribución de potencia recibida (en dBm) a 1.27 m de altura.

En primer lugar, se observa de forma gráfica la potencia recibida en la planta a las diferentes alturas y después se extraen los datos específicos de interés, los valores de potencia recibidos en los distintos puntos del cuerpo (tabla 3.7) para poder compararlos con los obtenidos en las medidas realizadas.

En las tres alturas se observa cómo se obtienen los valores de potencia más elevados en las zonas más cercanas a la antena transmisora y cómo esos valores van disminuyendo según nos alejamos. Existen zonas con valores de potencia reducidos debido a que se encuentran cercanas a obstáculos como columnas o el hueco del ascensor. Otras que han perdido potencia debido a los rebotes de los rayos y también algunas zonas cercanas al cuerpo humano ven reducida su potencia recibida por la influencia que éste ejerce en la propagación de la señal, como por ejemplo su absorción.

Partiendo de estos datos también se obtiene mediante la figura 3.52, la potencia de la señal transmitida desde la antena Tx hasta los distintos puntos de recepción situados en el cuerpo humano (tobillo, muñeca y pecho).

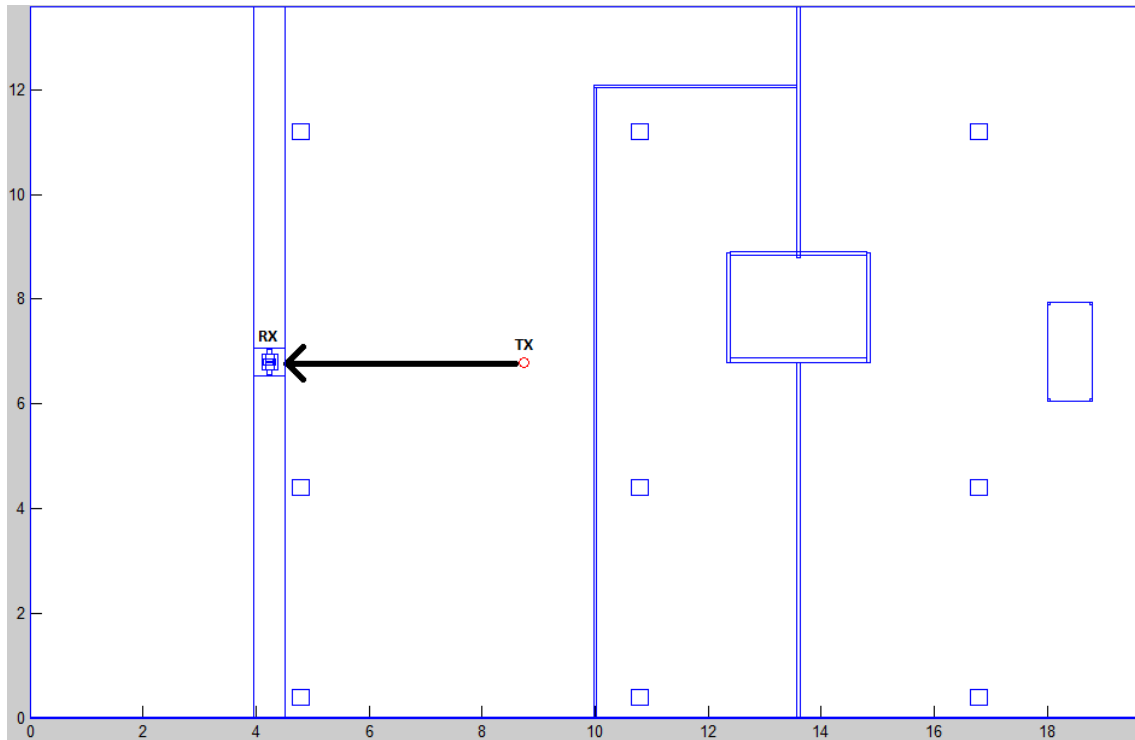


Figura 3.51. Camino desde antena Tx hasta los distintos puntos RX.

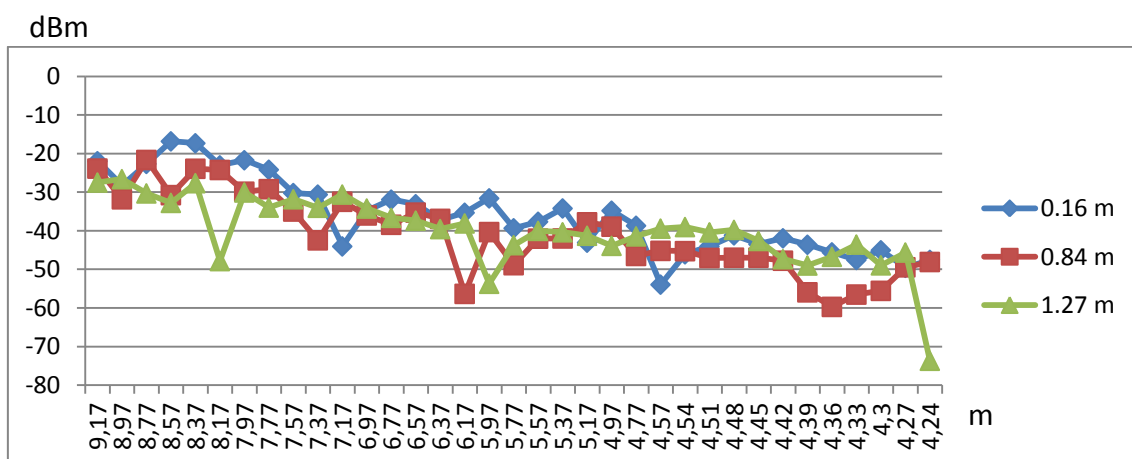


Figura 3.52. Potencia Tx-Rx (en dBm).

Línea verde: Desde la antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en muñeca derecha ($x=4.29$ metros), a una altura de 0.84 metros.

Línea roja: Desde la antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en el pecho ($x=4.39$ metros), a una altura de 1.27 metros.

Línea azul: Potencia desde la antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en tobillo derecho ($x=4.3$ metros), a una altura de 0.16 metros. Esta situación, como se observa en la tabla 3.3, corresponde al mejor enlace Tx-Rx, consiguiendo el mejor dato de RSSI, por tanto el PER más bajo de todos. En la tabla 3.7 también se comprueba cómo este punto es el que más potencia recibe tanto en medida como en simulación.

Para este escenario, se extraen los datos específicos de la potencia recibida en cada punto de interés (tobillo, muñeca, pecho) y se comparan con los obtenidos en las medidas in situ en el escenario real explicado en apartado *mediciones 2* del punto 4.2. (ver tabla 3.7)

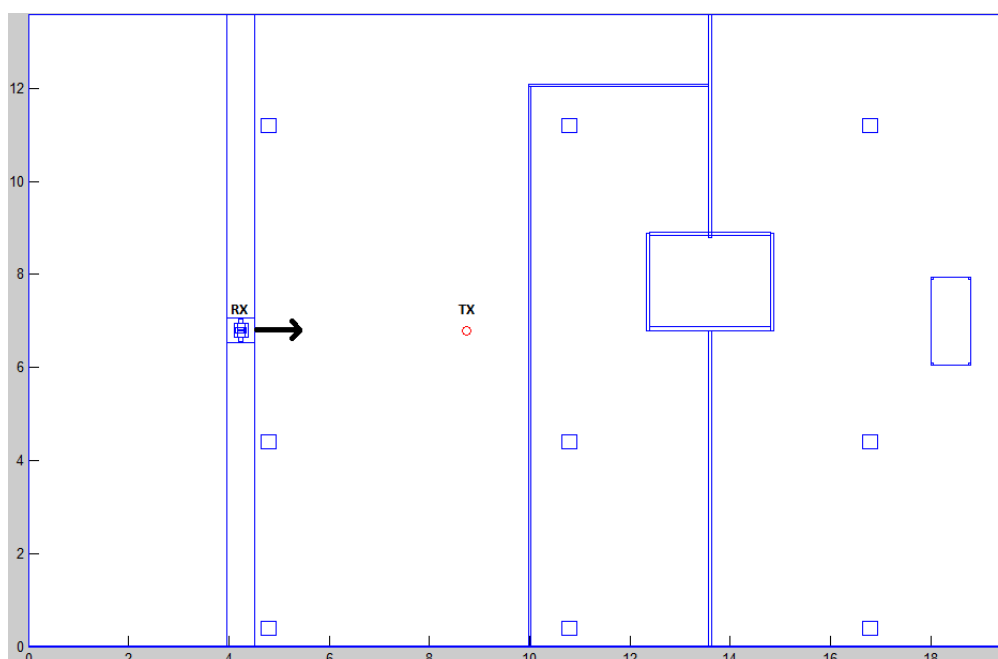


Figura 3.53. Persona (puntos Rx) de frente a antena Tx.

ANTENA RX	POTENCIA RECIBIDA (TRAZADO DE RAYOS)	POTENCIA RECIBIDA (MEDIDAS IN SITU)
Tobillo (0.16 m)	-46.18 dBm	-42.35 dBm
Muñeca (0.84 m)	-49.21 dBm	-44.39 dBm
Pecho (1.27 m)	-48.11 dBm	-44.43 dBm

Tabla 3.7. Resultados de *MEDIDAS 2 - CASO 1* comparados con los obtenidos en simulación con el software de trazado de rayos.

Por lo que se puede asegurar que el trazado de rayos se aproxima a la realidad de forma satisfactoria.

4.4.2.- CASO 2: Antena Tx situada en cuerpo humano.

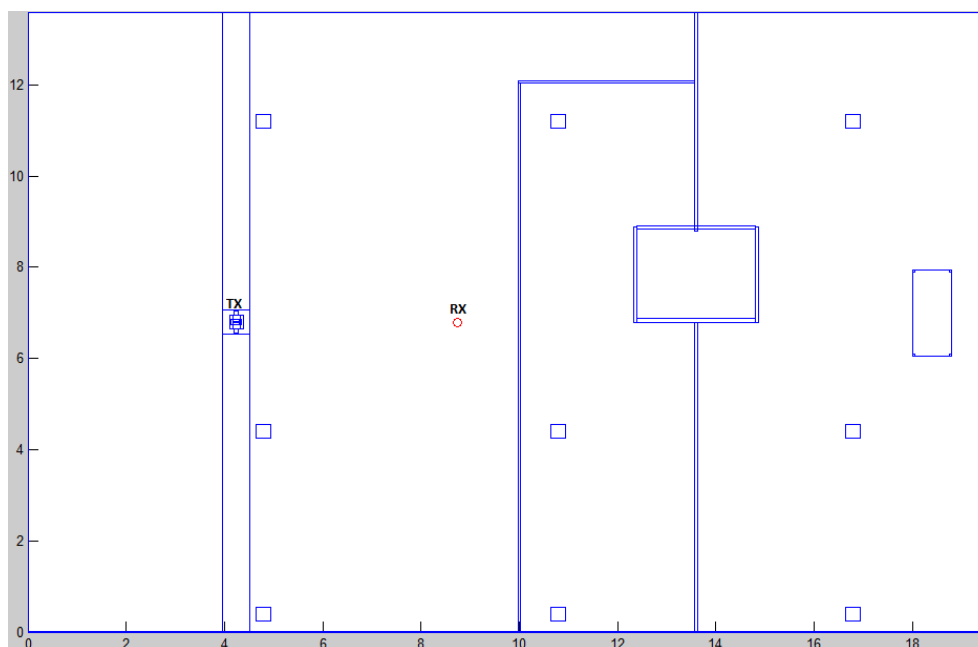


Figura 3.54. Disposición Tx-Rx.

En este caso la antena transmisora se encuentra situada en el pecho del individuo (1.27m), mientras que la antena receptora pasa a ser el círculo rojo que se muestra en la figura superior (3.54).

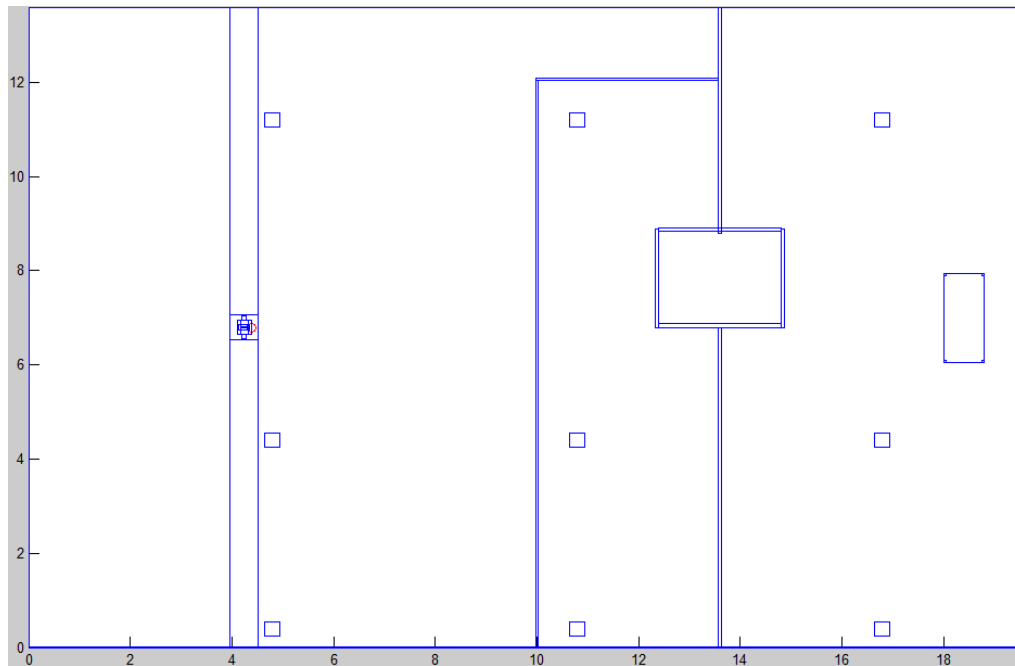


Figura 3.55. Antena Tx situada en el pecho del individuo.

Tras el proceso de simulación se extrae el siguiente reparto de potencia recibida en el plano correspondiente a la altura del pecho donde se encuentra situada la antena Tx. Además de observar las atenuaciones de potencia debidas a la propagación indoor de la señal, se puede percibir a golpe de vista (comparando con las gráficas del CASO 1) como afecta en la propagación que la antena transmisora se encuentre sobre el cuerpo humano.

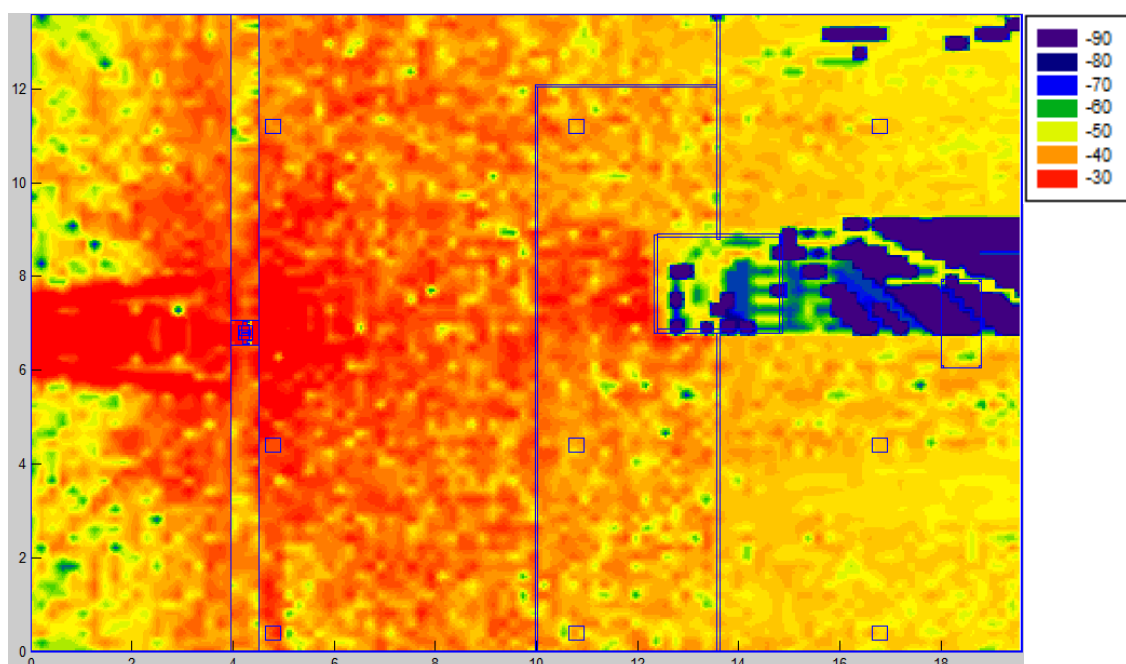


Figura 3.56. Distribución de potencia recibida (en dBm) a 1.27 m de altura.

A continuación se toman también los datos de la distribución de potencia, pero en este caso se escoge una radial a diferentes alturas, atravesando la sala de un extremo a otro. En este camino también se puede observar la transmisión de la señal desde el cuerpo humano (donde se encuentra la antena Tx) hasta la antena receptora.

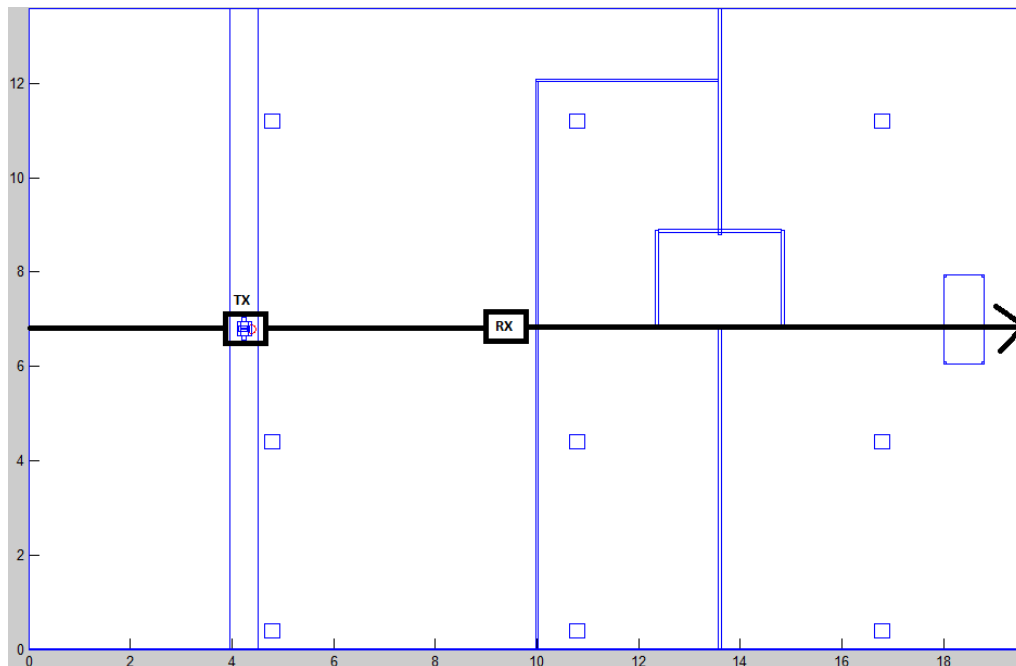


Figura 3.57. Radial que atraviesa el eje x de la planta.

La antena Tx se encuentra situada a 1.27 metros de altura (en el pecho) y a una distancia en la sala de 4.39 metros, mientras que la antena Rx lo hace en 8.8 metros.

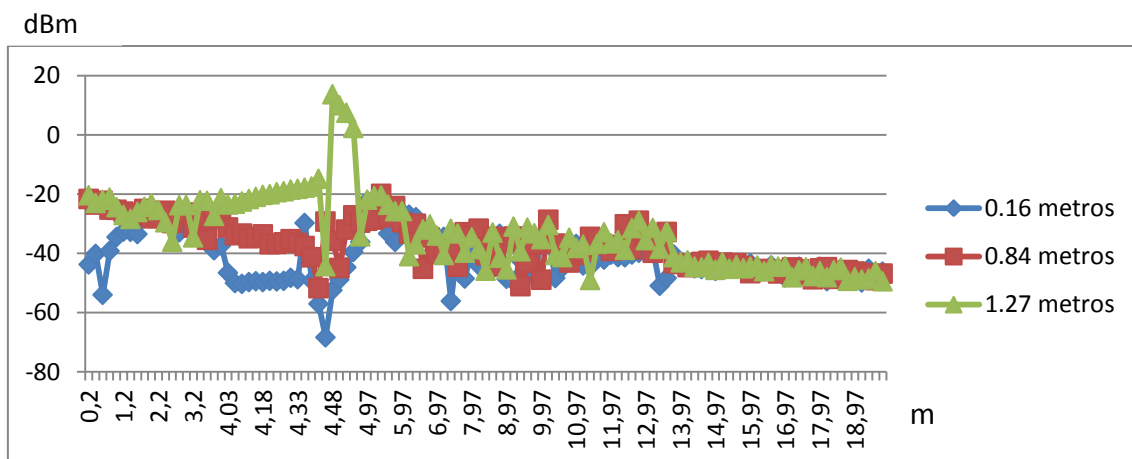


Figura 3.58. Potencia Recibida (dBm) en cada punto del radial eje x.

A simple vista se puede apreciar en la figura 3.58 el pico de potencia en la línea verde, correspondiente al lugar donde se encuentra la antena Tx. Y cómo en ese mismo punto las líneas azul y verde correspondientes a la muñeca y tobillo experimentan una atenuación de potencia debido a la influencia que ejerce el cuerpo humano.

Este escenario concreto, como ya se ha comentado, consta de una antena Tx sobre el pecho de la persona y ésta se encuentra situada de frente a la antena Rx.

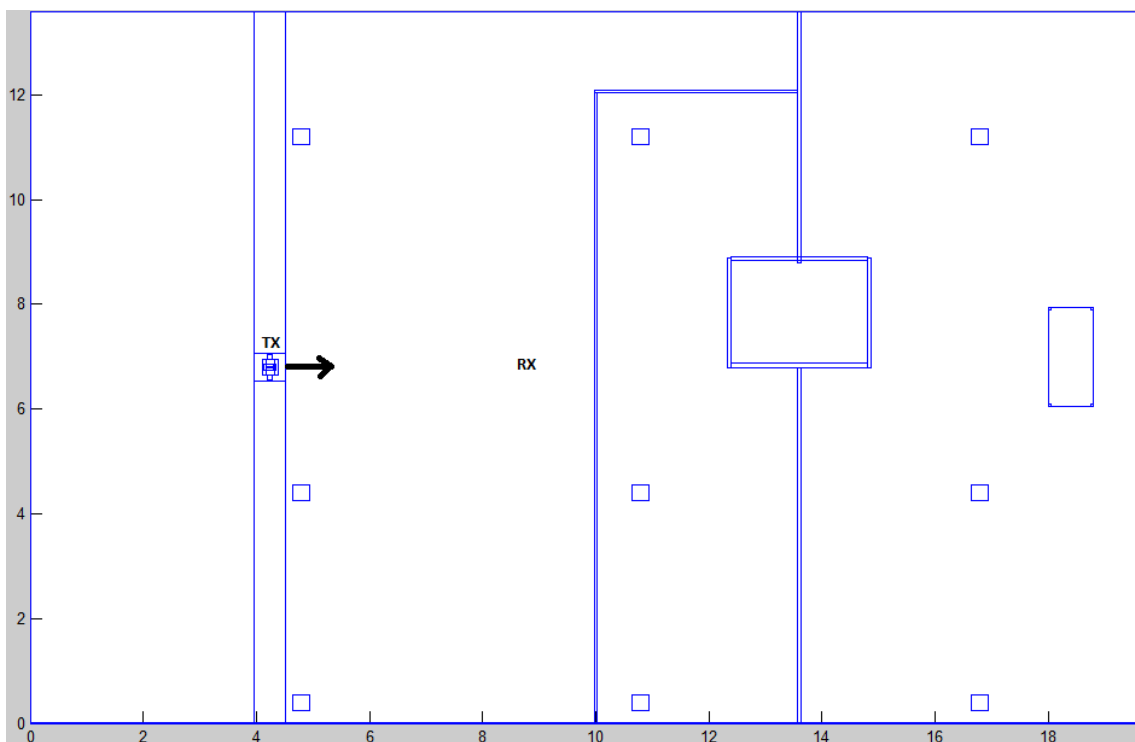


Figura 3.59. Escenario Tx-Rx.

Durante la realización del proyecto se ha realizado mucha más casuística variando la posición de la antena a otras partes del cuerpo (muñeca y tobillo) y también variando la orientación de la persona en cuestión (como se ha explicado en el punto 4.2). Todos estos resultados se pueden ojear en el ANEXO VI.

Los datos obtenidos en las simulaciones para la orientación que se indica en la figura 3.59, se comparan en la siguiente tabla con los resultados conseguidos en medidas reales.

ANTENA TX	POTENCIA RECIBIDA (TRAZADO DE RAYOS)	POTENCIA RECIBIDA (MEDIDAS IN SITU)
Tobillo (0.16 m)	-48.22 dBm	-54.17 dBm
Muñeca (0.84 m)	-45.10 dBm	-53.74 dBm
Pecho (1.27 m)	-45.30 dBm	-52.76 dBm

Tabla 3.8. Resultados de *MEDIDAS 2 - CASO 2* comparados con los obtenidos en simulación con el software de trazado de rayos.

En esta orientación (de frente a la antena) es donde se han obtenido los datos más altos de potencia recibida. También se puede afirmar que como en el caso anterior, los resultados son tremendamente similares, con lo que se puede asegurar que el software de trazado de rayos es una herramienta que sin duda ofrece muchas garantías a la hora de realizar simulaciones *indoor* de redes inalámbricas de área personal (WBANs).

5.-Conclusiones

Las conclusiones que se han extraído del proyecto son las siguientes:

- Debido a las características de propagación *indoor* es complicado determinar las posiciones de colocación del transmisor y receptor para obtener una recepción óptima de la señal.
- La presencia de una persona en el escenario influye en gran medida en la propagación de la señal. Si el transmisor es colocado sobre el cuerpo, los primeros rayos emitidos experimentan la absorción proporcionada por el mismo cuerpo, lo que atenúa la señal y por tanto llega en menor nivel a la recepción. Esto también significará un aumento del PER, reduciendo la calidad de enlace Tx-Rx y por tanto una mayor pérdida de paquetes durante la transmisión.
- La potencia recibida está estrechamente relacionada con la localización del receptor, por lo que es necesario estudiar diferentes puntos Rx para estimar cuál de ellos logra proporcionar un nivel de señal de recepción de mayor calidad, lo que mejorará la relación señal-ruido.
- La calidad de la antena también influye en la potencia recibida, ya que al realizar medidas con distintas antenas se ha comprobado.
- El software de trazado de rayos permite realizar simulaciones de innumerables escenarios proporcionando resultados de potencia recibida muy cercanos a los reales. Permite realizar un análisis intenso de las características de la red, pudiendo realizar todo tipo de pruebas para así, posteriormente, poder aplicarlo a situaciones reales.

6.-Líneas futuras

Una vez terminado este proyecto, la línea de investigación continúa. La evolución de este proyecto podría comenzar por los siguientes puntos:

- Hacer simulaciones tomando diferentes localizaciones del individuo para intentar mejorar la calidad de enlace y el PER.
- Realizar simulaciones de escenarios con varias personas.
- Situar los individuos en diferentes puntos del recinto y por tanto aumentar la complejidad de la red, estudiando cómo interfieren unas personas con otras, ya que habrá varias antenas transmitiendo al mismo tiempo.
- Realizar escenarios dinámicos con las personas en movimiento.
- Estudiar entornos más complejos donde existieran interferencias con distintas tecnologías.

7.-Bibliografía

- [1] E. Reusens, W. Joseph, *Member, IEEE*, G. Vermeeren, D. Kurup, and L. Martens, *Member, IEEE*. “*Real Human Body Measurements, Model, and Simulations of a 2.45 GHz Wireless Body Area Network Communication Channel*”.
- [2] Jae-Myeong Choi, Heau-Jo Kang, Yong-Seok Choi. *Dept. of Information Technology Eng., Graduate School, Mokwon University Radio Signal Processing Research Team, Radio Technology Research Dept.* “*A Study on the Wireless Body Area Network Applications and Channel Models*”.
- [3] Paolo Bonato. “*Wearable Sensors and systems from enabling technology to clinical applications*”.
- [4] Katrin Biltrup. “*A Preliminary Study of Wireless Body Area Networks*”.
- [5] Shahin Farahani. “*Zig Bee Wireless Network and Transceivers*”.
- [6] Drew Gislason. “*Zig Bee Wireless Networking*”.
- [7] Claude Oesteges, Danielle Vanhoenacker-Janvier and Bruno Clerckx. “*Channel Characterization of Indoor Wireless Personal Area Networks*”
- [8] Elisabeth Reusens, Wout Joseph, Benoit Latre, Bart Braem, Günter Vermeeren, Emmeric Tanghe, Luc Martens, Ingrid Moerman and Chris Blondia. “*Characterization of On-Body Communication Channel and Energy Efficient Topology Design for Wireless Body Area Networks*”.
- [9] Tam, W.K. “*Propagation modeling for indoor wireless communication*”.
- [10] Chris A. Otto, Emil Jovanov and Aleksandar Mlenkovic. “*A WBAN-based System for Health Monitoring at Home*”.

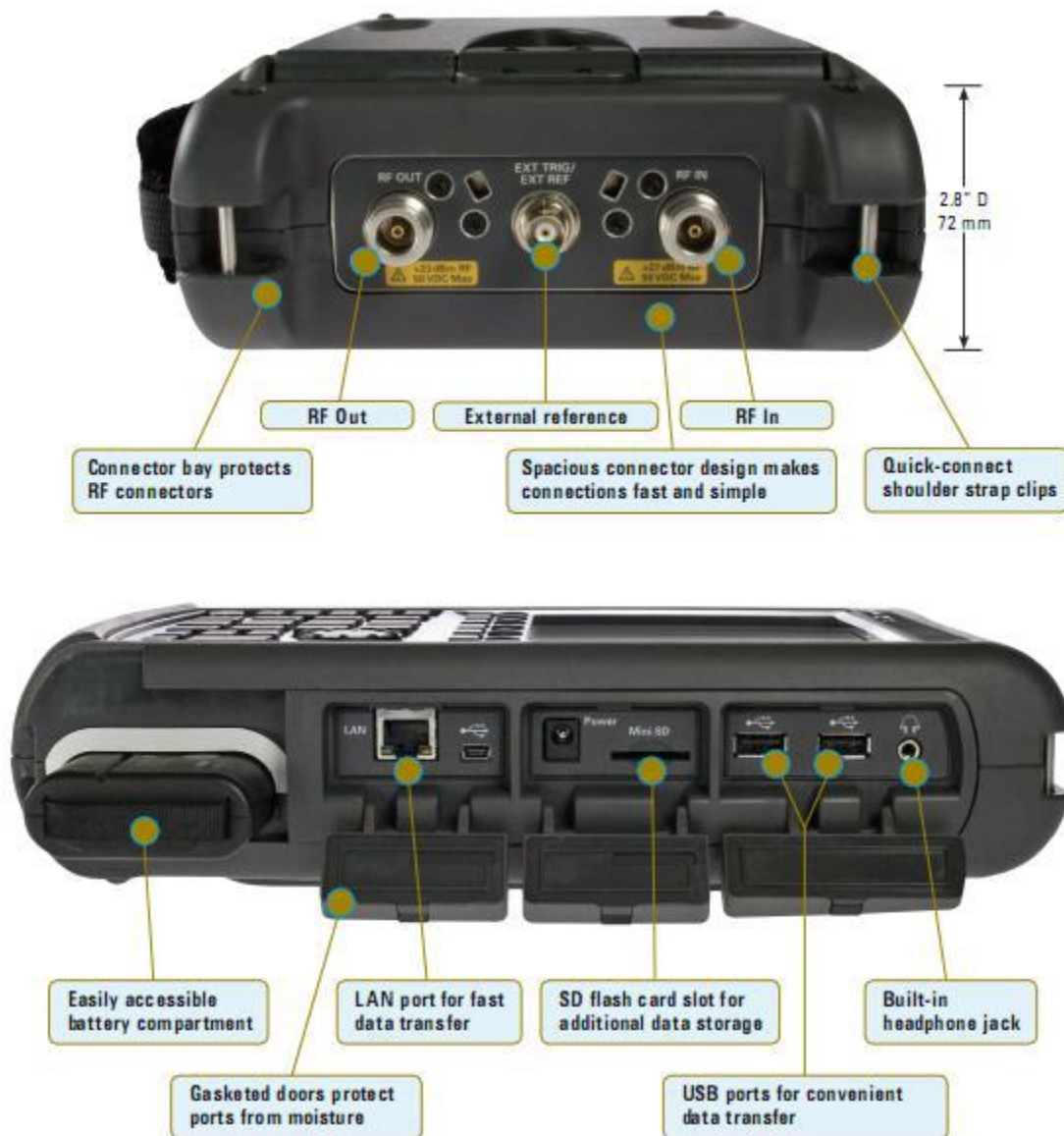
Anexo I

Ficha técnica del analizador de espectros *Agilent FieldFox N9912A*.

Key measurements:

- Cable and antenna test (distance to fault, return loss, etc.)
- Cable loss measurement
- Insertion loss and transmission measurement
- Spectrum analyzer
- Power meter with USB power sensor
- Vector network analysis with Smith chart display





Specifications:

Warranted performance. Specifications include guard bands to account for the expected statistical performance distribution, measurement uncertainties, and changes in performance due to environmental conditions. The following conditions must be met:

- FieldFox has been turned on at least 90 minutes
- FieldFox is within its calibration cycle
- Storage or operation at $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ range
(unless otherwise stated)

Cable and antenna analyzer

Frequency			
Frequency range	2 MHz to 4 GHz		
	2 MHz to 6 GHz		
Frequency reference	Accuracy ± 2 ppm		
	Aging rate ± 1 ppm/yr		
	Temperature stability ± 1 ppm over -10 to 55 °C		
Frequency resolution	2 MHz to 1.6 GHz 2.5 kHz		
	> 1.6 GHz to 3.2 GHz 5 kHz		
	> 3.2 GHz to 6 GHz 10 kHz		
Measurement speed	Return loss	1.5 ms/point (nominal)	1.75 GHz to 3.85 GHz, 1001 points, Cal ON
	Distance to fault	2.4 ms/point (nominal)	0 to 500 ft, 601 points, Cal ON
Data points	101, 201, 401, 601, 801, 1001		
Directivity	Corrected	> 42 dB	
	QuickCal	> 42 dB (typical)	
Source match	Corrected	> 36 dB	
	QuickCal	≥ 35 dB (typical)	
Reflection tracking	Corrected \pm	0.06 dB	
	QuickCal \pm	0.15 dB (typical)	

Dynamic range		
Reflection (RF Out port)	2 MHz to 4 GHz	60 dB (typical)
	> 4 GHz to 6 GHz	55 dB (typical)
Transmission measurement	2 MHz to 2 GHz	72 dB (typical)
	> 2 GHz to 4 GHz	67 dB (typical)
	> 3 GHz to 5 GHz	58 dB (typical)
	> 5 GHz to 6 GHz	49 dB (typical)
Output power range	High power	
	2 MHz to 4 GHz	< +8 dBm, +6 dBm (nominal)
	> 4 GHz to 6 GHz	< +7 dBm, +2 dBm (nominal)
	Low power	
	2 MHz to 4 GHz	< -23 dBm, -25 dBm (nominal)
	> 4 GHz to 6 GHz	< -24 dBm, -25 dBm (nominal)
Maximum input level (RF Out port)	+23 dBm	
Maximum input DC voltage (RF Out port)	± 50 VDC	

Cable and antenna measurements				
Return loss	Display range	0 to 100 dB		
	Resolution	0.01 dB		
VSWR	Display range	0 to 100		
	Resolution	0.01		
Distance to fault (DTF)	• Range	$= (\text{number of points} - 1) / (\text{span}^2) \times V_f$ (velocity factor in cable) $\times c$ (light speed)		
	• Resolution	$= \text{range} / (\text{number of points} - 1)$		
	• Number of points	101, 201, 401, 601, 801, 1001,	reflection coefficient	
	• Distance to fault display	Return loss, VSWR		
Transmission measurement	Frequency range	2 MHz to 4 GHz (Option 104)		
		2 MHz to 6 GHz (Option 106)		
	Dynamic range	2 MHz to 2 GHz	72 dB (typical)	
		2 GHz to 3 GHz	67 dB (typical)	
		> 3 GHz to 5 GHz	58 dB (typical)	
		> 5 GHz to 6 GHz	49 dB (typical)	

Network analysis

Network análisis	
S11	Vector measurement, S11 magnitude and S11 phase. Specification is listed under Cable and antenna analyzer section (S11/Return loss).
S21	Scalar measurement, S21 magnitude. Specification is listed under transmission measurement. S21 requires Option 110 transmission measurement.
A	Reflected power
R	Source power
Display	Log, linear, phase, VSWR, Smith chart, polar, group delay
Calibration types	Mechanical cal, QuickCal, Normalization, Automatic cal update with frequency change or number of points change
IF bandwidth selections	300 Hz, 1 kHz, 3 kHz, 10 kHz and 30 kHz

Spectrum analyzer

Frequency			
Frequency range	Option 104	100 kHz to 4 GHz, usable to 5 kHz	
	Option 106	100 kHz to 6 GHz, usable to 5 kHz, tunable to 6.1 GHz	
Frequency reference	Accuracy	±2 ppm	
	Frequency aging	± 1 ppm/yr	
	Frequency reference Temperature stability	± 1 ppm over -10 to 55 °C	
Frequency readout accuracy	± (readout frequency x frequency reference accuracy + RBW centering + 0.5 x horizontal resolution)		
Frequency span	Range	0 Hz (zero span), 10 Hz to maximum frequency	
	Span accuracy	±(2 x RBW centering + horizontal resolution)	
	Span resolution	1 Hz	
Resolution bandwidth (RBW)	Range (-3 dB bandwidth)	Zero span	300 Hz to 1 MHz in 1-3-10 sequence; 2 MHz
		Non-zero span	10 Hz to 300 kHz in 1/1.5/2/3/5/7.5/10 sequence; 1 MHz, 2 MHz
	Accuracy	1 kHz to 1 MHz: ± 5% (nominal)	
		10 Hz to 100 KHz non-zero span: ± 1% (nominal)	
		2 MHz: ± 10% (nominal)	
Selectivity (-60 dB/ -3 dB)	300 Hz zero span: ± 10% (nominal)		
4:1 (nominal)			
Video bandwidth (VBW)	Range	1 Hz to 2 MHz in 1/1.5/2/3/5/7.5/10 sequence	
Stability	Noise sidebands, CF = 1 GHz	10 kHz offset: -88 dBc/Hz (typical)	
		30 kHz offset: -89 dBc/Hz, (typical)	
		100 kHz offset: -95 dBc/Hz, (typical)	
		1 MHz offset: -115 dBc/Hz, (typical)	
Sweep acquisition, span > 0 Hz	Range	1 to 5000, number of data acquisitions per trace point; value is normalized to the minimum required to achieve amplitude accuracy with CW signals	
	Resolution	1	
	Readout	Measured value representing time required to tune receiver, acquire data, and process trace	
Trace updates	Span = 20 MHz, RBW = 3 kHz	1.5 updates/second	
	Span = 100 MHz, RBW auto coupled	7 updates/second	
	Span = 6 GHz, RBW auto coupled	1 update/second	
Trace points	101, 201, 401, 601, 801, 1001 points, default is 401		

Amplitude				
Measurement range	Displayed average noise level (DANL) to +20 dBm			
Input attenuator range	0 to 31 dB, 1 dB stops			
Maximum DC voltage at RF In port	±50 VDC			
Maximum input power at RF In port	+27 dBm (0.5 W)			
Displayed average noise level (DANL)	Preamplifier OFF	20 to 30 °C	10 MHz to 2.4 GHz	-130 dBm (typical)
			> 2.4 GHz to 5.0 GHz	-125 dBm (typical)
			> 5.0 GHz to 6.0 GHz	-119 dBm (typical)
	Preamplifier ON	20 to 30 °C	10 MHz to 2.4 GHz	-148 dBm (typical)
			> 2.4 GHz to 5.0 GHz	-145 dBm (typical)
			> 5.0 GHz to 6.0 GHz	-138 dBm (typical)
		-10 to 55 °C	10 MHz to 2.4 GHz	< -141 dBm
			> 2.4 GHz to 5 GHz	< -138 dBm
> 5 GHz to 6 GHz	< -130 dBm			
Total absolute amplitude accuracy	20 to 30 °C	2 MHz to 10 MHz	±1.8 dB ±0.60 dB (typical)	
		> 10 MHz to 3.0 GHz	±1.5 dB ±0.50 dB (typical)	
		> 3.0 GHz to 5.0 GHz	±1.9 dB ±0.60 dB (typical)	
		> 5.0 GHz to 6.0 GHz	±2.1 dB ±0.60 dB (typical)	
Second harmonic distortion (SHI)	2 MHz to 1.35 GHz		< -70 dBc, +40 dBm SHI (nominal)	
	1.35 GHz to 3.0 GHz		< -80 dBc, +50 dBm SHI (nominal)	
Residual responses	20 MHz to 3 GHz		-90 dBm (nominal)	
	> 3 GHz to 6 GHz		-85 dBm (nominal)	
Spurious responses	Input mixer level -30 dBm	RFsig = RFtune + 417 MHz -70 dBc (nominal)		
		RFsig = RFtune + 1.716 GHz -80 dBc (nominal)		
	Input mixer level -10 dBm, first IF image response	RFsig = RFtune - 2 x 0.8346 GHz, for RFtune 5.7 to 6.0 GHz		-50 dBc (nominal)
	Sidebands	-80 dBc (nominal)		
-60 dBc (nominal) when battery charging, 260 kHz Offset				
Reference level	Range	-170 dBm to +30 dBm		
	Resolution	0.1 dB		
	Accuracy	0 dB (no error)		
Traces	4 traces, data/max/average/min			
Trigger	External, video trigger, FFT gating with video (IF envelope) trigger			

Independent signal source						
Frequency range	2 MHz to 4 GHz (Option 230) or 2 MHz to 6 GHz (Option 231)					
Amplitude	High power	2 MHz to 4 GHz	< +8 dBm, +6 dBm (nominal) dBm (nominal)	Low power	2 MHz to 4 GHz	<-23 dBm, -25 dBm (nominal)
		>4 GHz to 6 GHz	<+7 dBm, +2 dBm (nominal)		>4 GHz to 6 GHz	< -24 dBm, -29 dBm (nominal)
	Attenuation		0 to 31 dB			
	Functions		Continuous wave, stimulus / response			

Power meter measurement	
Frequency range	9 kHz to 24 GHz (sensor dependent)
USB power sensor	9 kHz to 24 GHz

General specifications			
Connector type	Type-N (female)		
Input impedance	50 ohm		
External reference	Input type	BNC female	
	Reference frequency	10 MHz	
	Required level	-5 dBm to 10 dBm	
Display	6.5" transfl ective, color VGA LED backlit 640 x 480 with anti-glare coating		
Speaker	Built-in speaker		
Headphone jack	Built-in headphone jack		
Connectivity	2 x USB 2.0; 1 x mini USB; 1 x LAN		
Internal storage	Minimum 16 MB, up to 1000 traces		
External storage	1 x mini SD slot and 2 x USB 2.0		
EMC	Complies with European EMC Directive 2004/108/EC IEC/EN 61326-2-1), CISPR Pub 11 Group 1, Class A , AS/NZS CISPR 11, ICES/NMB-001		
ESD	IEC/EN 61000-4-2, functional up to 20 kV test		
Safety	Complies with European Low Voltage Directive 2006/95/EC: IEC/EN 61010-1 2nd Edition, Canada: CSA C22.2 No. 61010-1-04, USA: UL 61010-1 2nd Edition		
Environmental	Humidity	95% at 40 °C	
	Temperature	Operating	-10 °C to +55 °C
Non-operating		-51 °C to 71 °C	
Weight	6.2 lbs / 2.8 kg including battery		
Dimensions(H x W x D)	11.5" x 7.4" x 2.8" (292 x 188 x 72 mm)		
Power	Power supply	External DC input	15 to 19 VDC

Tabla I.1. Especificaciones técnicas de analizador de espectros.

Anexo II

Ficha técnica de la antena “Picea 2.4GHz Swivel”.

Features:

- Designed for 2.4 GHz applications: Bluetooth, Wi-Fi (802.11a/b/g/n), Zig Bee, etc., as well as 2.3 GHz WiMAX, 2.5 GHz WiMAX and WiBro applications.
- Easy to integrate
- High efficiency
- Intended for snap-in mounting
- Supplied in bulk

Description:

Picea is intended for use with all 2.4 GHz applications and it has an antenna blade made of a flexible material that can be rotated 360 degrees.

The antenna is intended for snap-in mounting and it uses a ground plane in order to radiate efficiently. The ground plane must extend underneath the antenna itself.

Applications:

- Development tools
- Test equipment
- Access points, routers, etc

Part number:

Picea: B5771 (PCB thickness = 1.6 mm)

General data:

Product name	Picea 2.4 GHz
Part Number	B5771
Frequency	2.4 – 2.5 GHz
Polarization	Linear
Operating temperature	-40 °C to +85 °C
Impedance with matching	50 Ω
Weight	3.3 g
Antenna type	Swivel
Dimensions	14.9 x 12 x 48 [mm]

Tabla II.1. Datos generales de la antena.

Note: Picea is not intended for outdoor use or applications.

Electrical characteristics:

	Typical performance	Conditions
Peak gain	2.1 dBi	All data measured on Antenova's reference board, part number B5771-U1 Data given for the 2.4 – 2.5 GHz frequency range
Average gain	-1.5 dBi	
Average efficiency	70%	
Maximum Return Loss	-12 dB	
Maximum VSWR	1.7:1	

Tabla II.2. Características eléctricas de la antena.

Antena patterns:

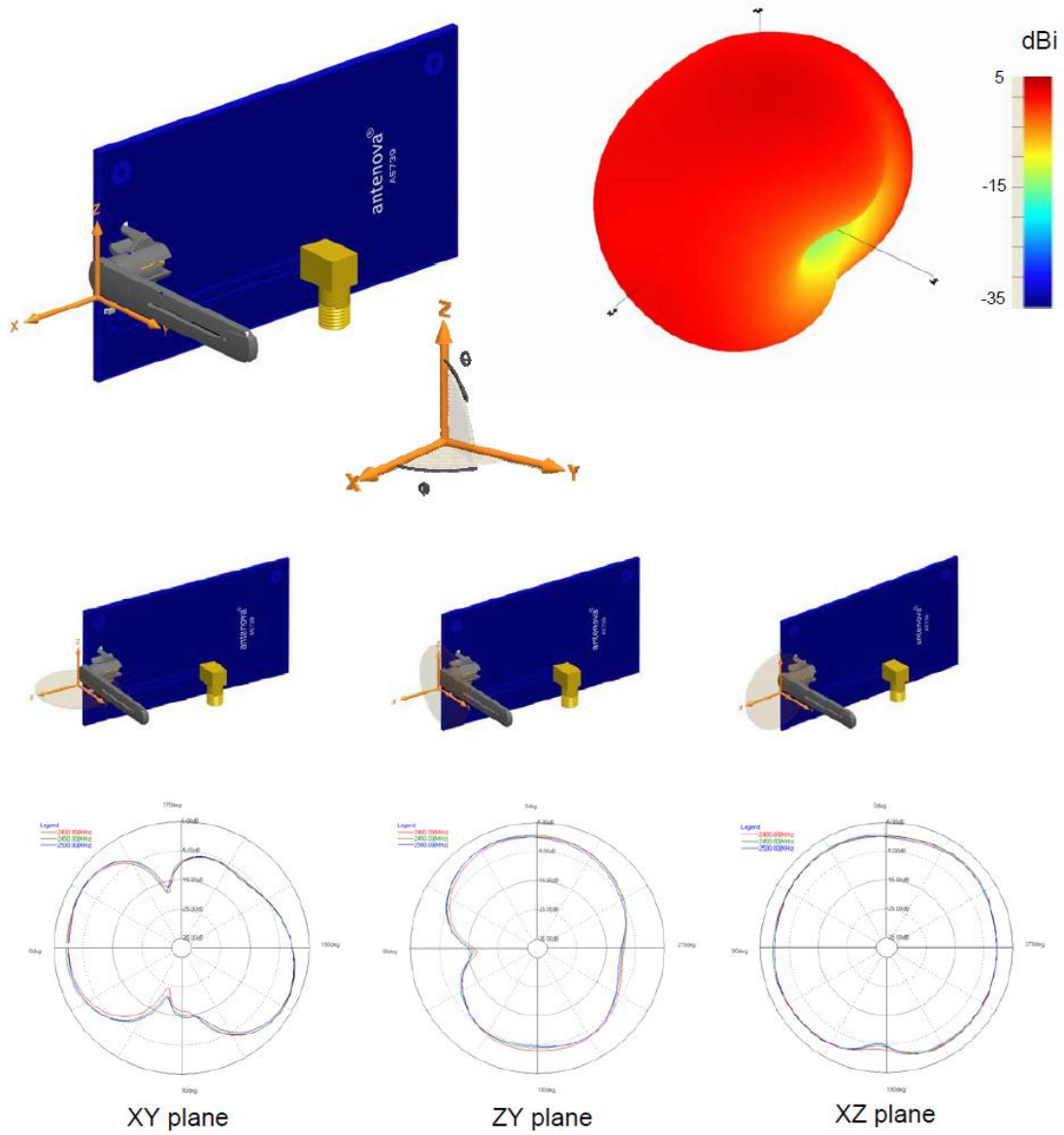


Figura II.1. Patrones de radiación de la antena.

Antenna dimensions:

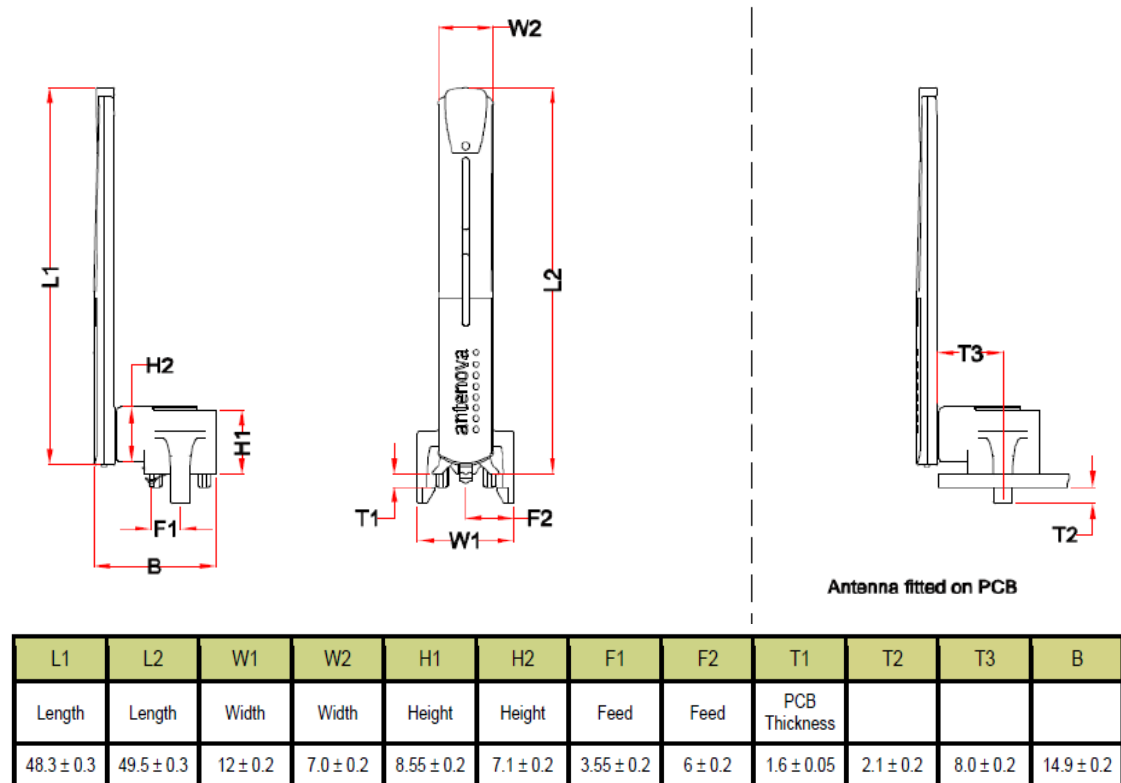
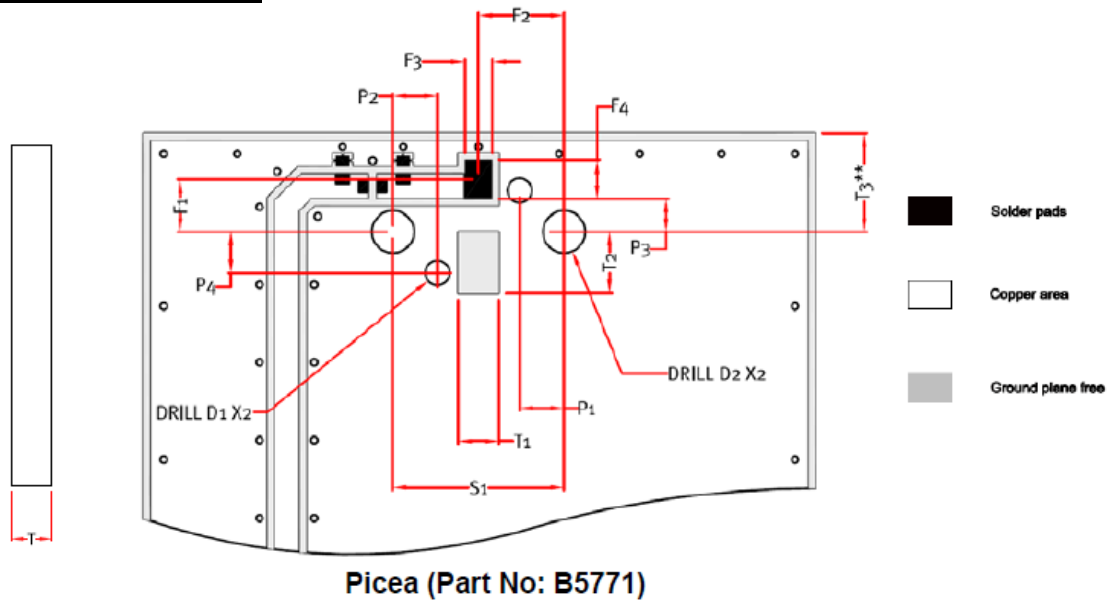


Figura II.2. Dimensiones de la antenna.

Antenna footprint:



F1	F2	F3	F4	S1	P1/P2	P3/P4	D1	D2	T	T1	T2	T3
Feed	Feed	Feed	Feed	Snap-in	Position	Position	Diameter	Diameter	PCB Thickn.			
4 ± 0.1	6 ± 0.1	2 ± 0.1	2.25 ± 0.1	12.5 ± 0.1	3.25 ± 0.1	3.0 ± 0.1	1.8 ± 0.1	3.1 ± 0.1	1.6 ± 0.1	3.0 ± 0.1	4.5 ± 0.1	Max 7.2

Dimensions in mm

Figura II.3. Huella de la antenna.

Electrical interface:

Transmission lines:

- All transmission lines should be designed to have a characteristic impedance of 50 ohms.
- The length of the transmission lines should be kept to a minimum.
- Any other parts of the RF system like transceivers, power amplifiers, etc, should also be designed to have an impedance of 50 ohms.

Once the material for the PCB has been chosen (PCB thickness and dielectric constant), a coplanar transmission line can easily be designed using any of the commercial software packages for transmission line design. For the chosen PCB thickness, copper thickness and substrate dielectric constant, the program will calculate the appropriate transmission line width and gaps on either side of the track so the characteristic impedance of the coplanar transmission line is 50 ohms.

Matching circuit:

The antenna requires a matching circuit that must be optimized for each customer's product. The matching circuit will require up to three components and the following pad layout should be designed into the device so the correct circuit can be installed:

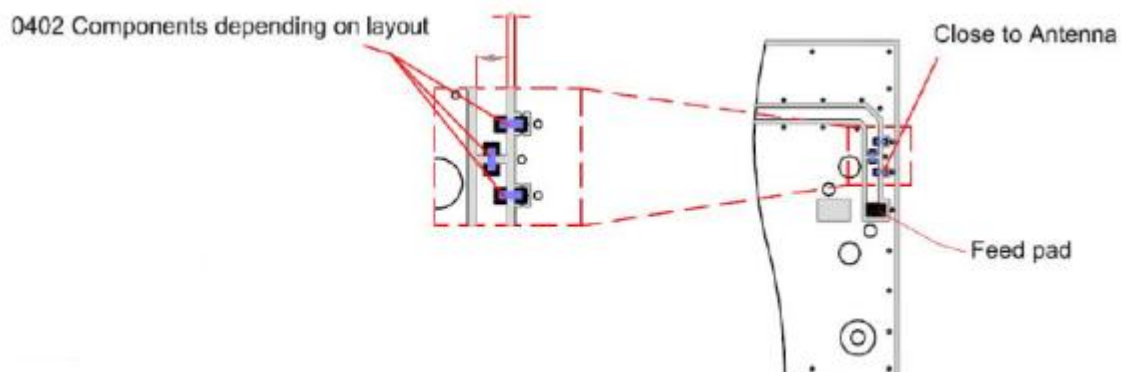


Figura II.4. Circuito de la antena.

In addition to the matching circuit, a separate DC blocking capacitor will also be required between the radio and the antenna matching circuit.

Antenna placement:

Antenova strongly recommends placing the antenna near the edge of the board.

Reference board:

The reference board has been designed for evaluation purposes of Picea 2.4 GHz and it includes a SMA female connector.

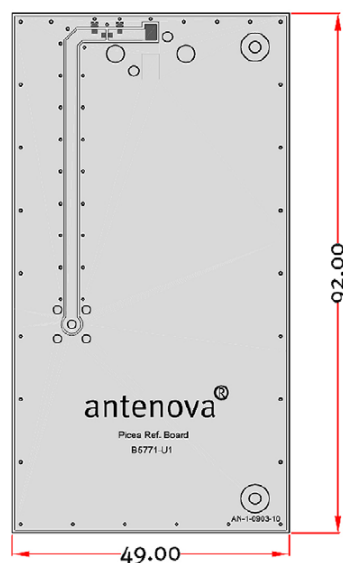


Figura II.5. Tabla de referencia de la antena.

Hazardous material regulation conformance:

The antenna has been tested to conform to RoHS requirements. A certificate of conformance is available from Antenova's website.

Packaging:

Optimal storage conditions:

Temperature	-10°C to 40°C
Humidity	Less than 75% RH
Shelf Life	48 Months
Storage place	Away from corrosive gas and direct sunlight

Figura II.6. Condiciones óptimas de embalaje de la antena.

Anexo III

Ficha técnica de los dispositivos Xbee-pro

Overview:

XBee and XBee-PRO ZB embedded RF modules provide cost-effective wireless connectivity to devices in ZigBee mesh networks. Utilizing the ZigBee PRO Feature Set, these modules are interoperable with other ZigBee devices, including devices from other vendors*.

Products in the XBee family are easy to use. They require no

configuration or additional development; users can have their network up and running in a matter of minutes.

Programmable versions of the XBee-PRO ZB module make customizing ZigBee applications easy. Programming directly on the module eliminates the need for a separate processor. Because the wireless software is isolated, applications can be developed with no risk to RF performance or security. XBee modules are available in a variety of protocols and frequencies. The common hardware footprint shared by Digi's XBee modules means users can substitute one XBee for another with minimal development time and risk.



Platform	Xbee-PRO ZB	Xbee ZB
Performance		
RF Data Rate	250 Kbps	250 Kbps
Indoor/Urban Range	300 ft (90 m)	133 ft (40 m)
Outdoor/RF Line-of-Sight Range	1 mi (1.6 km)	400 ft (120 m)
Transmit Power	50 mW (+17 dBm) / Int'l 10 mW (+10 dBm)	1.25 mW (+1 dBm) / 2 mW (+3 dBm) boost mode
Receiver Sensitivity (1% PER)	-102 dBm	-96 dBm in boost mode
Features		
Serial Data Interface	3.3V CMOS UART	3.3V CMOS UART
Configuration Method	API or AT commands, local or over-the-air	API or AT commands, local or over-the-air
Frequency Band	2.4 GHz	2.4 GHz
Interference Immunity	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
Serial Data Rate	1200 bps - 1 Mbps	1200 bps - 1 Mbps
ADC Inputs	(4) 10-bit ADC inputs	(4) 10-bit ADC inputs
Digital I/O	10	10
Antenna Options	Chip, Wire Whip, U.FL, RPSMA	Chip, Wire Whip, U.FL, RPSMA
Networking & Security		
Encryption	128-bit AES	128-bit AES
Reliable Packet Delivery	Retries/Acknowledgments	Retries/Acknowledgments
IDs and Channels	PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 13 channels	PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 16 channels
Power Requirements		
Supply Voltage	3.0 - 3.4VDC	2.1 - 3.6VDC
Transmit Current	295 mA @ 3.3VDC	35 mA / 45 mA boost mode @ 3.3VDC
Receive Current	45 mA @ 3.3VDC	38 mA / 40 mA boost mode @ 3.3VDC
Power-Down Current	<10 uA @ 25° C	<1 uA @ 25° C
Regulatory Approvals		
FCC (USA)	Yes	Yes
IC (Canada)	Yes	Yes
ETSI (Europe)	Yes (int'l unit only)	Yes
C-TICK (Australia)	Pending	Yes
Telec (Japan)	Pending (int'l unit only)	Yes

Tabla III.1. Tabla de especificaciones de los dispositivos XBee.

Features:

- Interoperability with Zig Bee compliant devices.
- No configuration needed for out-of-the-box RF communications.
- Common XBee footprint for a variety of RF modules
- Zig Bee mesh networking protocol
 - Improved data traffic protocol

- Remote firmware updates
- Self-healing and discovery for network stability
- Programmable versions of the XBee-PRO ZB enable custom ZigBee application development
 - 8-bit Feescale S08 microprocessor brings intelligence to devices
 - CodeWarrior development tools for easy customization.

Anexo IV

Software de trazado de rayos.

En este capítulo, se expondrá el funcionamiento del algoritmo de forma teórica, sin entrar en el código fuente de la implementación práctica del mismo.

El algoritmo ha sido realizado con la misión de poder evaluar las comunicaciones en un entorno interior, para ello, posee las siguientes características.

- Recreación de una propagación multitrayecto realista.
- Modelado en tres dimensiones de todo tipo de habitaciones con diferentes formas y tamaños.
- Creación de entornos complejos tan grandes como se desee, múltiples plantas, múltiples edificios.
- Caracterización y modelado de cualquier tipo de objeto (ventanas, mesas, sillas, paredes, etc.) mediante su forma tridimensional y su constante dieléctrica.
- Modelado de la reflexión y refracción.
- Cálculo de las interacciones entre los rayos y los objetos teniendo en cuenta la polarización de la onda.
- Modelado de cualquier tipo de transceptor.
- Duración de la simulación de un rayo determinado caracterizable mediante el número de rebotes y el retardo máximo.
- Análisis del escenario extrayendo parámetros tales como el campo eléctrico, la potencia, la relación señal-interferencia, el retardo potencia, la dispersión, etc.

En la programación del algoritmo se ha intentado modularizarlo lo máximo posible, por lo que el algoritmo se desarrolla en 3 fases.

Fase 1: Creación del escenario. En esta fase se crea el escenario, formado por las habitaciones, los objetos que hay en éstas y los transmisores y receptores.

Fase 2: Simulación de trazado de rayos en tres dimensiones. En esta fase se lanzan los rayos desde cada uno de los transmisores, guardando los parámetros necesarios en cada posición del espacio.

Fase 3: Análisis de los resultados. En esta fase se tratan los valores obtenidos de la simulación para obtener los parámetros deseados.

Creación del escenario:

El escenario está compuesto por cuatro variables

- Habitaciones: Esta variable posee la información necesaria para caracterizar cada una de las habitaciones y los objetos que hay en éstas.
- Interconexiones: Esta variable define la manera en la que están interconectadas las habitaciones.
- Transmisores: Posee información que caracteriza a cada uno de los transmisores.
- Receptores: Caracteriza cada uno de los receptores del escenario.

Una de las ventajas de dividir el escenario en habitaciones, es que al simularse cada habitación por separado, solo hay que tener en la memoria RAM la habitación que se está simulando en ese momento. Por tanto, da igual como de grande sea el entorno de la simulación, puesto que en memoria RAM solo será necesario tener la habitación de la simulación actual.

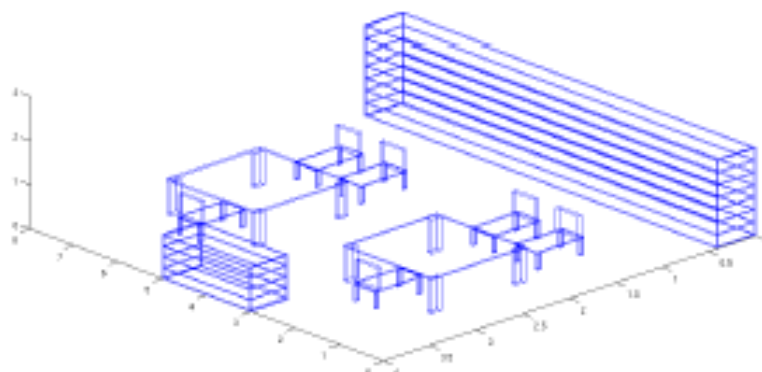


Figura IV.1. Escenario modelado en el software.

Simulación de trazado de rayos en tres dimensiones:

Una vez creado el escenario, se procede a la simulación por trazado de rayos en 3 dimensiones. En esta fase, se lanzan los rayos desde cada uno de los emisores. Estos rayos se propagan a través del espacio interactuando con los obstáculos que encuentran en su camino, provocando fenómenos físicos tales como la reflexión y la refracción, y se van almacenando los parámetros de estos rayos cuando entran en cada uno de los hexaedros de resolución hasta que el rayo ha dado un número determinado de rebotes o ha superado el tiempo de propagación previamente fijado.

El algoritmo funciona de una manera iterativa, considerando un rayo y sus reflexiones hasta que alcanza el número de rebotes o el retardo establecidos, almacenando los rayos creados por el fenómeno de la difracción para procesarlos más tarde.

Esta fase de la simulación se realiza en 3 pasos recurrentes. El primer paso consiste en coger todas las antenas de una misma habitación y meterlas al simulador. El segundo paso es simular la habitación, y en el tercer paso se transforman los rayos que salen de la habitación en nuevas antenas en otras habitaciones.

Los cálculos más importantes son:

- Cálculo del punto de impacto.
- Recorrido del punto inicial al punto de impacto guardando los parámetros.
- Cálculo del rayo reflejado.
- Cálculo del rayo transmitido.

Análisis de los resultados:

Una vez se ha simulado el escenario, se obtiene una cell de tamaño ($Resx * Resy * Resz$) y cada elemento de esta cell posee una matriz con la información de cada uno de los rayos que ha pasado por esa localización.

La información que se ha guardado de cada rayo es:

- Tiempo que ha tardado el rayo en llegar.
- Distancia recorrida por el rayo.
- Coeficiente de pérdidas en cada polarización.
- Dirección del rayo en el transmisor.
- Dirección del rayo en el receptor.
- Antena transmisora.

Además, se tiene la información referente a los transceptores:

- Potencia radiada.
- Directividad.
- Polarización.
- Frecuencia de emisión.

Anexo V

Función *fabricapersona*.

En este anexo se comentará la implementación de la función *fabricapersona*.

Esta función es capaz de generar con cubos un modelo de persona en matlab, siempre con las limitaciones de esta forma geométrica y tratándose el resultado de un modelo muy simplificado de lo que en realidad es un cuerpo humano.

La idea es que mediante la altura se pueda definir un modelo de ser humano de proporciones medias con posibilidad de variar su postura y con diferentes niveles de resolución dependiendo del experimento al que se le quiera someter.

La forma de llamar a la función es mediante el comando:

Persona=fabricapersona(x0,y0,z0,h,postura,posición,resolución)

Se introducen las siguientes variables:

x0,y0,z0 = posición del cuerpo en el escenario creado.

h = altura del modelo.

postura = postura en la que se quiere poner al modelo.

posición = dirección a la que mira el modelo.

resolución = precisión que se le quiere dar al modelo.

Variables de posición

Aquí se define dónde se situará el modelo en el escenario. El código está programado de tal forma que x_0 e y_0 sean el centro del cuerpo y que z_0 esté definido como el talón del pie y la parte más baja del modelo, de tal manera que si se quiere poner a una persona de pie en el suelo z_0 siempre tiene que valer cero.

Variable h

Aquí se introduce la altura del modelo a simular, el código está programado de tal manera que partiendo de esta altura sea capaz de generar un modelo proporcionado de forma realista.

Variable postura

Esta variable permite poner el modelo en dos posturas diferentes, sentado o de pie. Si la variable toma el valor 1, la persona se generará de pie y si la variable tiene el valor 2 la persona se generará sentada.

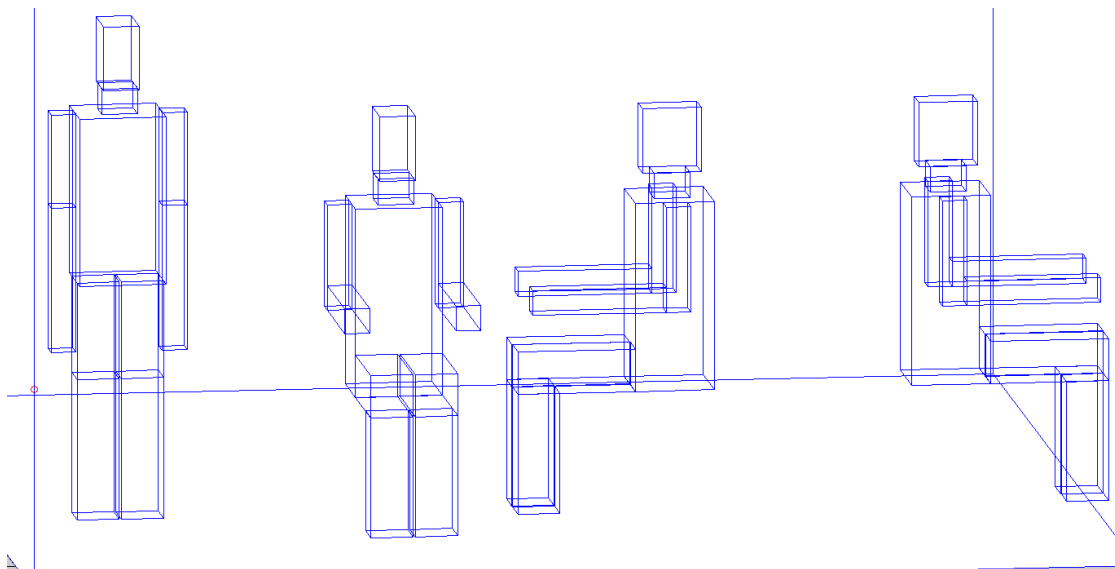


Figura V.1. Posiciones del modelo cuerpo humano.

Variable resolución

La variable resolución permite definir modelos de cuerpo humano con más o menos detalle, aumentando el detalle si se aumenta este valor. De esta manera el valor 0 genera el modelo como cubos de piel, sin ningún tipo de órgano o hueso en el interior. Si la variable toma el valor 1 se definen los huesos, si toma el valor 2, capas de piel y sangre y si toma el valor 3 se generan también órganos.

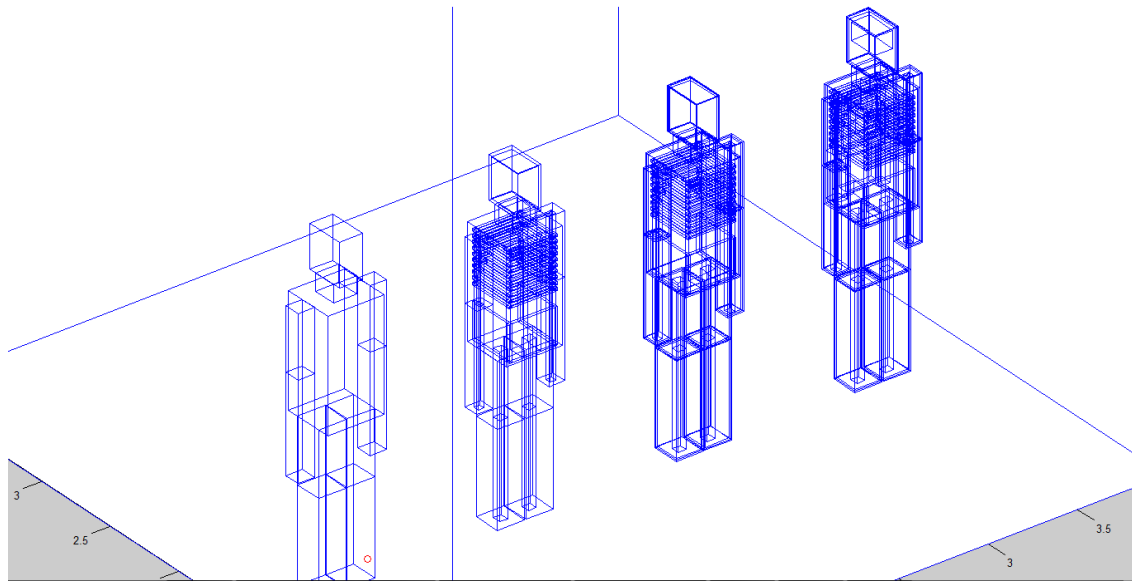


Figura V.2. Resoluciones del modelo cuerpo humano.

Anexo VI

Casuística realizada.

Se dispone de una planta de dimensiones 19.6m x 16.6m x 3.8m, formada por varias habitaciones, como se indica en la figura.

CASO 1:

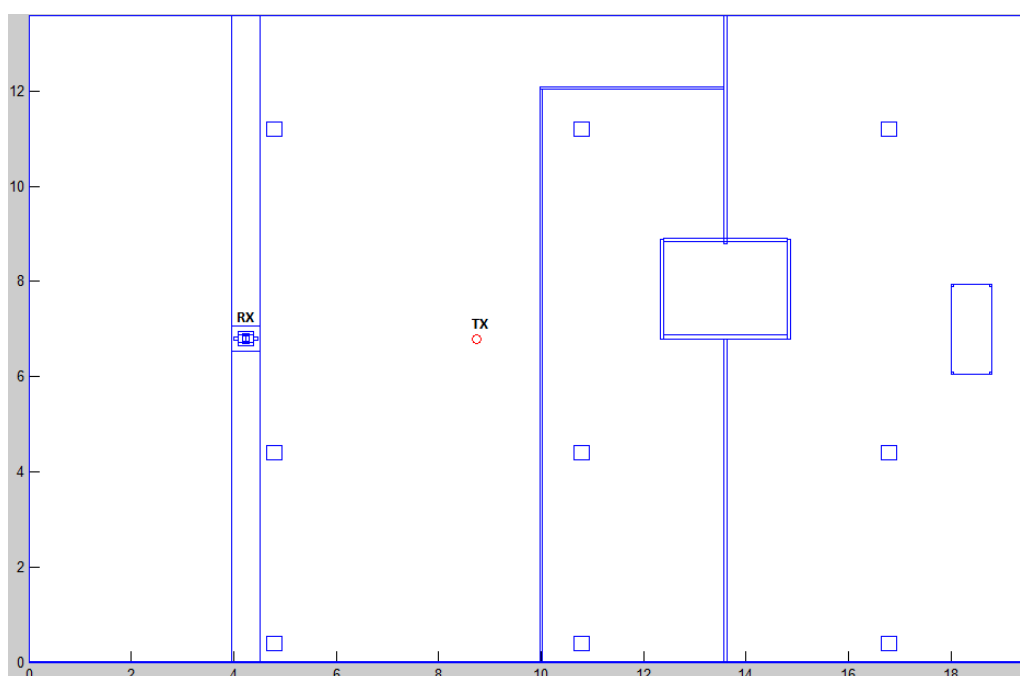


Figura VI.1. Disposición Tx-Rx.

En la sala se encuentra situada una persona que cuenta con 1,75 metros de altura y cuya posición variará dependiendo del caso a estudio, tomará posiciones de 0,90,180 y 270 grados con respecto a la antena emisora (círculo rojo situado en el dibujo superior). Esta antena tiene una potencia de 0,01 Watos, se encuentra situada a 0,7 metros de altura y opera a una frecuencia de 2,410 GHz.

El objetivo principal de estas simulaciones es estudiar en cada caso el reparto de potencia (dBm) en la sala indicada, realizando secciones en el plano z a distintas alturas de interés, dichos cortes corresponderán con la altura a la

que se encuentran los tobillos, muñecas o pecho del individuo (dependiendo del caso), por lo que de cada posición de la persona obtendremos tres simulaciones correspondientes a cada una de las tres alturas.

POSICIÓN 1: el individuo se encuentra situado a 90 grados con respecto a la antena emisora. La persona mira hacia arriba.

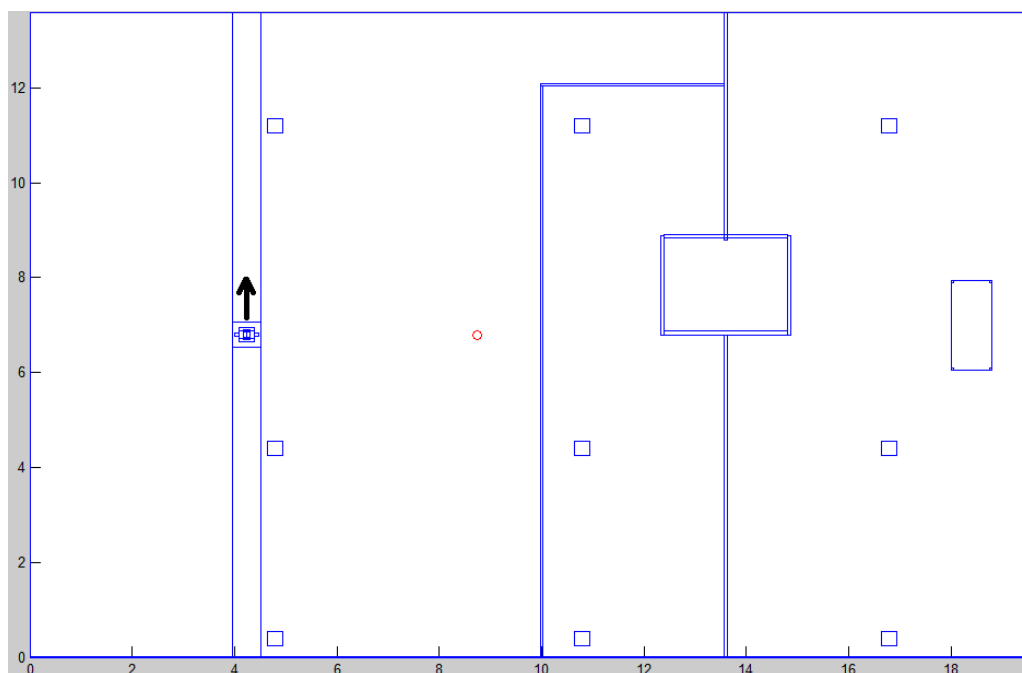


Figura VI.2. Persona situada a 90° con respecto a la antena Tx.

0.16 metros

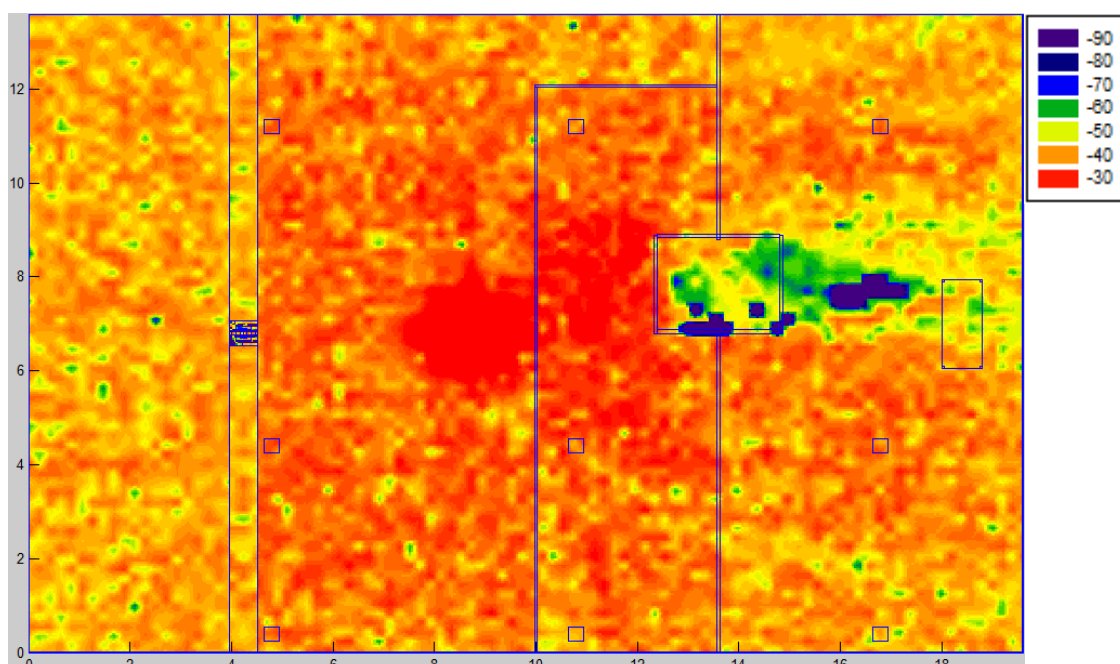


Figura VI.3. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

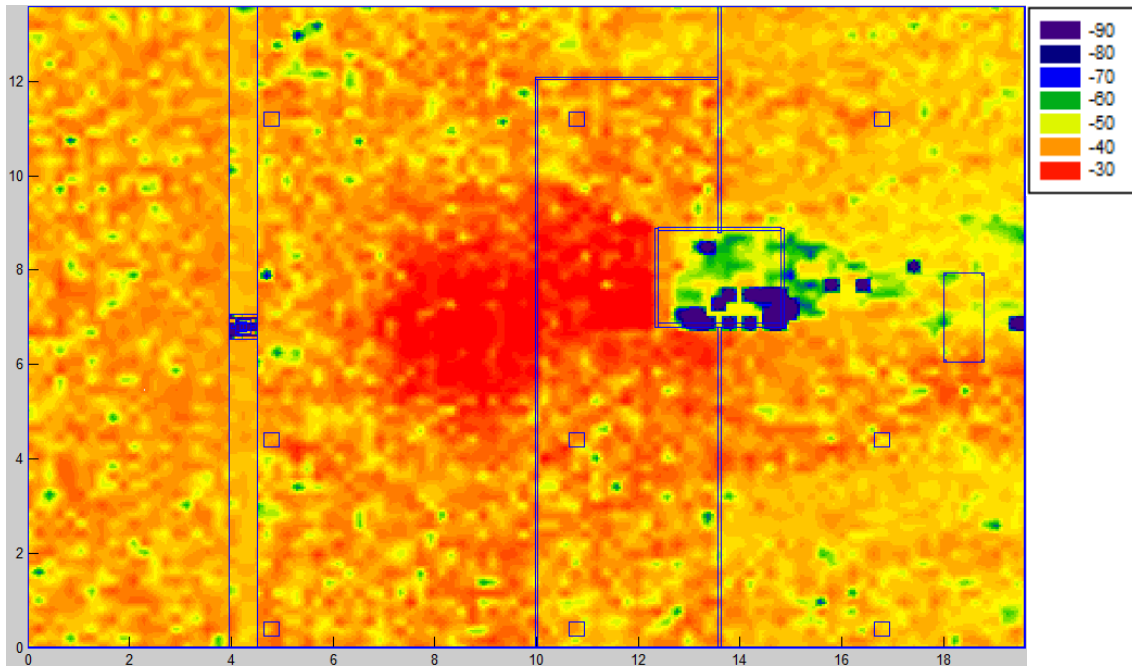


Figura VI.4. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

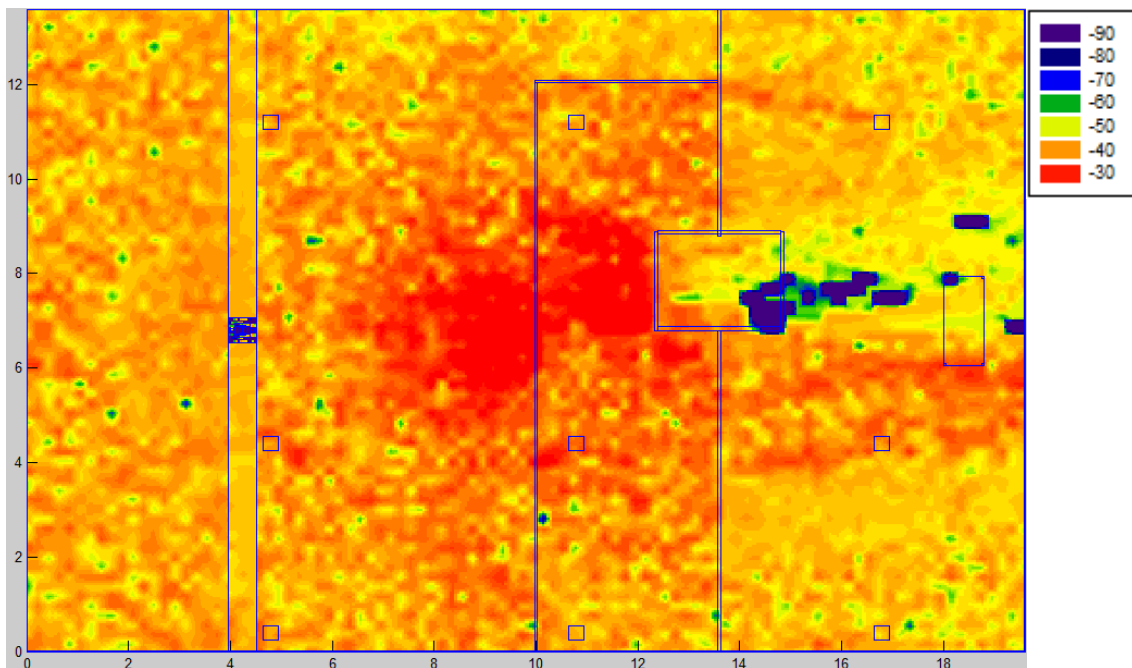


Figura VI.5. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la transmisión de potencia a diferentes alturas, desde la antena Tx hasta la antena Rx situada en distintas partes de la persona.

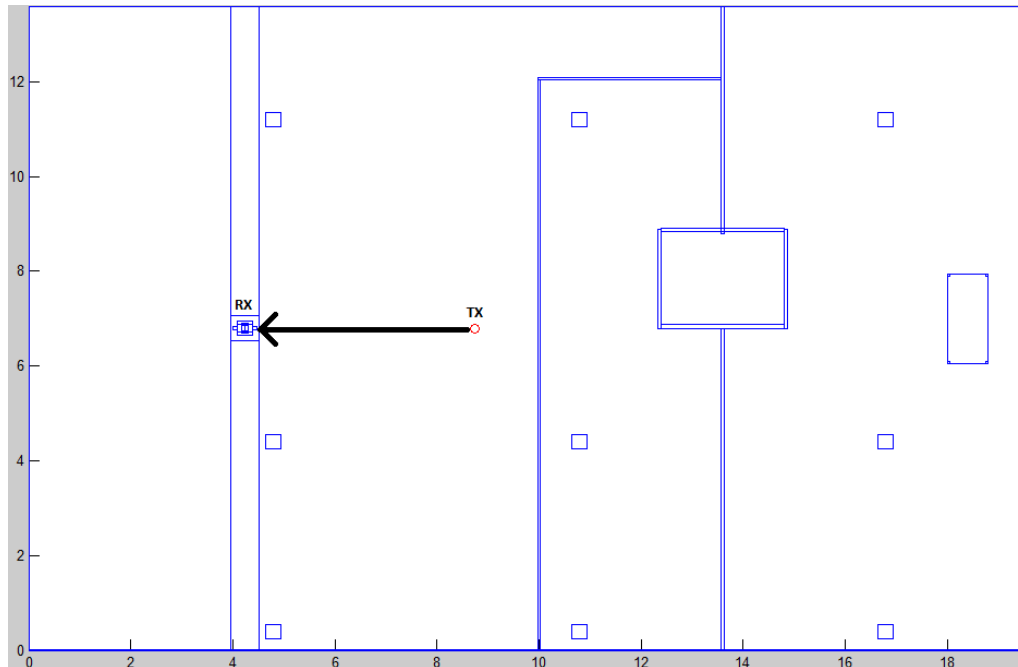


Figura VI.6. Camino Tx-Rx.

Línea azul:

Potencia desde antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en tobillo derecho ($x=4.3$ metros), a una altura de 0.16 metros.

Línea verde:

Desde antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en muñeca derecha ($x=4.4$ metros), a una altura de 0.84 metros.

Línea roja:

Desde antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en el pecho ($x=4.24$ metros), a una altura de 1.27 metros.

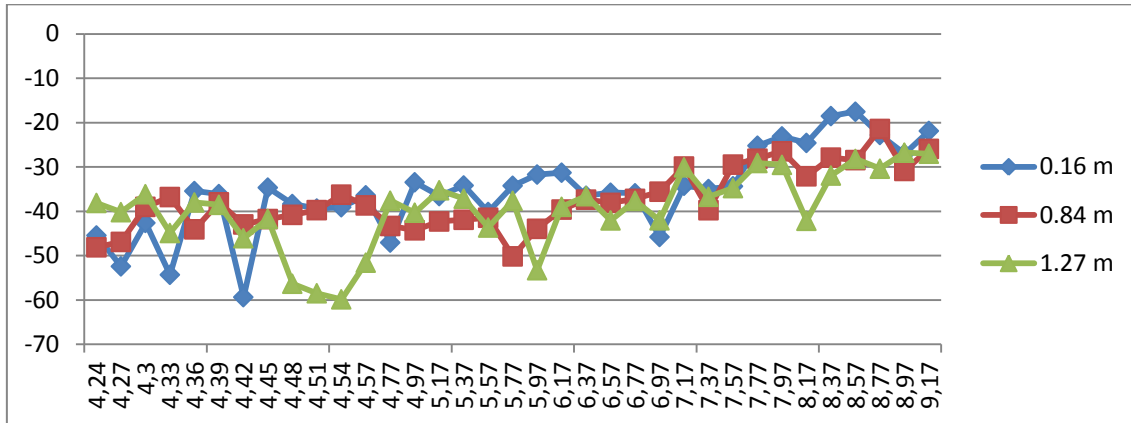


Figura VI.7. Potencia Rx ←TX.

Comparación de medidas: Se realiza una comparativa entre los valores de potencia recibida extraídos en el proceso de simulación en los diferentes puntos de recepción (antena Rx) frente a los valores extraídos en mediciones in situ en el escenario que se muestra en la figura.

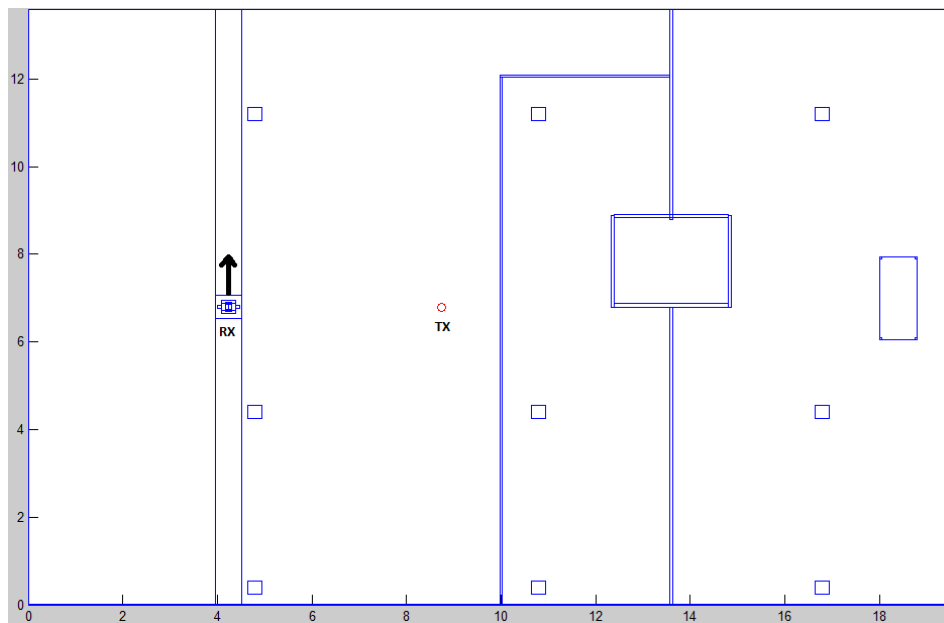


Figura VI.8. Escenario CASO 1-POSICIÓN 1.

ANTENA RX	POTENCIA RECIBIDA (TRAZADO DE RAYOS)	POTENCIA RECIBIDA (MEDIDAS IN SITU)
Tobillo (0.16 m)	-45.79 dBm	-45.82 dBm
Muñeca (0.84 m)	-45.08 dBm	-44.55 dBm
Pecho (1.27 m)	-47.21 dBm	-47.02 dBm

Tabla VI.1. Resultados CASO 1 - POSICIÓN 1 comparados.

POSICIÓN 2: el individuo se encuentra situado a 270 grados con respecto a la antena emisora. La persona mira hacia abajo.

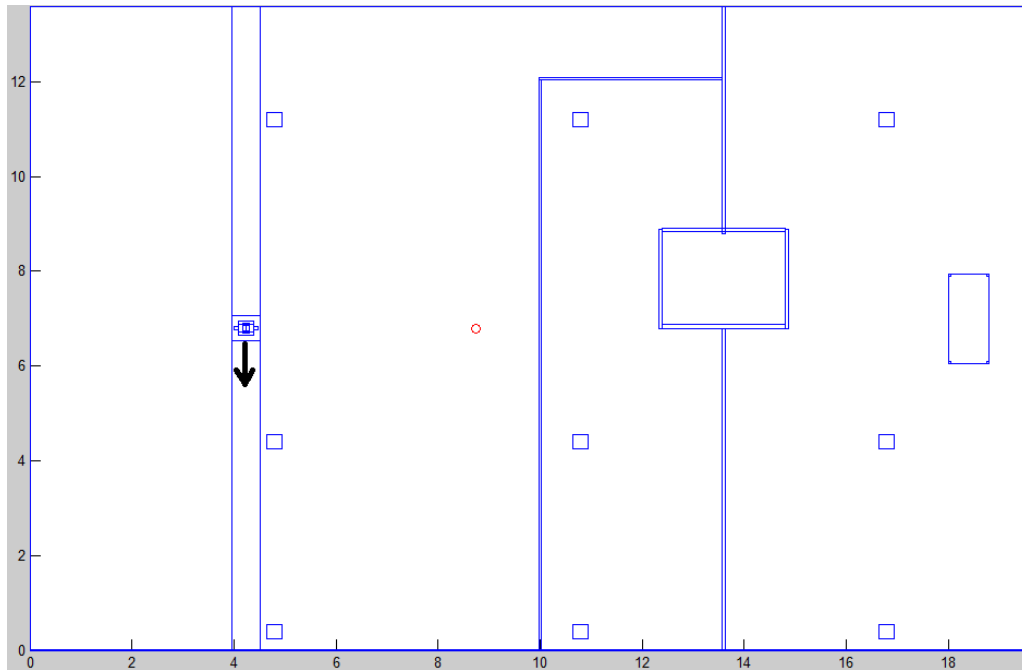


Figura VI.9. Persona situada a 270° con respecto a la antena Tx.

0.16 metros

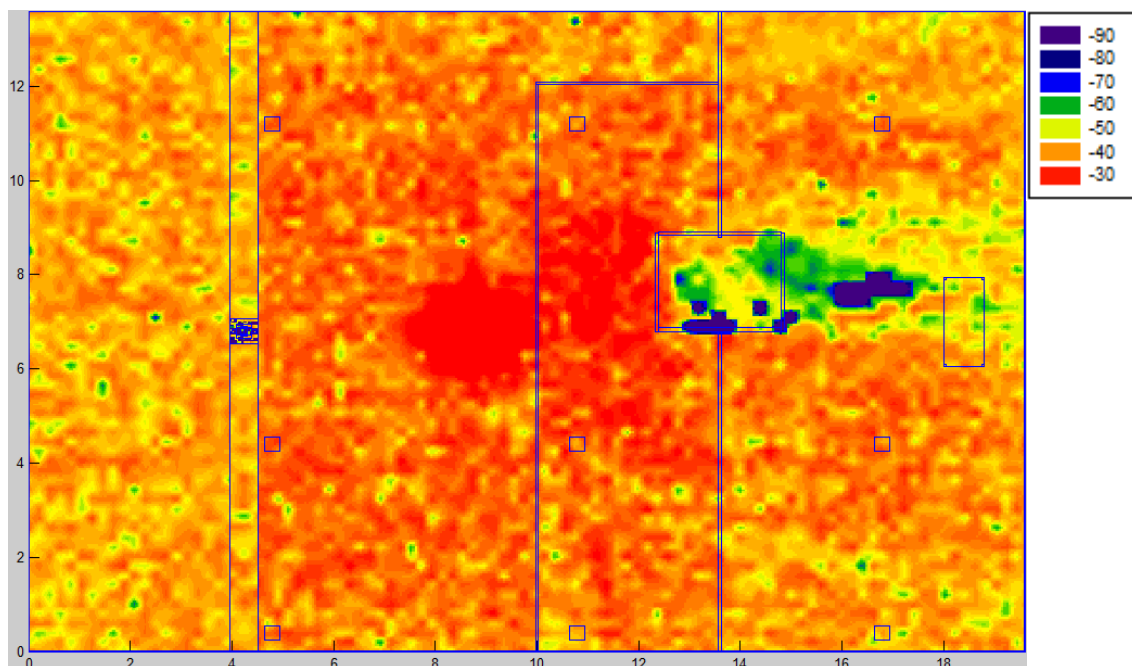


Figura VI.10. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

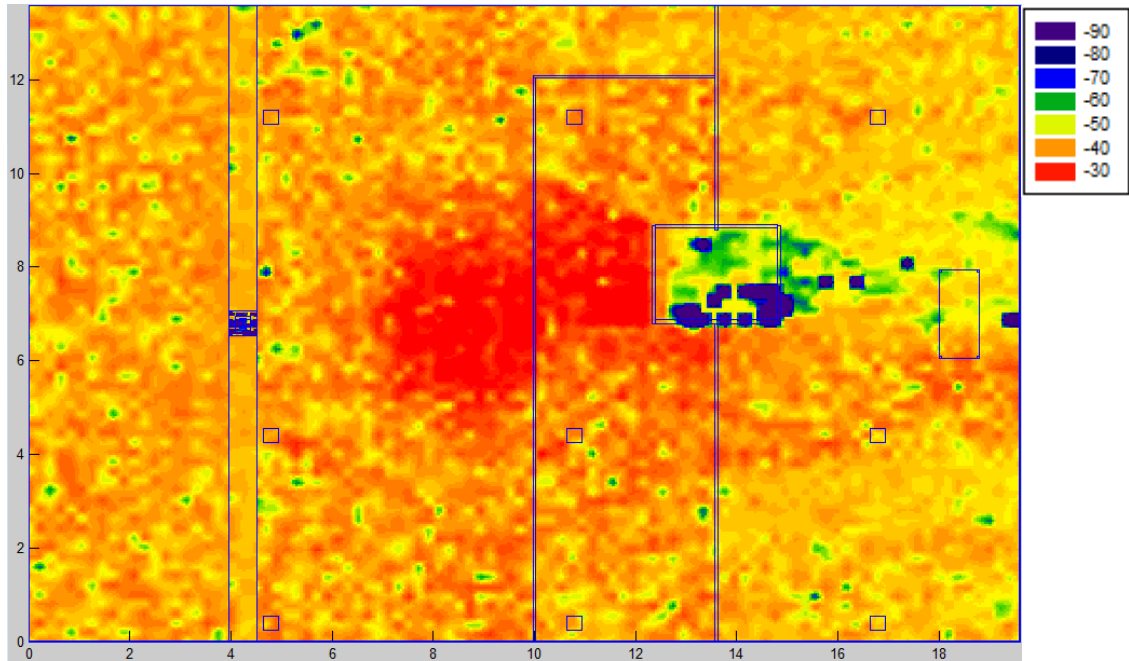


Figura VI.11. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

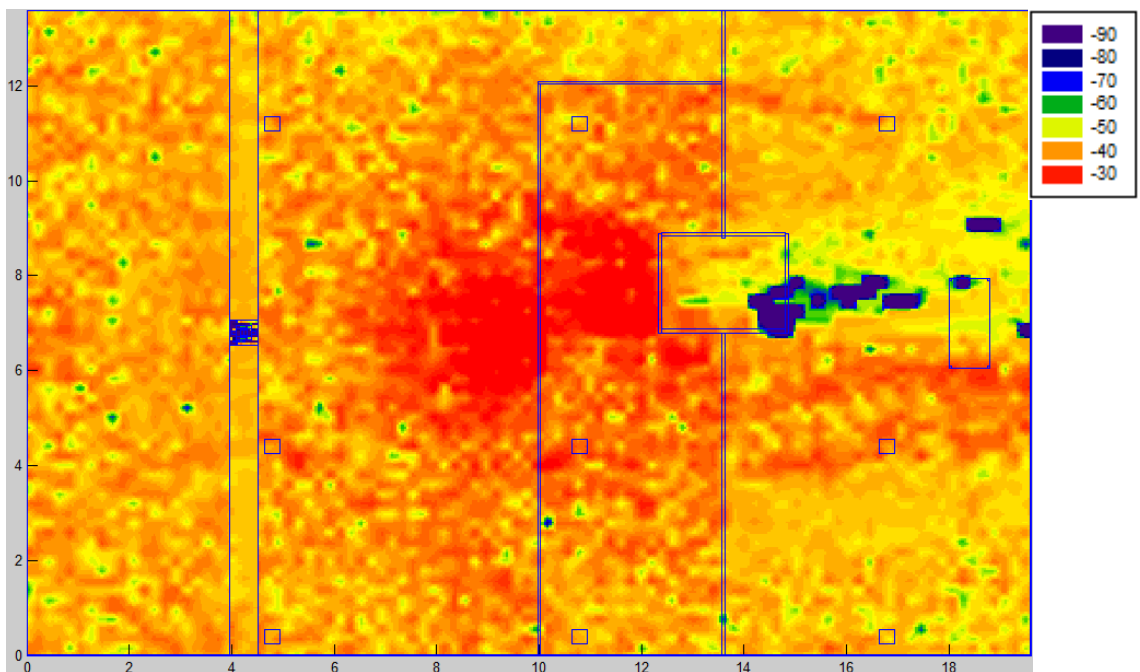


Figura VI.12. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la transmisión de potencia a diferentes alturas, desde la antena Tx hasta la antena Rx situada en distintas partes de la persona.

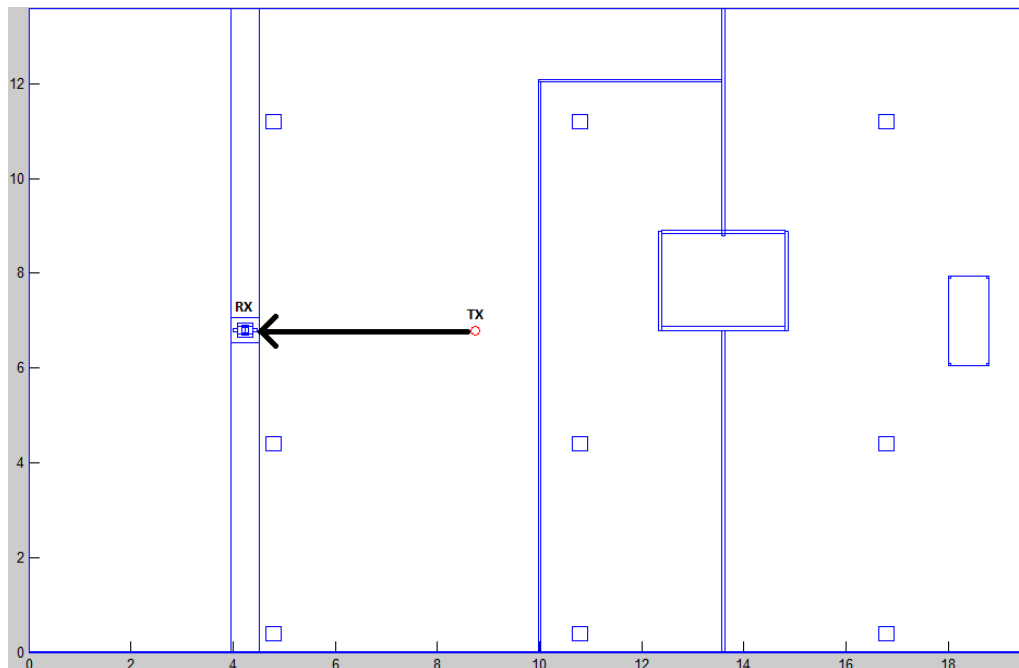


Figura VI.13. Camino Tx-Rx.

Línea azul:

Potencia desde antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en tobillo derecho ($x=4.17$ metros), a una altura de 0.16 metros.

Línea verde:

Desde antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en muñeca derecha ($x=4.04$ metros), a una altura de 0.84 metros.

Línea roja:

Desde antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en el pecho ($x=4.24$ metros), a una altura de 1.27 metros.

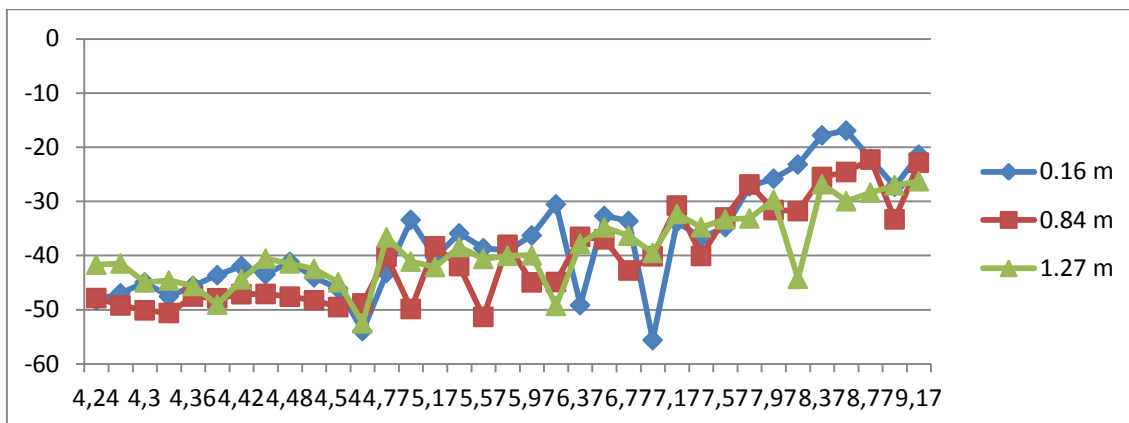


Figura VI.14. Potencia Rx ←TX.

Comparación de medidas: Se realiza una comparativa entre los valores de potencia recibida extraídos en el proceso de simulación en los diferentes puntos de recepción (antena Rx) frente a los valores extraídos en mediciones in situ en el escenario que se muestra en la figura.

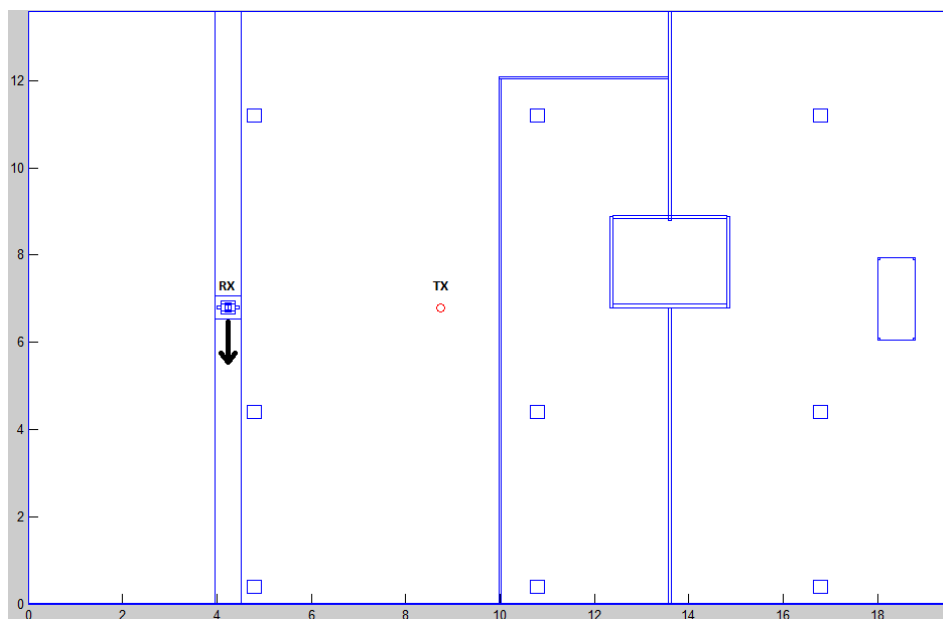


Figura VI.15. Escenario CASO 1-POSICIÓN 2.

ANTENA RX	POTENCIA RECIBIDA (TRAZADO DE RAYOS)	POTENCIA RECIBIDA (MEDIDAS IN SITU)
Tobillo (0.16 m)	-56.18 dBm	-51.78 dBm
Muñeca (0.84 m)	-54.11 dBm	-53.71 dBm
Pecho (1.27 m)	-46.80 dBm	-45.42 dBm

Tabla VI.2. Resultados CASO 1-POSICIÓN 2 comparados.

POSICIÓN 3: el individuo se encuentra situado a 180 grados con respecto a la antena emisora. La persona mira hacia la izquierda.

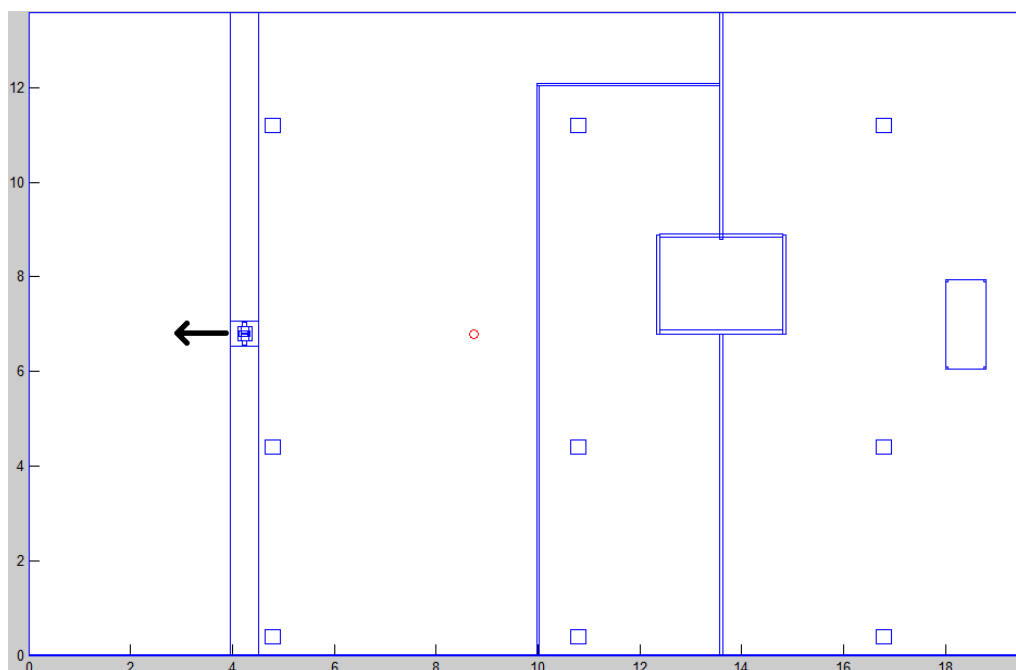


Figura VI.16. Persona situada a 180° con respecto a la antena Tx.

0.16 metros

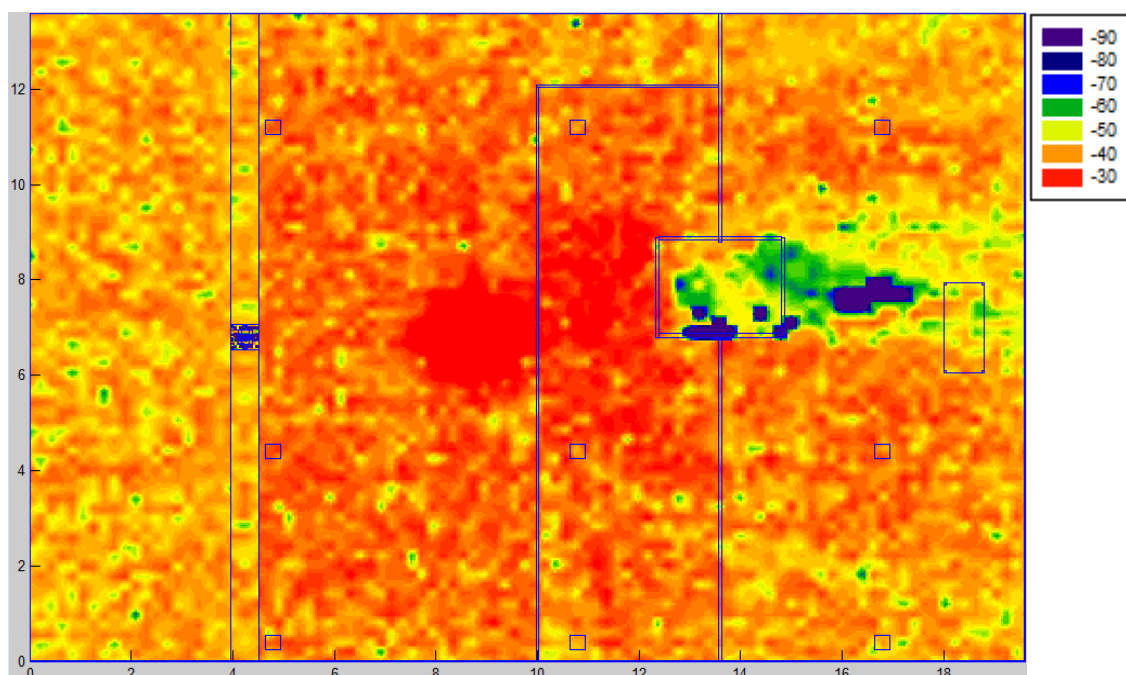


Figura VI.17. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

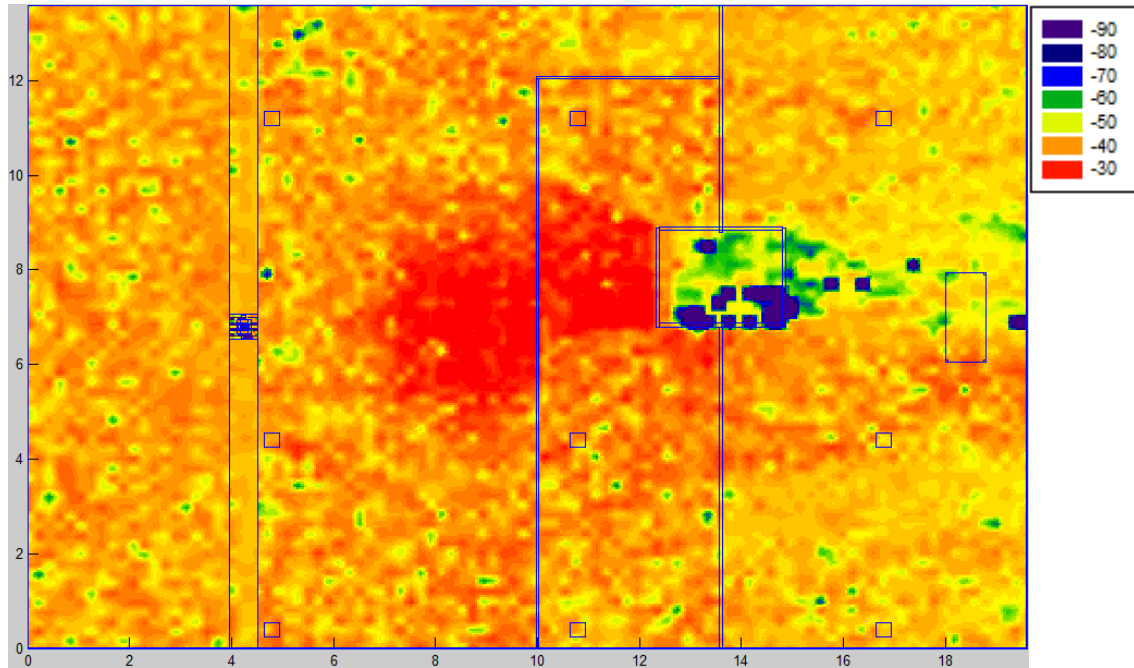


Figura VI.18. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

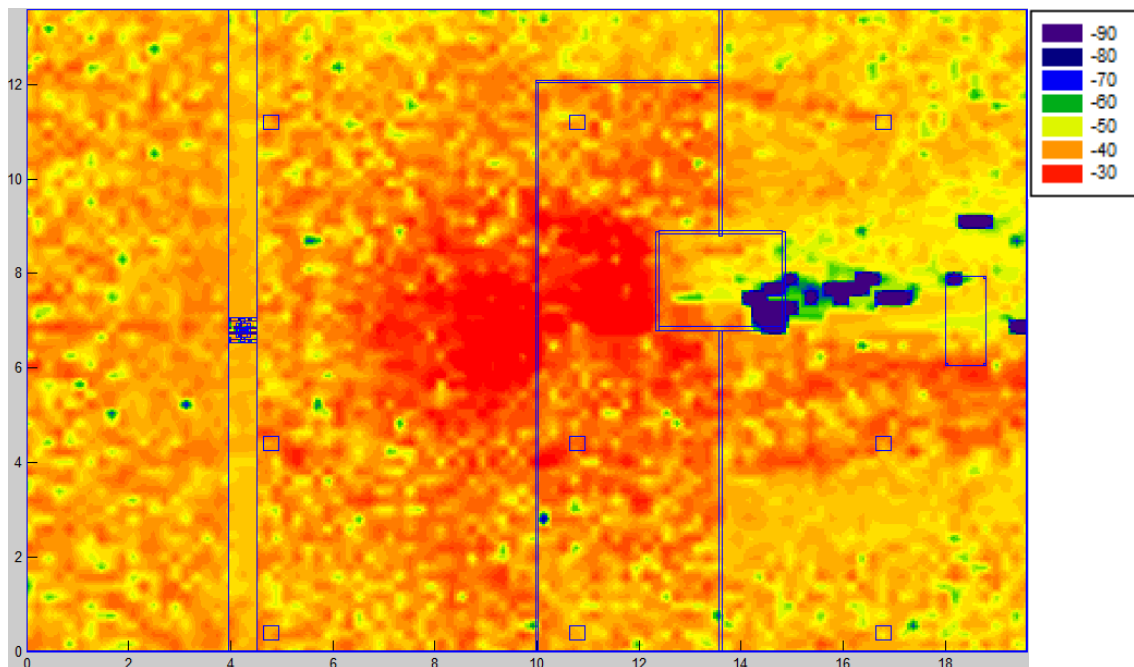


Figura VI.19. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la transmisión de potencia a diferentes alturas, desde la antena Tx hasta la antena Rx situada en distintas partes de la persona.

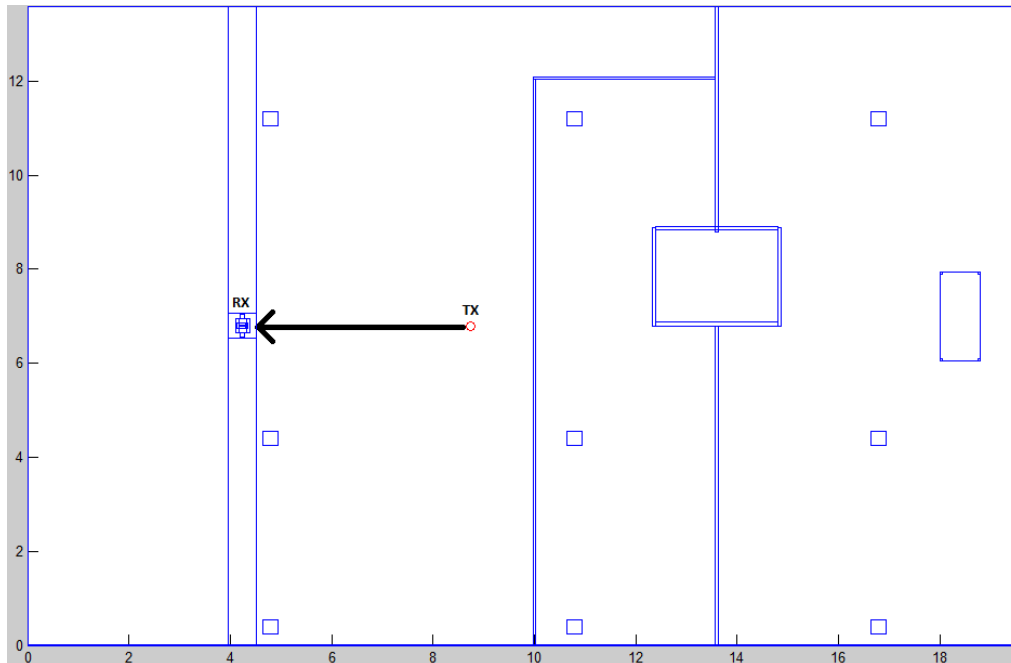


Figura VI.20. Camino Tx-Rx.

Línea azul:

Potencia desde antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en tobillo derecho ($x=4.16$ metros), a una altura de 0.16 metros.

Línea verde:

Desde antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en muñeca derecha ($x=4.19$ metros), a una altura de 0.84 metros.

Línea roja:

Desde antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en el pecho ($x=4.09$ metros), a una altura de 1.27 metros.

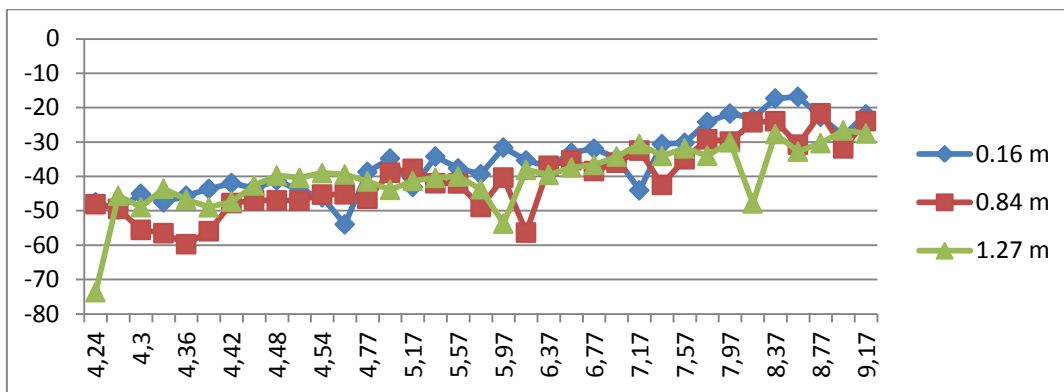


Figura VI.21. Potencia Rx-Tx.

Comparación de medidas: Se realiza una comparativa entre los valores de potencia recibida extraídos en el proceso de simulación en los diferentes puntos de recepción (antena Rx) frente a los valores extraídos en mediciones in situ en el escenario que se muestra en la figura.

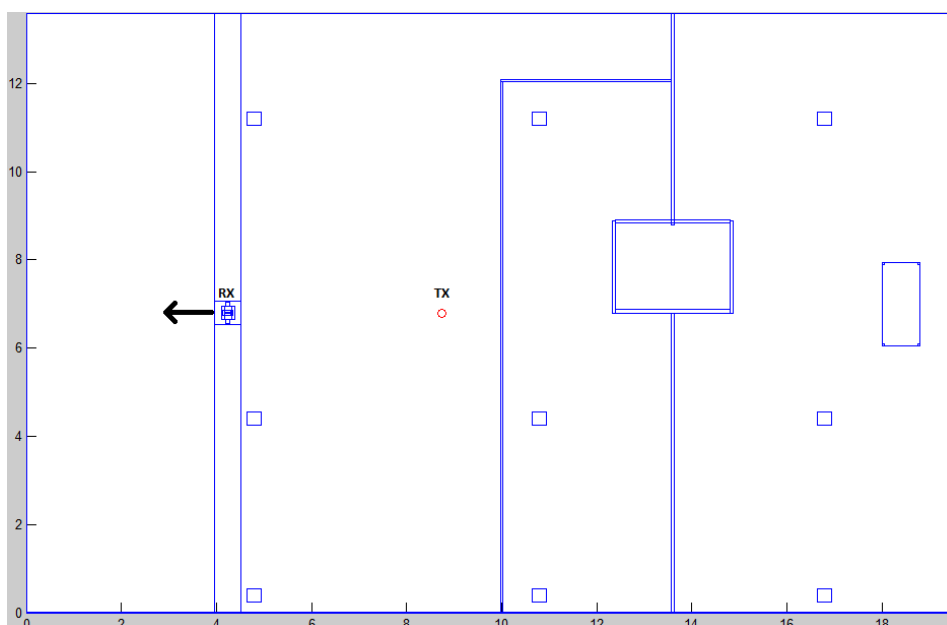


Figura VI.22. Escenario CASO 1-POSICIÓN 3.

ANTENA RX	POTENCIA RECIBIDA (TRAZADO DE RAYOS)	POTENCIA RECIBIDA (MEDIDAS IN SITU)
Tobillo (0.16 m)	-47.94 dBm	-54.35 dBm
Muñeca (0.84 m)	-60.36 dBm	-54.44 dBm
Pecho (1.27 m)	-54.32 dBm	-49.69 dBm

Tabla VI.3. Resultados CASO 1-POSICIÓN 3 comparados.

POSICIÓN 4: el individuo se encuentra situado a 0 grados con respecto a la antena emisora. La persona mira hacia la derecha (de frente a la antena).

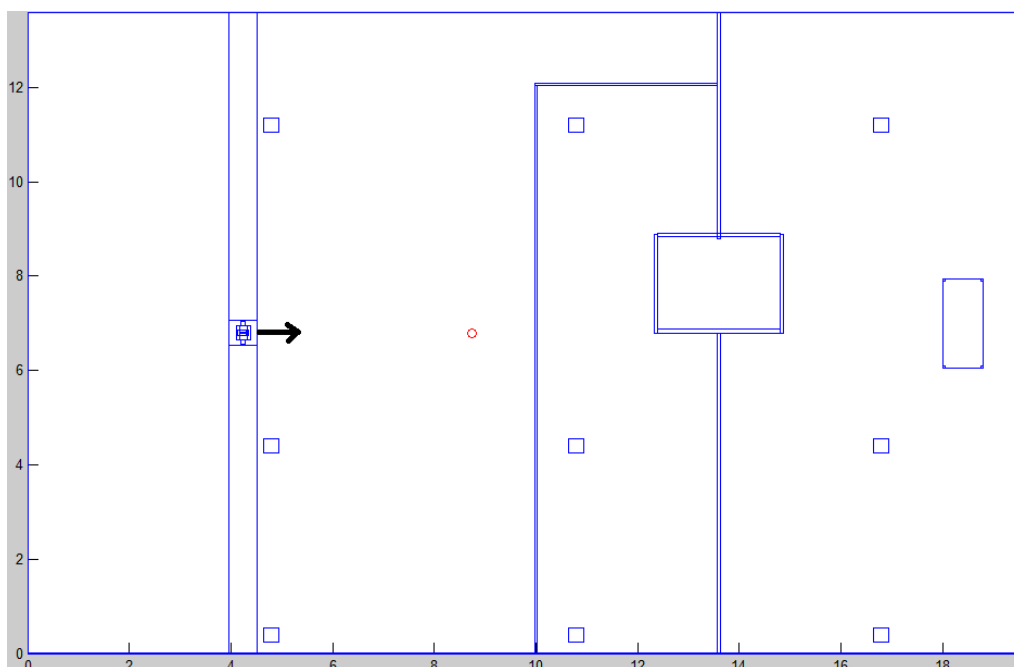


Figura VI.23. Persona situada a 0° con respecto a la antena Tx.

0.16 metros

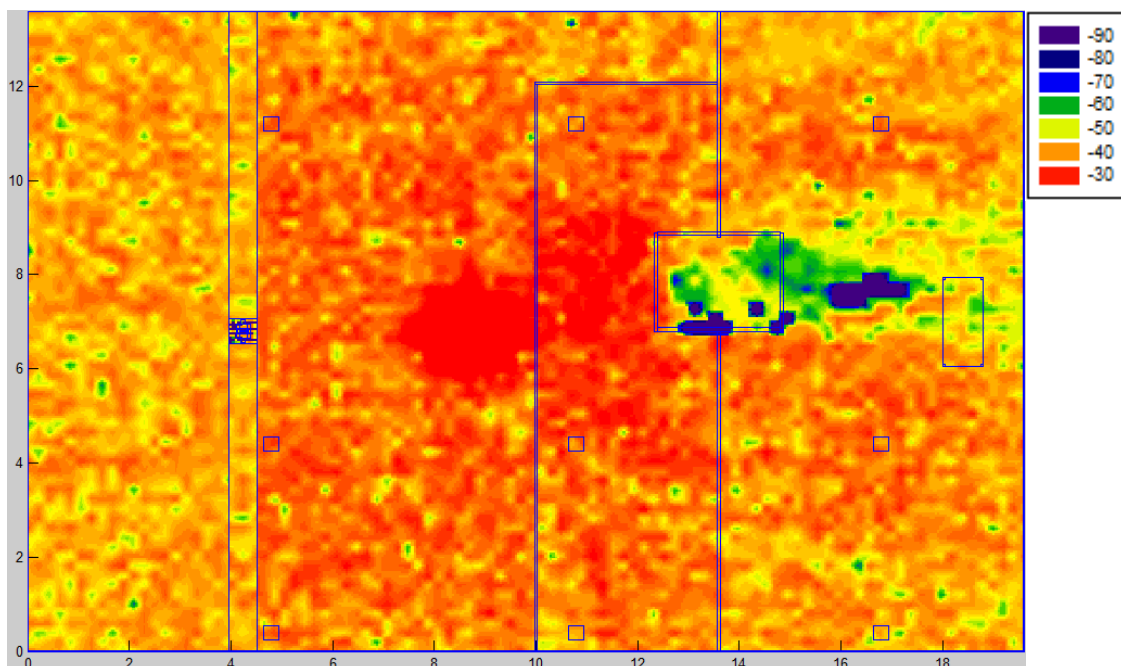


Figura VI.24. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

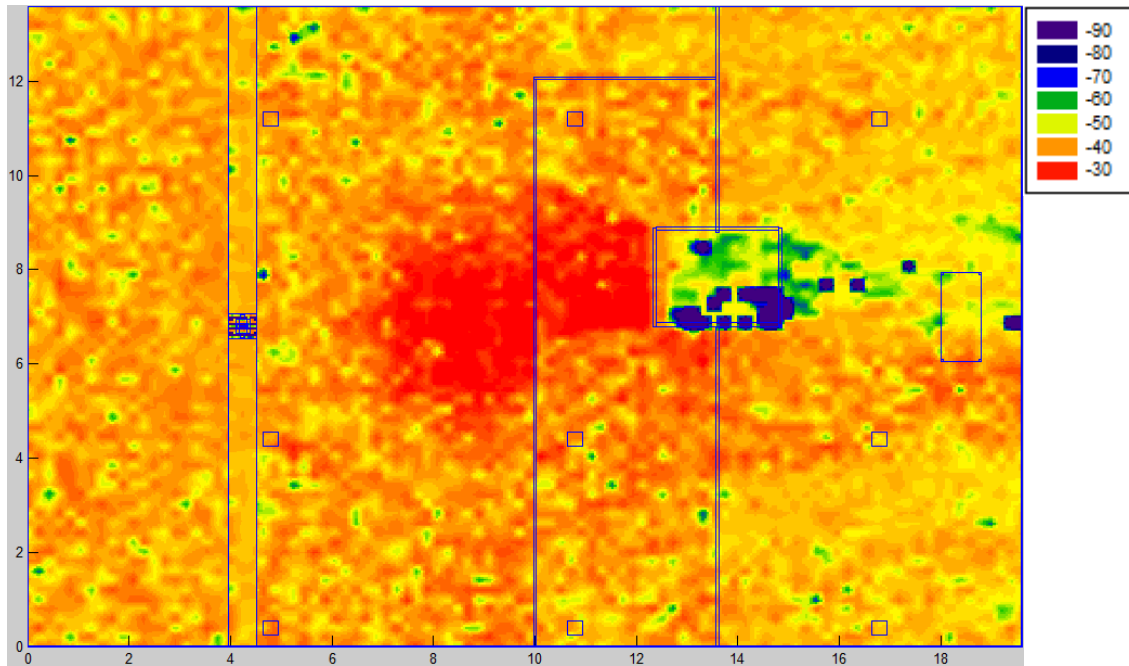


Figura VI.25. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

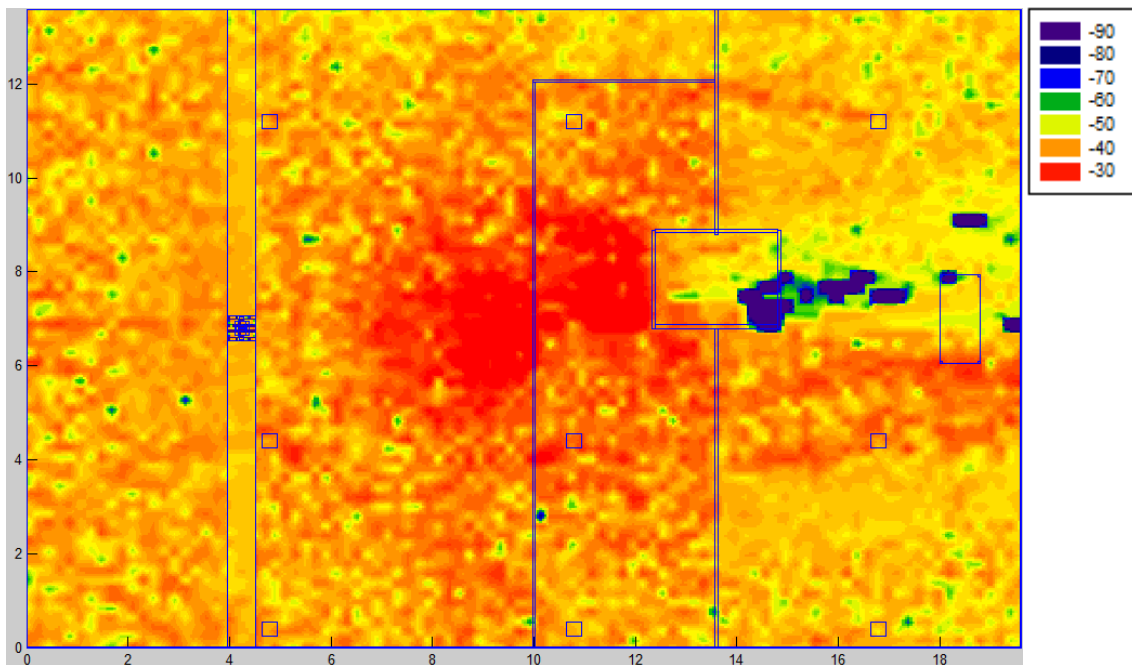


Figura VI.26. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la transmisión de potencia a diferentes alturas, desde la antena Tx hasta la antena Rx situada en distintas partes de la persona.

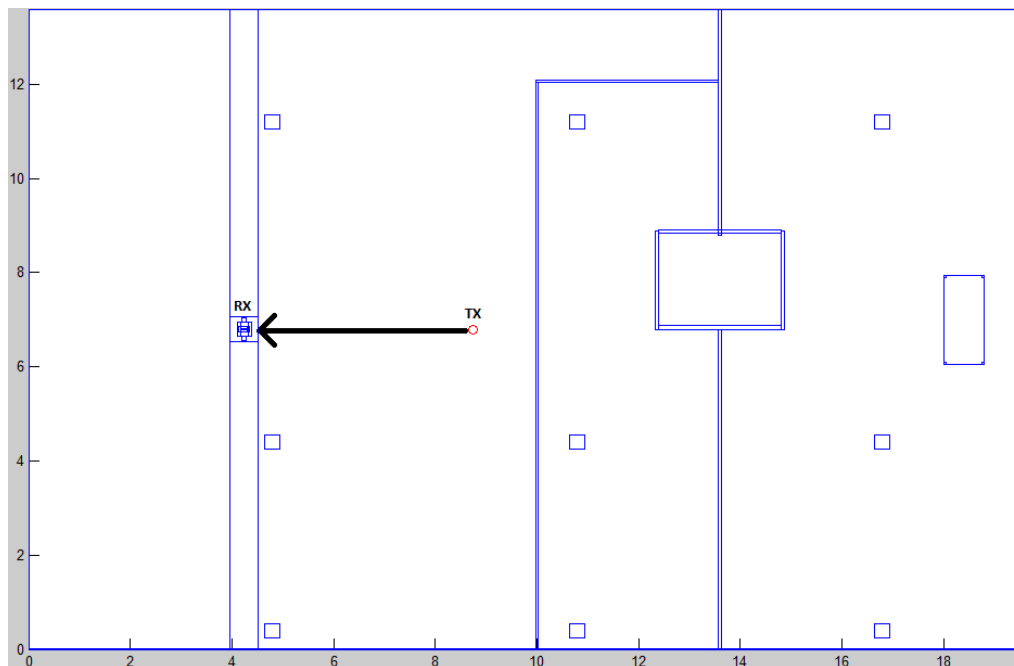


Figura VI.27. Camino Tx-Rx.

Línea azul:

Potencia desde antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en tobillo derecho ($x=4.32$ metros), a una altura de 0.16 metros.

Línea verde:

Desde antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en muñeca derecha ($x=4.29$ metros), a una altura de 0.84 metros.

Línea roja:

Desde antena Tx situada a 8.8 metros, hasta antena Rx situada en el pecho ($x=4.39$ metros), a una altura de 1.27 metros.

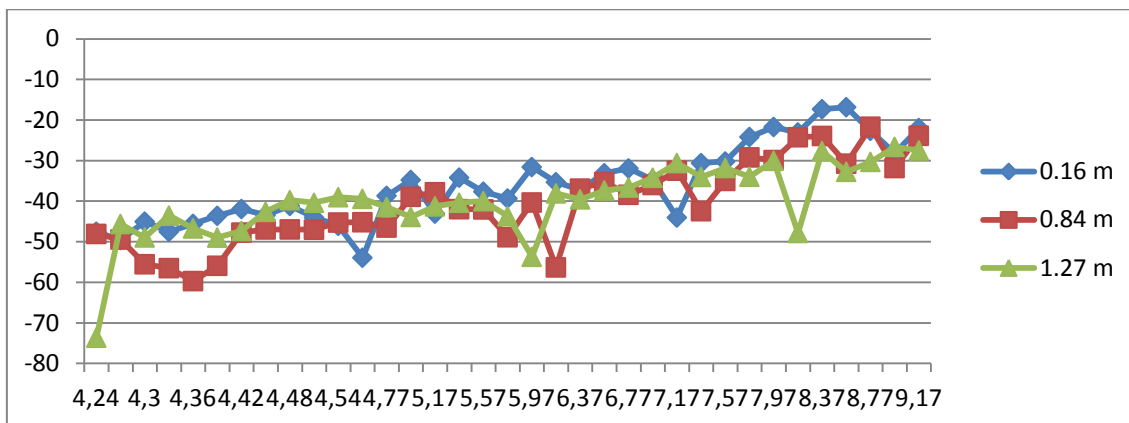


Figura VI.28. Potencia Rx ←Tx.

Comparación de medidas: Se realiza una comparativa entre los valores de potencia recibida extraídos en el proceso de simulación en los diferentes puntos de recepción (antena Rx) frente a los valores extraídos en mediciones in situ en el escenario que se muestra en la figura.

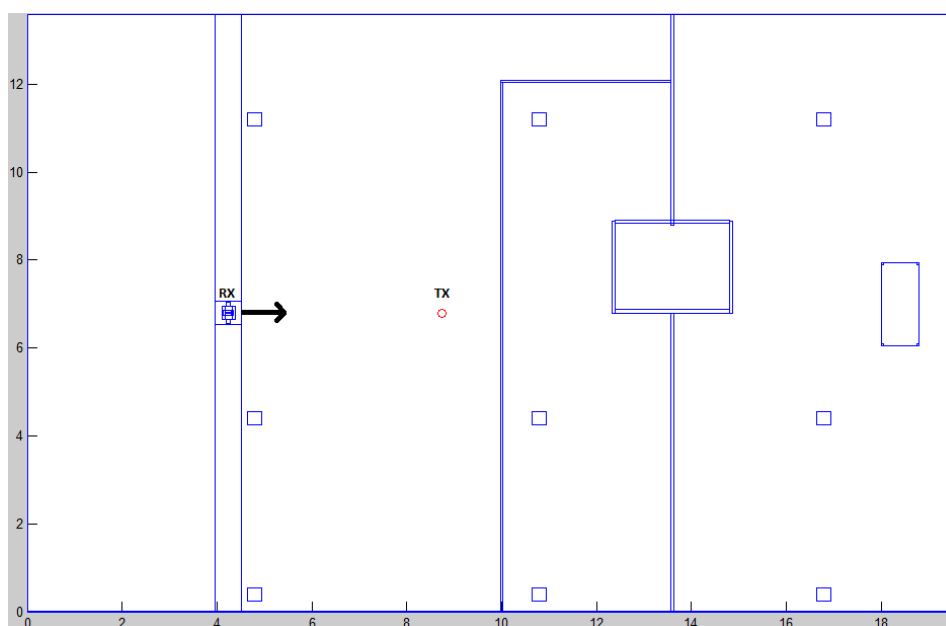


Figura VI.29. Escenario CASO 1-POSICIÓN 4.

ANTENA RX	POTENCIA RECIBIDA (TRAZADO DE RAYOS)	POTENCIA RECIBIDA (MEDIDAS IN SITU)
Tobillo (0.16 m)	-46.18 dBm	-44.49 dBm
Muñeca (0.84 m)	-49.21 dBm	-42.35 dBm
Pecho (1.27 m)	-48.11 dBm	-44.43 dBm

Tabla VI.4. Resultados CASO 1-POSICIÓN 4 comparados.

CASO 2:

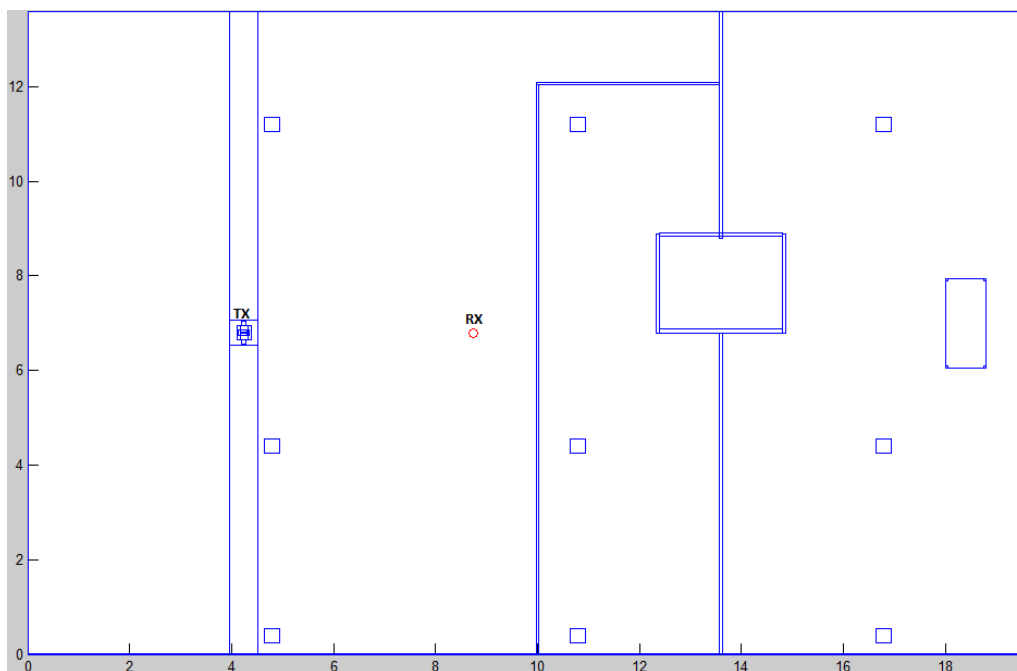


Figura VI.30. Disposición Tx-Rx.

En este caso la antena transmisora se encuentra situada en el cuerpo humano, dependiendo del caso será en el tobillo derecho, muñeca derecha o pecho del individuo, mientras que la antena receptora pasa a ser el círculo rojo que se muestra en la figura superior.

Para cada situación de la antena se realizan medidas en distintas orientaciones de la persona: 0, 90, 180 y 270 grados con respecto a la antena receptora.

POSICIÓN 1: el individuo se encuentra situado a 90 grados con respecto a la antena receptora. La persona mira hacia arriba. Se realizan cortes a tres alturas del plano z para ver la distribución de potencia recibida a diferentes alturas.

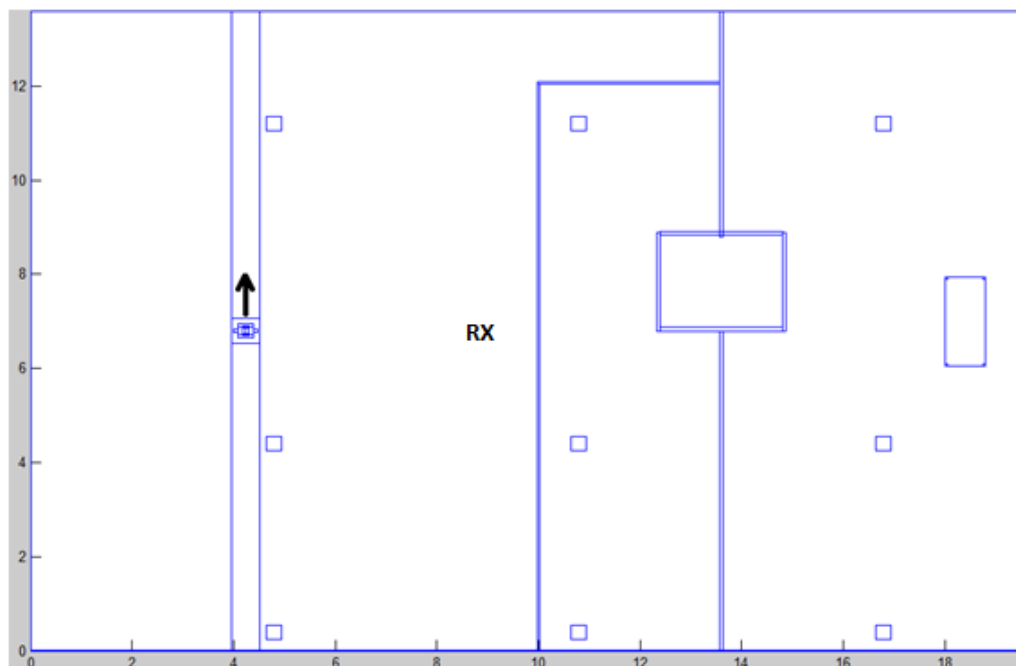


Figura VI.31. Persona situada a 90° con respecto a la antena Tx.

1. Antena Tx situada en el tobillo derecho del individuo

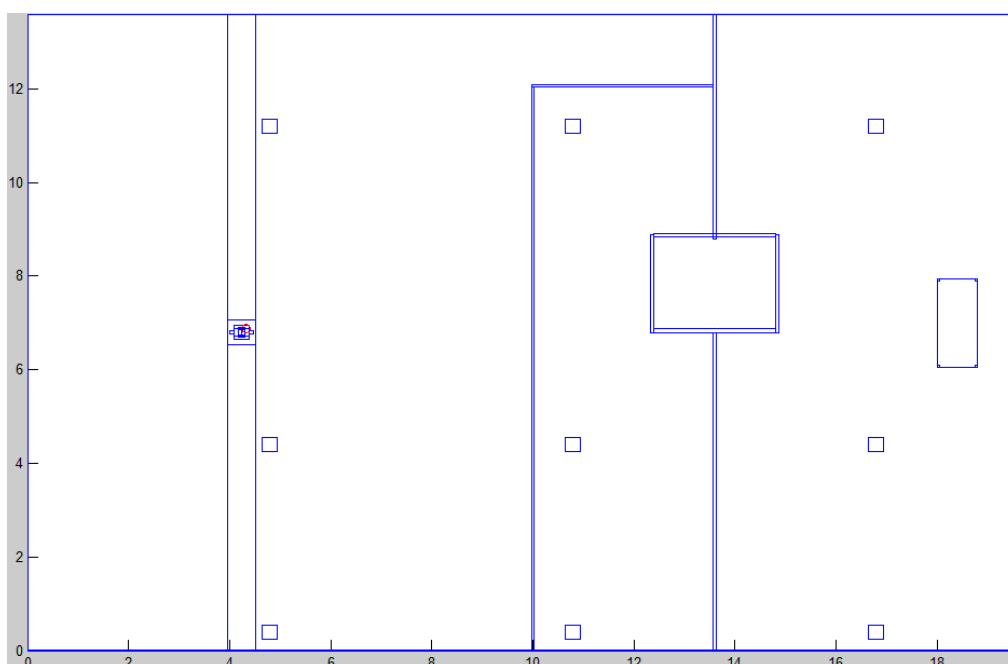


Figura VI.32. Antena Tx situada en el tobillo de la persona.

0.16 metros

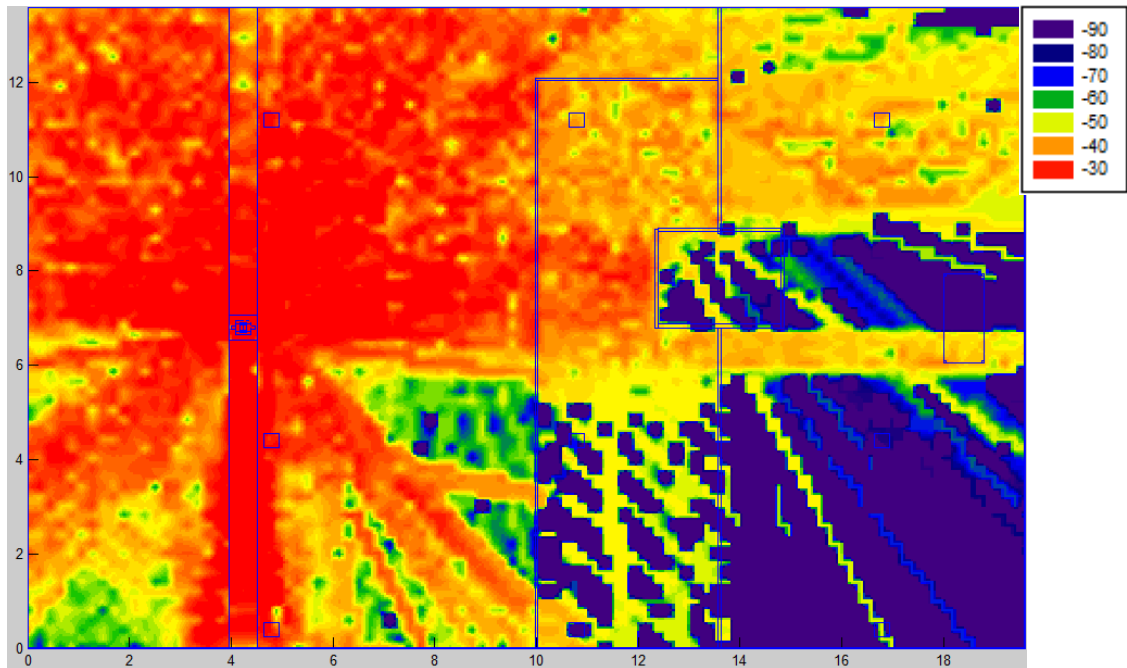


Figura VI.33. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

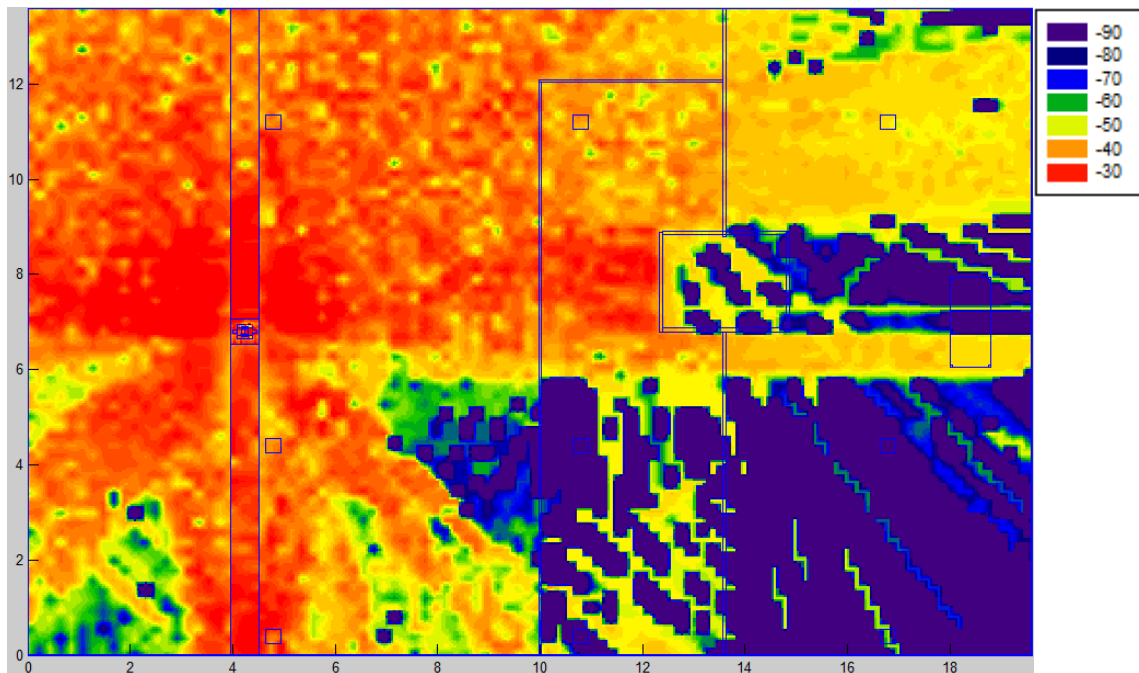


Figura VI.34. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

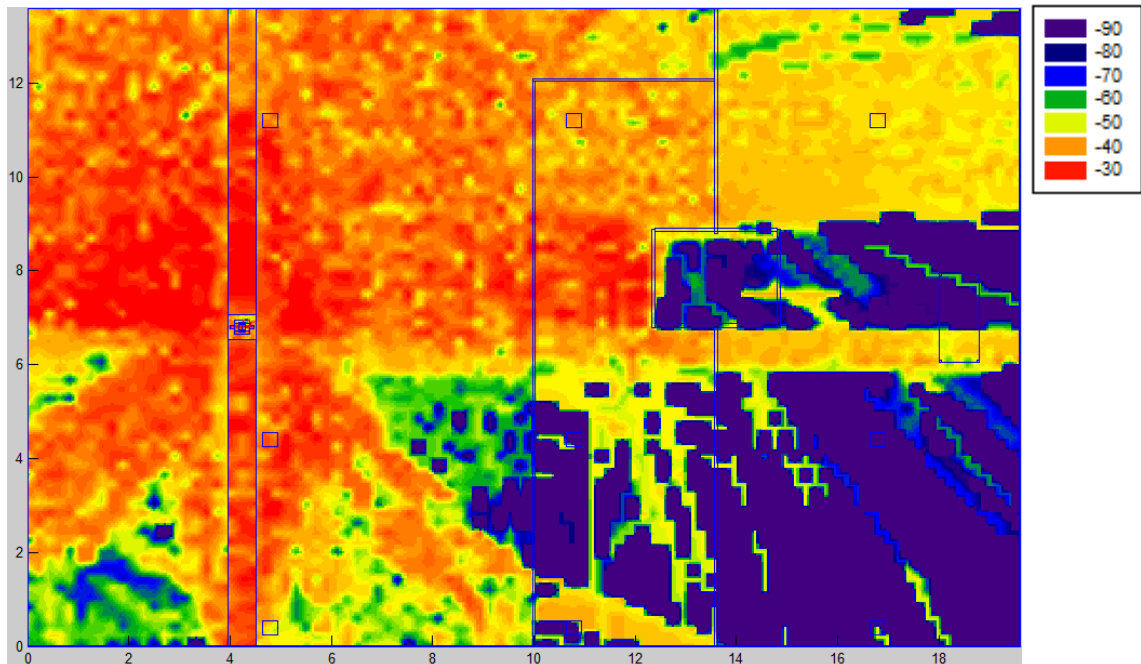


Figura VI.35. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la distribución de potencia a lo largo de la planta a diferentes alturas, atravesando desde el cuerpo humano (donde se encuentra la antena TX) hasta la antena receptora, por lo que se puede observar la transmisión de potencia de TX a RX.

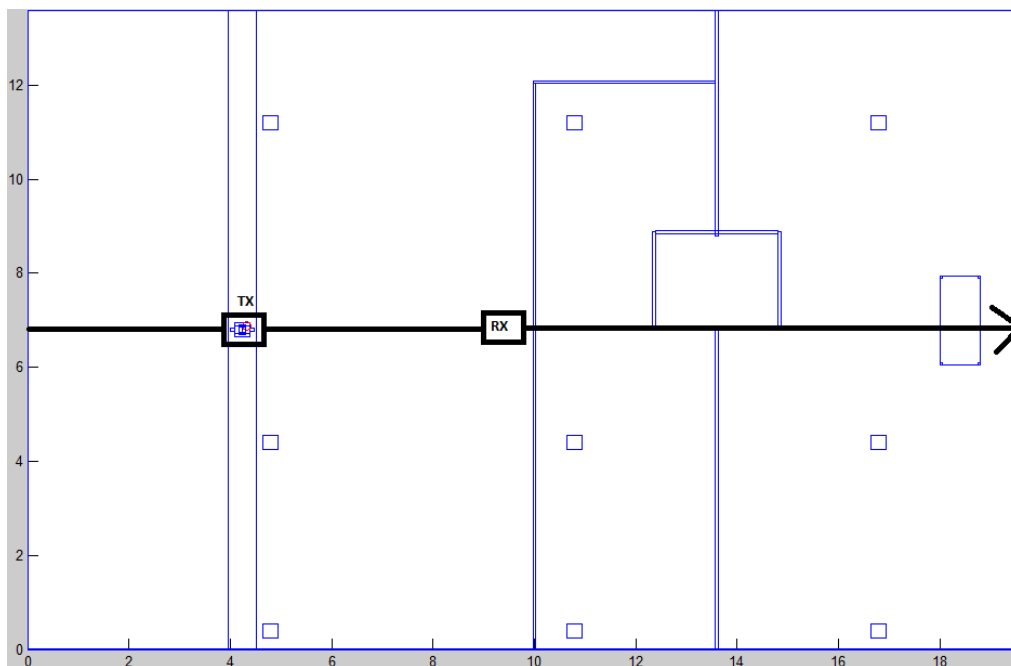


Figura VI.36. Radial que atraviesa el eje x de la planta.

Antena Tx situada a una altura de 0.16 metros, en el tobillo derecho a una distancia de 4,17 metros y antena Rx situada en 8.8 metros.

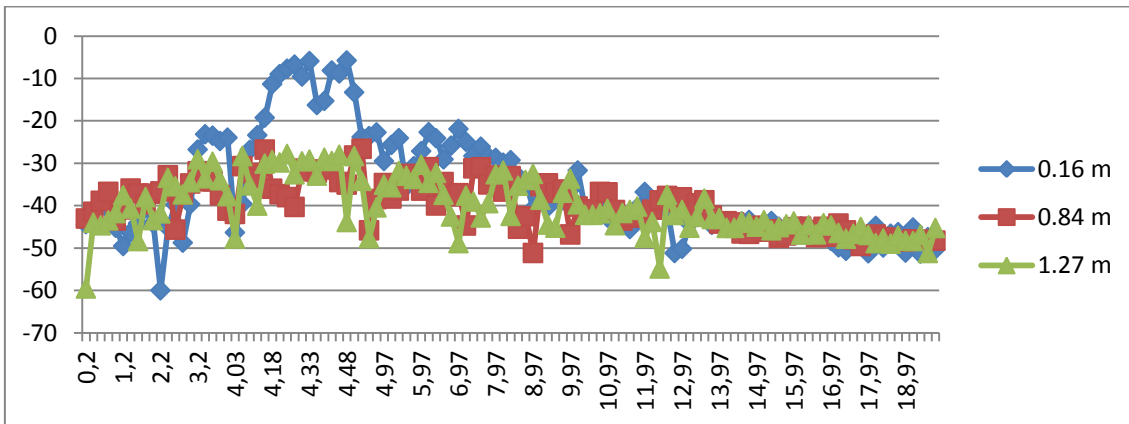


Figura VI.37. Potencia recibida en cada punto del Radial eje x.

2. Antena Tx situada en la muñeca derecha del individuo

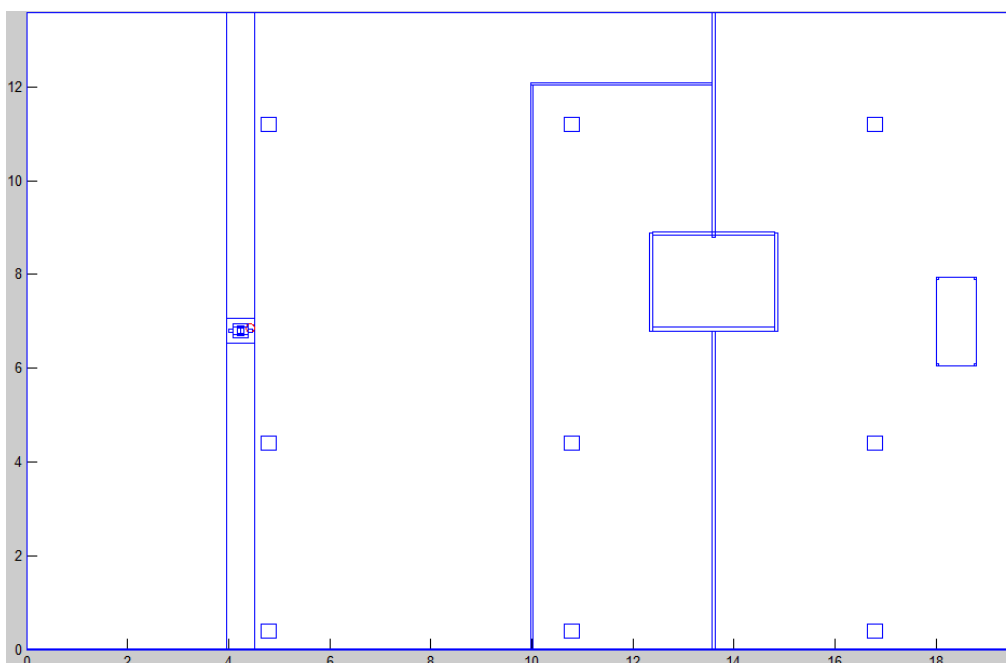


Figura VI.38. Antena Tx situada en la muñeca de la persona.

0.16 metros

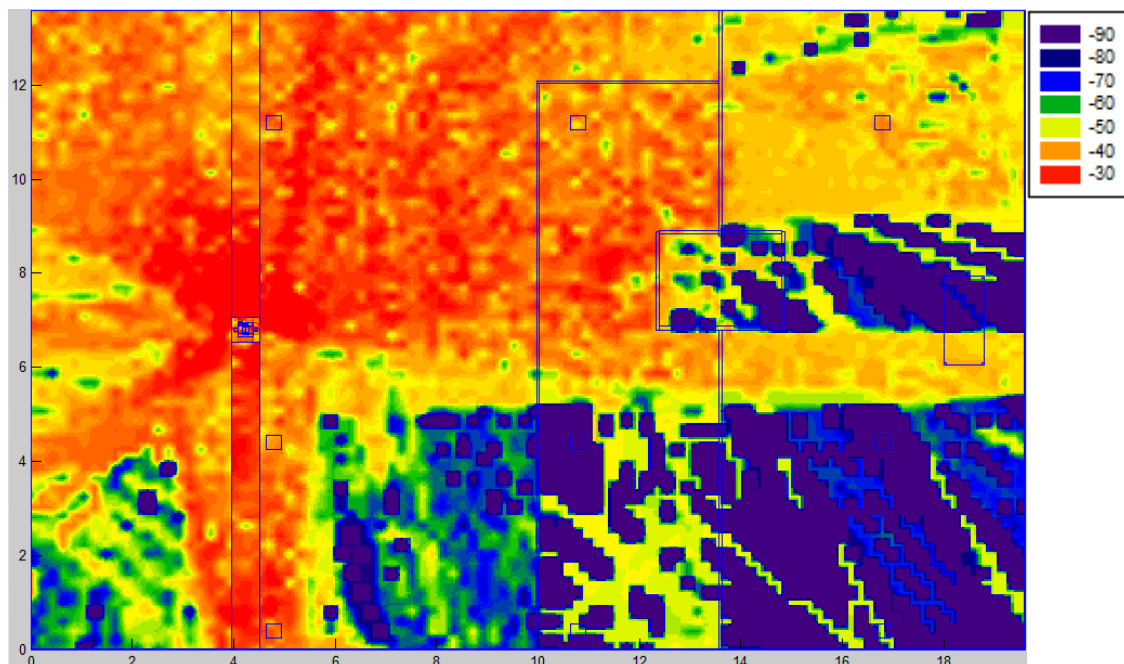


Figura VI.39. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

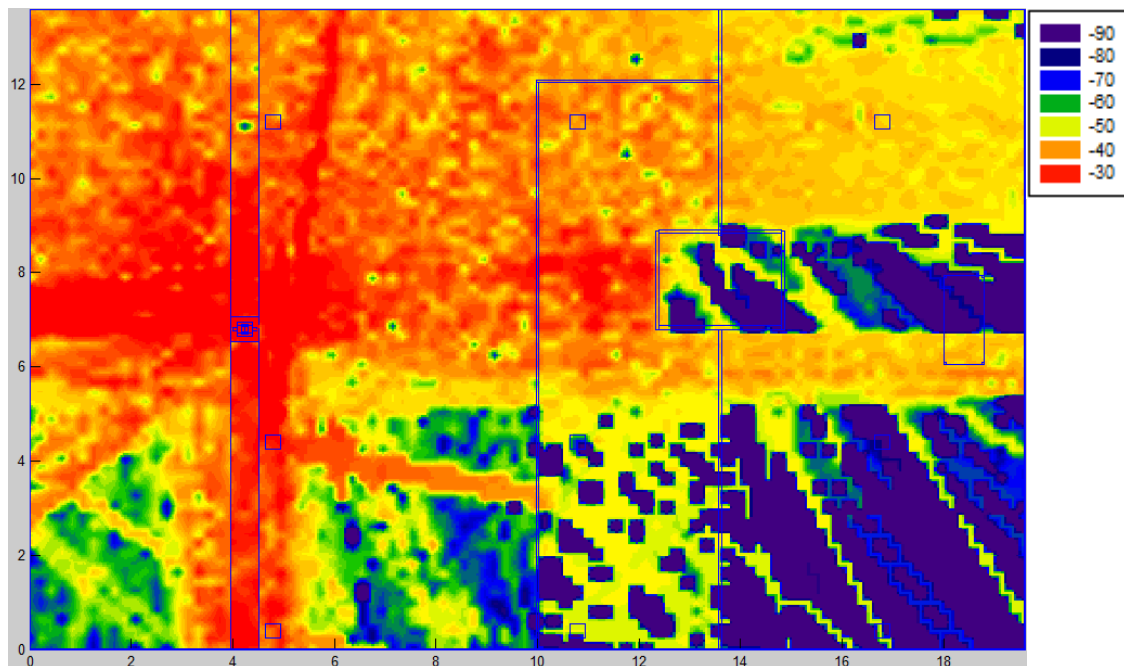


Figura VI.40. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

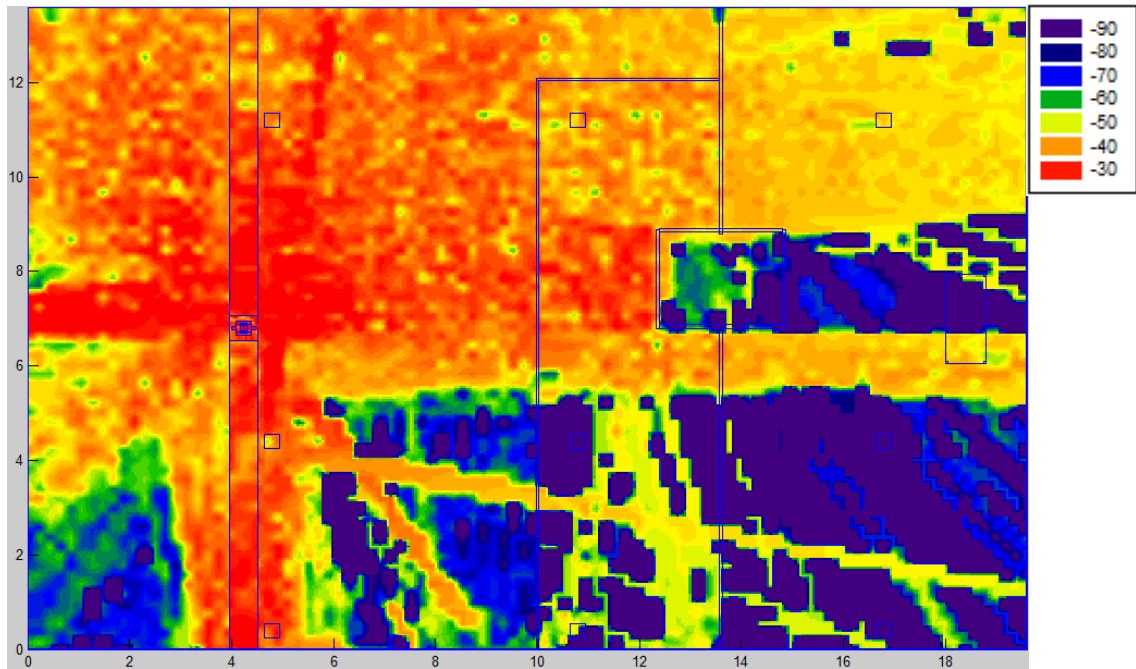


Figura VI.41. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la distribución de potencia a lo largo de la planta a diferentes alturas, atravesando desde el cuerpo humano (donde se encuentra la antena TX) hasta la antena receptora, por lo que se puede observar la transmisión de potencia de TX a RX.

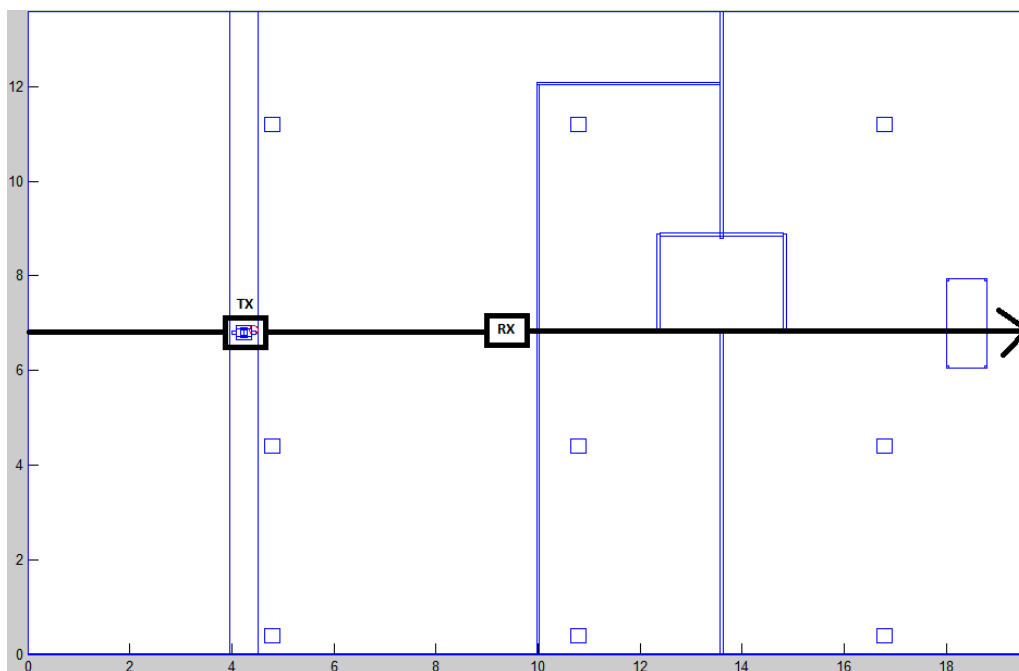


Figura VI.42. Radial que atraviesa el eje x de la planta.

Antena Tx situada a 0.84 metros de altura, en la muñeca derecha a una distancia de 4,44 metros y antena Rx situada en 8.8 metros.

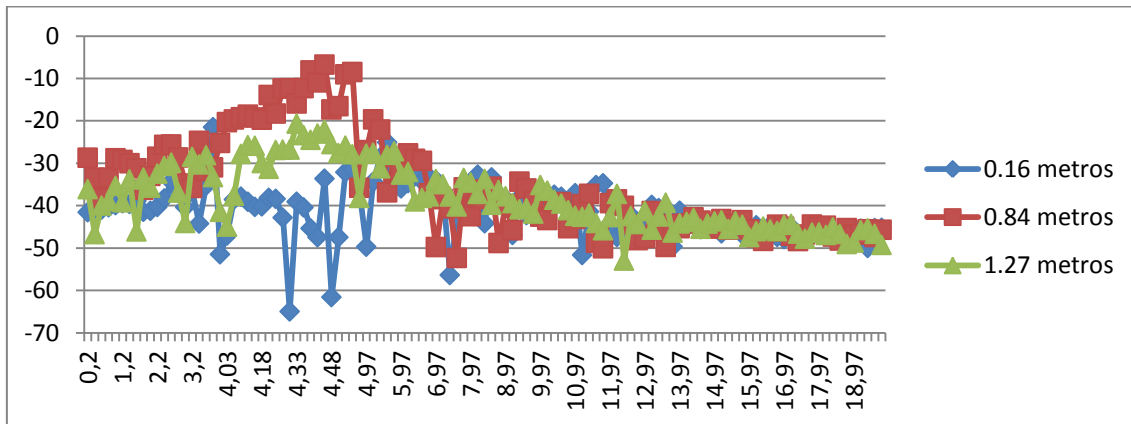


Figura VI.43. Potencia recibida en cada punto del Radial eje x.

3. Antena Tx situada en el pecho del individuo

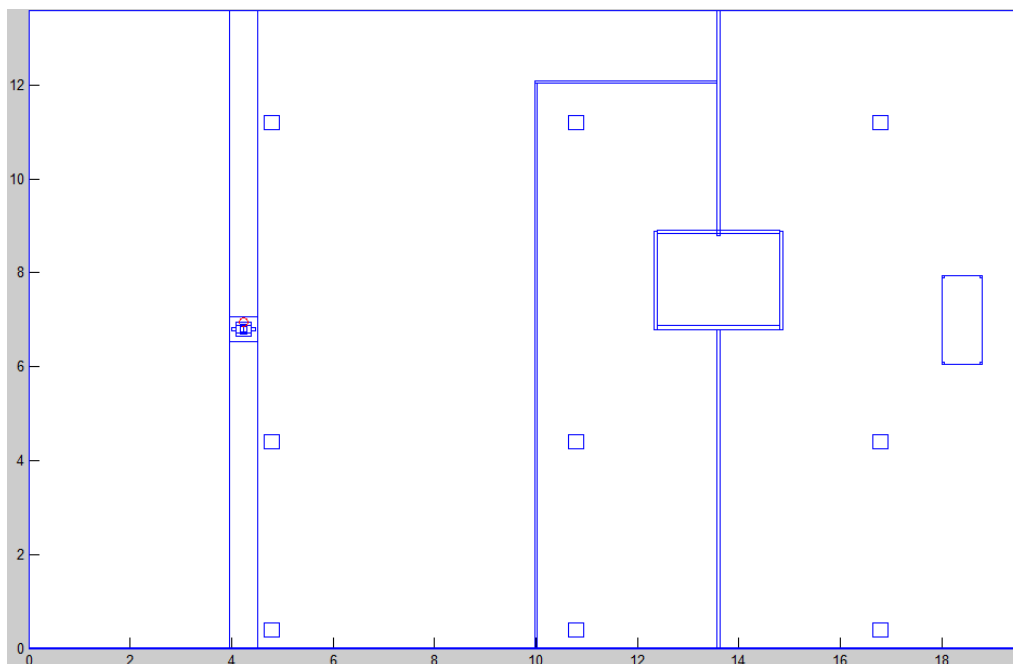


Figura VI.44. Antena Tx situada en el pecho de la persona.

0.16 metros

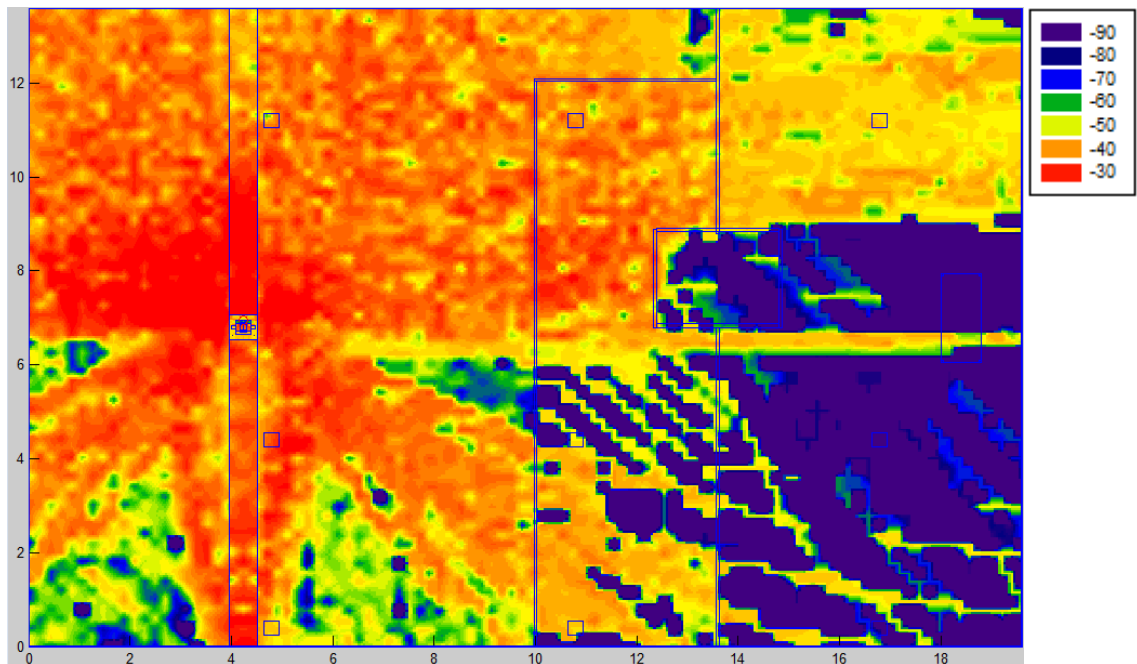


Figura VI.45. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

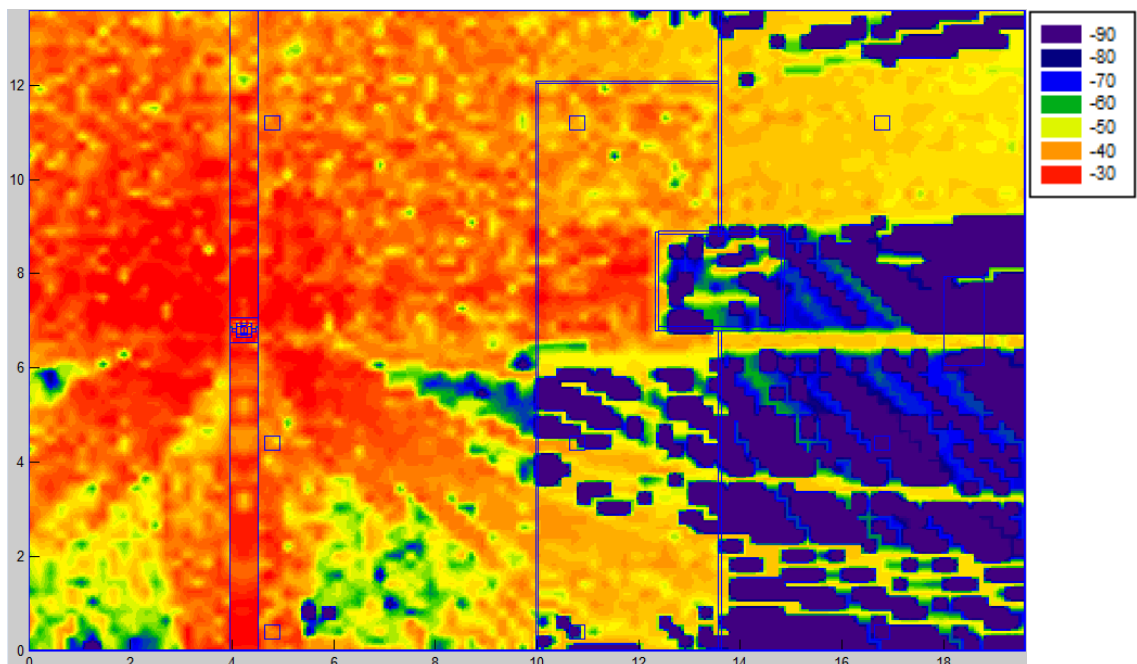


Figura VI.46. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

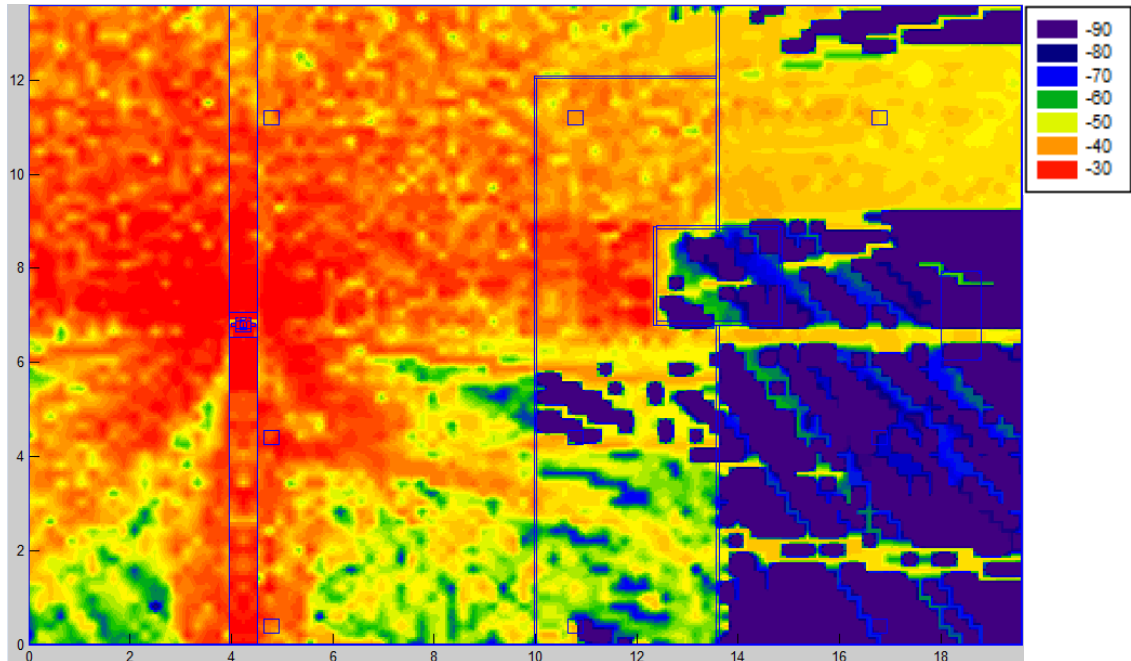


Figura VI.47. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la distribución de potencia a lo largo de la planta a diferentes alturas, atravesando desde el cuerpo humano (donde se encuentra la antena TX) hasta la antena receptora, por lo que se puede observar la transmisión de potencia de TX a RX.

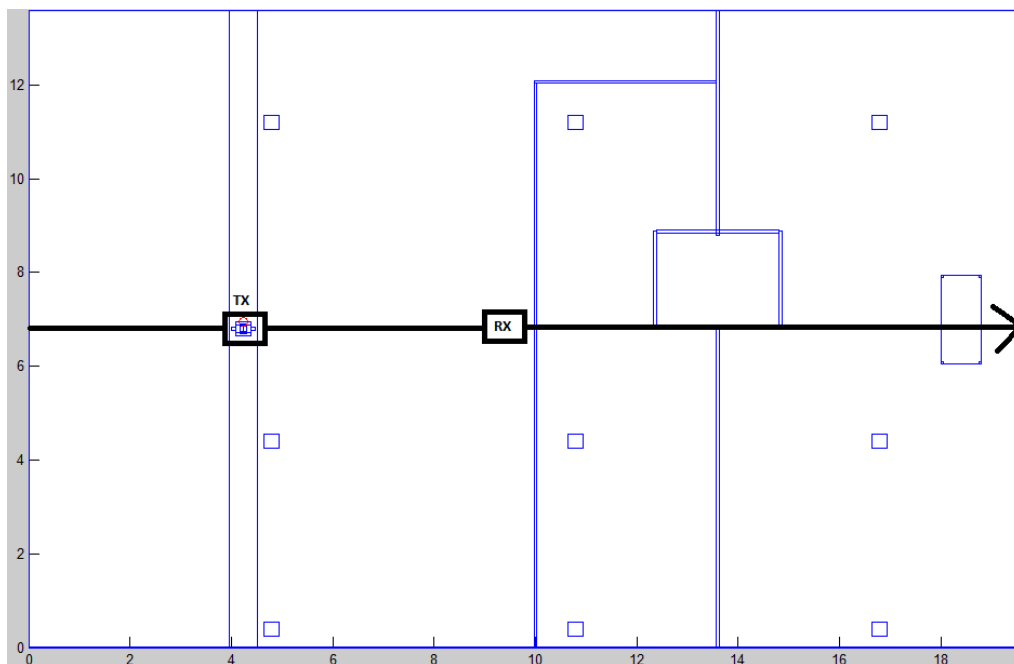


Figura VI.48. Radial que atraviesa el eje x de la planta.

Antena Tx situada a 1.27 metros, en el pecho, a una distancia de 4.24 metros y antena Rx situada en 8.8 metros.

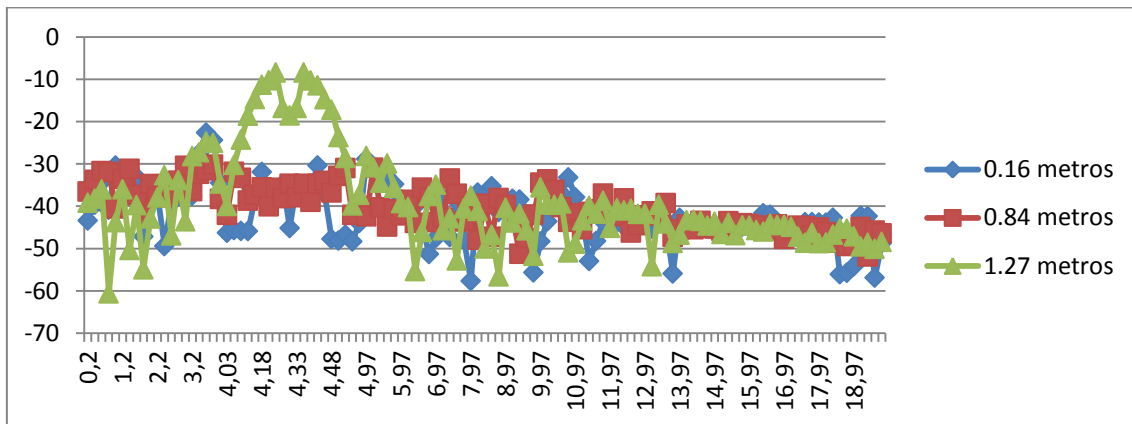


Figura VI.49. Potencia recibida en cada punto del Radial eje x.

Comparación de medidas

Se realizaron medidas tal y como se ha explicado en páginas anteriores, situando la antena Tx en tres posiciones distintas (tobillo derecho, muñeca derecha y pecho) del individuo y éste, a 90° respecto de la antena Rx. En cada caso, la potencia recibida en el punto Rx es la siguiente:

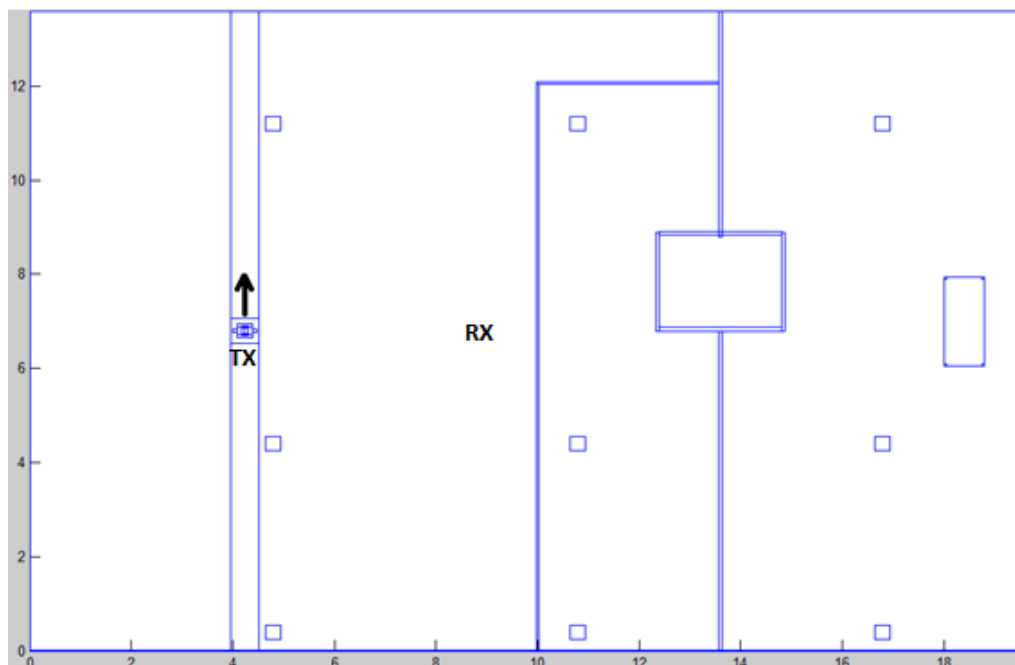


Figura VI.49. Escenario CASO 2-POSICIÓN 1.

ANTENA TX	POTENCIA RECIBIDA (TRAZADO DE RAYOS)	POTENCIA RECIBIDA (MEDIDAS IN SITU)
Tobillo (0.16 m)	-52.47dBm	-54.13 dBm
Muñeca (0.84 m)	-61.58 dBm	-54.85 dBm
Pecho (1.27 m)	-58.18 dBm	-57.41 dBm

Tabla VI.5. Resultados CASO 2-POSICIÓN 1 comparados.

POSICIÓN 2: el individuo se encuentra situado a 270 grados con respecto a la antena receptora. La persona mira hacia abajo. Se realizan cortes a tres alturas del plano z para ver la distribución de potencia recibida a diferentes alturas.

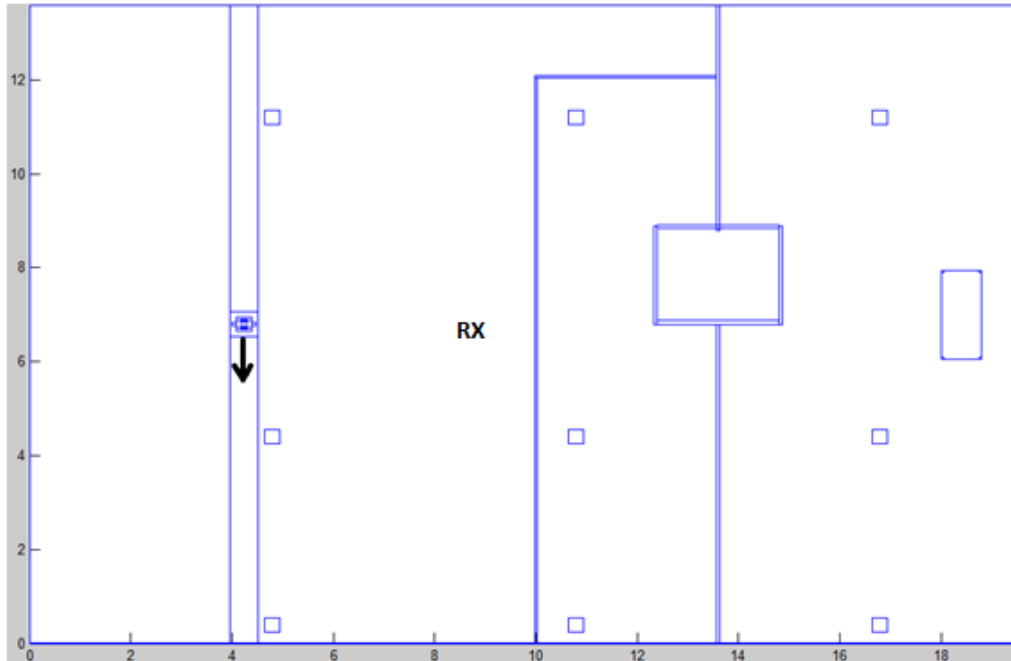


Figura VI.50. Persona situada a 270° con respecto a la antena Rx.

1. Antena Tx situada en el tobillo derecho del individuo

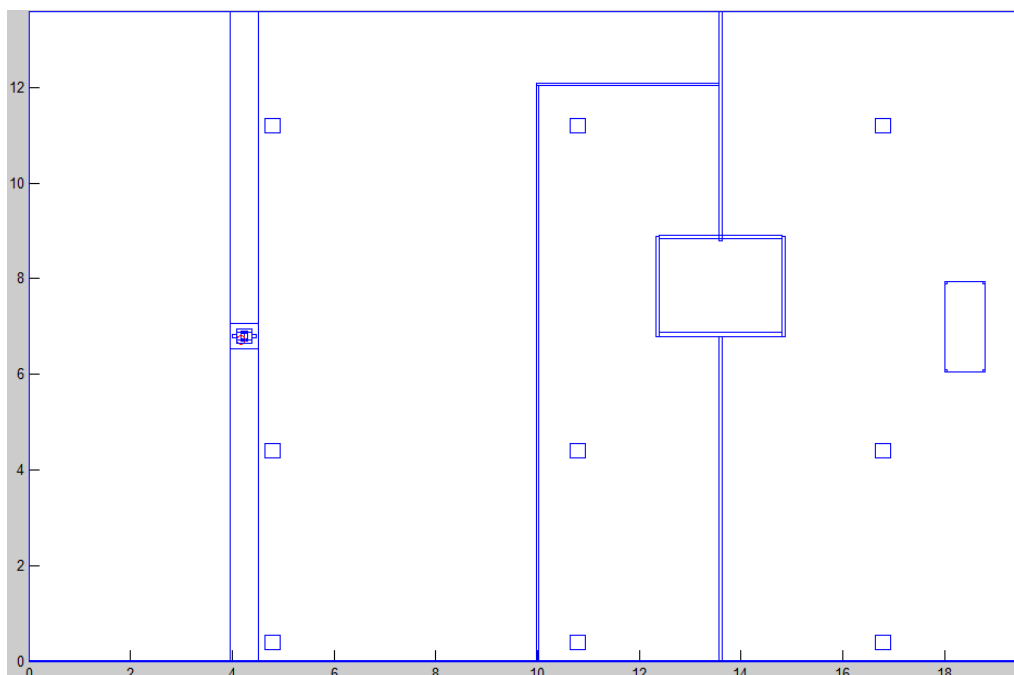


Figura VI.51. Antena Tx situada en el tobillo de la persona.

0.16 metros

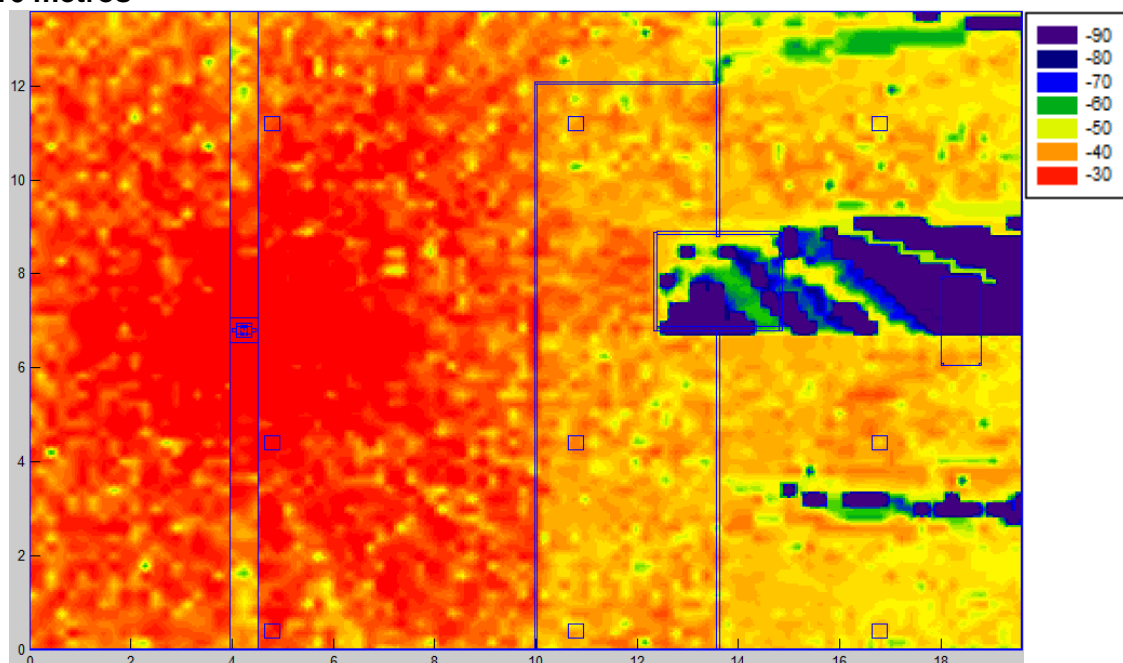


Figura VI.52. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

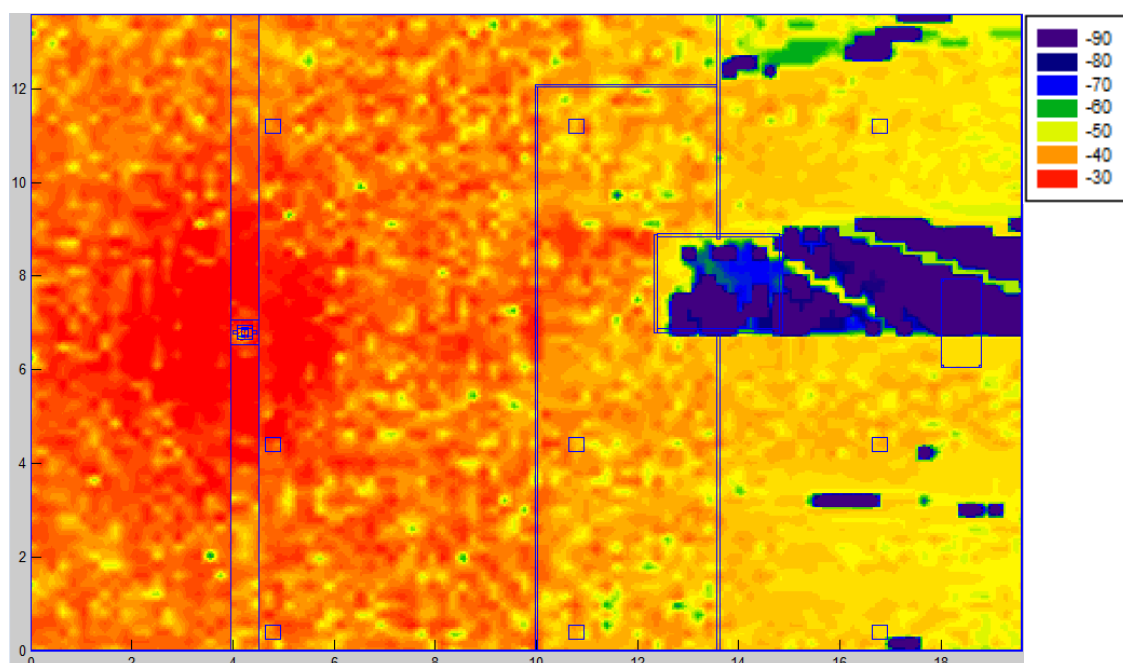


Figura VI.53. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

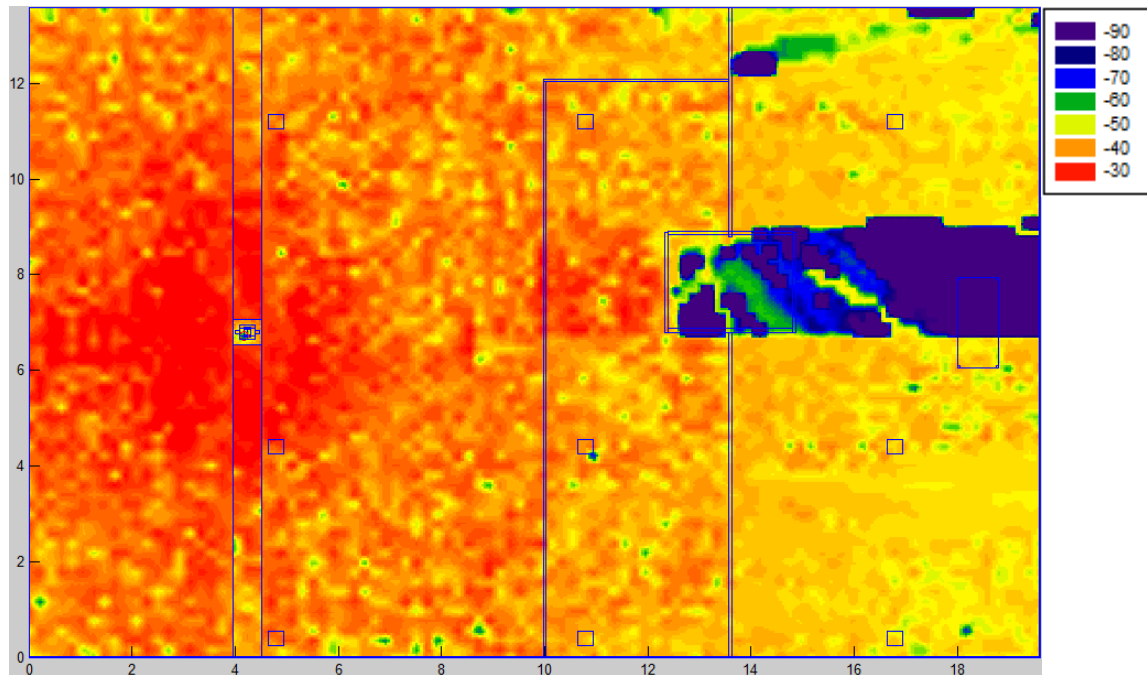


Figura VI.54. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la distribución de potencia a lo largo de la planta a diferentes alturas, atravesando desde el cuerpo humano (donde se encuentra la antena TX) hasta la antena receptora, por lo que se puede observar la transmisión de potencia de TX a RX.

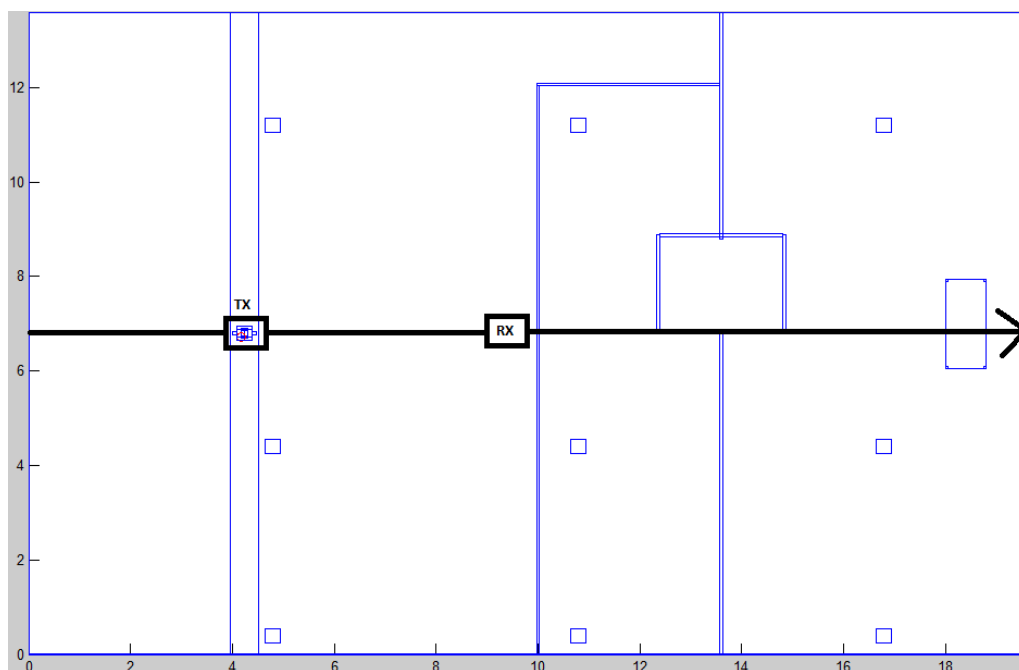


Figura VI.55. Radial que atraviesa el eje x de la planta.

Antena Tx situada a 0.16 metros, en el tobillo derecho, a una distancia de 4.17 metros y antena Rx situada en 8.8 metros.

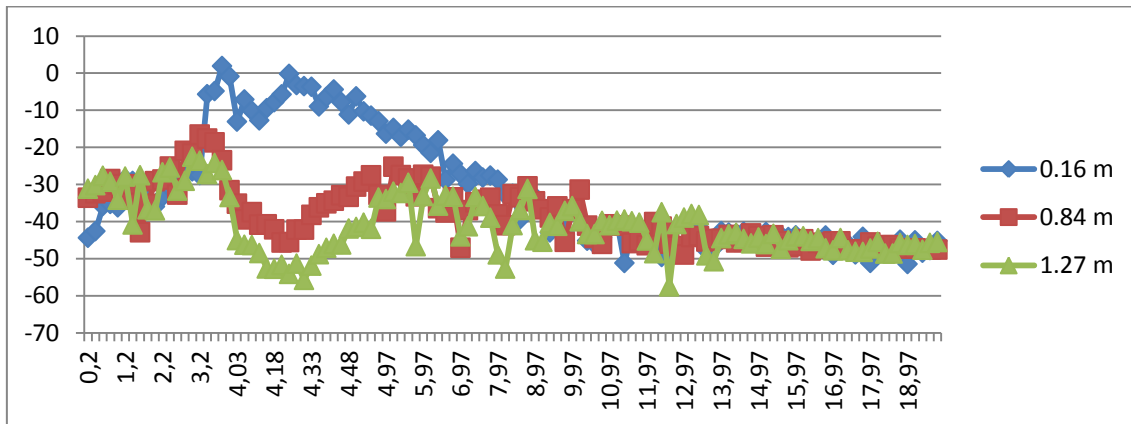


Figura VI.56. Potencia recibida en cada punto del Radial eje x.

2. Antena Tx situada en la muñeca derecha del individuo

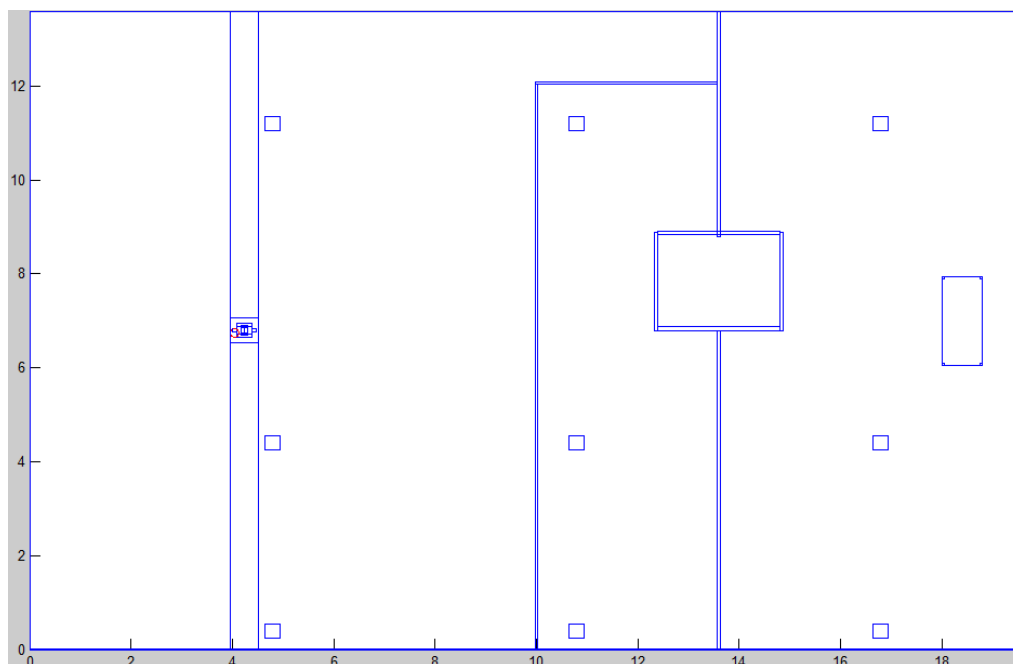


Figura VI.57. Antena Tx situada en la muñeca de la persona.

0.16 metros

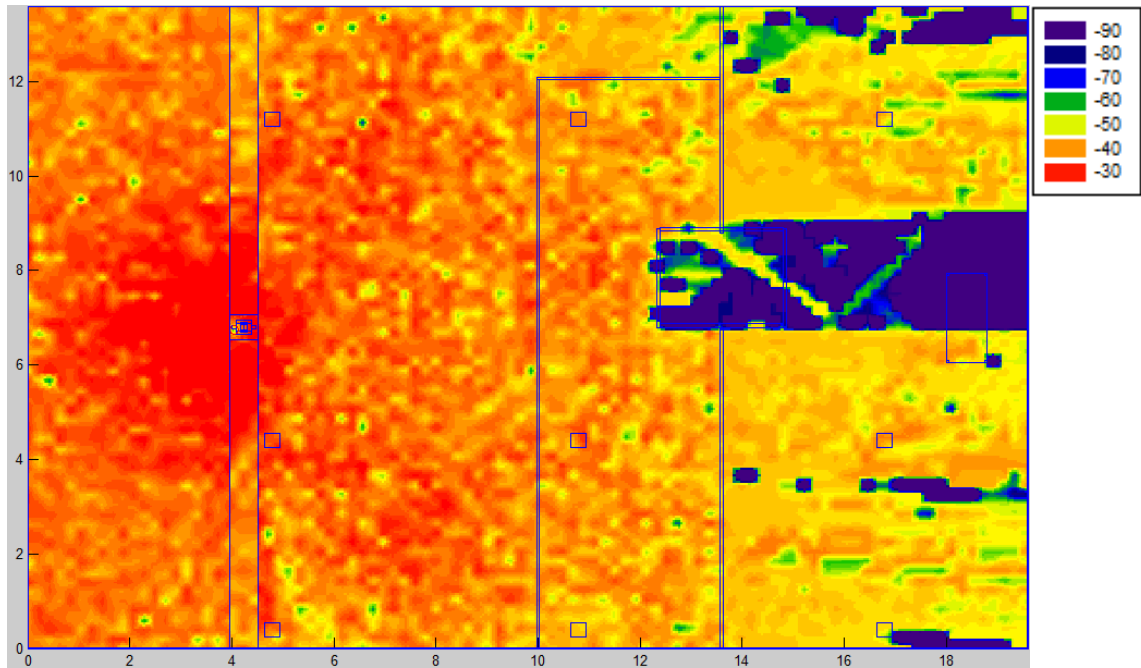


Figura VI.58. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

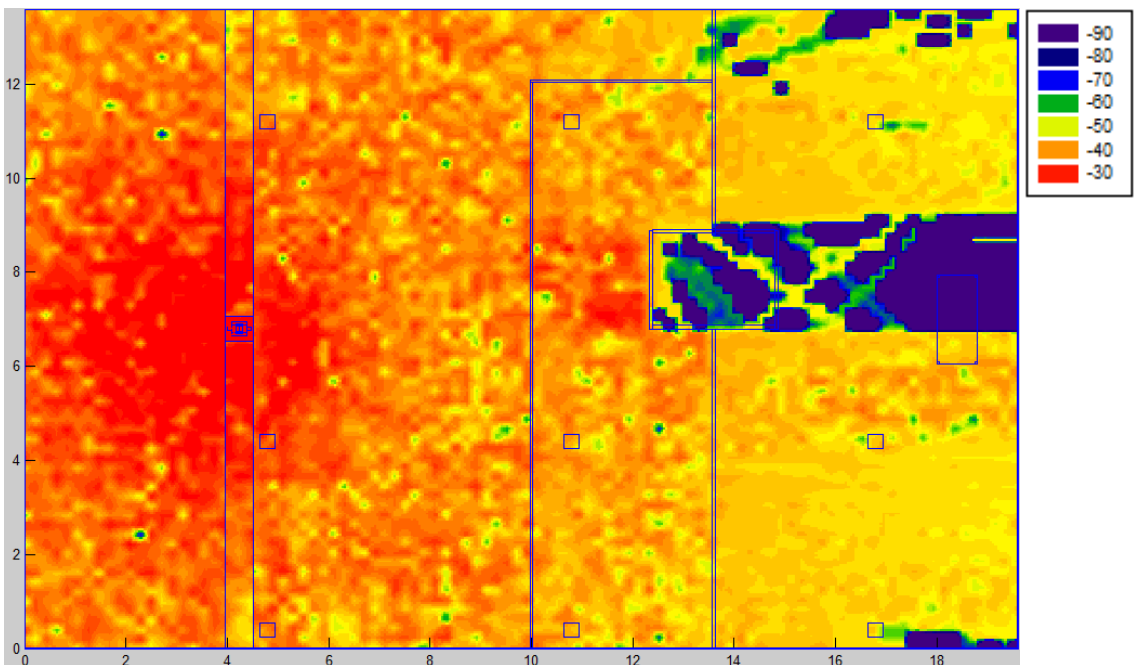


Figura VI.59. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

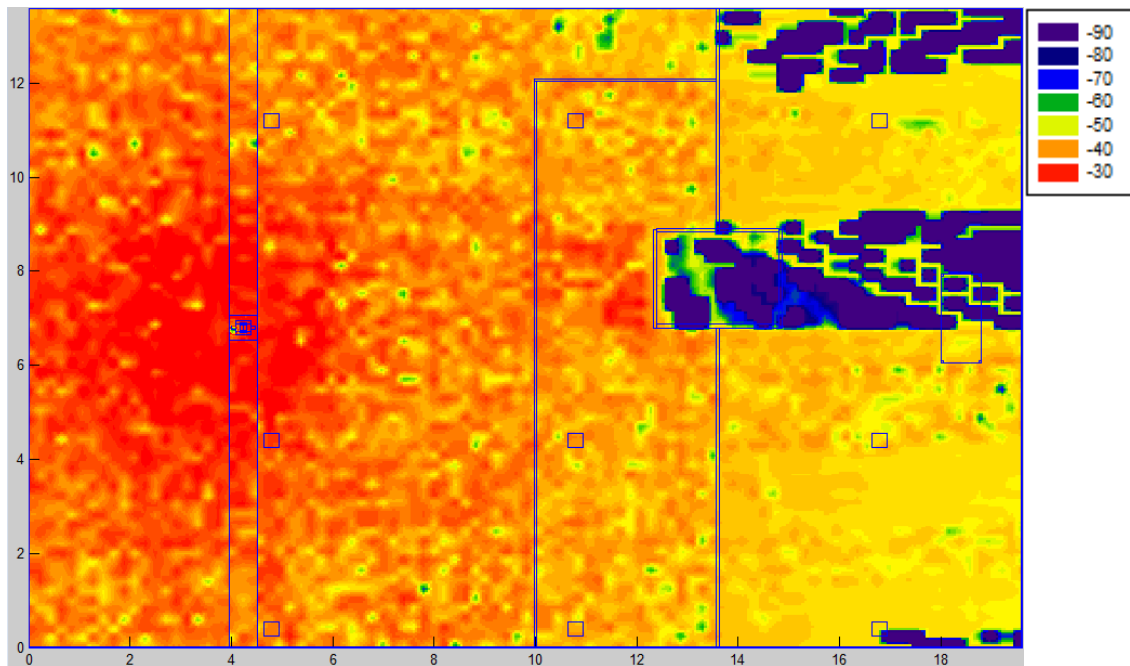


Figura VI.60. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la distribución de potencia a lo largo de la planta a diferentes alturas, atravesando desde el cuerpo humano (donde se encuentra la antena TX) hasta la antena receptora, por lo que se puede observar la transmisión de potencia de TX a RX.

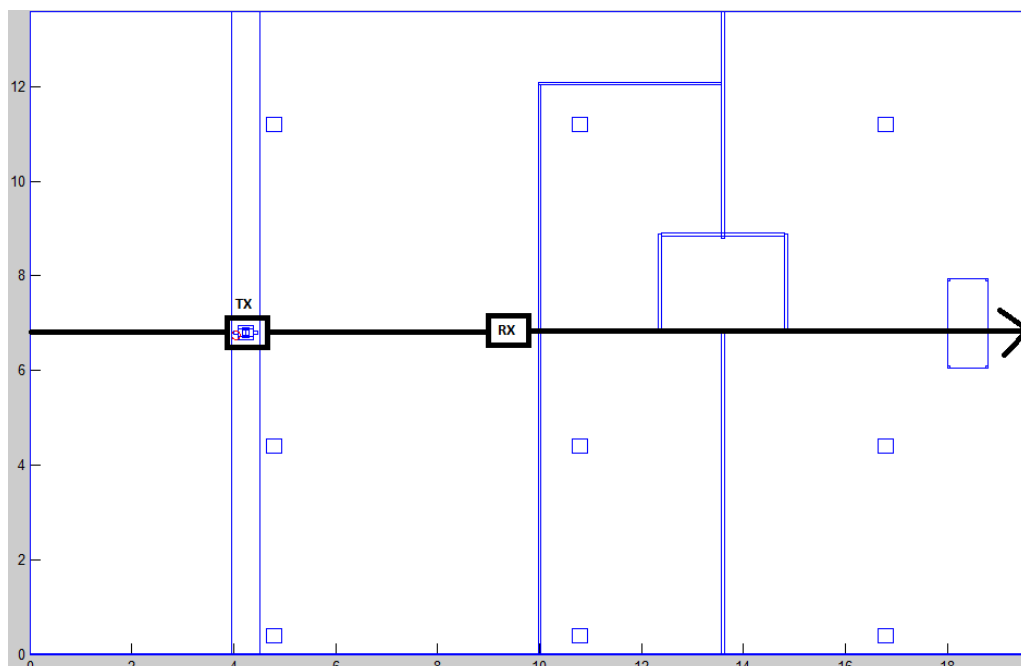


Figura VI.61. Radial que atraviesa el eje x de la planta.

Antena Tx situada a 0.84 metros, en la muñeca derecha, a una distancia de 4.04 metros y antena Rx situada en 8.8 metros.

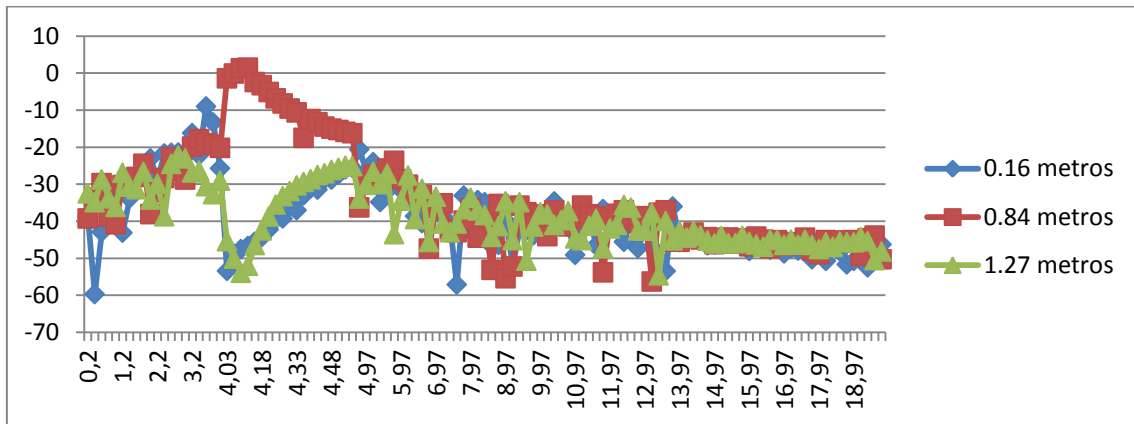


Figura VI.62. Potencia recibida en cada punto del Radial eje x.

3. Antena Tx situada en el pecho del individuo

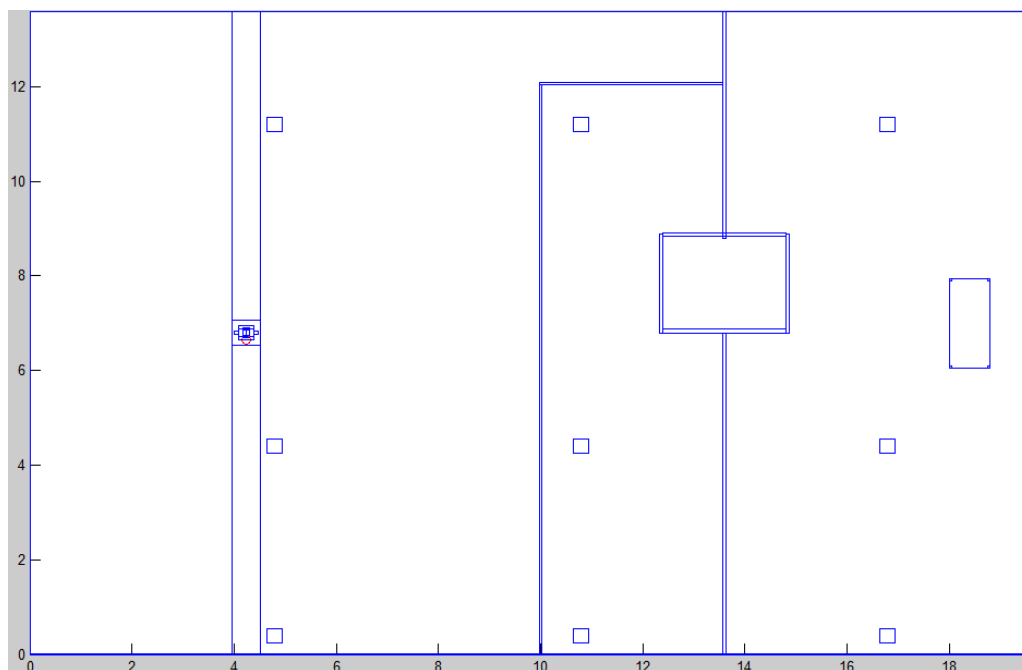


Figura VI.63. Antena Tx situada en el pecho de la persona.

0.16 metros

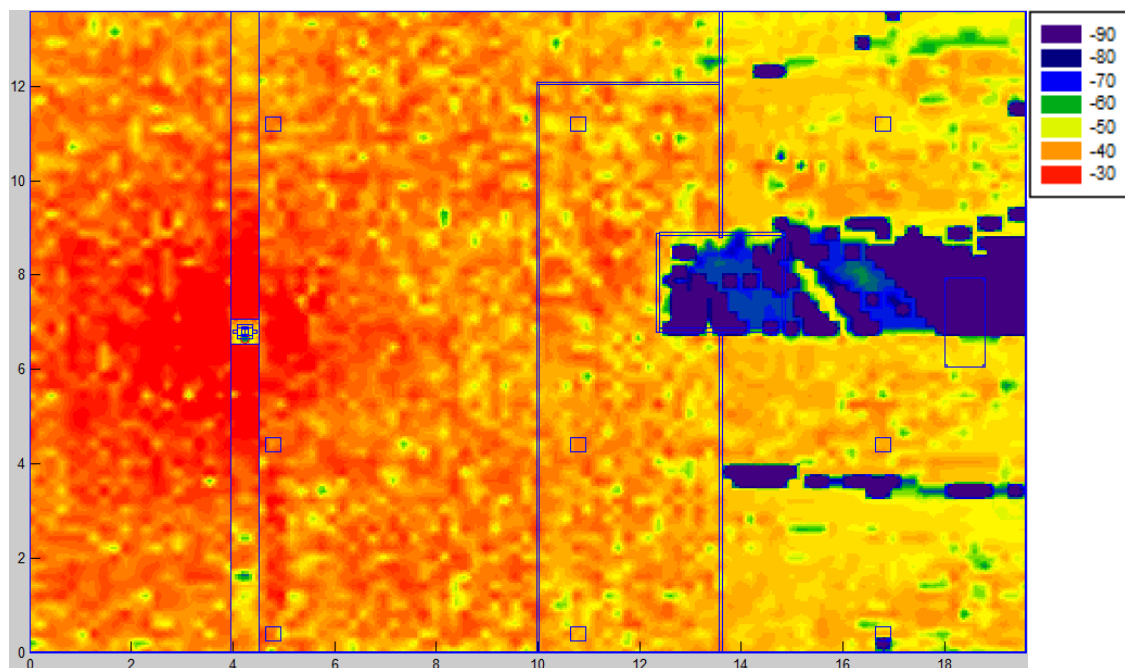


Figura VI.64. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

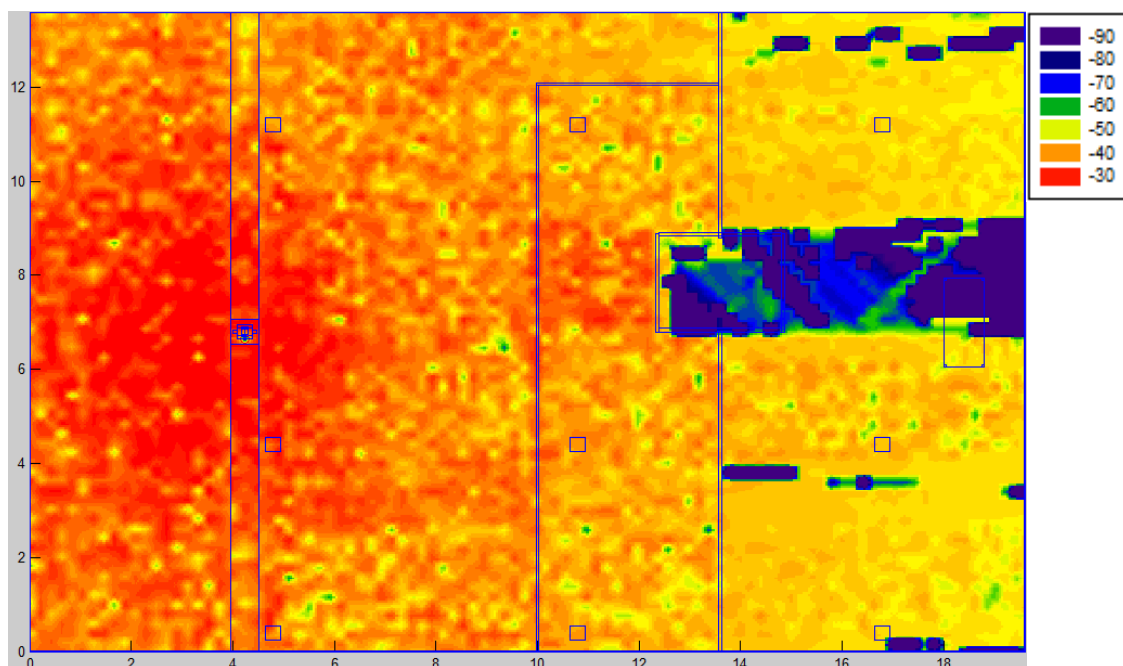


Figura VI.65. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

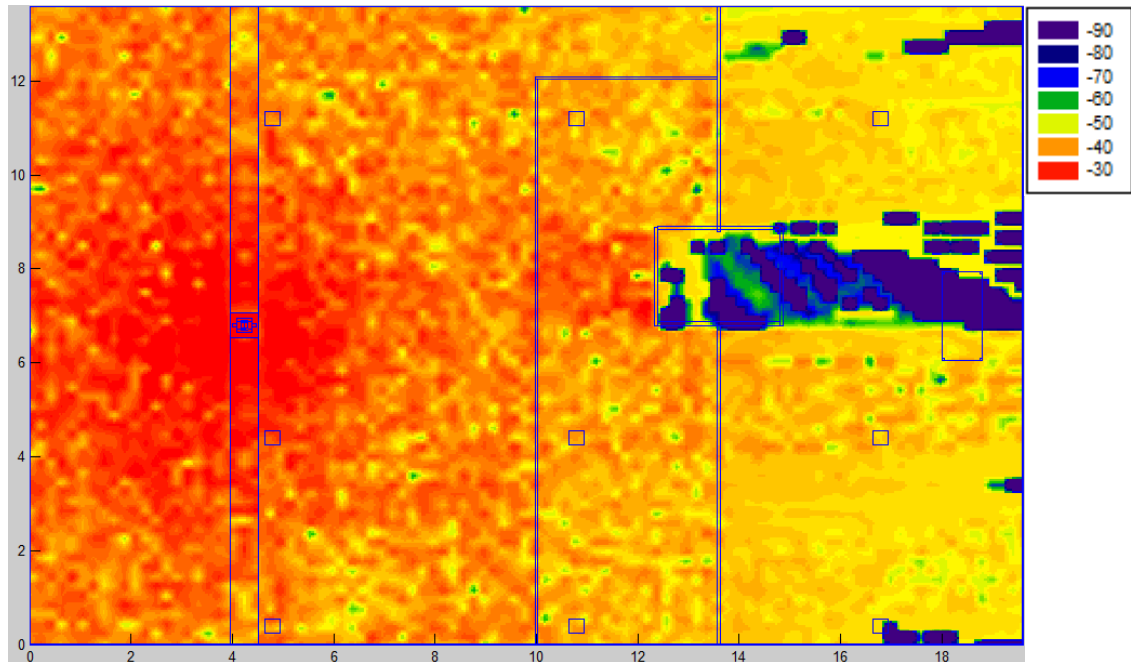


Figura VI.66. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la distribución de potencia a lo largo de la planta a diferentes alturas, atravesando desde el cuerpo humano (donde se encuentra la antena TX) hasta la antena receptora, por lo que se puede observar la transmisión de potencia de TX a RX.

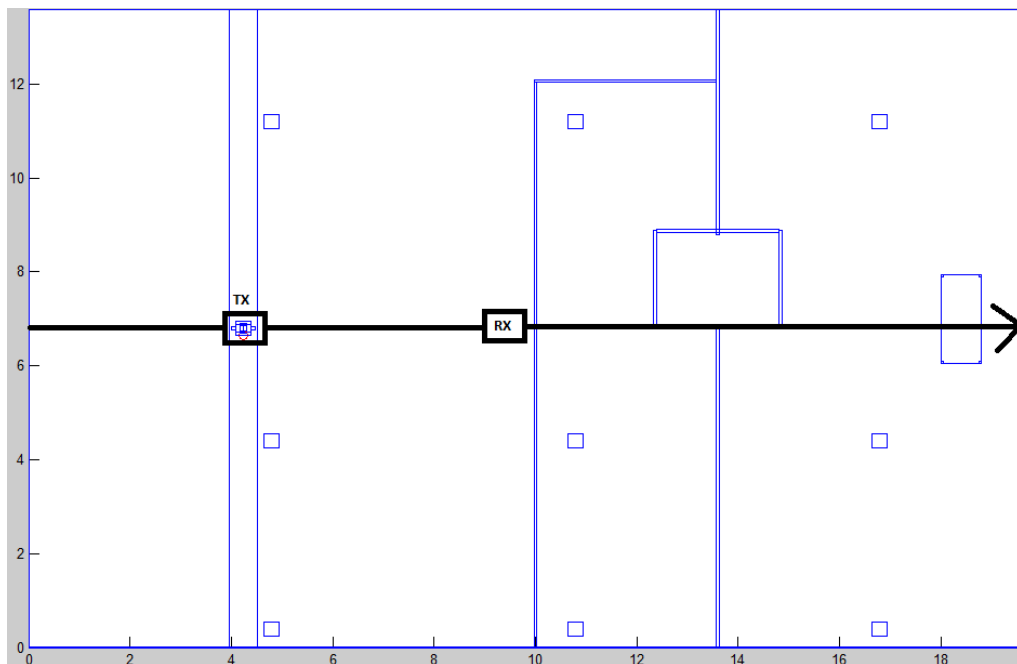


Figura VI.67. Radial que atraviesa el eje x de la planta.

Antena Tx situada a 1.27 metros, en el pecho, a una distancia de 4.24 metros y antena Rx situada en 8.8 metros.

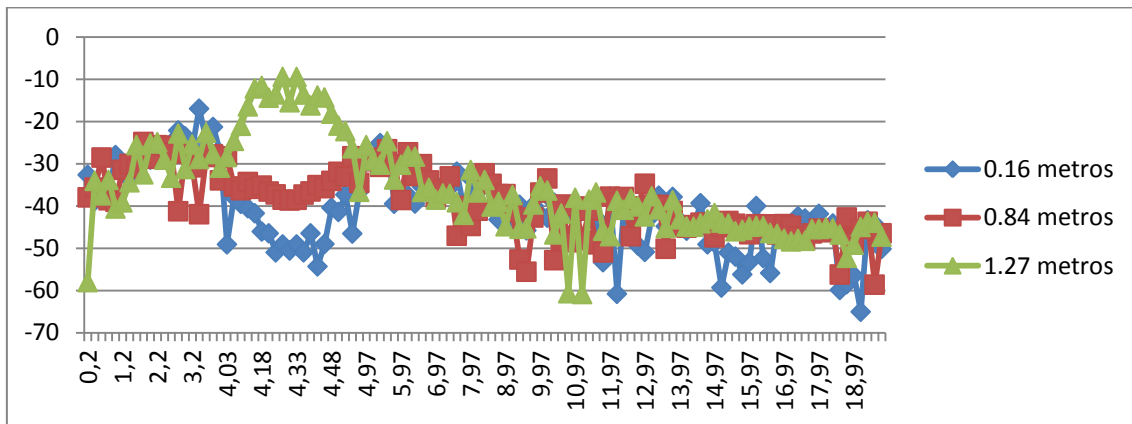


Figura VI.68. Potencia recibida en cada punto del Radial eje x.

Comparación de medidas

Se realizaron medidas tal y como se ha explicado en páginas anteriores, situando la antena Tx en tres posiciones distintas (tobillo derecho, muñeca derecha y pecho) del individuo y éste, a 270° respecto de la antena Rx. En cada caso, la potencia recibida en el punto Rx es la siguiente:

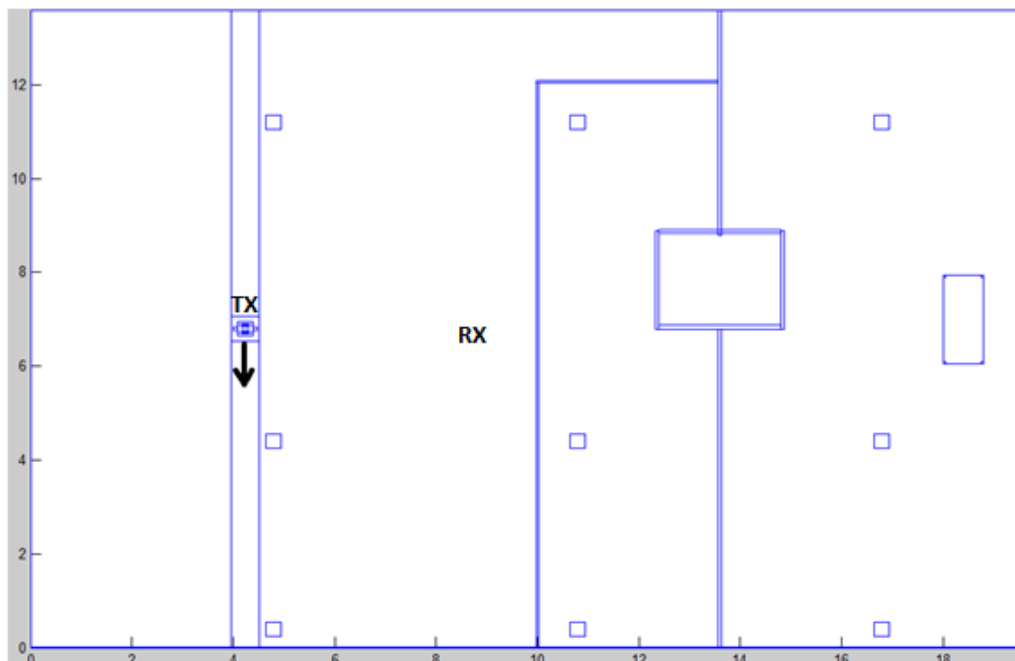


Figura VI.69. Escenario CASO 2-POSICIÓN 2.

ANTENA TX	POTENCIA RECIBIDA (TRAZADO DE RAYOS)	POTENCIA RECIBIDA (MEDIDAS IN SITU)
Tobillo (0.16 m)	-56.11 dBm	-55.21 dBm
Muñeca (0.84 m)	-54.31 dBm	-54.06 dBm
Pecho (1.27 m)	-58.35 dBm	-56.46dBm

Tabla VI.6. Resultados CASO 2-POSICIÓN 2 comparados.

POSICIÓN 3: el individuo se encuentra situado a 180 grados con respecto a la antena receptora. La persona mira hacia la izquierda. Se realizan cortes a tres alturas del plano z para ver la distribución de potencia recibida a diferentes alturas.

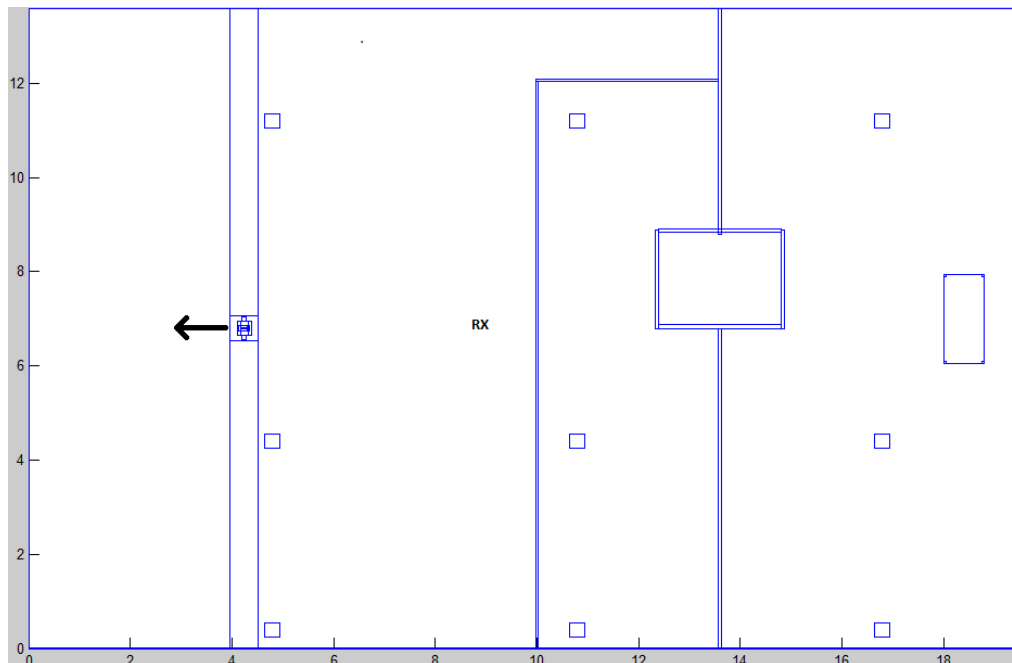


Figura VI.70. Persona situada a 180° con respecto a la antena Rx.

1. Antena Tx situada en el tobillo derecho del individuo

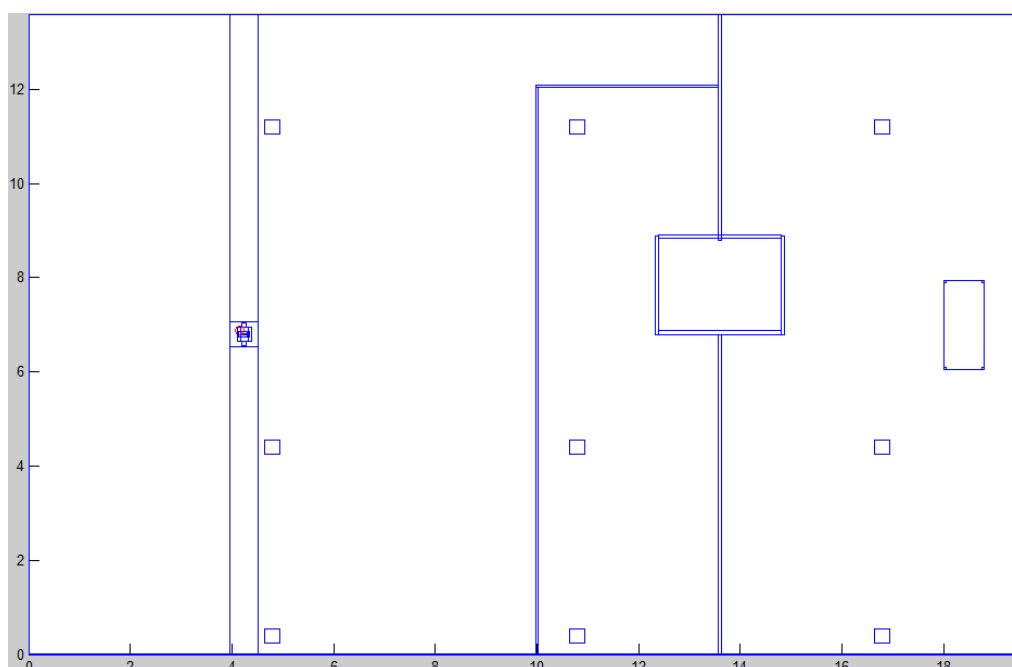


Figura VI.71. Antena Tx situada en el tobillo de la persona.

0.16 metros

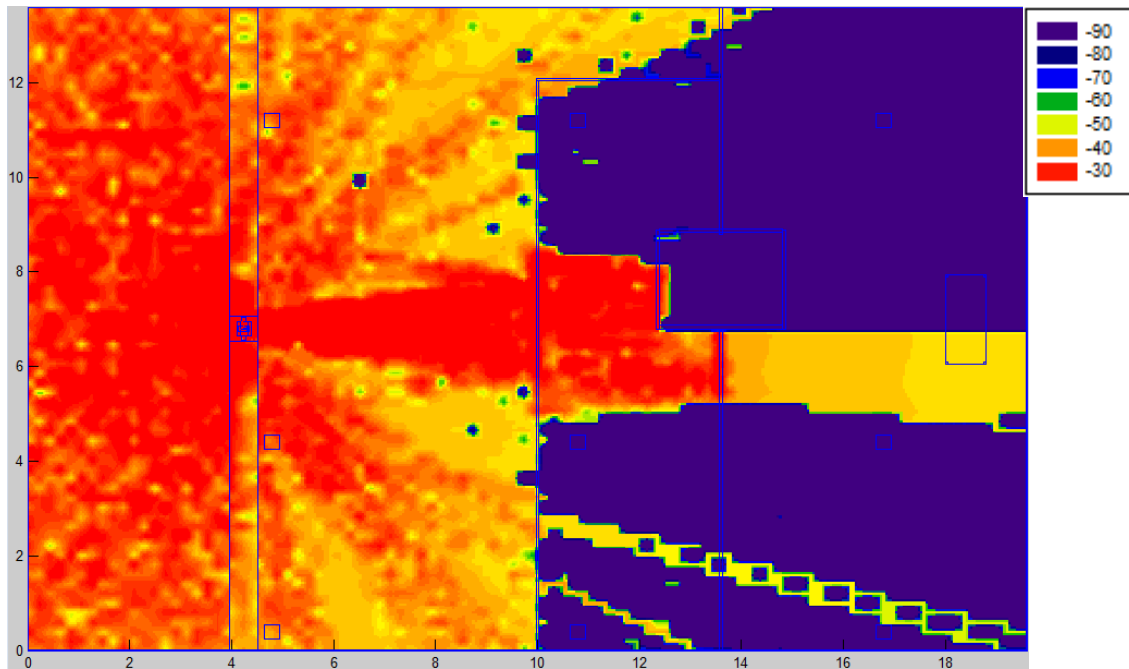


Figura VI.72. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

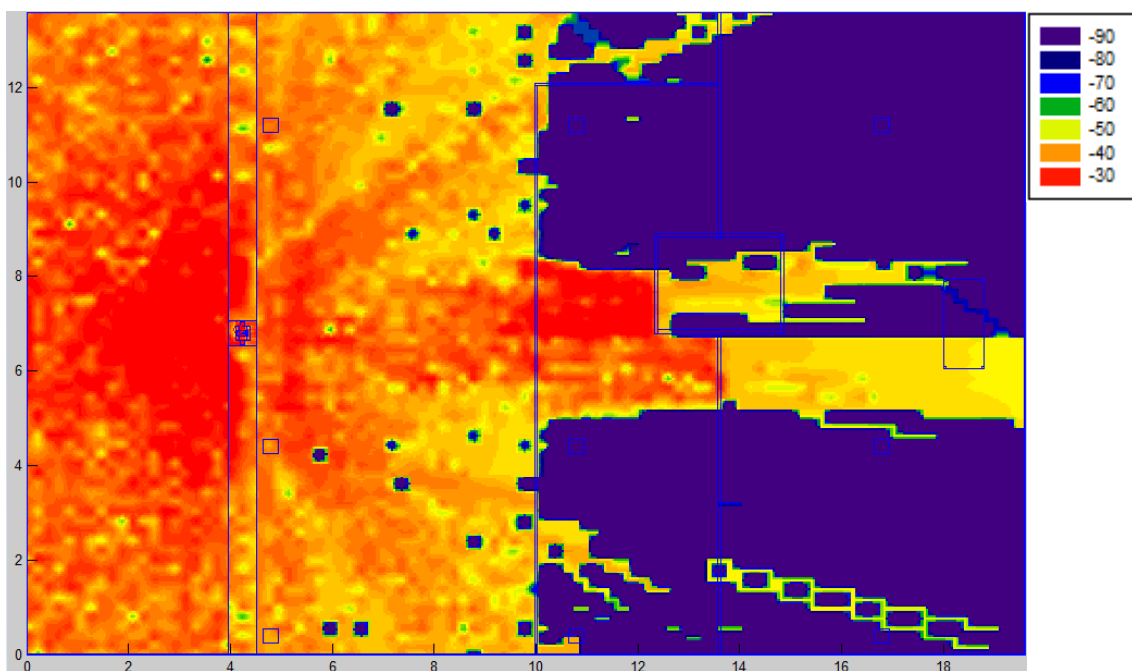


Figura VI.73. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

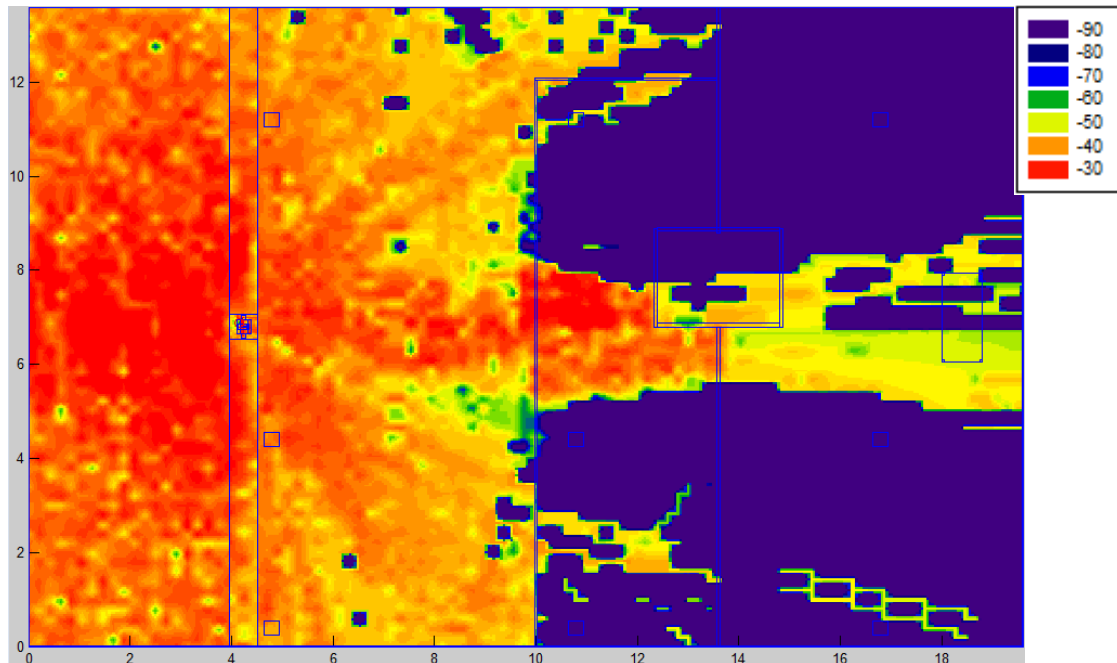


Figura VI.74. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la distribución de potencia a lo largo de la planta a diferentes alturas, atravesando desde el cuerpo humano (donde se encuentra la antena TX) hasta la antena receptora, por lo que se puede observar la transmisión de potencia de TX a RX.

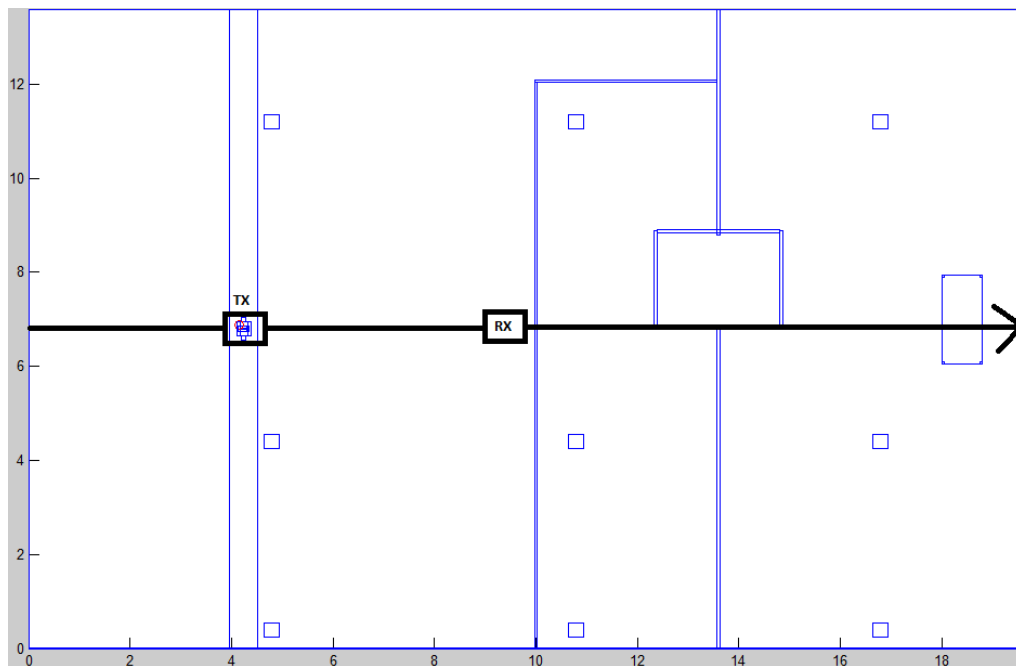


Figura VI.75. Radial que atraviesa el eje x de la planta.

Antena Tx situada a 0.16 metros, en el tobillo derecho, a una distancia de 4.16 metros y antena Rx situada en 8.8 metros.

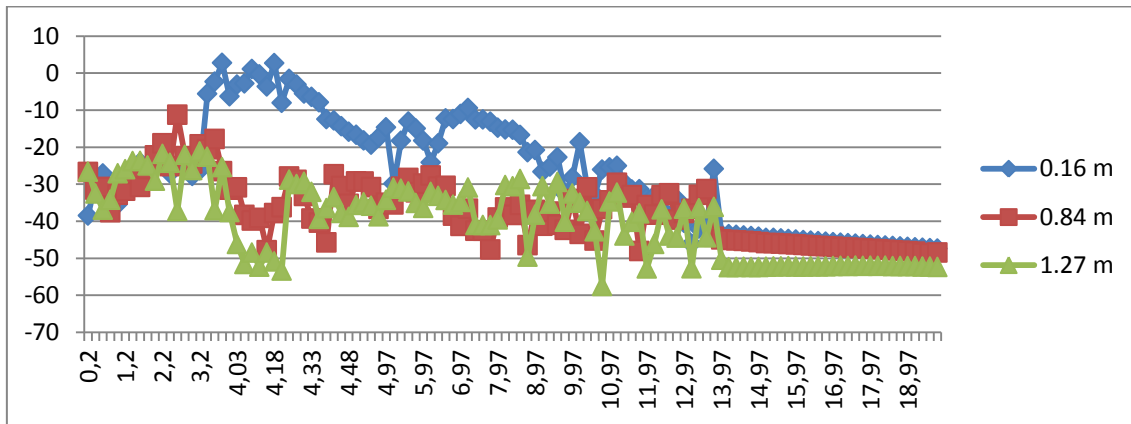


Figura VI.76. Potencia recibida en cada punto del Radial eje x.

2. Antena Tx situada en la muñeca derecha del individuo

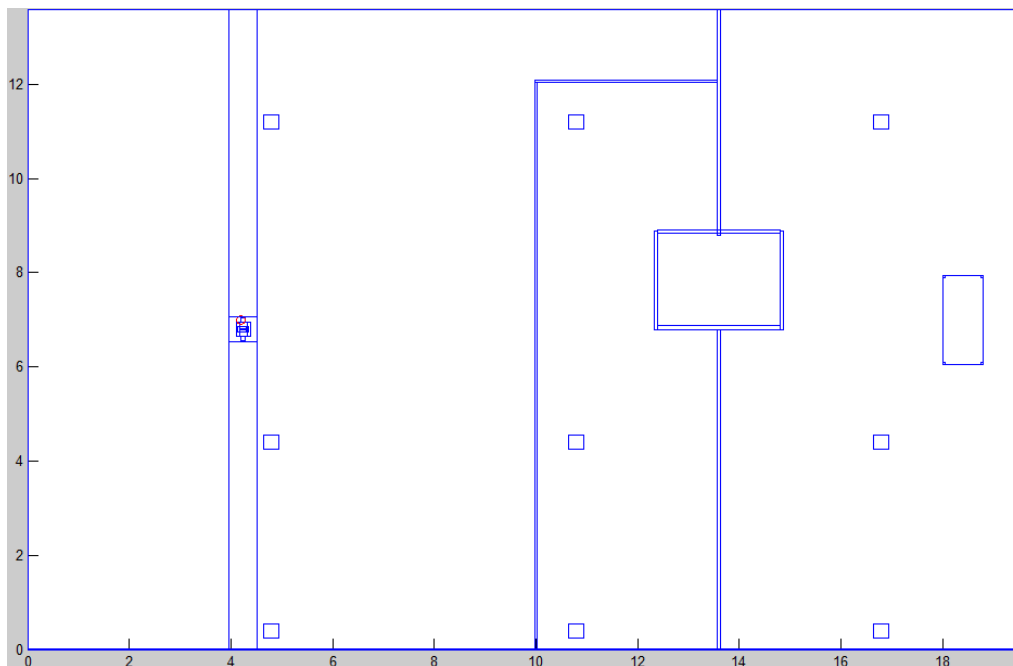


Figura VI.77. Antena Tx situada en la muñeca de la persona.

0.16 metros

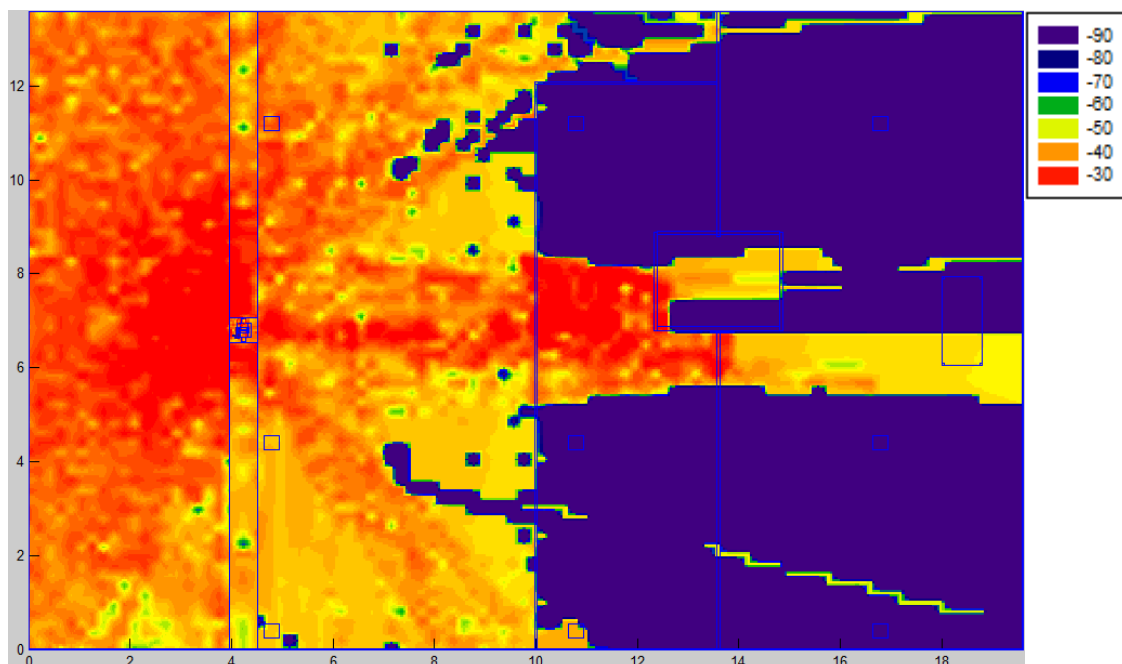


Figura VI.78. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

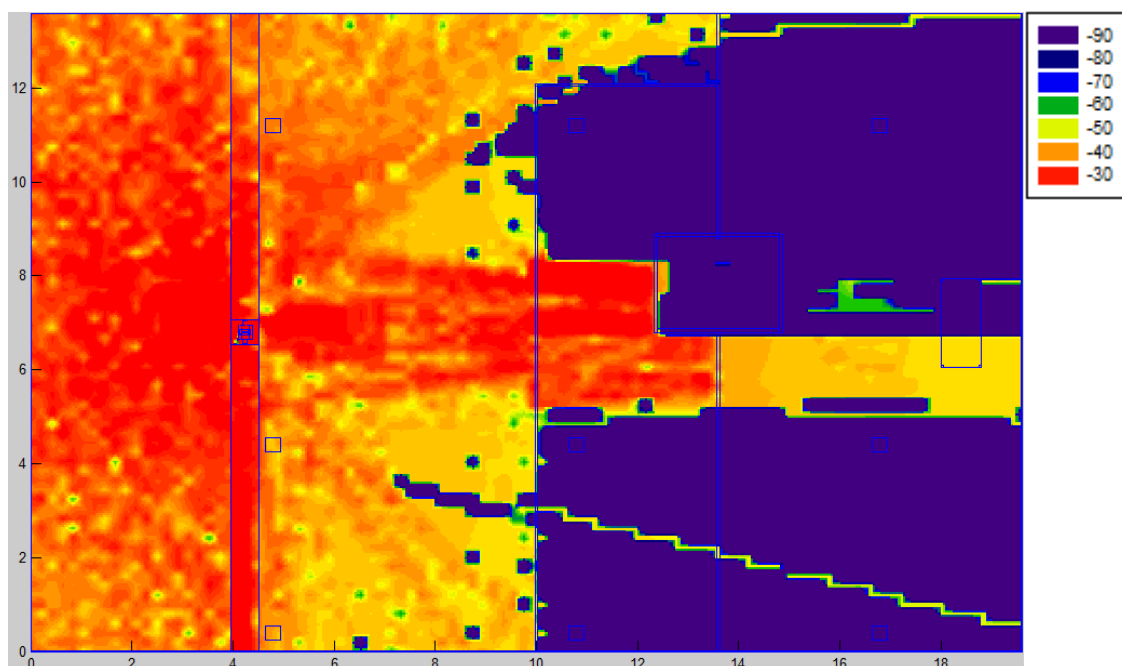


Figura VI.79. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

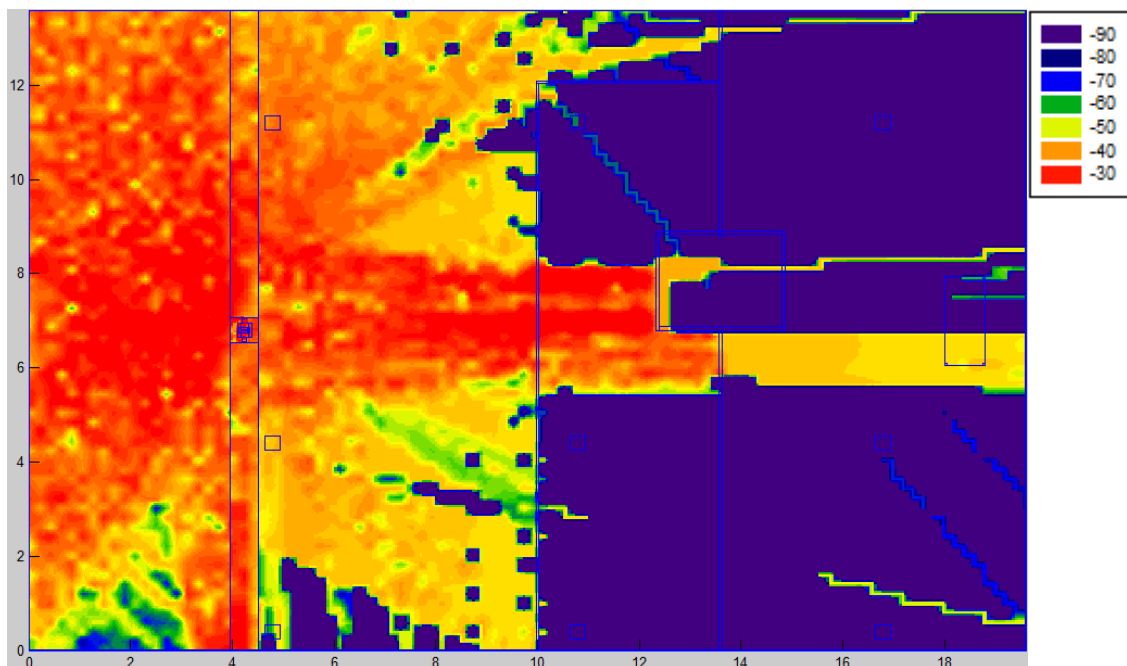


Figura VI.80. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la distribución de potencia a lo largo de la planta a diferentes alturas, atravesando desde el cuerpo humano (donde se encuentra la antena TX) hasta la antena receptora, por lo que se puede observar la transmisión de potencia de TX a RX.

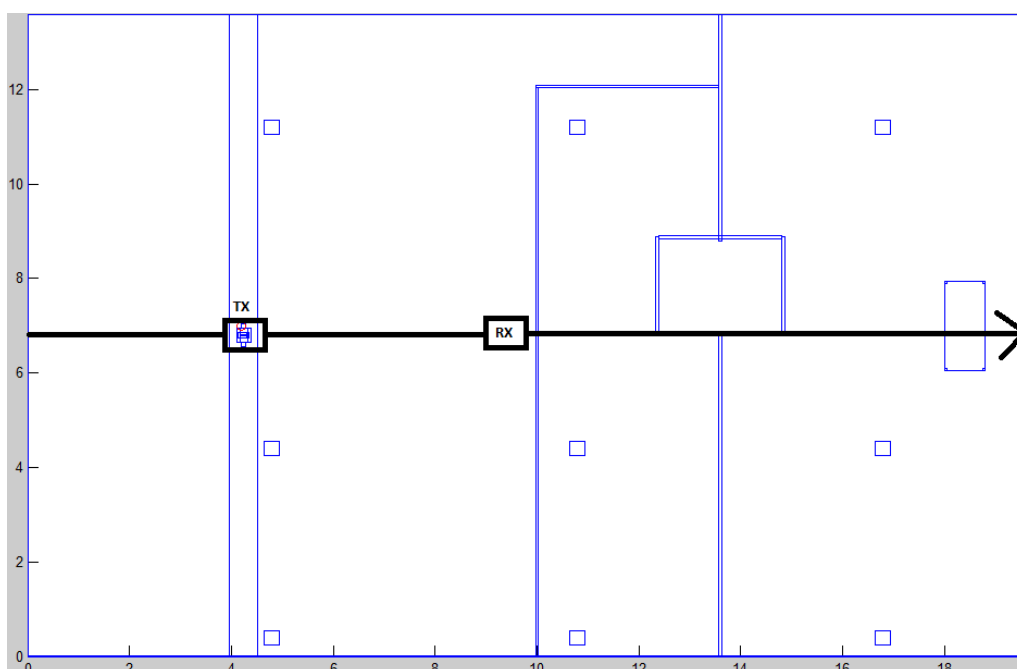


Figura VI.81. Radial que atraviesa el eje x de la planta.

Antena Tx situada a 0.84 metros, en la muñeca derecha, a una distancia de 4.19 metros y antena Rx situada en 8.8 metros.

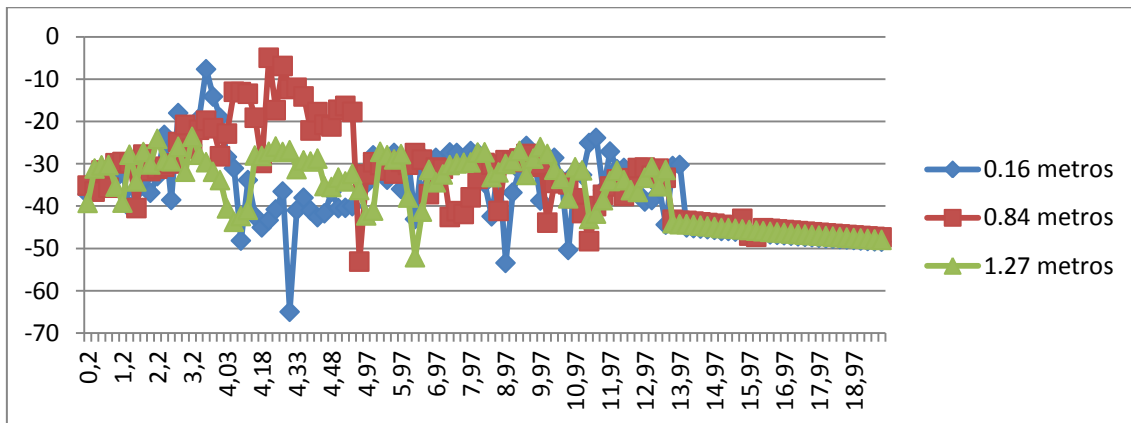


Figura VI.82. Potencia recibida en cada punto del Radial eje x.

3. Antena Tx situada en el pecho del individuo

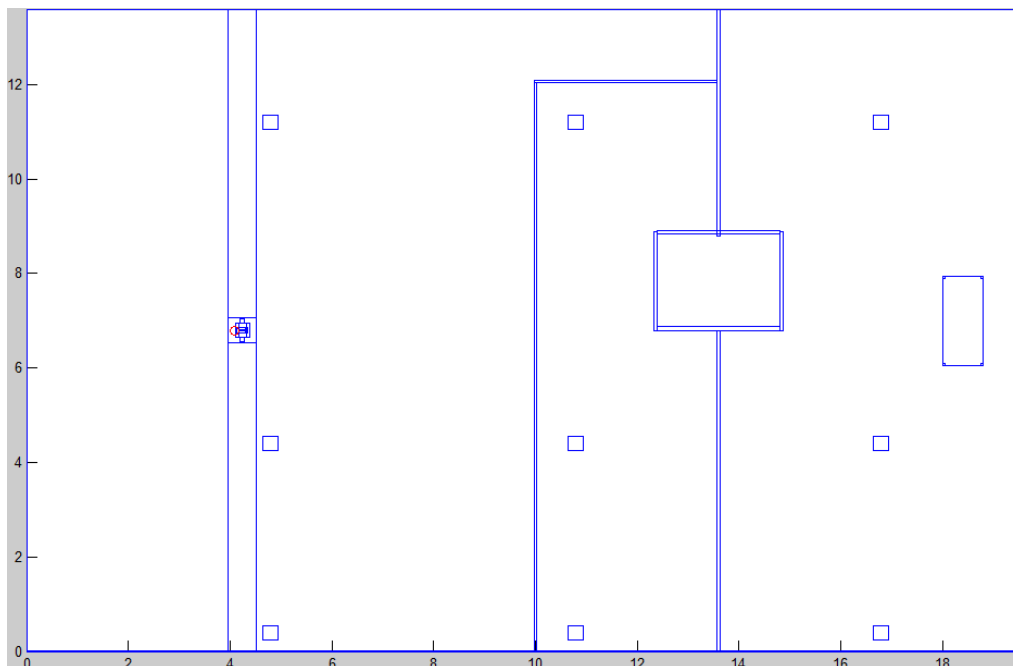


Figura VI.83. Antena Tx situada en el pecho de la persona.

0.16 metros

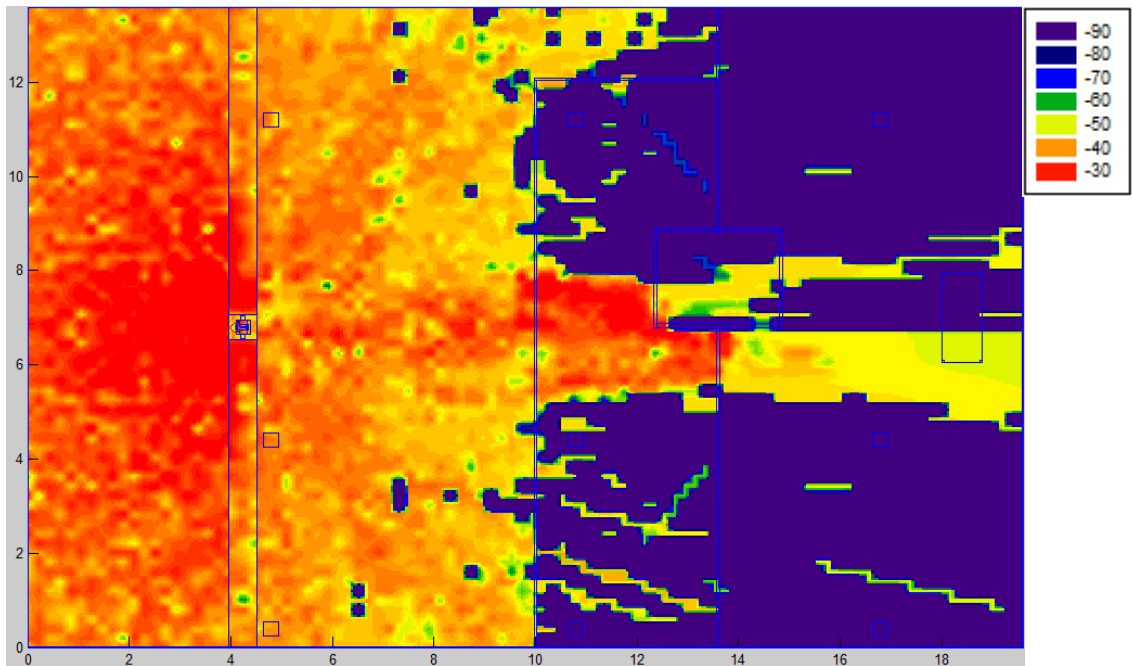


Figura VI.84. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

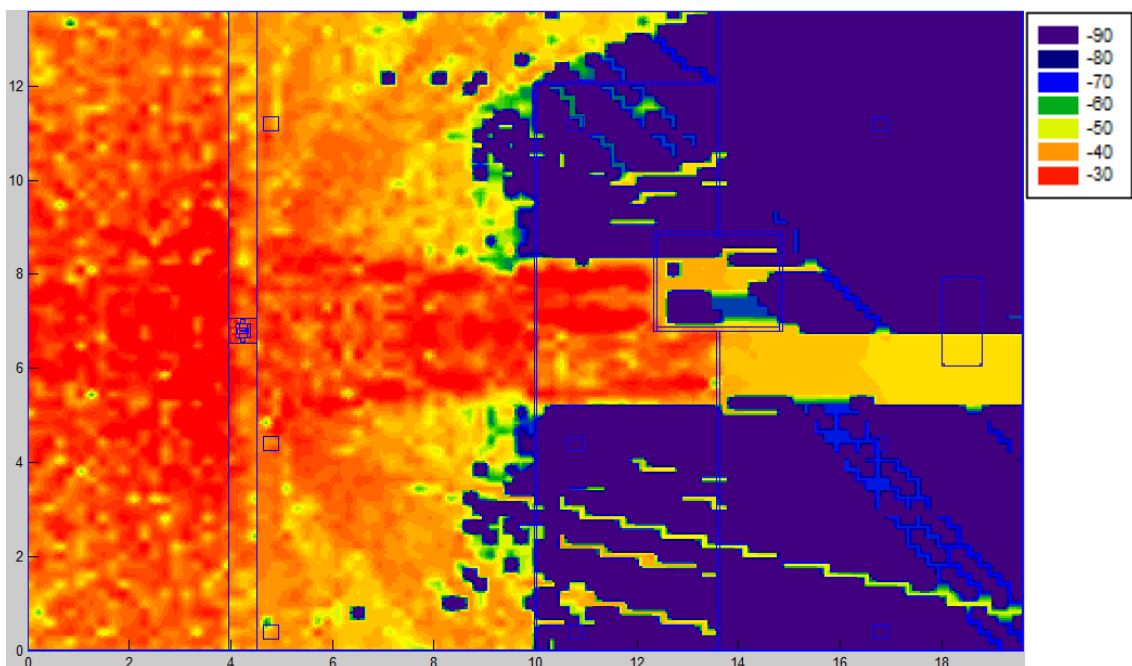


Figura VI.85. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

1.27 metros

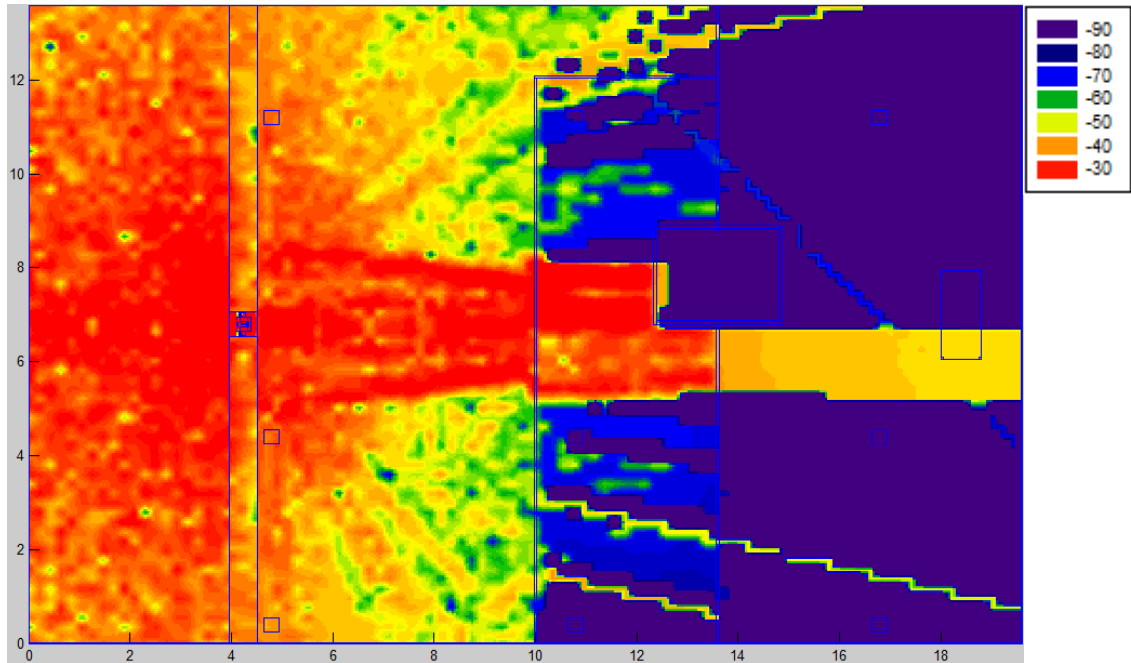


Figura VI.86. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la distribución de potencia a lo largo de la planta a diferentes alturas, atravesando desde el cuerpo humano (donde se encuentra la antena TX) hasta la antena receptora, por lo que se puede observar la transmisión de potencia de TX a RX.

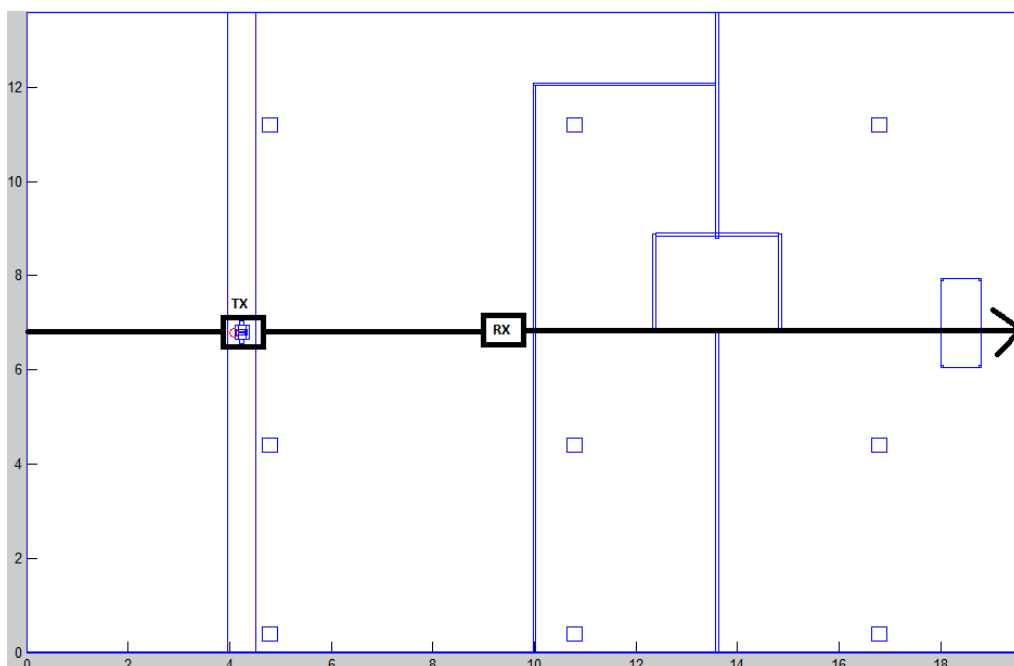


Figura VI.87. Radial que atraviesa el eje x de la planta.

Antena Tx situada a 1.27 metros, en el pecho, a una distancia de 4.09 metros y antena Rx situada en 8.8 metros.

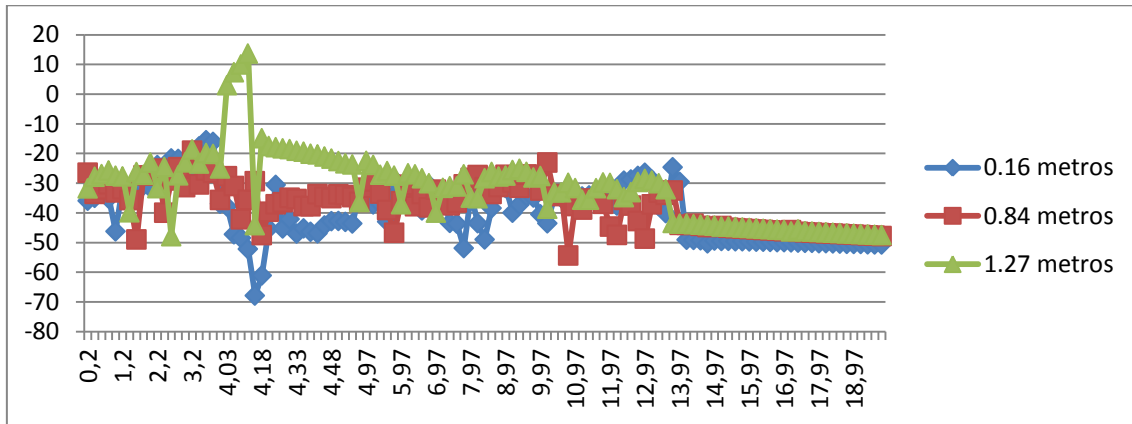


Figura VI.88. Potencia recibida en cada punto del Radial eje x.

Comparación de medidas

Se realizaron medidas tal y como se ha explicado en páginas anteriores, situando la antena Tx en tres posiciones distintas (tobillo derecho, muñeca derecha y pecho) del individuo y éste, a 180° respecto de la antena Rx. En cada caso, la potencia recibida en el punto Rx es la siguiente:

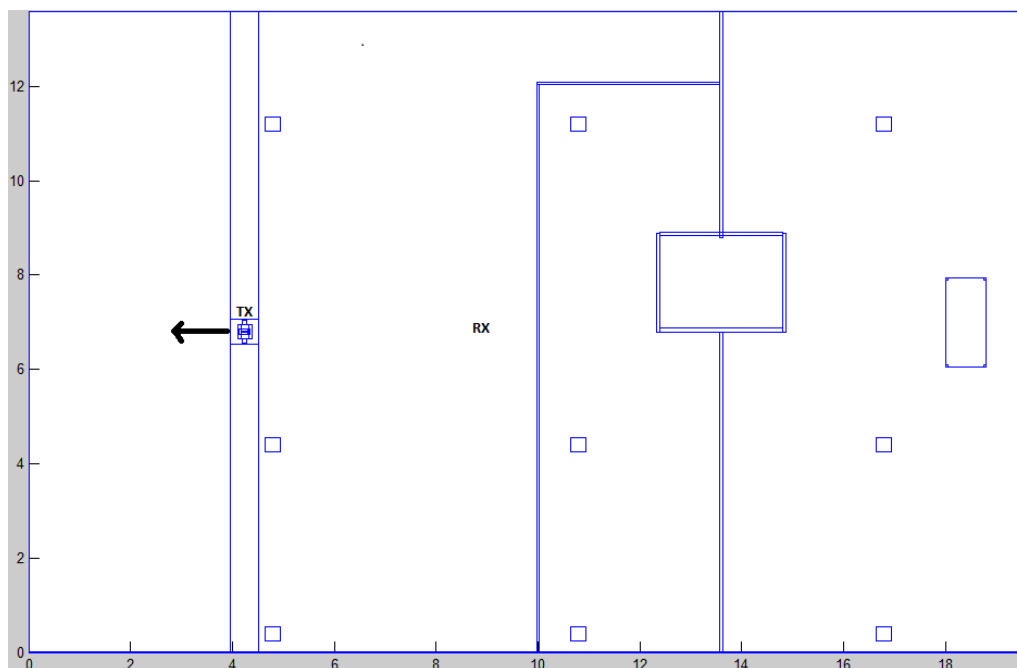


Figura VI. 89. Escenario CASO 2-POSICIÓN 3.

ANTENA TX	POTENCIA RECIBIDA (TRAZADO DE RAYOS)	POTENCIA RECIBIDA (MEDIDAS IN SITU)
Tobillo (0.16 m)	-47.10 dBm	-52.03 dBm
Muñeca (0.84 m)	-56.50 dBm	-54.12 dBm
Pecho (1.27 m)	-65.88dBm	-57.02 dBm

Tabla VI. 7. Resultados CASO 2-POSICIÓN 3 comparados.

POSICIÓN 4: el individuo se encuentra situado a 0 grados con respecto a la antena receptora. La persona mira hacia la derecha. Se realizan cortes a tres alturas del plano z para ver la distribución de potencia recibida a diferentes alturas.

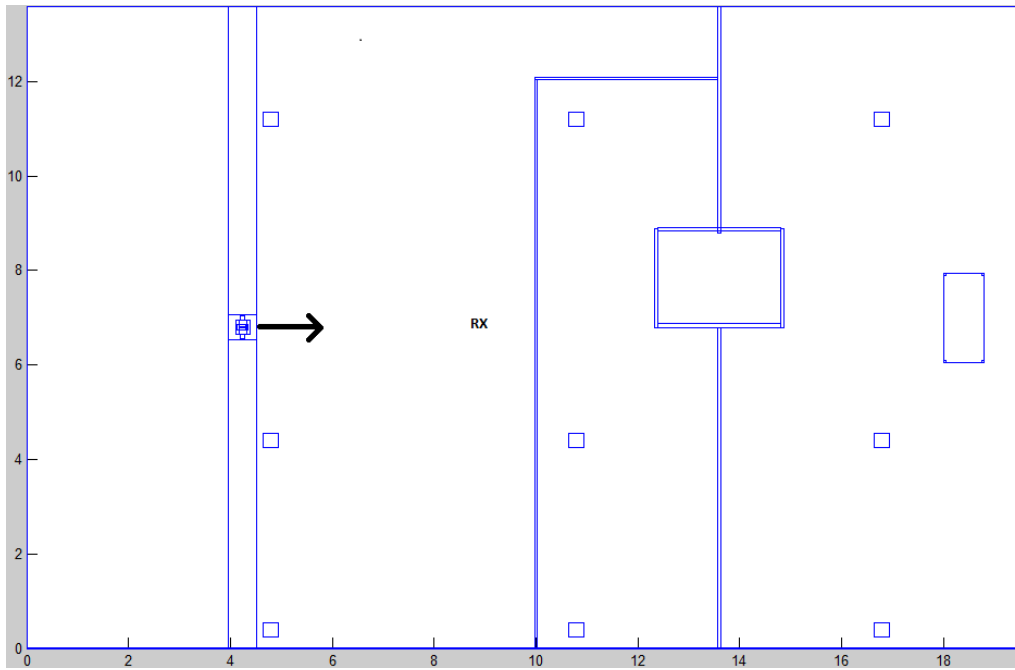


Figura VI.90. Persona situada a 0° con respecto a la antena Tx.

1. Antena Tx situada en el tobillo derecho del individuo

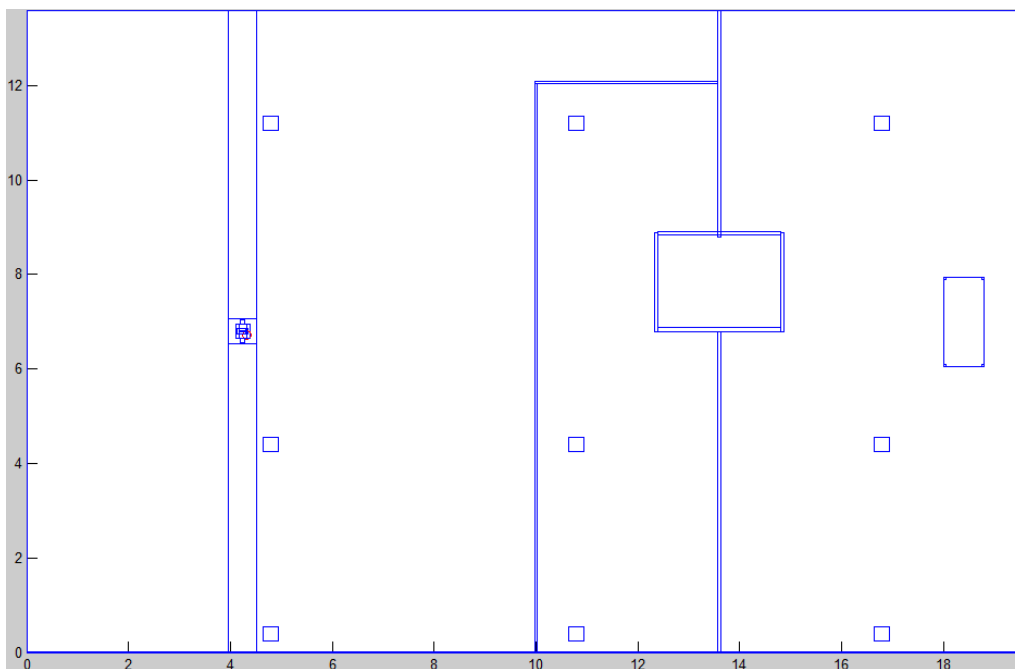


Figura VI.91. Antena Tx situada en el tobillo derecho de la persona.

0.16 metros

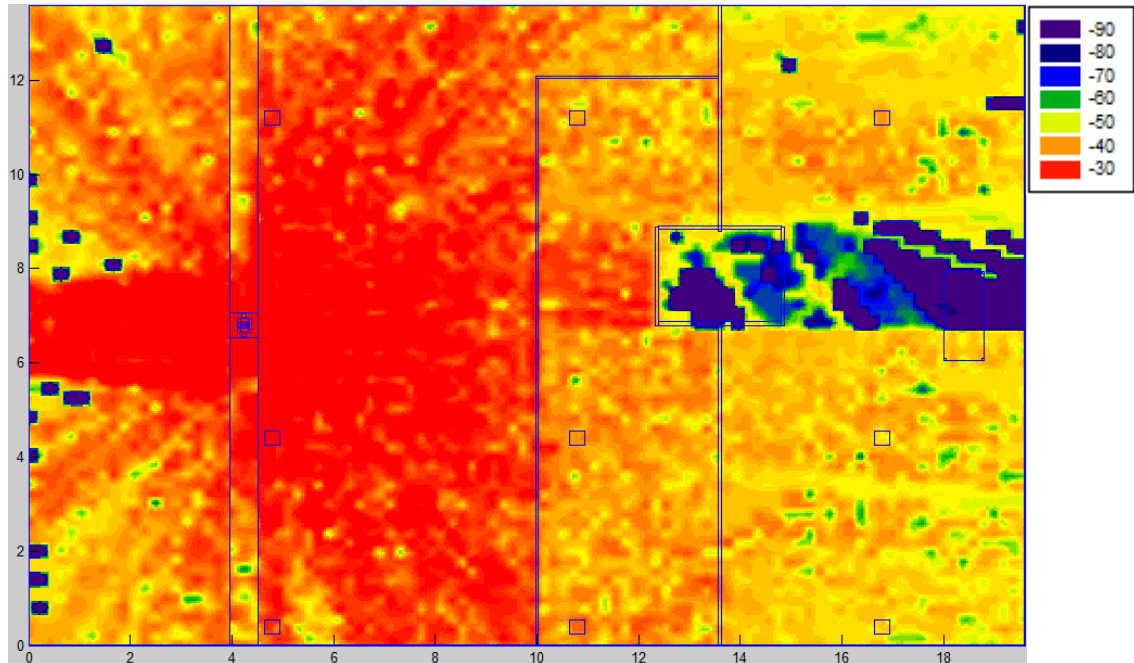


Figura VI.92. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

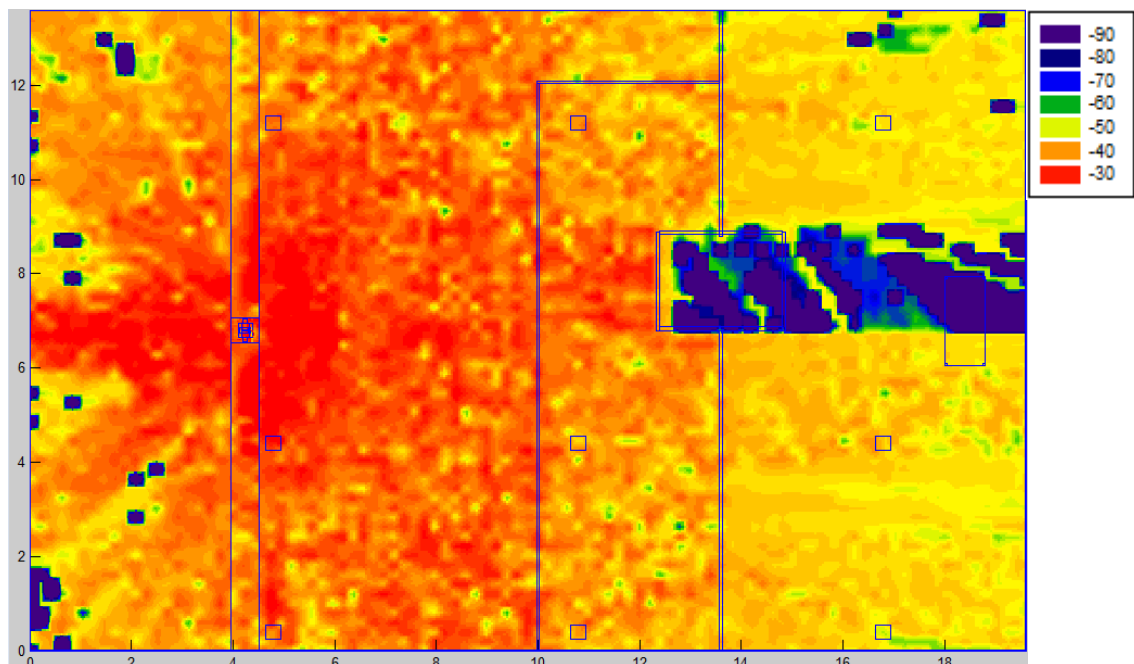


Figura VI.93. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

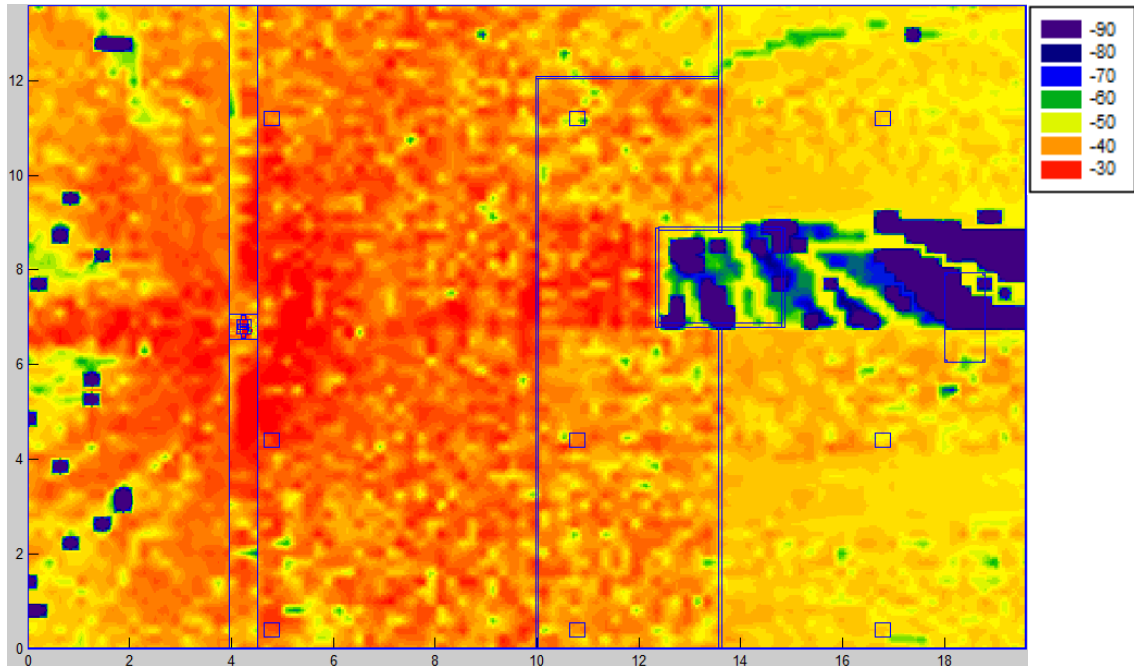


Figura VI.94. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la distribución de potencia a lo largo de la planta a diferentes alturas, atravesando desde el cuerpo humano (donde se encuentra la antena TX) hasta la antena receptora, por lo que se puede observar la transmisión de potencia de TX a RX.

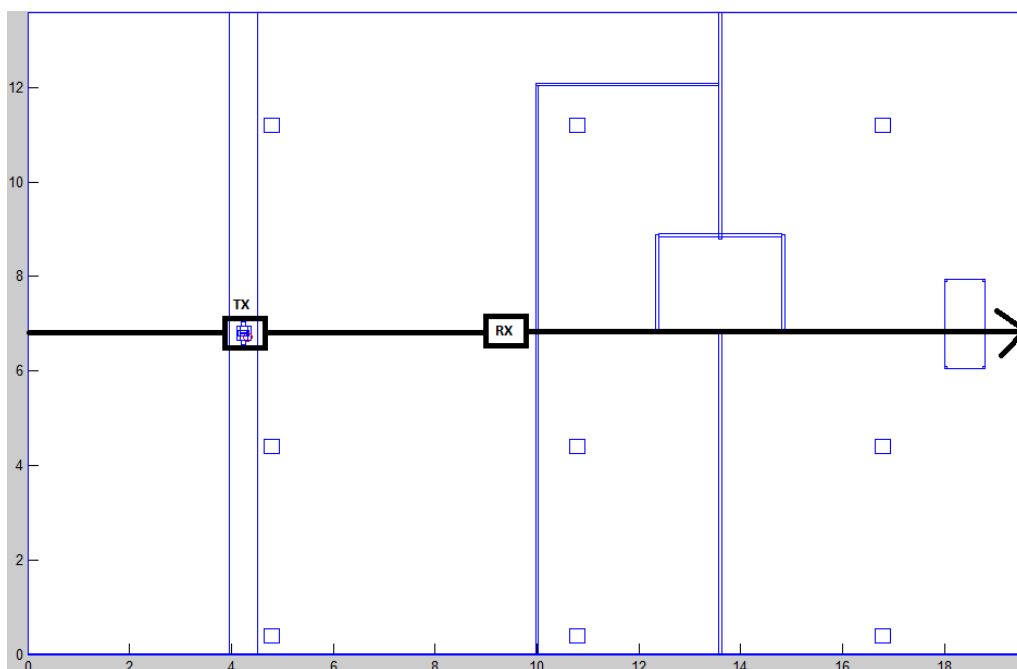


Figura VI.95. Radial que atraviesa el eje x de la planta.

Antena Tx situada a 0.16 metros, en el tobillo derecho, a una distancia de 4.32 metros y antena Rx situada en 8.8 metros.

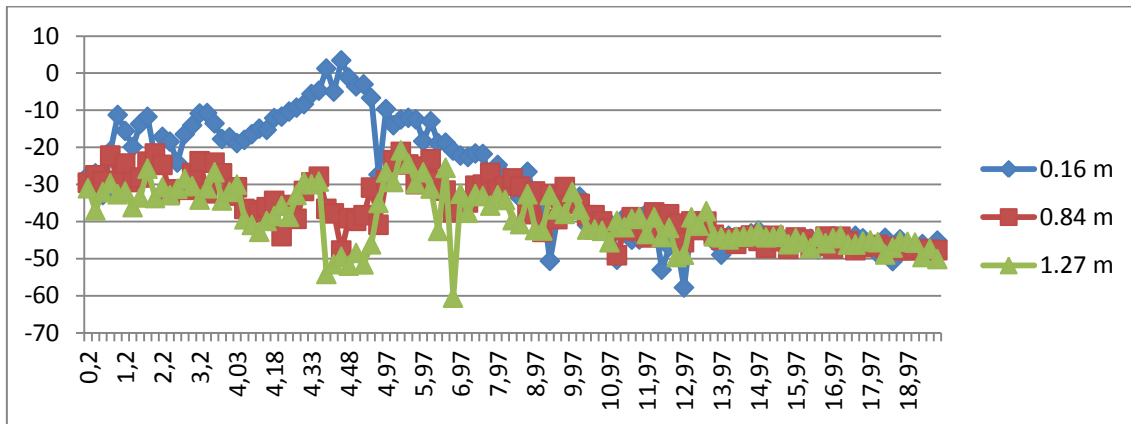


Figura VI.96. Potencia recibida en cada punto del Radial eje x.

2. Antena Tx situada en la muñeca derecha del individuo

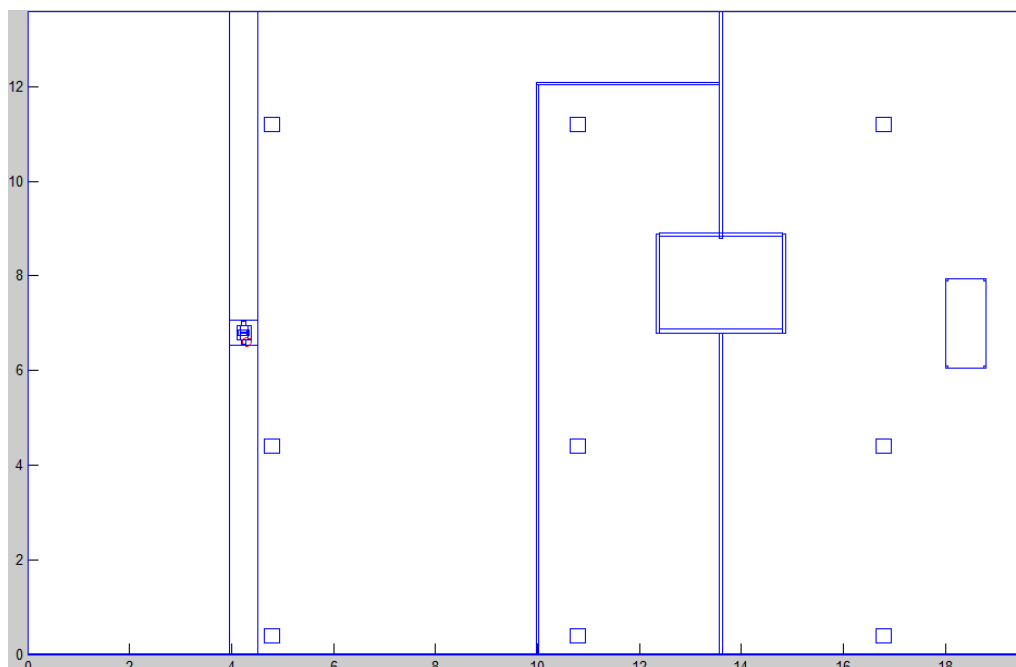


Figura VI.97. Antena Tx situada en la muñeca derecha de la persona.

0.16 metros

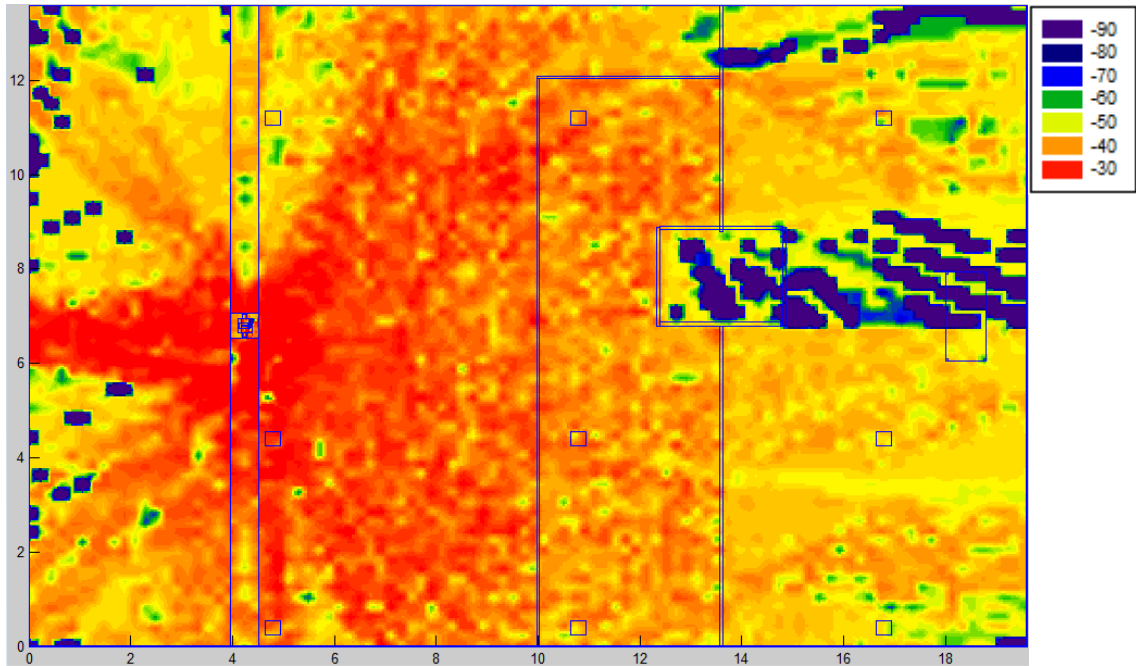


Figura VI.98. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

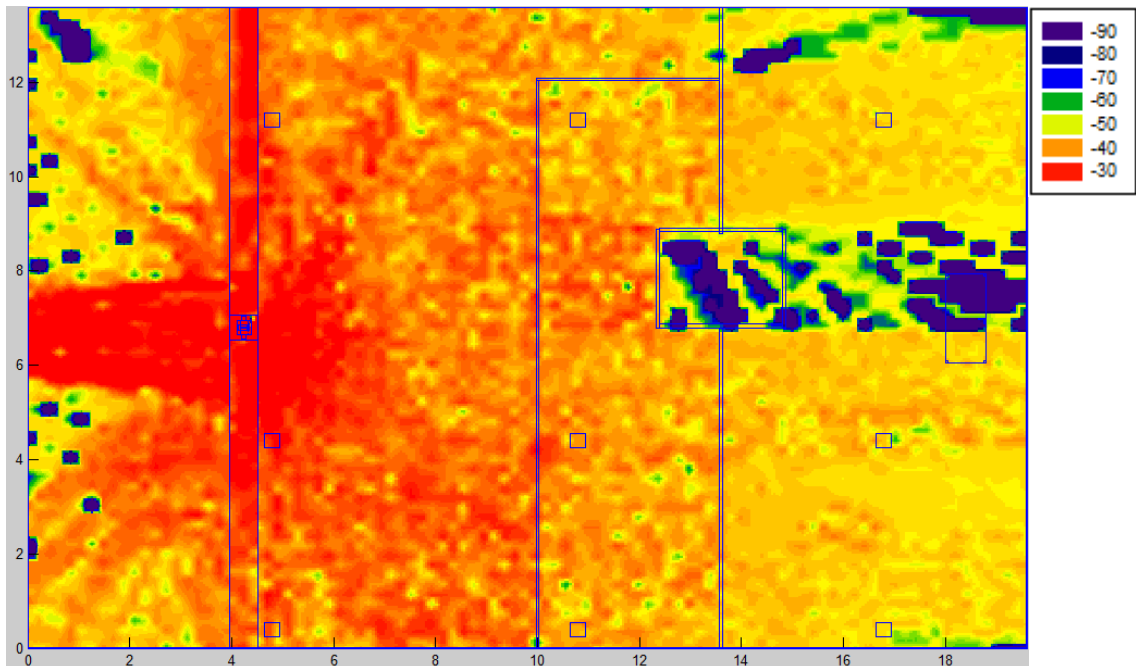


Figura VI.99. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

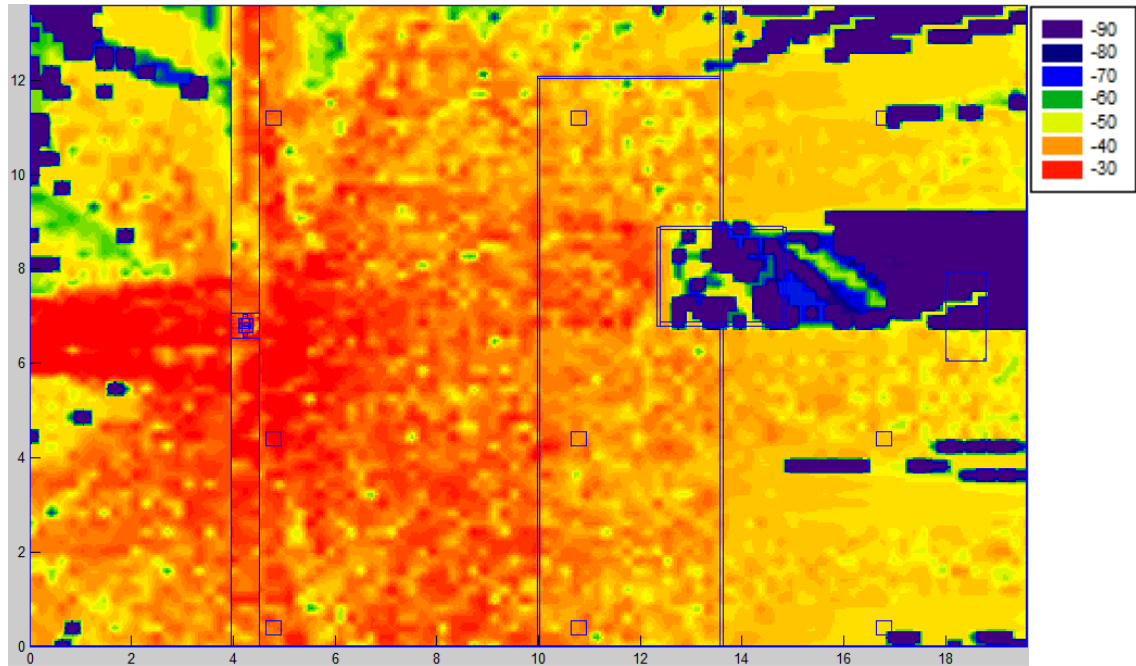


Figura VI.100. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la distribución de potencia a lo largo de la planta a diferentes alturas, atravesando desde el cuerpo humano (donde se encuentra la antena TX) hasta la antena receptora, por lo que se puede observar la transmisión de potencia de TX a RX.

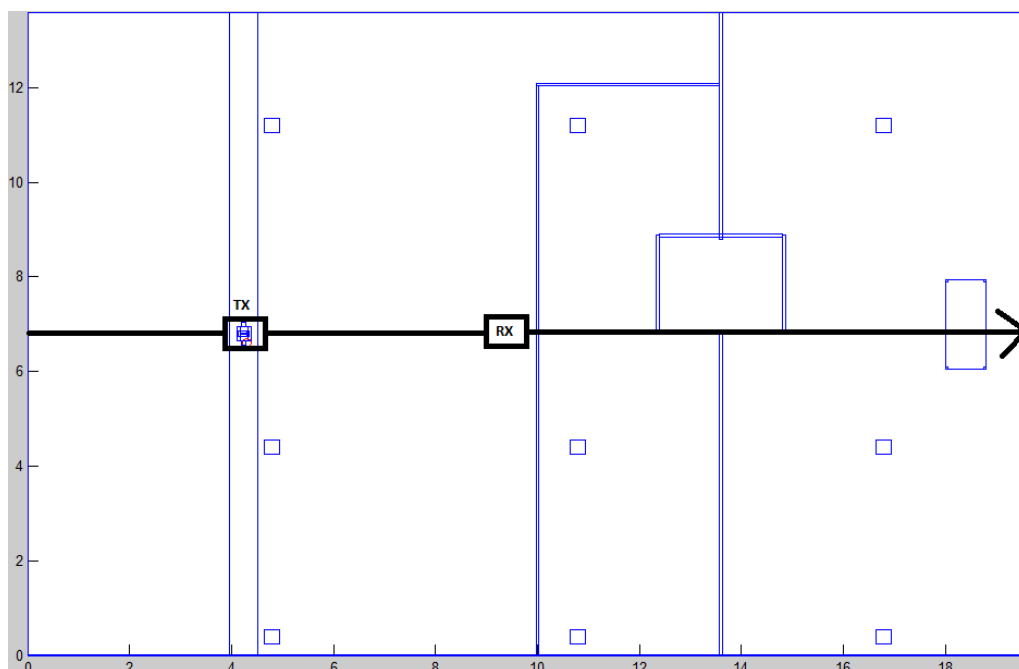


Figura VI.101. Radial que atraviesa el eje x de la planta.

Antena Tx situada a 0.84 metros, en la muñeca derecha, a una distancia de 4.29 metros y antena Rx situada en 8.8 metros.

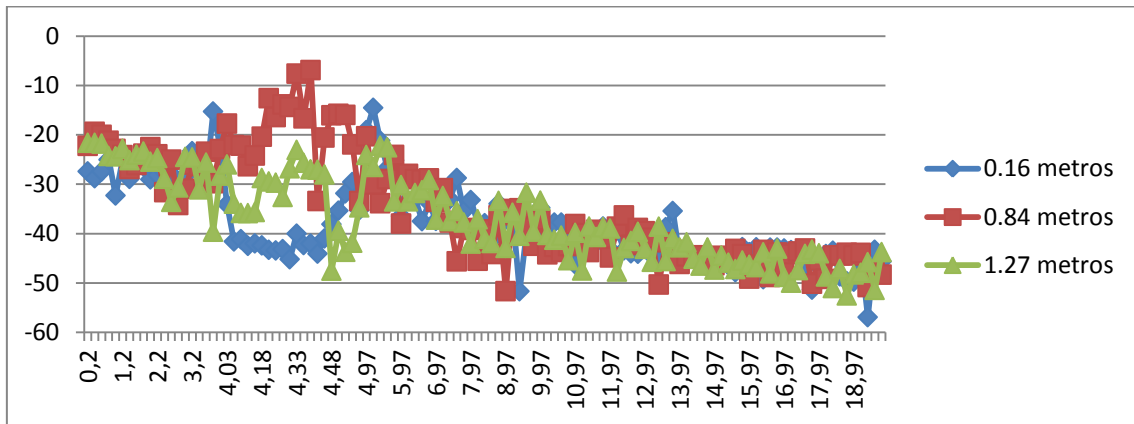


Figura VI.102. Potencia recibida en cada punto del Radial eje x.

3. Antena Tx situada en el pecho del individuo

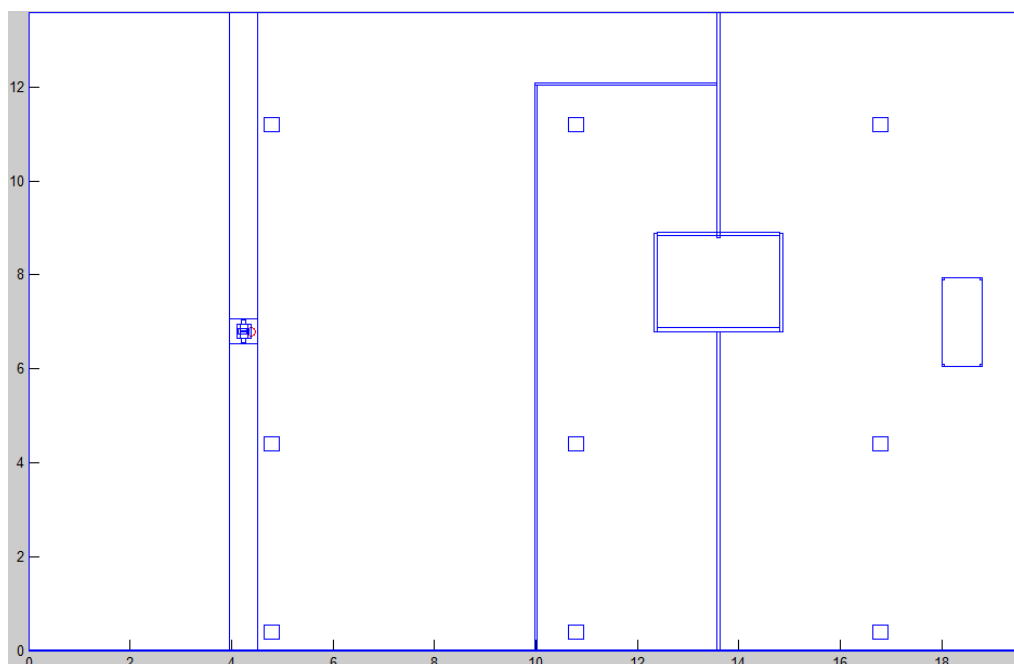


Figura VI.103. Antena Tx situada en el pecho de la persona.

0.16 metros

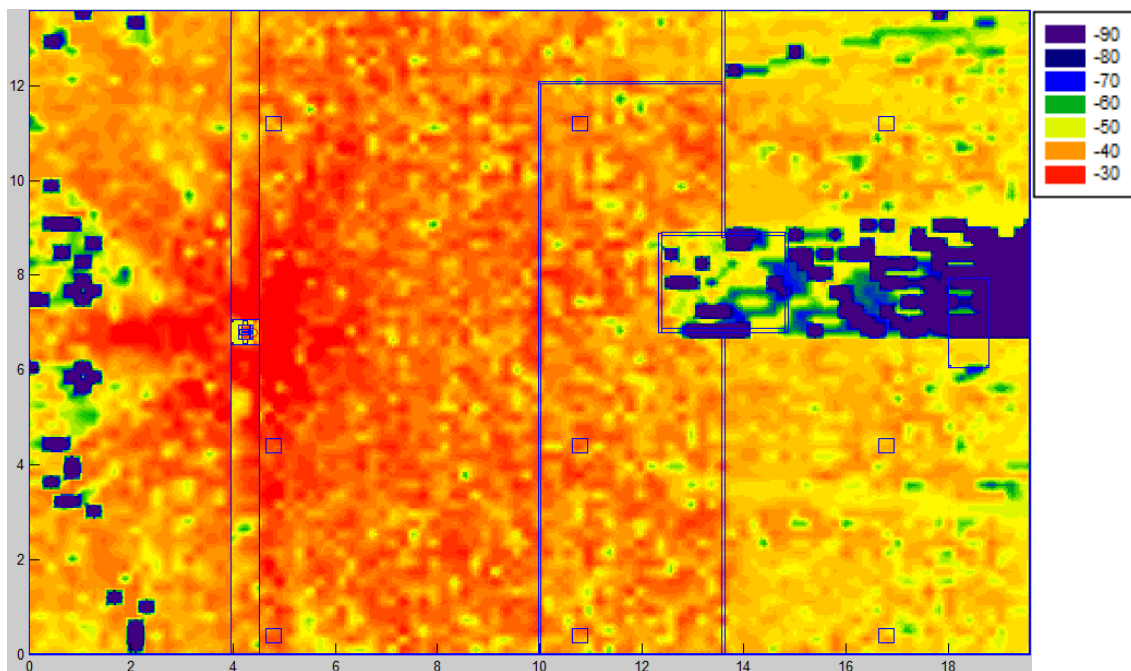


Figura VI.104. Distribución de potencia a una altura de 0.16 m.

0.84 metros

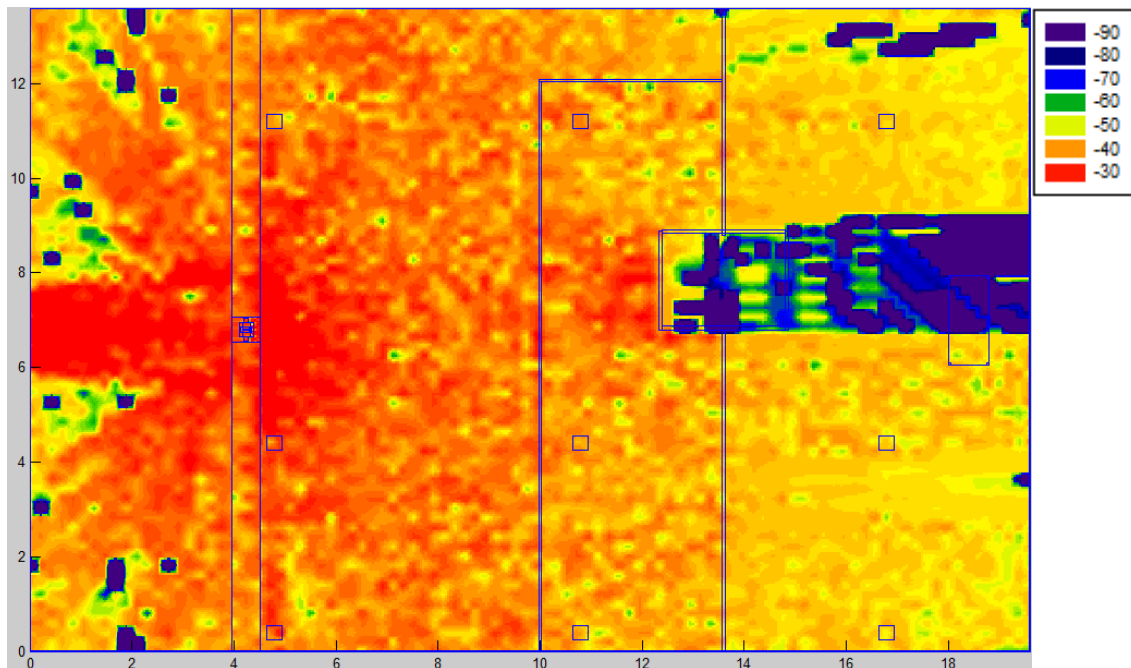


Figura VI.105. Distribución de potencia a una altura de 0.84 m.

1.27 metros

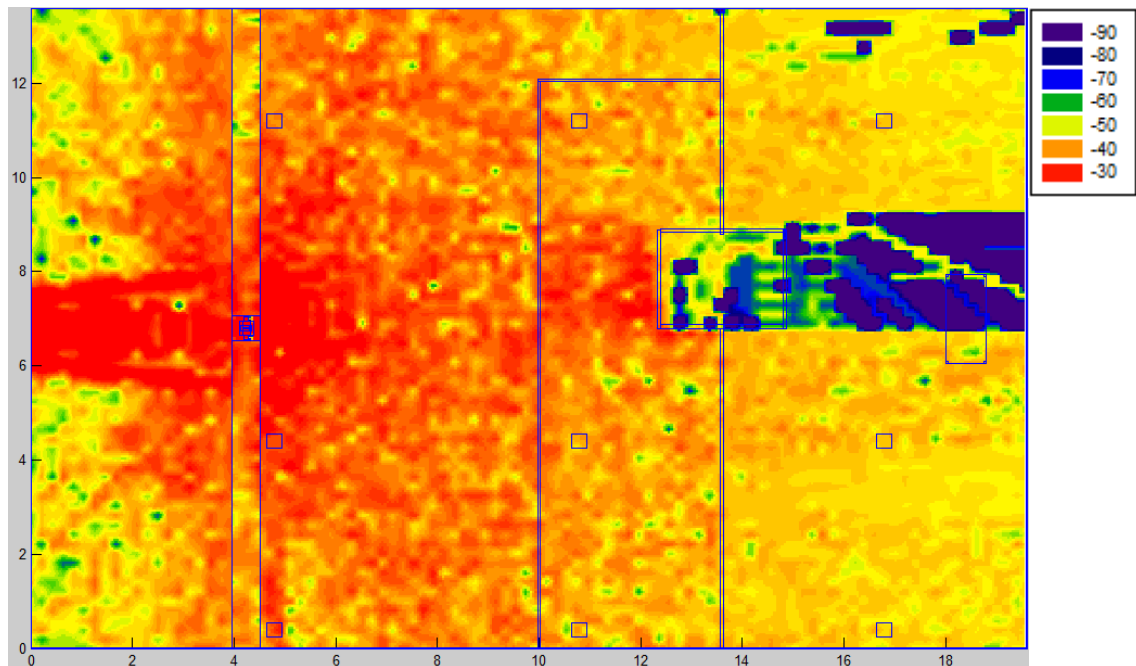


Figura VI.106. Distribución de potencia a una altura de 1.27 m.

Se obtiene la distribución de potencia a lo largo de la planta a diferentes alturas, atravesando desde el cuerpo humano (donde se encuentra la antena TX) hasta la antena receptora, por lo que se puede observar la transmisión de potencia de TX a RX.

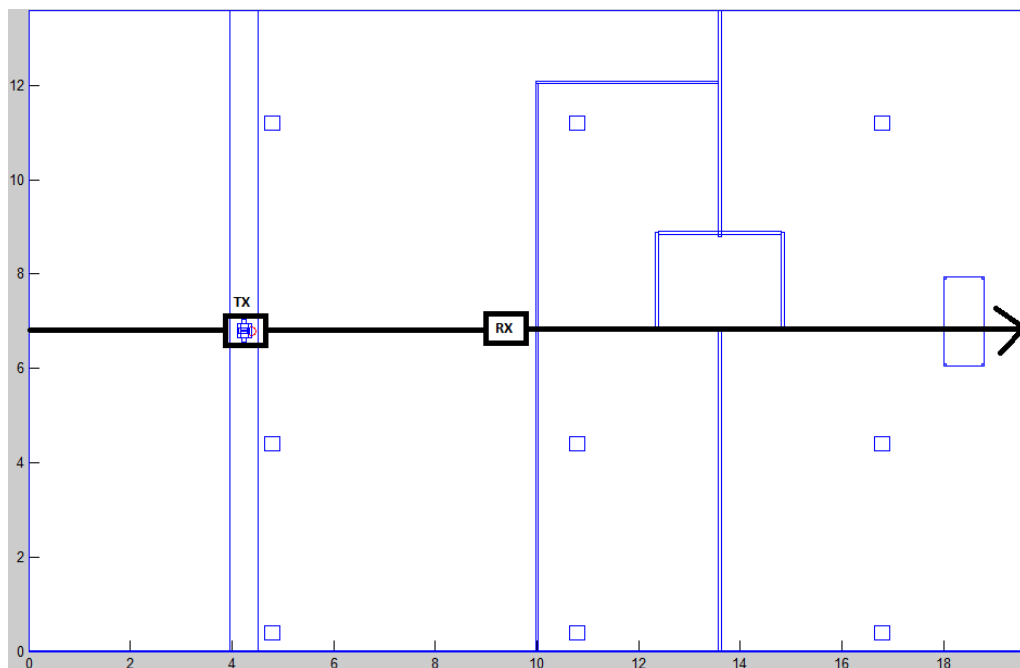


Figura VI.107. Radial que atraviesa el eje x de la planta.

Antena Tx situada a 1.27 metros, en el pecho, a una distancia de 4.39 metros y antena Rx situada en 8.8 metros.

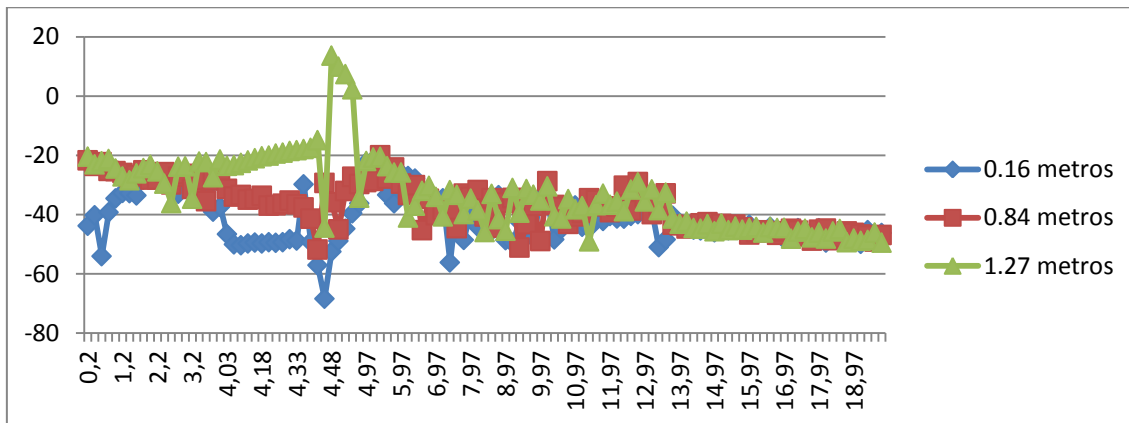


Figura VI.108. Potencia recibida en cada punto del Radial eje x.

Comparación de medidas

Se realizaron medidas tal y como se ha explicado en páginas anteriores, situando la antena Tx en tres posiciones distintas (tobillo derecho, muñeca derecha y pecho) del individuo y éste, a 0° respecto de la antena Rx. En cada caso, la potencia recibida en el punto Rx es la siguiente:

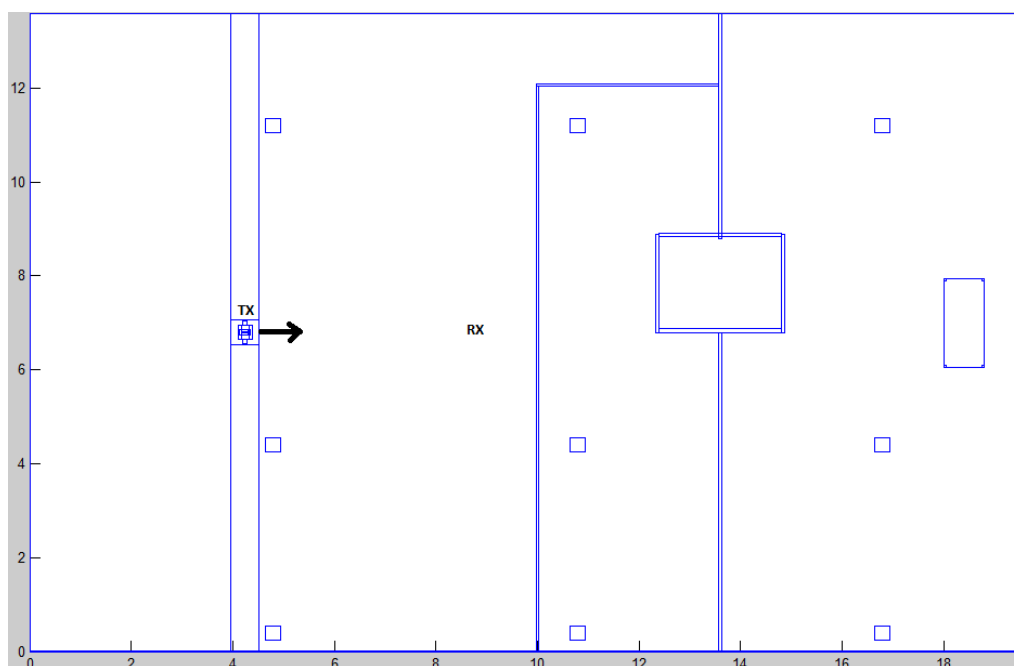


Figura VI.108. Escenario CASO 2-POSICIÓN 4.

ANTENA TX	POTENCIA RECIBIDA (TRAZADO DE RAYOS)	POTENCIA RECIBIDA (MEDIDAS IN SITU)
Tobillo (0.16 m)	-48.22 dBm	-54.17 dBm
Muñeca (0.84 m)	-45.10 dBm	-53.74 dBm
Pecho (1.27 m)	-45.30 dBm	-52.76dBm

Tabla VI. 8. Resultados CASO 2-POSICIÓN 4 comparados.

Anexo VII

Influence of Human Body and Indoor Scenarios in On-Body Wireless Communication Systems

Carmen Rivares⁽¹⁾, Leire Azpilicueta⁽¹⁾, Peio López⁽¹⁾, Juan Antonio Nazabal⁽¹⁾ and Francisco Falcone⁽¹⁾

(1) Electrical and Electronic Engineering Dept., Universidad Pública de Navarra, Spain, <http://csm.unavarra.es>

The use of wireless communication systems in close interaction with the human body is being steadily adopted, mainly due to the existence of more economical and smaller transceivers, as well as by increasing operational lifetime with techniques such as energy harvesting. There is a wide range of application for such on-body communication systems, such as monitoring of health constants for chronic patients, monitoring of athletes in training and competition, location of children and elderly or data fusion for defense related operations, to name a few. One of the main aspects in the operation of these devices is the interaction with the human body, as well as with the surrounding environment and the impact this has on the overall performance of the established wireless links. In this work, the influence of the human body interacting on an indoor scenario on Personal Area Network devices (such as Bluetooth or ZigBee) is analyzed. In order to perform such analysis, an in-house 3D Ray Launching simulation code has been employed, in which a complex indoor scenario as well as a simplified human body model, including layers of dispersive materials (i.e., skin, muscle, bone and internal organs) are considered. The results obtained clearly state the dependence of total losses with the location of the on-body wireless transceiver, located in different positions such as chest, head or limbs as well as with the relative position of the human body within the indoor scenario. These results can aid in radioplanning tasks related with on-body wireless devices, locating the transceivers in the optimal positions in terms of energy consumption as well as of communication link capacity.

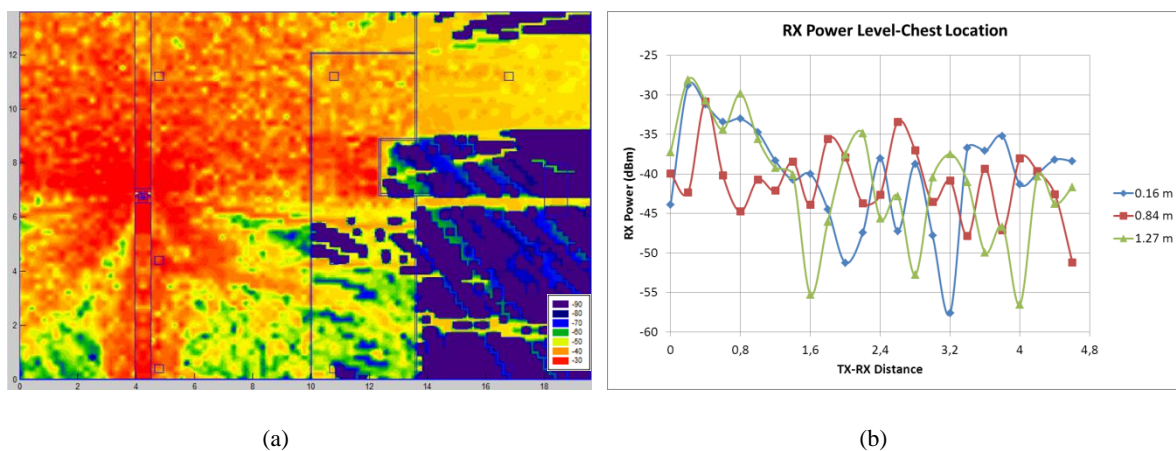


Figure 1: a) Estimation of RX power level for an on-body wireless transceiver operating in 2.4GHz, located in the central part of the chest b) Received power level as a function of distance for different heights within the indoor scenario.

