

ANÁLISIS DE LA EXACTITUD DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO EN UN ESCENARIO DE INTERIORES USANDO UWB



Universidad
del Cauca

Andrés Fernando Vivas Flórez
Daniel Eduardo Collazos García

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
GRIAL- Grupo de Radio e Inalámbricas
Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricas
Popayán, Cauca
2022

ANÁLISIS DE LA EXACTITUD DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO EN UN ESCENARIO DE INTERIORES USANDO UWB



Universidad
del Cauca

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones

Andrés Fernando Vivas Flórez
Daniel Eduardo Collazos García

Director: Víctor Manuel Quintero Flórez

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
GRIAL- Grupo de Radio e Inalámbricas
Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricas
Popayán, Cauca

2022

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABLAS.....	xii
LISTA DE ACRÓNIMOS	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 1 MARCO TEÓRICO	3
1.1 SERVICIOS BASADOS EN LOCALIZACIÓN	3
1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO	3
1.3. SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN EN TIEMPO REAL	4
1.4. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO EN INTERIORES.....	4
1.5 MÉTRICAS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA	5
1.5.1 <i>Exactitud</i>	5
1.5.2 <i>Disolución Geométrica de la Precisión</i>	6
1.5.3 <i>Área de Cobertura</i>	6
1.5.4 <i>Seguridad</i>	6
1.5.5 <i>Escalabilidad</i>	6
1.5.6 <i>Costo</i>	6
1.5.7 <i>Disponibilidad</i>	6
1.5.8 <i>Complejidad</i>	7
1.5.9 <i>Robustez</i>	7
1.5.10 <i>Latencia</i>	7
1.5.11 <i>Eficiencia Energética</i>	7
1.6 MÉTRICAS DE LA SEÑAL	7
1.6.1 <i>Tiempo de Llegada</i>	8
1.6.2 <i>Diferencia de Tiempo de Llegada</i>	8
1.6.3 <i>Ángulo de Llegada</i>	9
1.6.4 <i>Intensidad de la Señal Recibida</i>	9
1.6.5 <i>Fase de Llegada</i>	10
1.6.6 <i>Tiempo de Ida y Vuelta</i>	10
1.7 TÉCNICAS PARA ESTIMAR LA LOCALIZACIÓN	12
1.7.1 <i>Trilateración/Multilateración</i>	12
1.7.2 <i>Triangulación</i>	14
1.7.3 <i>Indicador de Intensidad de Señal Recibida</i>	15
1.7.4 <i>Fingerprinting</i>	15
1.7.5 <i>Proximidad</i>	15

1.7.6	<i>Análisis de Visión</i>	16
1.8	ALGORITMOS DE ESTIMACIÓN DE POSICIÓN	16
1.8.1	<i>Filtro de Kalman</i>	16
1.8.2	<i>Métodos Bayesianos</i>	17
1.8.3	<i>Filtro de Partículas</i>	17
1.8.4	<i>Algoritmo de Taylor</i>	17
1.8.5	<i>Estimación por Mínimos Cuadrados</i>	18
1.8.6	<i>K-vecino más Cercano</i>	18
1.8.7	<i>Redes Neuronales</i>	18
1.9	TECNOLOGÍAS EMPLEADAS	18
1.9.1	<i>Identificación por Radiofrecuencia</i>	18
1.9.2	<i>Infrarrojo</i>	20
1.9.3	<i>Ultrasonido</i>	20
1.9.4	<i>Bluetooth</i>	20
1.9.5	<i>Wi-Fi</i>	21
1.9.6	<i>Ultra Banda Ancha</i>	21
1.9.7	<i>Campos Magnéticos</i>	21
1.10	GENERALIDADES DE UWB	21
1.10.1	<i>Ultra Banda Ancha</i>	21
1.10.2	<i>Ventajas de UWB</i>	23
1.10.3	<i>Regularización y Estandarización</i>	23
Capítulo 2	ANÁLISIS Y DISEÑO	25
2.1	REQUISITOS	26
2.1.1	<i>Requisitos Funcionales</i>	26
2.1.2	<i>Requisitos no Funcionales</i>	26
2.2	ANÁLISIS Y DISEÑO	27
2.2.1	<i>Selección de la Métrica y Técnica de Posicionamiento</i>	28
2.2.2	<i>Dispositivos Hardware</i>	30
2.2.3	<i>Software</i>	35
2.3	IMPLEMENTACIÓN DE VALIDACIÓN	35
2.3.1	<i>Escenarios de Pruebas</i>	35
2.3.2	<i>Equipos de Soporte</i>	37
2.4	PRUEBAS	40
2.4.1	<i>Modelo General de Pruebas</i>	40
2.4.2	<i>Detalle del Plan de Pruebas</i>	41
2.4.2.1	<i>Primera Etapa de Medidas</i>	42

2.4.2.2 Segunda Etapa de Medidas	43
2.4.2.3 Tercera Etapa de Medidas	43
2.4.2.4 Cuarta Etapa de Medidas	44
2.4.3 Protocolo de Medidas	45
2.5 EJECUCIÓN DEL PLAN DE PRUEBAS DE VALIDACIÓN	46
2.5.1 Estructura del Dataset	47
2.5.2 Configuración de los Dispositivos	49
2.5.3 Pruebas de Validación	53
2.5.4 Comparaciones	87
2.6 SIMULACIONES	88
Capítulo 3 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO	91
3.1 TÉCNICA DE TRILATERACIÓN/MULTILATERACIÓN	91
3.2 DEFINICIÓN PLAN DE PRUEBAS EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO	93
3.3 PRUEBA DE DESEMPEÑO EN ESC1	96
3.3.1 Ejecución Prueba de Desempeño D1-ESC1-LOS	96
3.3.2 Ejecución Prueba de Desempeño D2-ESC1-LOS	98
3.4 PRUEBA DE DESEMPEÑO EN ESC3	102
3.4.1 Ejecución Prueba de Desempeño D3-ESC3-LOS	102
3.4.2 Ejecución Prueba de Desempeño D4-ESC3-NLOS	105
3.5 COMPARACIONES	109
3.6 PRUEBA DE SEGUIMIENTO O RASTREO EN ESCENARIO DE INTERIORES	110
3.6.1 Definición de Prueba	110
3.6.2 Evaluación del Desempeño en T-ESC3	111
3.6.3 Análisis de la Potencia y Distancia en T-ESC3	112
3.6.4 Comparación Condición LOS y NLOS	112
Capítulo 4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	115
4.1 CONCLUSIONES	115
4.2 TRABAJOS FUTUROS	117
BIBLIOGRAFÍA	118
Anexo A. COMPARACIÓN TÉCNICAS BASADAS EN MULTILATERACIÓN	126
A1. CANCHA ESC1-LOS	126
A1.1 Enfoque geométrico de trilateración para los nodos 1, 2 y 3	126
A1.2 Enfoque de Mínimos Cuadrados	126
A1.3 Enfoque de regresión no lineal para mínimos cuadrados	127
A2. SALÓN ESC3-LOS	127
A2.1 Enfoque geométrico de trilateración para los nodos 1, 2 y 3	128

A2.2 Enfoque de Mínimos Cuadrados	128
A2.3 Enfoque de regresión no lineal para mínimos cuadrados	129
A3. SALÓN ESC3-NLOS	129
A3.1 Enfoque geométrico de trilateración para los nodos 1, 2 y 3.....	130
A3.2 Enfoque de Mínimos Cuadrados	130
A3.3 Enfoque de regresión no lineal para mínimos cuadrados	130
Anexo B. EXACTITUD DE LA LOCALIZACIÓN POR CAMBIO EN POSICIÓN DE ANCLAS	132
Anexo C. EXACTITUD DE LA TRAYECTORIA	134
C1. REGRESIÓN NO LINEAL PARA MÍNIMOS CUADRADOS	134
C2. RESOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES POR TRILATERACIÓN	134
C3. ESTIMACIÓN POR MÍNIMOS CUADRADOS	135
Anexo D. COMBINACIÓN DE NODOS PARA POSICIONAMIENTO	136
D1. ESCENARIO 3: SALÓN 127 IPET	136
D2. POSICIONAMIENTO EN TRAYECTORIA	140
Anexos E. CLASIFICACIÓN DE LOS DATOS POR HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS.....	143
E1. HERRAMIENTAS DE MATLAB	143
E2. RESULTADOS	145
E2.1 P1-ESC1-LOS.....	145
E2.2 P2-ESC1-LOS.....	147
E2.3 P2-ESC1-NLOS	149
E2.4 P3-ESC2-LOS.....	152
E2.5 P4-ESC2-LOS.....	154
E2.6 P4-ESC2-NLOS	155
E2.7 P5-ESC3-LOS.....	156
E2.8 P6-ESC3-LOS.....	158
E2.9 D1-ESC1-LOS	161
E2.10 D2-ESC1-LOS	165
E2.11 D3-ESC3-LOS	166
E2.12 D4-ESC3-NLOS	167

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Clasificación de sistemas de posicionamiento.....	4
Figura 1.2 Esquema de posicionamiento TDoA.....	9
Figura 1.3 Esquema de posicionamiento AoA.....	9
Figura 1.4 Localización basada en PoA.....	10
Figura 1.5 Comunicación TWR.....	11
Figura 1.6 Esquema de trilateración.....	13
Figura 1.7 Esquema de triangulación.....	14
Figura 1.8 Ancho de banda UWB.....	22
Figura 1.9 Espectro de señales de radiofrecuencias.....	22
Figura 1.10 Asignación de canales UWB.....	24
Figura 2.1 Diagrama de esfuerzo de la metodología RUP.....	25
Figura 2.2 Ciclo de metodología RUP adaptada.....	26
Figura 2.3 Diagrama general de bloques del sistema prototipo.....	27
Figura 2.4 Diagrama del sistema prototipo de posicionamiento para UWB.....	28
Figura 2.5 Diagrama de bloques del módulo DWM1001.....	33
Figura 2.6 Patrón de radiación de antena.....	34
Figura 2.7 ESC1: escenario exterior cancha el Diamante.....	36
Figura 2.8 ESC2: escenario interior pasillo.....	36
Figura 2.9 ESC3: escenario interior salón.....	36
Figura 2.10 Dispositivo DWM1001.....	37
Figura 2.11 Tipos de fuentes de alimentación.....	38
Figura 2.12 Cordel y chuzos de madera.....	39
Figura 2.13 Flexómetro de 50 m.....	39
Figura 2.14 Trípodes.....	39
Figura 2.15 Pegatinas de referencia.....	40
Figura 2.16 Modelo general enlace de comunicación.....	41
Figura 2.17 Modelo general sistema de localización.....	41
Figura 2.18 Enlace entre dos dispositivos UWB.....	43
Figura 2.19 Sistema de posicionamiento con UWB.....	44
Figura 2.20 Protocolo de medidas.....	46
Figura 2.21 Diagrama general de la prueba de enlace.....	49
Figura 2.22 Formato del mensaje transmitido.....	50
Figura 2.23 Diagrama de flujo en el proceso de transmisión.....	50
Figura 2.24 Diagrama de flujo en el proceso de recepción.....	51
Figura 2.25 Protocolo TWR.....	52
Figura 2.26 Diagrama general de la prueba enlace.....	53
Figura 2.27 Ubicación de transmisor-receptor en ESC1.....	54
Figura 2.28 Presencia de otras señales de radiofrecuencias en ESC1.....	54
Figura 2.29 Preparación del ESC1.....	55
Figura 2.30 Histograma del error de distancia para P1-ESC1-LOS a 5 m.....	56
Figura 2.31 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para P1-ESC1-LOS a 5 m.....	56
Figura 2.32 Tasa de error de paquetes y funciones de distribución acumulativa aproximadas por Matlab para P1-ESC1-LOS a 5 m.....	57
Figura 2.33 Exactitud contra distancia para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.....	58

Figura 2.34 Error contra distancia para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.	59
Figura 2.35 Desviación estándar para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.	60
Figura 2.36 Tasa de error de paquetes para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.	60
Figura 2.37 Histograma del error de distancia para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.	61
Figura 2.38 Función de densidad de probabilidad para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.	61
Figura 2.39 Función de distribución acumulativa para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.	62
Figura 2.40 Niveles de potencia para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.	63
Figura 2.41 Condición de LOS/NLOS para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.	63
Figura 2.42 Calidad de la medida para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.	64
Figura 2.43 Respuesta al impulso del canal para P2-ESC1-LOS.	64
Figura 2.44 Ventana ampliada de la respuesta al impulso del canal para P2-ESC1-LOS de los primeros 9 m.	65
Figura 2.45 Ventana ampliada de la respuesta al impulso del canal con 4 distancias diferentes para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.	65
Figura 2.46 Comportamiento del voltaje promedio para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.	66
Figura 2.47 Comportamiento de la temperatura promedio para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.	66
Figura 2.48 Disposición del escenario ESC2.	67
Figura 2.49 Recepción de señales de RF en ESC2.	67
Figura 2.50 Histograma en ESC2 para P3-ESC2-LOS a 5 m.	68
Figura 2.51 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para P3- ESC2-LOS a 5 m.	69
Figura 2.52 Tasa de error de paquetes y funciones de distribución acumulativa aproximadas por Matlab para P3-ESC2-LOS a 5 m.	69
Figura 2.53 Exactitud contra distancia para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.	70
Figura 2.54 Error promedio contra distancia para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.	71
Figura 2.55 Desviación estándar para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.	72
Figura 2.56 Tasa de error de paquetes para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.	72
Figura 2.57 Histograma para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.	73
Figura 2.58 Función de densidad de probabilidad para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.	73
Figura 2.59 Función de distribución acumulativa para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.	74
Figura 2.60 Nivel de potencia para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.	74
Figura 2.61 Condición de LOS/NLOS para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.	75
Figura 2.62 Calidad de la medida para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.	75
Figura 2.63 Ventana ampliada de la respuesta al impulso del canal con 5 distancias diferentes para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.	76
Figura 2.64 Temperatura para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.	76
Figura 2.65 Evidencia en ESC3 y presencia de señales WiFi.	77
Figura 2.66 Histograma para P5-ESC3-LOS a 5 m.	78
Figura 2.67 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para P5- ESC3-LOS a 5 m.	78
Figura 2.68 Tasa de error de paquetes y funciones de distribución acumulativa aproximadas por Matlab para P5-ESC3-LOS a 5m.	79
Figura 2.69 Exactitud contra distancia para P6-ESC3-LOS.	80
Figura 2.70 Error promedio contra distancia e histograma para P6-ESC3-LOS.	81
Figura 2.71 Desviación estándar y tasa de error de paquetes para P6-ESC3-LOS.	81
Figura 2.72 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para P6- ESC3-LOS.	82
Figura 2.73 Nivel de potencia y calidad de la medida para P6-ESC3-LOS.	82

Figura 2.74 Condición de LOS/NLOS para P6-ESC3-LOS.	83
Figura 2.75 Ventana ampliada de la respuesta al impulso del canal con 4 distancias para P6-ESC3-LOS.	83
Figura 2.76 Voltaje y temperatura contra distancia para P6-ESC3-LOS.	84
Figura 2.77 Disposición de los dispositivos para prueba entre muros.	84
Figura 2.78 Error de medida en escaleras.	85
Figura 2.79 Prueba del efecto de una puerta.	85
Figura 2.80 Error para puerta abierta y puerta cerrada.	85
Figura 2.81 Error a 3 cm de separación.	86
Figura 2.82 Prueba calibrada en pasillo.	86
Figura 2.83 Desviación estándar y nivel de potencia en recepción para distancia mínima.	87
Figura 2.84 ESC1 - Potencia RX contra distancia.	89
Figura 2.85 ESC2 - Potencia RX contra distancia.	90
Figura 2.86 ESC3 - Potencia RX contra distancia.	90
Figura 3.1 Geometría de trilateración.	91
Figura 3.2 Modelo general del sistema prototipo de posicionamiento en interiores.	93
Figura 3.3 Condiciones del escenario ESC3.	94
Figura 3.4 Fuentes de alimentación utilizadas.	95
Figura 3.5 Aplicación Android DRTLS Manager.	95
Figura 3.6 Registro de prueba en escenario ESC1.	96
Figura 3.7 Resultados de posicionamiento en D1-ESC1-LOS.	96
Figura 3.8 Mapa de calor de los errores en D1-ESC1-LOS.	97
Figura 3.9 Comportamiento de la exactitud entre punto estimado y de referencia en D1-ESC1-LOS.	97
Figura 3.10 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para D1-ESC1-LOS.	98
Figura 3.11 Resultados de posicionamiento en D2-ESC1-LOS.	99
Figura 3.12 Mapa de calor de los errores de distancia en D2-ESC1-LOS.	99
Figura 3.13 Comportamiento de la exactitud entre punto estimado y de referencia en D2-ESC1-LOS.	100
Figura 3.14 Desviación estándar por punto de medida y por ancla en D2-ESC1-LOS.	100
Figura 3.15 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para D2-ESC1-LOS.	101
Figura 3.16 Resultados de posicionamiento en D3-ESC3-LOS.	102
Figura 3.17 Mapa de calor del error de distancia en D3-ESC3-LOS.	103
Figura 3.18 Comportamiento del error de distancia por punto de medida en D3-ESC3-LOS.	103
Figura 3.19 Desviación estándar de la distancia de error por punto de medida en D3-ESC3-LOS.	104
Figura 3.20 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para D3-ESC3-LOS.	105
Figura 3.21 Obstáculo respecto al nodo ancla A1.	105
Figura 3.22 Resultados de posicionamiento en D3-ESC3-LOS.	106
Figura 3.23 Mapa de calor de los errores de distancia en D4-ESC3-NLOS.	106
Figura 3.24 Evaluación de la distancia de error por punto de medida en el escenario D3-ESC3-NLOS.	107
Figura 3.25 Desviación estándar en D4-ESC3-NLOS.	107
Figura 3.26 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para D4-ESC3-NLOS.	109
Figura 3.27 Trayectoria definida para una persona.	111

Figura 3.28 Posiciones estimadas y desviación estándar.	111
Figura 3.29 Comportamiento de RSSI y la distancia recorrida por nodo ancla.....	112
Figura 3.30 Validación de LOS y trayectoria.	113
Figura 3.31 Resultado de condición LOS en los nodos ancla A1 y A2.	113
Figura 3.32 Resultado de condición LOS en los nodos ancla A3 y A4.	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Comparación de las principales métricas.	11
Tabla 1.2 Comparación de las principales tecnologías.....	20
Tabla 2.1 Comparación de métricas para el posicionamiento.	29
Tabla 2.2 Comparación de técnicas para el posicionamiento.....	30
Tabla 2.3 Módulos UWB de Decawave/Qorvo.	32
Tabla 2.4 Kits Decawave.....	32
Tabla 2.5 Características técnicas de los equipos de cómputo a utilizar.	37
Tabla 2.6 Alimentación disponible.	38
Tabla 2.7 Configuración para prueba de validación del desempeño.	47
Tabla 2.8 Columnas del Dataset.	48
Tabla 2.9 Interpretación de potencias en recepción.	49
Tabla 2.10 Información del histograma para P1-ESC1-LOS.	55
Tabla 2.11 Resultados de P1-ESC1-LOS a 5 m.....	57
Tabla 2.12 Comparación de resultados P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.	59
Tabla 2.13 Información del histograma para P3-ESC2-LOS.	68
Tabla 2.14 Resultados de P3-ESC2-LOS a 5 m.....	70
Tabla 2.15 Comparación de resultados para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.	71
Tabla 2.16 Características del histograma P5-ESC3-LOS.	77
Tabla 2.17 Resultados de P5-ESC3-LOS a 5m.....	79
Tabla 2.18 Resumen de P6-ESC3-LOS.	80
Tabla 2.19 Resultados para prueba calibrada.	87
Tabla 2.20 Comparación de medidas para los tres escenarios.	88
Tabla 2.21 Resultados de la simulación para los tres escenarios.	89
Tabla 3.1 Características de los escenarios.	93
Tabla 3.2 Disposición de los nodos anclas en los escenarios ESC1 y ESC3.	94
Tabla 3.3 Resumen del desempeño en D1-ESC1-LOS.....	98
Tabla 3.4 Desviación estándar de los nodos ancla.....	101
Tabla 3.5 Resumen del error de la prueba D2-ESC1-LOS.....	101
Tabla 3.6 Desviación estándar de los nodos ancla en D3-ESC3-LOS.	104
Tabla 3.7 Resumen del error de la prueba D3-ESC3-LOS.....	104
Tabla 3.8 Desviación estándar de los nodos ancla en D4-ESC3-NLOS.....	108
Tabla 3.9 Resumen del error de la prueba D4-ESC3-NLOS	108
Tabla 3.10 Comparación de las tres pruebas de desempeño.....	110
Tabla 3.11 Determinación de LOS y NLOS.	114

LISTA DE ACRÓNIMOS

ANN	<i>Artificial Neural Networks</i> , Redes Neuronales Artificiales.
AoA	<i>Angle of Arrival</i> , Ángulo de Llegada.
AON	<i>Always-ON</i> , Siempre Encendido.
AVL	<i>Automatic Vehicle Location</i> , Localización Automática de Vehículos.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i> , Bluetooth de Baja Energía.
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> , Función de Distribución Acumulativa.
CIR	<i>Channel Impulse Response</i> , Respuesta al Impulso del Canal.
CoO	<i>Cell of Origin</i> , Celda de Origen.
DoA	<i>Direction of Arrival</i> , Dirección de Llegada.
DS-UWB	<i>Direct-Sequence Ultra-Wideband</i> , Banda Ultra Ancha de Secuencia Directa.
SDS-TWR	<i>Symmetrical Double Sided Two Way Ranging</i> , Estimación Simétrica de Distancia Bidireccional desde los dos Extremos.
ECC	<i>European Communications Committee</i> , Comité Europeo de Comunicaciones.
ECMA	<i>European Computer Manufacturers Association</i> , Asociación Europea de Fabricantes de Ordenadores.
EKF	<i>Extended Kalman Filter</i> , Filtro de Kalman Extendido.
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i> , Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones.
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> , Comisión Federal de Comunicaciones.
FSL	<i>First Signal Level</i> , Nivel de Primer Trayecto.
GDOP	<i>Geometric Dilution of Precision</i> , Dilución Geométrica de la Precisión.
GEV	<i>Generalized Extreme Value</i> , Valor Extremo Generalizado.
GPS	<i>Global Positioning Systems</i> , Sistema de Posicionamiento Global.
IoT	<i>Internet of Things</i> , Internet de las Cosas.
IPS	<i>Indoor Positioning System</i> , Sistema de Posicionamiento en Interiores.

ISED	<i>Innovation, Science and Economic Development Canada</i> , Innovación, Ciencia y Desarrollo Económico Canadá.
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> , Organización Internacional de Normalización.
ITS	<i>Intelligent Transportation System</i> , Sistema de Transporte Inteligente.
KF	<i>Kalman Filter</i> , Filtro de Kalman.
kNN	<i>k-nearest neighbors</i> , k-Vecinos Cercanos.
LBS	<i>Location Based Services</i> , Servicios Basados en Localización.
LDE	<i>Leading Edge Detection</i> , Detección de Borde Principal.
LOS	<i>Line of Sight</i> , Línea de Vista.
LPS	<i>Local Positioning System</i> , Sistema de Posicionamiento Local.
LSE	<i>Least Squares Estimation</i> , Estimación por Mínimos Cuadrados.
MB-OFDM	<i>Multi-Band Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal Multibanda.
MCU	<i>Microcontroller Unit</i> , Unidad de Microcontrolador.
MSE	<i>Mean Squared Error</i> , Error cuadrático Medio.
NLS	<i>Non Linear Squares</i> , Mínimos cuadrados no lineales.
NLOS	<i>Non Line of Sight</i> , Sin Línea de Vista.
PAC	<i>Preamble Acquisition Chunk Size</i> , Tamaño del preámbulo de adquisición.
PANS	<i>Positioning and Networking Stack</i> , Pila de Redes y Posicionamiento.
PDF	<i>Probability Density Function</i> , Función de Densidad de Probabilidad.
PF	<i>Particle Filter</i> , Filtro de Partículas.
PHR	<i>PHY Header</i> , Modo de Encabezado de Capa Física.
PoA	<i>Phase of Arrival</i> , Fase de Llegada.
PRF	<i>Pulse Repetition Frequency</i> , Frecuencia de Repetición de Pulso.
PSD	<i>Power Spectral Density</i> , Densidad Espectral de Potencia.
RF	<i>Radio Frequency</i> , Radio Frecuencia.
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> , Identificación por Radiofrecuencia.
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> , Raíz del Error Cuadrático Medio.
RSL	<i>Received Signal Level</i> , Nivel de Señal Recibida.
RSS	<i>Received Signal Strength</i> , Intensidad de la Señal Recibida.

RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> , Indicador de Intensidad de la Señal Recibida.
RTLS	<i>Real Time Locating System</i> , Sistemas de Localización en Tiempo Real.
RTT	<i>Round Trip Time</i> , Tiempo de Ida y Vuelta.
RUP	<i>Rational Unified Process</i> , Proceso Racional Unificado.
SFD	<i>Start Frame Delimiter</i> , Delimitador de Inicio de Trama.
SNR	<i>Signal Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
SS-TWR	<i>Single Sided Two Way Ranging</i> , Estimación de Distancia Bidireccional desde un Extremo.
TDoA	<i>Time Difference of Arrival</i> , Diferencia de Tiempo de Llegada.
ToA	<i>Time of Arrival</i> , Tiempo de Llegada.
ToF	<i>Time of Flight</i> , Tiempo de Vuelo.
TRL	<i>Technology Readiness Level</i> , Nivel de Madurez Tecnológica.
TWR	<i>Two Way Ranging</i> , Estimación de Distancia Bidireccional.
US	<i>UltraSonic</i> , Ultrasonido.
UWB	<i>Ultra Wide Band</i> , Ultra Banda Ancha.
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i> , Fidelidad Inalámbrica.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , Red de Área Local Inalámbrica.
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i> , Red de Área Personal Inalámbrica.
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i> , Red de Sensores Inalámbrica.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desarrollo tecnológico de dispositivos inalámbricos, servicios móviles, teléfonos inteligentes e Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*) ha dado como resultado el desarrollo de innumerables aplicaciones, como los Servicios Basados en Localización (LBS, *Location Based Services*). Estos servicios se dividen en dos categorías: los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, *Global Positioning Systems*) y los Sistemas de Posicionamiento Local (LPS, *Local Positioning System*). La primera categoría ofrece una solución adecuada para los escenarios de exteriores como navegación peatonal, vehicular, marítima, de aviación, seguimiento de objetos, Localización Automática de Vehículos (AVL, *Automatic Vehicle Location*), localización de personas en situaciones de emergencia, Sistemas de Transporte Inteligente (ITS, *Intelligent Transportation System*) para gestionar la movilidad, operaciones de búsqueda y rescate, entre otras. Sin embargo, el funcionamiento de los servicios de esta categoría en escenarios de interiores es inviable por la pobre cobertura de la señal satelital, los errores del multitrayecto y las condiciones Sin Línea de Vista (NLOS, *Non Line Of Sight*) ocasionadas por los edificios, árboles y objetos similares, los cuales terminan degradando la exactitud del sistema al momento de determinar la posición de una persona u objeto, por lo que deben adoptarse o complementarse con otros tipos de sistemas. Los sistemas de posicionamiento se encuentran en continuos procesos de investigación, desarrollo e innovación, relacionados con tecnologías y procedimientos para obtener un mejor desempeño de los servicios y aplicaciones en función de la exactitud requerida en el posicionamiento. Los escenarios interiores son espacios relativamente pequeños en comparación con los escenarios exteriores, por lo tanto, requieren de sistemas de posicionamiento de una mayor exactitud, la cual dependiendo del requerimiento debe ser del orden de los centímetros. Las tecnologías que ofrecen mejores resultados de exactitud para sistemas de posicionamiento en interiores son: ultrasonido, basadas en imágenes y UWB. De estas tres tecnologías, solo ultrasonido y UWB pueden trabajar en condiciones de Línea de Vista (LOS, *Line Of Sight*) y NLOS. Para los sistemas de posicionamiento basado en ultrasonido la velocidad del sonido varía significativamente con los cambios de temperatura y humedad, y requiere de complejos algoritmos de procesamiento para filtrar los altos niveles de ruido ambiental. Por lo tanto, UWB es una tecnología radio para comunicaciones de corto alcance, que se caracteriza por transmitir pulsos de corta duración (del orden de los picosegundos), lo cual se traduce en un amplio espectro de señal (ancho de banda mayor a 500 MHz) y un bajo consumo de energía (del orden de los micro vatios). De manera específica, las ventajas de UWB se encuentran relacionadas con la penetración de obstáculos, baja potencia de transmisión, estructura simple del transceptor y alto rango de resolución por su gran ancho de banda. Además, esta tecnología proporciona una alta velocidad de transmisión de datos (480 Mbps) y una exactitud de posicionamiento del orden de centímetros. La corta duración de los pulsos UWB hace que su energía se distribuya a través de un amplio rango de frecuencias de varios MHz, lo cual asegura una baja densidad espectral de potencia (PSD, *Power Spectral Density*) evitando que no interfiera considerablemente con otras tecnologías. De acuerdo con lo anterior, en este documento se presenta la evaluación de la exactitud de un sistema de posicionamiento en un escenario de interiores utilizando la tecnología UWB. El documento está estructurado en los siguientes capítulos:

- El **Capítulo 1** desarrolla los conceptos teóricos relacionados con los sistemas de posicionamiento, técnicas, métricas y tecnologías.

- El **Capítulo 2** presenta el diseño del sistema prototipo y se realizan pruebas de validación sobre los dispositivos adquiridos
- El **Capítulo 3** presenta la evaluación del sistema prototipo de posicionamiento y los resultados.
- El **Capítulo 4** presenta las conclusiones y los trabajos futuros.

Capítulo 1 MARCO TEÓRICO

1.1 SERVICIOS BASADOS EN LOCALIZACIÓN

Los Servicios Basados en Localización (LBS) son aplicaciones comerciales que permiten obtener la posición geográfica de personas u objetos; igualmente, permiten obtener información adicional de acuerdo con el contexto de su ubicación [1-2]. Un sistema LBS consta de cinco componentes básicos: dispositivos móviles, red de comunicaciones, componente de posicionamiento encargado de determinar la posición del nodo móvil, el proveedor de servicios y aplicaciones para procesar las solicitudes del usuario y ofrecer los servicios requeridos, y el proveedor de datos y contenido para almacenar toda la información posible sobre el usuario [3].

Algunas aplicaciones de los LBS están en los servicios de emergencia, el sector comercial, y la industria gubernamental y militar [4]. Dentro de los servicios de emergencia están las operaciones de búsqueda y rescate, navegación y seguimiento. En el sector comercial se tienen los usos de publicidad dirigida en función de la posición de los clientes, la coincidencia o la relación de perfiles de usuario; además, tiene implementaciones en las empresas con el objetivo de controlar el inicio y cierre de sesiones de los empleados según su posición [1][5]. En la industria militar se utilizan para hacer seguimiento de submarinos, buques de guerra, vehículos aéreos no tripulados, vehículos terrestres no tripulados, misiles, vigilancia y navegación aérea, equipos de búsqueda y rescate, y proyectiles de artillería, entre otros.

1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO

Los sistemas de posicionamiento usan un sistema de coordenadas o de referencia para estimar la posición de una persona u objeto en el espacio por medio de un conjunto de medidas de señales y procedimientos matemáticos. En la Fig. 1.1 se muestra la clasificación de los sistemas de posicionamiento de manera general en dos categorías: los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y los Sistemas de Posicionamiento Local (LPS) [6]. Los sistemas de la primera categoría estiman la posición del objeto o persona en escenarios exteriores de acuerdo con un sistema de coordenadas global, empleando para ello las señales provenientes de una constelación de satélites [7-8]. Los sistemas de la segunda categoría estiman la posición de acuerdo con un determinado sistema de coordenadas. Los sistemas de posicionamiento local (LPS) se clasifican en sistemas de auto posicionamiento y sistemas de posicionamiento remoto [7]. Los sistemas de auto posicionamiento permiten que cada persona u objeto estime su posición con respecto a un nodo ancla, a diferencia de los sistemas de posicionamiento remoto donde el nodo ancla es quien estima la posición relativa de otros nodos ubicados dentro de su área de cobertura. Este último se divide en: sistemas de posicionamiento remoto activos y sistemas de posicionamiento remoto pasivos. En el primer caso, el objetivo coopera en el proceso de posicionamiento brindando algún tipo de información, mientras que, en el segundo caso, el objetivo es pasivo y no cooperativo [9].

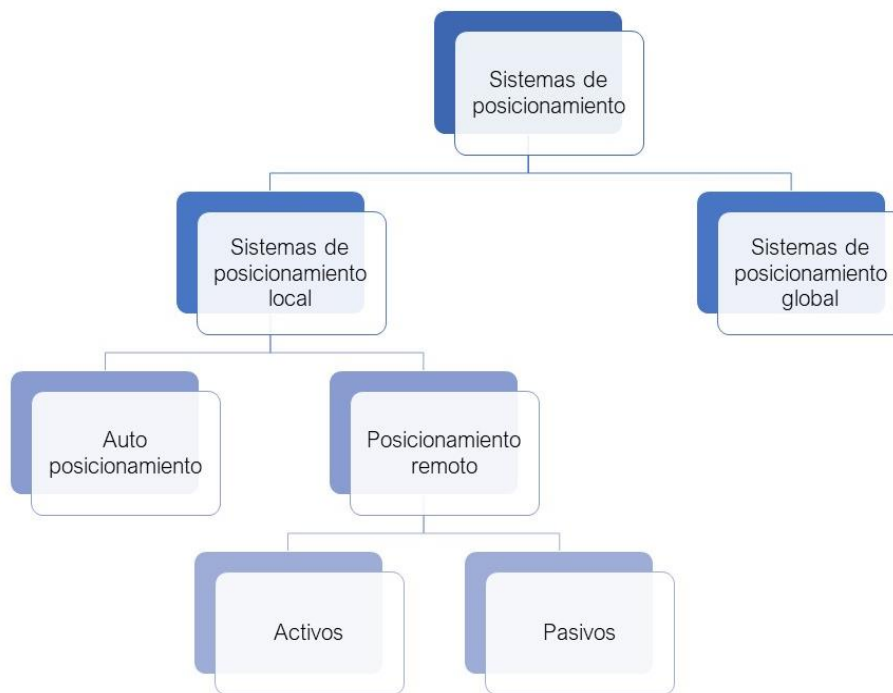


Figura 1.1 Clasificación de los sistemas de posicionamiento.

1.3. SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN EN TIEMPO REAL

Los Sistemas de Localización en Tiempo Real (RTLS, *Real Time Locating System*) son sistemas de posicionamiento para la identificación y seguimiento de forma automática de la posición de personas u objetos en cualquier lugar de un espacio definido y en un instante cercano al tiempo real. Un RTLS consiste en dispositivos que son llevados por las personas o incorporadas en los objetos de los que se desea estimar la posición, las cuales transmiten información por medio de señales inalámbricas a nodos anclas o nodos fijos ubicados a lo largo del espacio de localización, los cuales reciben la información procedente del nodo móvil. Cuanto mayor sea el número de puntos de referencia, mayor será la exactitud en la estimación de la posición. Sin embargo, un incremento del número de dispositivos implica una mayor cantidad de información a procesar, al igual que se debe considerar el error causado por la posición relativa de los nodos ancla conocido como Dilución Geométrica de la Precisión (GDOP, *Geometric Dilution of Precision*). Actualmente, los RTLS desempeñan un papel clave e importante para muchas aplicaciones en el Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*). Los RTLS son muy útiles en aplicaciones relacionadas con la navegación asistida y el seguimiento [10].

1.4. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO EN INTERIORES

Los Sistemas de Posicionamiento en Interiores (IPS, *Indoor Positioning System*) son sistemas hardware y software capaces de detectar, seguir y localizar múltiples objetivos con cierto grado de exactitud en escenarios de interiores, como, por ejemplo, localizar personal médico o pacientes en un hospital, encontrar personas en operaciones de

búsqueda y rescate, y ubicar personas dentro de una fábrica [1]. El posicionamiento es una parte esencial de los IPS y los LBS [4].

Los IPS localizan personas u objetos en escenarios de interiores utilizando diferentes tecnologías basadas en ondas de radio, campos magnéticos, señales ultrasónicas y considerando métricas o medidas sobre las señales, tales como: el Tiempo de Llegada (ToA, *Time of Arrival*), el Ángulo de Llegada (AoA, *Angle of Arrival*) y la Intensidad de la Señal Recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*), entre otras. Posteriormente, las medidas son procesadas por un algoritmo de posicionamiento para estimar la ubicación del objetivo. Las principales métricas de desempeño general de un IPS son: exactitud, cobertura, seguridad, escalabilidad, costo, disponibilidad, complejidad, robustez, y retardo [3].

Existen varias razones por las cuales el posicionamiento en escenarios de interiores es diferente del posicionamiento en escenarios de exteriores. Los escenarios de interiores son más complejos que los escenarios de exteriores debido a la presencia de varios obstáculos, tales como: paredes, muebles y personas, los cuales reflejan las señales induciendo multitrayecto. Los obstáculos obligan al IPS a funcionar en condiciones sin línea de vista directa (NLOS), lo que ocasiona retardos, atenuación y dispersión de la señal degradando la exactitud del sistema de posicionamiento. Normalmente, las aplicaciones de posicionamiento en interiores requieren de una mayor exactitud en comparación con las aplicaciones para escenarios de exteriores [3].

1.5 MÉTRICAS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA

Estas métricas se diferencian de las métricas de señal en cuanto al enfoque al que se refieren. Las métricas de desempeño del sistema examinan, tipifican y evalúan los límites de operación, por tanto, son métricas indispensables en la planeación de cualquier sistema. A continuación, se describe el concepto general de las métricas mencionadas:

1.5.1 Exactitud

La exactitud, error de localización o incertidumbre de medición se utiliza para la cuantificación de una desviación estándar (precisión), por lo tanto, mide el grado de acercamiento entre la estimación del sistema a la posición real de referencia [11]. La exactitud del posicionamiento depende de las condiciones meteorológicas, de la sensibilidad del receptor, de factores geométricos que relacionan la posición de los nodos fijos con el nodo móvil y el comportamiento estadístico debido a errores de medición aleatorios. Por lo tanto, la exactitud del posicionamiento no solo depende del escenario, sino también de la naturaleza de la señal transmitida, el procesamiento de la señal y las características del hardware de la comunicación. Los principales parámetros que afectan la exactitud en un sistema de posicionamiento basado en señales radio son los siguientes: ancho de banda de la señal, la relación señal a ruido (SNR, *Signal Noise Ratio*) a la salida del receptor, el rango dinámico del receptor y los algoritmos de procesamiento de señales [12].

1.5.2 Disolución Geométrica de la Precisión

GDOP define cómo se reduce la exactitud de posicionamiento debido a factores geométricos, de modo que la exactitud de posicionamiento puede ser mucho peor que la exactitud medida solo de punto a punto. Estos efectos GDOP pueden ser el factor dominante en la exactitud de un sistema si la ubicación y el número de estaciones base en el área de cobertura no se planifican cuidadosamente [13].

1.5.3 Área de Cobertura

La métrica de área de cobertura indica el área en la cual el nodo móvil puede ser localizado con alguna técnica con un valor de exactitud específico. La mayoría de los IPS tiene un rango de distancia de alcance de 5 m a 50 m [7]. En algunos IPS el área de la cobertura de los nodos fijos se reduce a un rango de 10 m a 20 m por la existencia de obstáculos entre el emisor y el receptor [14].

1.5.4 Seguridad

La métrica de seguridad, también llamada seguridad de la posición está relacionada con la privacidad y la confiabilidad de la información [3]. Los riesgos de seguridad de la posición incluyen el acceso no autorizado y la no autenticación; y el uso, divulgación, modificación, interrupción y destrucción de la información. La posición del usuario es información sensible que no se debe compartir a usuarios no autorizados. En los IPS la seguridad no es un aspecto importante [1].

1.5.5 Escalabilidad

La métrica de escalabilidad en un IPS es la capacidad de funcionar cuando incrementa la geografía y/o el número de usuarios [7]. Otra medida de escalabilidad es el espacio dimensional del sistema, es decir, la estimación de la posición del nodo móvil en un plano (2D) o en el espacio (3D) [2].

1.5.6 Costo

La métrica de costo en un IPS no debería ser elevada y de forma ideal no debería incurrir en gastos de infraestructura adicional [1]. El costo puede medirse en dimensiones de dinero, tiempo, espacio, peso y energía (vida útil de la batería por carga). Adicionalmente, el costo se puede medir en instalación, mantenimiento, componentes de infraestructura y dispositivos de funcionamiento [2][7]. Algunos IPS utilizan infraestructuras existentes para ser más rentables y otros utilizan dispositivos de posicionamiento pasivos de energía como las etiquetas RFID [3].

1.5.7 Disponibilidad

La métrica de disponibilidad indica el porcentaje de tiempo durante el cual el servicio de un IPS está disponible. Para la adopción a gran escala es importante utilizar tecnologías que estén disponibles, como, por ejemplo, los teléfonos inteligentes [1]. La disponibilidad se puede agrupar en tres niveles: baja disponibilidad (<95%), disponibilidad regular (entre 95% y 99%) y alta disponibilidad (>99%) [7].

1.5.8 Complejidad

La métrica de complejidad para un IPS se analiza por tres factores generales: hardware, software y puesta en operación [15]. La complejidad de hardware y de operación no está relacionada directamente con la cantidad de dispositivos, ya que estos, pueden en algunos casos integrarse fácilmente [16]. La complejidad del software o del algoritmo depende del número de cálculos y el lugar en el que se realicen. Un servidor centralizado con suministro de energía y una infraestructura adecuada puede procesar más rápido que un nodo móvil o un nodo fijo. Este hecho impacta en el tiempo que tarda el sistema en estimar la posición del objetivo [15]. Por ejemplo, la principal desventaja de aumentar las funcionalidades y validaciones dentro del código es el procesamiento adicional para decodificar la señal recibida [12].

1.5.9 Robustez

La métrica de robustez indica la capacidad de un sistema de posicionamiento para funcionar bajo condiciones no favorables de la señal, tales como, una baja intensidad de potencia de recepción de la señal; ángulos de incidencia críticos de la señal; o algunos nodos fijos deshabilitados o fuera de funcionamiento. La robustez de un IPS se soporta en las técnicas de posicionamiento para estimar la posición con información incompleta [15].

1.5.10 Latencia

La métrica de latencia, retardo o latencia de actualización en un IPS se define como el tiempo entre la obtención de información de la señal recibida y la estimación de la posición del nodo móvil [17]. La latencia está relacionada con las métricas de complejidad y robustez. La presencia de obstáculos ocasiona NLOS entre el nodo móvil y los nodos fijos, y, por tanto, multitrayectoria.

1.5.11 Eficiencia Energética

La métrica de eficiencia energética en los IPS compara la relación entre el costo por suministro de energía y el desempeño del sistema a nivel de exactitud. La eficiencia energética se relaciona con las métricas de costo, latencia y complejidad. Por ejemplo, en la mayoría de *los smartphones* el servicio de ubicación es una aplicación que corre en segundo plano consumiendo la batería, siendo esta una fuente limitada, por lo tanto, se debería limitar el consumo de energía. Los factores que influyen en el consumo de energía son: la periodicidad en el envío de señales desde los nodos fijos para estimar la posición; la potencia de transmisión; y la complejidad computacional [1].

1.6 MÉTRICAS DE LA SEÑAL

Las métricas o medidas de la señal se obtienen en los nodos ancla que funcionan como entrada de información para determinar la posición de un nodo móvil, también puede ocurrir que sea el propio nodo móvil quien reciba la información de los nodos anclas y así pueda calcular su posición. A continuación, se describen los parámetros esenciales dentro de los IPS:

1.6.1 Tiempo de Llegada

La métrica ToA también conocida como Tiempo de Vuelo (ToF, *Time of Flight*) se basa en la medida del tiempo de propagación de una señal, la cual permite estimar la distancia entre un transmisor y un receptor. En posicionamiento es importante el sincronismo de los relojes entre el nodo móvil y los nodos ancla. El nodo móvil transmite una señal con marca de tiempo hacia los nodos ancla, los cuales miden el tiempo de llegada y calculan la distancia al móvil en función de la velocidad de propagación de la señal¹, como se muestra en la siguiente ecuación [18]:

$$d_i = c (T_i - T_0), \quad (1.1)$$

donde, c es la velocidad de la luz con un valor aproximado a $c \simeq 3 * 10^8 \text{ m/s}$; T_0 es la marca de tiempo de transmisión (en segundos); y T_i la marca de tiempo de recepción por el nodo ancla i (en segundos), con $i \in \mathbf{N}$. La métrica de ToA se suele utilizar en conjunto con la técnica de trilateración para estimar la posición del nodo móvil, donde para dos dimensiones se necesita conocer al menos la distancia al nodo móvil desde 3 nodos ancla y para tres dimensiones al menos desde 4 nodos ancla.

1.6.2 Diferencia de Tiempo de Llegada

A diferencia de la métrica ToA que impone una sincronización estricta entre el nodo móvil y los nodos ancla, la métrica Diferencia de Tiempo de Llegada (TDoA, *Time Difference of Arrival*) es más versátil, ya que no utiliza el tiempo en que se envía la señal desde el nodo móvil a los nodos ancla, únicamente necesita la diferencia de tiempo en que se recibe la señal en los nodos ancla, por lo que solo estos deben compartir una referencia de tiempo global o estar sincronizados [14]. TDoA mide la diferencia en los tiempos de propagación de las señales de diferentes nodos anclas, medidos en el nodo móvil. A partir de esta información se obtiene la diferencia de distancia, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\Delta d_{m,n} = c (T_m - T_0) - c (T_n - T_0) = c (T_m - T_n) = c \Delta T_{m,n}, \quad (1.2)$$

donde, $\Delta d_{m,n}$ es la diferencia de distancia en metros para $m, n \in \{1, \dots, \mathbb{N} \mid m \neq n\}$, c es la velocidad de la luz, T_m y T_n las marcas de tiempo de cada nodo ancla en el nodo móvil (en segundos), T_0 la marca de tiempo del envío de la señal (en segundos).

Cada medida TDoA produce en el espacio de localización, en el caso 2D, una hipérbola, y en el caso 3D, un hiperboloide, sobre la cual se encuentra el nodo móvil (x, y) y cuyo foco corresponde a las posiciones conocidas de los nodos ancla (x_m, y_m) y (x_n, y_n) [20]. En la siguiente ecuación se representa la diferencia de distancia por la fórmula euclidiana:

$$\Delta d_{m,n} = \sqrt{(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2} - \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2}. \quad (1.3)$$

La intersección de múltiples curvas indica las posibles ubicaciones del objetivo, como se indica en la Fig. 1.2. Una vez que se han calculado suficientes hipérbolas, la posición del objetivo se puede determinar calculando la intersección. Cabe destacar que, aunque no necesita sincronización entre el nodo móvil y los nodos ancla, si se requiere sincronización entre los nodos ancla.

¹ Velocidad de propagación de una onda electromagnética para sistemas basados en señales de radiofrecuencia.

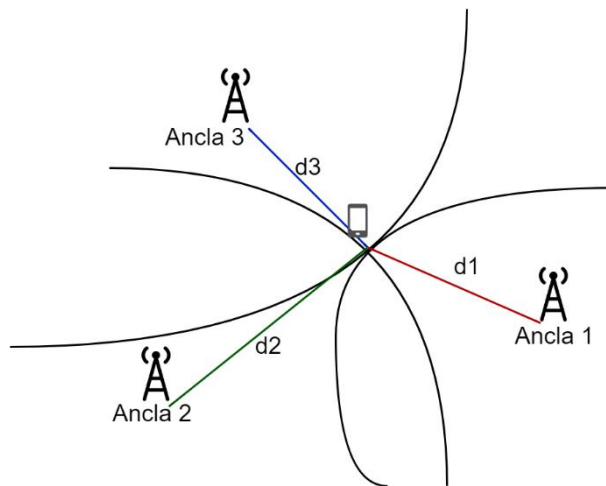


Figura 1.2 Esquema de posicionamiento TDoA.

1.6.3 Ángulo de Llegada

La métrica AoA también conocida como Dirección de Llegada (DoA, *Direction of Arrival*) estima la posición del objetivo determinando el ángulo de incidencia en el que las señales llegan a cada nodo ancla. El ángulo de llegada se define como el ángulo que forma la dirección de propagación de una onda incidente y una dirección de referencia, que se conoce con el nombre de orientación. Un sistema de posicionamiento que utiliza el parámetro AoA puede estimar la posición en 2D con mínimo dos nodos ancla, como se aprecia en la Fig. 1.3.

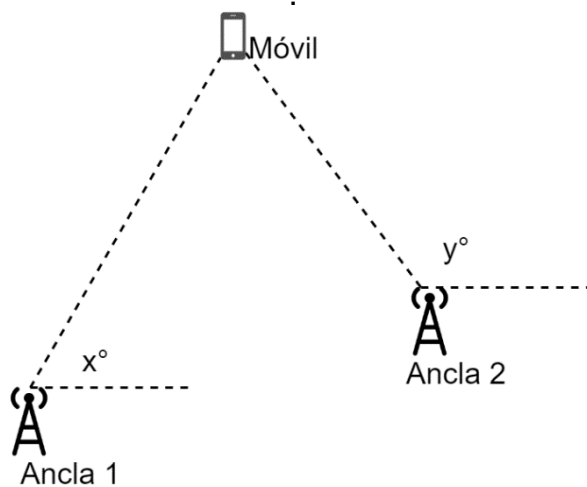


Figura 1.3 Esquema de posicionamiento AoA.

1.6.4 Intensidad de la Señal Recibida

La métrica de Intensidad de la Señal Recibida (RSS, *Received Signal Strength*) permite estimar la distancia entre el nodo móvil y un nodo ancla al considerar la atenuación de la señal emitida. La RSS es una métrica fácil de obtener y con buena relación costo-eficiencia, sin embargo, en la estimación de la posición su exactitud es pobre, en especial para escenarios de interiores en condiciones NLOS, debido a la existencia de muchos obstáculos que generan multitrayecto [1][3]. Se pueden utilizar diferentes filtros o mecanismos para mitigar estos efectos, como combinar las medidas RSSI con modelos de propagación o técnicas como *fingerprinting*, sin embargo, es poco probable obtener un buen nivel de

exactitud sin el uso de algoritmos complejos. La distancia se puede calcular considerando el uso de un modelo de pérdidas de propagación, como, por ejemplo, el modelo de pendiente única, el cual se muestra en la siguiente ecuación [21][22]:

$$d(m)_{RSSI} = d_0 10^{\frac{RSSI(dBm) - A(dBm)}{-10n}}, \quad (1.4)$$

donde, $d_0 (m)$ y $RSSI(dBm)$ son la distancia de referencia y el valor RSSI a esa distancia, respectivamente y n es el índice de propagación.

1.6.5 Fase de Llegada

La métrica de Fase de Llegada (PoA, *Phase of Arrival*) utiliza la fase o la diferencia de fase de la portadora para estimar la distancia entre el nodo móvil y el nodo ancla [15][19]. Los IPS parten de la suposición de que los nodos ancla emiten señales sinusoidales puras con la misma frecuencia y fase igual a cero [15]. Para mejorar la estimación de la posición se puede emplear la métrica PoA junto con las métricas RSSI, ToA y TDoA, dado que PoA se degrada en condiciones NLOS [19]. Existen formas para estimar la distancia entre el nodo móvil y el nodo ancla usando PoA [19][23], con las distancias ya estimadas se pueden usar las mismas técnicas de ToF para estimar la posición del nodo móvil. En la Fig. 1.4 se muestra un ejemplo de la localización basado en PoA.

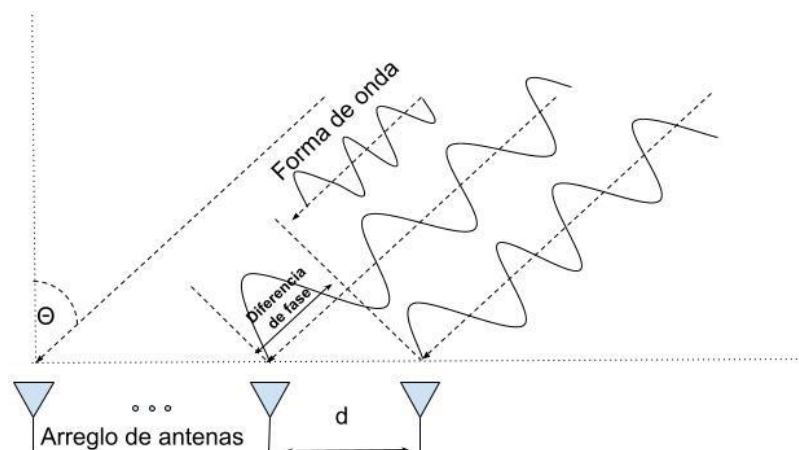


Figura 1.4 Localización basada en PoA.

1.6.6 Tiempo de Ida y Vuelta

La métrica de Tiempo de Ida y Vuelta (RTT, *Round Trip Time*) o (TWR, *Two Way Ranging*) se basa en una comunicación bidireccional entre el nodo móvil y cada nodo ancla. Existen dos esquemas conocidos de TWR: TWR de una cara (SS-TWR, *Single Sided TWR*) y TWR de doble cara simétrica (SDS-TWR, *Symmetrical Double Sided TWR*) [24]. Esta métrica no requiere de sincronización entre los nodos anclas y el nodo móvil, dado que las mediciones son ejecutadas en uno solo de los nodos. En la métrica TWR uno de los nodos envía un mensaje y espera el mensaje de respuesta de parte del otro nodo. La métrica de TWR se suele utilizar en conjunto con la técnica de trilateración para estimar la posición del nodo móvil, donde para 2D se necesita conocer al menos la distancia al nodo móvil desde 2 nodos ancla y para 3D al menos, de 4 nodos anclas. En la Fig. 1.5 se muestra la comunicación entre dos nodos con TWR, una de las desventajas de TWR es requerir más intercambio de mensajes para determinar la distancia.

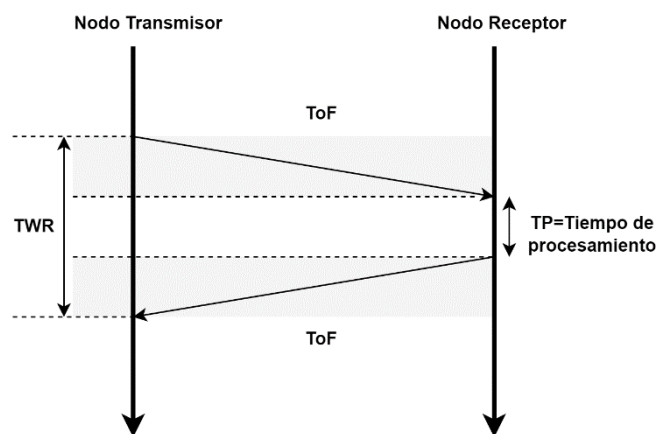


Figura 1.5 Comunicación TWR.

De acuerdo con la figura se puede calcular la métrica haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$TWR = (2ToF) + TP, \quad (1.5)$$

donde, ToF representa el tiempo de vuelo entre los dos nodos y TP el tiempo de procesamiento del nodo receptor. A partir de la información anterior se presenta en la Tabla 1.1 un resumen de las métricas que pueden ser consideradas por los sistemas de posicionamiento con sus principales ventajas y desventajas.

Métricas	Tipo	Ventajas	Desventajas
ToA	Tiempo	Exactitud alta.	Requiere sincronización entre los nodos ancla y el nodo móvil. Requiere condiciones LOS para mayor exactitud.
TDoA	Tiempo	Exactitud alta. No requiere sincronización con el nodo móvil.	Requiere condiciones LOS para mayor exactitud. Requiere sincronización entre los nodos ancla.
AoA	Ángulo	Requiere de mínimo dos nodos ancla. No requiere sincronización	Requiere hardware adicional como múltiples antenas. Requiere condiciones LOS para mayor exactitud.
RSS	Intensidad	Simple y económico. No requiere sincronización.	Exactitud baja.
PoA	Diferencia de fase	Se puede usar de manera conjunta con otras métricas como RSS, ToA y TDoA.	Requiere condiciones LOS.
TWR	Tiempo	No requiere sincronización	Mayor consumo de energía.

Tabla 1.1 Comparación de las principales métricas.

1.7 TÉCNICAS PARA ESTIMAR LA LOCALIZACIÓN

Son modelos matemáticos que se utilizan para estimar las coordenadas físicas del objetivo utilizando como entrada las métricas de la señal, tales como, ToA, AoA y RSS, entre otras.

Cuando las métricas se asocian a tiempos de llegada o diferencias de tiempo de llegada se utilizan técnicas de multilateración o trilateración. Estas técnicas buscan estimar la posición por la solución de un sistema de ecuaciones, para lo cual se utilizan diversos métodos como el algebraico, aproximación de Taylor, optimización iterativa, mínimos cuadrados, etc. [25-28].

Cuando las métricas se asocian a ángulos se utilizan técnicas de triangulación.

Cuando las métricas se asocian a RSS, se busca establecer una relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida, haciendo uso de algún modelo de propagación que permita estimar la distancia entre los nodos fijos y móviles. De igual manera se puede utilizar técnicas de *Fingerprinting*, en las cuales se correlacionan medidas actuales con medidas realizadas previamente en el mismo lugar e iguales condiciones.

Cuando las métricas se asocian a proximidad, la técnica utilizada asigna la posición al nodo ancla más cercano.

De manera general, las técnicas de localización se dividen en dos grupos: las basadas en distancia (multilateración, triangulación, trilateración, RSSI) y las basadas en proximidad. A continuación, se describen de manera general las principales técnicas de localización.

1.7.1 Trilateración/Multilateración

La técnica de trilateración es utilizada para estimar la posición de un objetivo aplicando un procedimiento matemático a la intersección de figuras geométricas, comúnmente círculos. Esta técnica pertenece al grupo de las técnicas basadas en distancia. A partir de la métrica ToA, ToF, PoA, TWR o RSS se determinan las distancias entre los nodos ancla y el nodo móvil. Un modelo geométrico de localización 2D o 3D puede ser aplicado para describir la información de la posición, típicamente, a través de un sistema de coordenadas polar o cartesiano. La Fig. 1.6 muestra un ejemplo de cómo determinar la ubicación del nodo móvil en función de las mediciones de distancia en un escenario 2D. El objetivo está ubicado en algún lugar de un círculo con la ubicación del nodo ancla en el centro y la distancia al nodo móvil como radio. En general, dos círculos se cruzan en dos puntos, lo que produce dos soluciones para la estimación de la posición del nodo móvil. Para resolver la ambigüedad de las dos soluciones, se requiere de un tercer círculo, que resulta de la medición de la distancia del nodo móvil con un tercer nodo ancla.

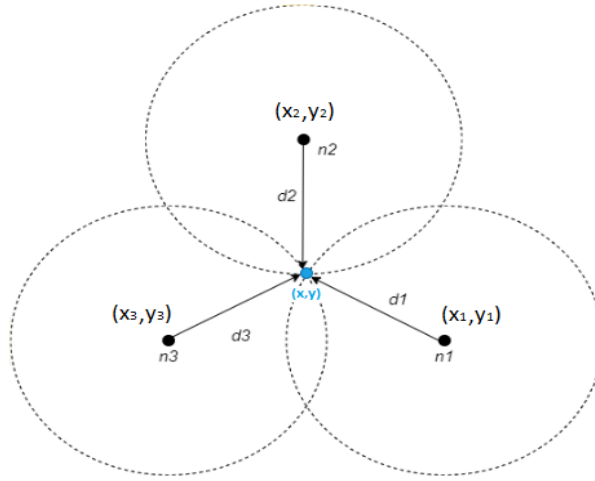


Figura 1.6 Esquema de trilateración.

Para tres nodos ancla, con sus posiciones conocidas, se utiliza una transformada de las coordenadas para facilitar el cálculo. En el caso del ejemplo de la Fig. 1.6, se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$d_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \quad (1.6)$$

$$d_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \quad (1.7)$$

$$d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2. \quad (1.8)$$

Restando (1.6) y (1.7) se obtiene:

$$d_1^2 - d_2^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 - (x - x_2)^2 - (y - y_2)^2. \quad (1.9)$$

Restando (1.6) y (1.8) se obtiene:

$$d_1^2 - d_3^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 - (x - x_3)^2 - (y - y_3)^2. \quad (1.10)$$

Desarrollando (1.9) y (1.10) y considerando al nodo 1 en el origen con $x_1 = 0, y_1 = 0$ para reducir la complejidad de las ecuaciones se obtiene:

$$(2x_2)x + (2y_2)y = d_1^2 - d_2^2 + x_2^2 + y_2^2 \quad (1.11)$$

$$(2x_3)x + (2y_3)y = d_1^2 - d_3^2 + x_3^2 + y_3^2. \quad (1.12)$$

Expresando (1.11) y (1.12) en forma matricial se obtiene:

$$\begin{bmatrix} 2x_2 & 2y_2 \\ 2x_3 & 2y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^2 - d_2^2 + x_2^2 + y_2^2 \\ d_1^2 - d_3^2 + x_3^2 + y_3^2 \end{bmatrix}. \quad (1.13)$$

Finalmente, considerando (1.13) se resuelve el sistema de ecuaciones para las variables desconocidas y se obtiene la coordenada del nodo móvil (x, y) .

1.7.2 Triangulación

La localización basada en la técnica de trilateración. La técnica de triangulación funciona de manera similar, pero en lugar de distancias, identifica el ángulo de la señal recibida con respecto a múltiples puntos de referencia y estima la posición mediante trigonometría. La triangulación requiere conocer la distancia y la línea de referencia entre dos nodos ancla o de referencia.

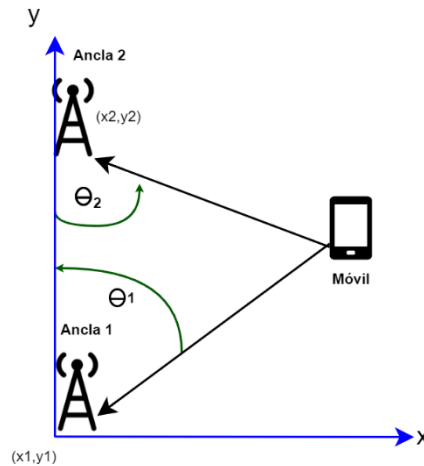


Figura 1.7 Esquema de triangulación.

La Fig. 1.7 muestra el esquema de la estimación de la posición del objetivo móvil en función de las mediciones de AoA para dos nodos ancla en un escenario específico. Los ángulos θ_1 y θ_2 representan el ángulo de llegada de la señal, siendo (x_1, y_1) y (x_2, y_2) las posiciones de los nodos ancla. Por trigonometría, se tiene que la relación entre la tangente de un ángulo y sus lados se puede representar mediante las siguientes ecuaciones:

$$\tan \theta_1 = \frac{y - y_1}{x - x_1}, \quad (1.14)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{y - y_2}{x - x_2}. \quad (1.15)$$

Por lo tanto, para obtener la posición (x, y) del objetivo se debe resolver el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$x \tan \theta_1 - y = x_1 \tan \theta_1 - y_1 \quad (1.16)$$

$$x \tan \theta_2 - y = x_2 \tan \theta_2 - y_2. \quad (1.17)$$

Cabe mencionar que, para un posicionamiento exacto, las mediciones de ángulos deben ser exactas, lo cual puede estar limitado por zonas de sombra, por el tamaño o número de antenas, pero sobre todo por la multitrayectoria [12]. Otra desventaja de las estimaciones basadas en AoA es que requieren de hardware adicional lo que implica un sobrecosto, haciendo compleja su implementación para redes con un alto número de sensores [7].

1.7.3 Indicador de Intensidad de Señal Recibida

La técnica basada en intensidad de señal recibida (RSS) es una de las más simples y ampliamente utilizada para la localización en escenarios de interiores. Se basa en medir la potencia de una señal entre un nodo ancla y un nodo móvil, considerando que la intensidad de la señal disminuye a medida que aumenta la distancia. La propagación en escenarios de interiores es un fenómeno complejo, aunque existen casos de trayectos con condición LOS, la mayoría son trayectos en condición NLOS, puesto que se cuenta con la presencia de paredes, techos, suelos, y objetos como muebles y mesas, entre otros. Existen modelos de propagación obtenidos a partir de mediciones experimentales, i.e., el modelo de pendiente única, el cual define una curva que se ajusta por regresión considerando la distancia y el exponente de propagación. Existen modelos más complejos, los cuales tienen en cuenta las atenuaciones producidas por paredes y techos, de manera que requiere información adicional acerca de planos del escenario y el tipo de material de construcción del escenario [29]. El modelo de propagación seleccionado permite convertir unas pérdidas de propagación estimadas en distancia.

Si bien el enfoque basado en RSS es simple y rentable en términos de implementación de hardware y software, su exactitud en la localización es pobre, especialmente en condiciones NLOS, debido a la atenuación adicional que resulta de los fenómenos de propagación como la multitrayectoria. Aunque se puede hacer uso de diferentes herramientas para mitigar estos efectos, es poco probable que mejore la exactitud sin el uso de algoritmos complejos [30].

1.7.4 Fingerprinting

La técnica de análisis de escena (*fingerprinting*) utiliza la comparación de medidas actuales o en tiempo real con medidas previas para la estimación de posicionamiento. La técnica utiliza dos fases: fase *offline* (de entrenamiento) y fase *online* (de posicionamiento).

Durante la fase de entrenamiento se construye un mapa radio dividiendo el área de localización en celdas con la ayuda de los planos del escenario, y se realiza una campaña de medidas de potencia de señal recibida para obtener una huella digital (*fingerprint*) generando una base de datos que relacione: potencia recibida - referencia de posicionamiento, para su posterior comparación y correlación con medidas en tiempo real [3][25].

Fase de posicionamiento, también llamada etapa de servicio o etapa de tiempo de ejecución, un algoritmo de posicionamiento utiliza las intensidades de señal observadas en tiempo real y la información recopilada previamente para estimar una posición. Cuando un usuario envía su RSSI actual, los algoritmos de posicionamiento consultan la base de datos de huellas digitales y devuelven las posiciones coincidentes.

El principal desafío de las técnicas basadas en *fingerprinting* es que la intensidad de la señal recibida en los escenarios de interiores se ve afectada principalmente por la propagación multitrayecto, la cual es debida a las múltiples reflexiones de la señal por la presencia de obstáculos [15].

1.7.5 Proximidad

Otra técnica de localización en IPS es la detección de proximidad, en donde la información de posición relativa se basa generalmente en la proximidad de un nodo móvil a puntos de

referencia, estaciones base o puntos de acceso dentro de un espacio conocido, por lo que, no es necesario realizar un cálculo de la posición. La técnica necesita fijar varios detectores en las posiciones conocidas, si se tienen varias unidades de referencia dentro del espacio de localización, estas unidades pueden realizar una mejor estimación. Es un método de posicionamiento simple utilizado para aplicaciones con bajos requerimientos de exactitud [2].

Se utilizan las tecnologías de RFID y NFC para obtener información de proximidad en lugar de una verdadera localización. Se puede decir que una etiqueta está dentro del alcance de un lector RFID, pero no exactamente en dónde [6]. Existen tres enfoques generales para detectar la proximidad. El primero y más básico es detectar el contacto físico con un objeto. Las tecnologías para detectar el contacto físico incluyen sensores de presión, sensores táctiles y detectores de campo capacitivos. El segundo enfoque es monitorear los puntos de acceso celular inalámbricos con los cuales un nodo móvil puede tener conexión. El tercer enfoque está relacionado con sistemas de identificación automáticos, por ejemplo, se pueden emplear para determinar la ubicación de un objeto móvil de forma indirecta, esto lo realiza cuando se conoce la ubicación de una etiqueta y esta es utilizada durante alguna transacción comercial [3].

1.7.6 Análisis de Visión

En la técnica de análisis de visión, la huella digital se obtiene usando cámaras de vídeo para capturar una variedad de imágenes y construir la referencia para la posterior comparación y detección de objetos. Por lo tanto, la posición se estima a partir de las imágenes recibidas en uno o varios puntos. Por lo general, una o varias cámaras se fijan en el área de seguimiento de un IPS para cubrir todo el lugar y tomar imágenes en tiempo real. A partir de las imágenes, se identifican los objetivos. Las imágenes observadas de los objetivos se buscan en la base de datos para hacer las estimaciones de posición [12].

1.8 ALGORITMOS DE ESTIMACIÓN DE POSICIÓN

El problema de localización puede verse como un problema de estimación. Por lo general, un sistema de posicionamiento proporciona mediciones para la distancia y/o la dirección de algún objetivo. Si se conoce el modelo matemático que describe el movimiento del objetivo, entonces se puede implementar un algoritmo de estimación para calcular la posición del objetivo en movimiento. Se espera que las posiciones estimadas tengan mejor exactitud en comparación con las posiciones medidas [22]. A continuación, y de manera general, se presentan algoritmos de estimación de posición:

1.8.1 Filtro de Kalman

El Filtro de Kalman (KF, *Kalman Filter*) es un conjunto de ecuaciones matemáticas que proporciona de manera eficiente una estimación del estado futuro del sistema, ya que minimiza la diferencia entre los estados verdaderos y los estados estimados, lo que reduce el Error Cuadrático Medio (MSE, *Mean Squared Error*) [31][33]. El KF se ha utilizado ampliamente en sistemas de control modernos, en seguimiento y navegación de vehículos. En los IPS, el KF se utiliza para localizar los nodos móviles, utilizando medidas de distancia [12]. El KF es adecuado en sistemas de tiempo real que cambian continuamente debido a

que sólo conserva el estado anterior y no conserva ningún otro dato histórico, ocupando una pequeña cantidad de memoria y haciendo que los cálculos no sean tan extensos [32].

El KF opera en dos etapas: la primera es de predicción donde, basándose en el estado anterior del sistema y las ecuaciones que lo describen, se predice el estado actual; y la segunda parte es de corrección, donde, haciendo uso de los datos de medición de los sensores, corrige la predicción. Si la dinámica del sistema y/o el modelo de medidas no son lineales, entonces se puede implementar un Filtro de Kalman Extendido (EKF, *Extended Kalman Filter*) en la etapa de estimación. La idea básica del EKF es linealizar el sistema de ecuaciones no lineales haciendo uso de la estimación actual y luego aplicar un filtro de Kalman lineal al modelo [38].

1.8.2 Métodos Bayesianos

Los métodos para estimar la posición basados en métodos bayesianos se pueden ver como una extensión de las técnicas de inferencia bayesiana, donde la información de posición estimada del nodo móvil en el instante t se puede modelar como una distribución de probabilidad $p(x_t | x_1, x_2, x_3, \dots, x_{t-1})$ que considera todas las mediciones hasta $t - 1$ [26].

1.8.3 Filtro de Partículas

Otra alternativa al KF es el Filtro de Partícula (PF, *Particle Filter*), también conocido como método secuencial de Monte Carlo. El PF es un algoritmo para implementar un filtro bayesiano recursivo mediante simulaciones de Monte Carlo (funciona crea un modelo de posibles resultados aprovechando una distribución de probabilidades) [12]. Este método permite abordar sistemas no lineales, por lo tanto, es bastante adecuado para problemas de seguimiento y localización [14]. La idea es representar la función de densidad de probabilidad mediante un conjunto de muestras aleatorias con pesos asociados [34-35]. La posición se calcula mediante la suma de los pesos entre todas las posiciones de las partículas. Una desventaja del filtro de partículas es que requiere mayor complejidad en los cálculos [36].

1.8.4 Algoritmo de Taylor

El algoritmo de Taylor generalmente requiere una estimación de la posición inicial cercana al valor real; de lo contrario, no se puede garantizar su convergencia. En este método, un conjunto de ecuaciones no lineales de medidas, que representan la posición del objetivo, se linealiza a través de su expansión en una serie de Taylor, en la cual se ignoran las partes de segundo orden o mayor. El conjunto de ecuaciones linealizadas se resuelve para producir una nueva posición estimada y el proceso continúa hasta que se satisface un criterio de convergencia preestablecido.

Finalmente, el algoritmo descarta los nodos cuyo error es considerable, vuelve a adquirir los valores medidos, y resuelve iterativamente la estimación [20]. La ventaja del algoritmo Taylor es que es bastante simple y fácil de implementar, siempre que se disponga de una estimación de la posición inicial. Su complejidad computacional es menor que la de algunos algoritmos no iterativos [12].

1.8.5 Estimación por Mínimos Cuadrados

Las técnicas de posicionamiento basadas en distancia resuelven un sistema de ecuaciones, sin embargo, cuando el sistema está sobredimensionado (número de ecuaciones independientes mayor que el número de variables desconocidos), se puede aplicar la técnica de estimación por mínimos cuadrados (LSE, *Least Squares Estimation*) haciendo uso de las mediciones redundantes para obtener mejores estimaciones de la posición.

1.8.6 K-vecino más Cercano

Los algoritmos de k-vecino más cercano (kNN, *k-Nearest Neighbors*) se relacionan y cooperan con la técnica de *Fingerprinting* que contiene dos fases (*online* y *offline*), previamente explicadas. El algoritmo se basa en el uso de los valores RSSI de la fase online para obtener las k coincidencias más cercanas sobre la base de mediciones RSSI de la fase *offline* almacenadas previamente, utilizando la raíz del error cuadrático medio (RMSE, *Root Mean Square Error*). El algoritmo, posteriormente, promedia las coincidencias más cercanas para obtener una ubicación estimada del nodo móvil. Se utiliza un kNN ponderado si las distancias se utilizan como pesos en el espacio de la señal [27].

1.8.7 Redes Neuronales

Las redes neuronales artificiales (ANN, *Artificial Neural Networks*) se utilizan en una serie de escenarios de clasificación y estimación. Para la localización, la red con la ayuda de la técnica de fingerprinting debe entrenarse utilizando los valores RSSI y las coordenadas correspondientes de la fase *offline*. Una vez que la ANN ha sido entrenada, se puede utilizar para obtener la ubicación del usuario en función de las mediciones RSSI en la fase online.

1.9 TECNOLOGÍAS EMPLEADAS

Las diferentes tecnologías utilizadas en los IPS facilitan su operación basadas en determinadas métricas, técnicas y algoritmos. La Tabla 1.2 resume las principales tecnologías empleadas en los IPS, construida a partir de las referencias [1][18] [38-39]. Las tecnologías se pueden agrupar en: basadas en imágenes, infrarrojo, ultrasonido, y radiofrecuencia, las cuales ofrecen en su mayoría conectividad inalámbrica de corto alcance enfocada a un servicio o aplicación diferente. De las referencias consultadas se obtiene la siguiente información: en los dispositivos móviles, las tecnologías más comunes son WiFi y Bluetooth, que corresponden a tecnologías de red inalámbricas locales(WLAN, *Wireless Local Area Network*) y redes de área personal inalámbrica(WPAN, *Wireless Personal Area Network*), respectivamente; las tecnologías RFID y NFC se utilizan para identificación de personas y objetos; y la tecnología ZigBee es utilizada en Redes de Sensores Inalámbricas (WSN, *Wireless Sensor Network*). Posteriormente, se detallan más aspectos de las tecnologías mencionadas en la tabla.

1.9.1 Identificación por Radiofrecuencia

Esta tecnología utiliza dispositivos llamados etiquetas, las cuales son identificadas por un dispositivo lector mediante ondas radio. Las etiquetas RFID se distinguen entre activas y pasivas. Las primeras cuentan con batería y la capacidad de transmitir señales de manera autónoma, mientras que las segundas requieren de una fuente externa de energía para la

transmisión de las señales. RFID es considerada una de las tecnologías más adecuadas para el seguimiento de personas u objetos, además, opera en condiciones NLOS, aunque su alcance es limitado [3].

Tecnología	Orden de la Exactitud	Cobertura (m)	Consumo de energía	Observaciones
RFID	dm - m	1-50	bajo	La exactitud depende de la densidad de etiquetas y el rango de lectura. No es fácil de integrar a otros sistemas.
Bluetooth	10-20 m	70-100	bajo	La exactitud varía de acuerdo con la técnica empleada. No requiere LOS.
WiFi	1-5 m	50-100	Moderado	Dependiendo de la técnica de localización puede o no requerir LOS. Por la complejidad de la medida de tiempos de propagación y ángulos de llegada de la señal no es común el uso de técnicas relacionadas. La técnica más utilizada es <i>fingerprinting</i> , la cual hace uso de la métrica de medida RSSI.
Zigbee	1-10 m	20	Bajo	Tiene un ciclo de trabajo pequeño que garantiza un bajo consumo de energía, lo cual no es favorable en seguimiento en sistemas de posicionamiento.
Ultrasonido	cm - m	10	Bajo - moderado	No requiere LOS. El grado de exactitud depende de la ubicación del sensor. No genera interferencia sobre otros sistemas de posicionamiento.
Basado en imágenes	mm - dm	1 - 10	Alto	La transformación del espacio de la imagen en el espacio de localización requiere información adicional sobre la distancia entre objetos. Requiere LOS.
Basado en redes celulares	20 - 500 m	Depende del tamaño de la celda	Depende del número de estaciones base	La mayoría de las técnicas están basadas en RSSI, lo que brinda una baja confiabilidad debido a cambios en las condiciones de propagación. Opera en banda licenciada.

UWB	cm - m	10-20 m	Moderado	Alto costo, corto alcance y requiere adicionar hardware dedicado, como nodos ancla y nodos objetivos.
Campo magnético	cm - m	10 - 100 m	Moderado - alto	Corto alcance, no sufre los efectos del multitrayecto y el desvanecimiento

Tabla 1.2 Comparación de las principales tecnologías.

1.9.2 Infrarrojo

Los IPS que hacen uso de infrarrojo utilizan pequeños dispositivos transmisores (portados por la persona u objeto que se desea localizar o seguir) que emiten señales infrarrojas cada 10 s a 15 s, y las señales transmitidas son captadas por dispositivos receptores. La primera forma de localizar al dispositivo, conocida como el método de Celda de Origen (CoO, *Cell of Origin*), consiste en ubicar un receptor en cada una de las habitaciones del edificio o escenario en el que esté implementado el sistema, y cuando las señales que emite el transmisor son captadas por los receptores (el alcance de estos dispositivos es de aproximadamente 6 m) se establece la posición del usuario. Si se desea estimar una posición más específica del usuario, se deben instalar varios receptores y calcularse mediante AoA. Cabe resaltar que las señales de infrarrojos necesitan LOS y además se ven afectadas por la fluorescencia y la luz solar directa [3].

1.9.3 Ultrasonido

Esta tecnología emplea ondas de ultrasonido (US, *UltraSonic*) para estimar la distancia entre una estación fija (receptor US) y el dispositivo que se desea localizar (transmisor US), para lo cual es necesario instalar múltiples receptores US sincronizados entre ellos. Para llevar a cabo el proceso de sincronización, el transmisor US envía una señal de Radiofrecuencia (RF, *Radio Frequency*) y una onda ultrasónica al mismo tiempo, la señal de radio llega a los receptores casi instantáneamente proporcionándoles la señal de sincronización, luego cada receptor mide el TDoA entre la señal de RF y la de US para calcular la distancia entre el transmisor y el receptor.

Esta tecnología tiene entre sus ventajas un bajo costo y en cuanto a las desventajas, se encuentra la complejidad de implementar un sistema con ultrasonido a gran escala, además, es importante mencionar que la temperatura influye críticamente en la velocidad del sonido, es por ello que la mayoría de estos sistemas incluyen sensores para la compensación automática por variación de temperatura [3].

1.9.4 Bluetooth

El posicionamiento mediante *Bluetooth* es uno de las más populares en el mercado, debido al bajo consumo de energía, el cual se implementa mediante *beacons*², los cuales envían una señal bluetooth que puede ser captada por cualquier dispositivo externo que se

² *Beacon*: son pequeños transmisores inalámbricos o nodos fijos [19].

encuentre a su alrededor como un teléfono inteligente o una tableta, el cual estima la distancia aproximada entre el dispositivo y el *beacon* [19].

1.9.5 Wi-Fi

Es una de las tecnologías más empleadas en IPS, principalmente porque la mayoría de estos escenarios cuenta con infraestructura desplegada como consecuencia de la popularidad de esta tecnología, la cual no requiere LOS. Esta tecnología funciona con un nodo que emite o recibe señales de radiofrecuencia hacia o desde un dispositivo inalámbrico para determinar su ubicación empleando una de las diferentes técnicas de posicionamiento asociadas a la tecnología, como trilateración y análisis de escena (*fingerprinting*) [3].

La exactitud de WiFi se mejora al incrementar el número de enrutadores o puntos de acceso, sin embargo, además de la exactitud existen grandes desafíos, entre ellos, el consumo de energía debido a que los dispositivos móviles son pequeños y poseen baterías limitadas; y la atenuación de la señal generada por obstrucciones [19].

1.9.6 Ultra Banda Ancha

Los IPS basados en UWB están compuestos por nodos fijos que emiten cortos pulsos de señal UWB, un nodo móvil, y un software de procesamiento de señal. La localización se realiza mediante una técnica de posicionamiento específica, una de las más populares es la trilateración, en la cual se calcula la distancia empleando parámetros como TDoA, ToF o TWR. Una ventaja de hacer uso de la tecnología UWB es que no es necesario tener LOS. La muy corta duración de los pulsos UWB los hace menos sensibles a los efectos de trayectos múltiples, lo que permite la identificación del trayecto principal en presencia de señales de trayectos múltiples [19].

1.9.7 Campos Magnéticos

Los campos magnéticos tienen la posibilidad de no ser fácilmente bloqueados por artefactos como paredes o grupos de personas en condiciones NLOS. Los campos magnéticos son relativamente fáciles de generar y detectar, no sufren de los efectos del multitrayecto y el desvanecimiento. Su principal desventaja está relacionada con el corto rango de operación. El posicionamiento por campos magnéticos es relativamente reciente, la forma de estimar la posición se basa en el uso de marcas de referencia y proximidad [40].

1.10 GENERALIDADES DE UWB

1.10.1 Ultra Banda Ancha

Ultra Banda Ancha (UWB, *Ultra Wide Band*), según la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, *Federal Communications Commission*) de los Estados Unidos, se define como una señal de radiofrecuencia que ocupa un ancho de banda mayor al 20% del valor de la frecuencia portadora o un ancho de banda igual o superior a los 500 MHz [7][50].

Como se indica en la Fig. 1.8, las frecuencias superiores f_H e inferior f_L , se encuentran 10 dB por debajo de la densidad espectral de potencia emitida más alta. Lo anterior, se puede definir de la siguiente manera:

$$BW = f_H - f_L \geq 500 \text{ MHz}, \quad (1.18)$$

$$f_c = \frac{f_H + f_L}{2}, \quad (1.19)$$

$$\frac{BW}{f_c} = \frac{f_H - f_L}{\frac{f_H + f_L}{2}} = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \geq 0.2. \quad (1.20)$$

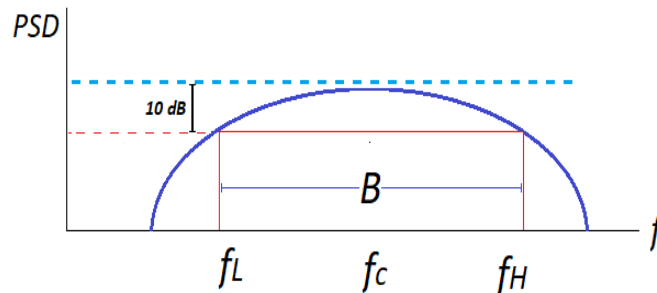


Figura 1.8 Ancho de banda UWB.

UWB nació como una tecnología WPAN de altas velocidades de transmisión de datos (entre 110 Mbps y 480 Mbps) para distancias de hasta 10 m y para bajas velocidades de transmisión de datos (entre 110 Kbps y 27.24 Mbps) para distancias de hasta 100 m [42]. El ancho de banda de UWB es mayor a 500 MHz debido a que transmite pulsos de corta duración (del orden de los picosegundos), lo que a su vez le brinda la capacidad de penetrar obstáculos en bajas frecuencias y operar en canales con baja SNR [41-42]. Las señales UWB pueden coexistir con otras señales de radiofrecuencia, por ejemplo, WiFi, GPS, Bluetooth, entre otros. La Fig. 1.9 muestra un diagrama del espectro de las principales tecnologías de radiofrecuencia.

La FCC estableció para los sistemas UWB sin licencia un límite a la densidad espectral de potencia de transmisión igual a -41.3 dBm/MHz y restringió para su operación la banda de frecuencias entre 3.1 GHz y 10.6 GHz (6.0 GHz - 8.5 GHz para el Comité Europeo de Comunicaciones (ECC, *European Communications Committee*) [41].

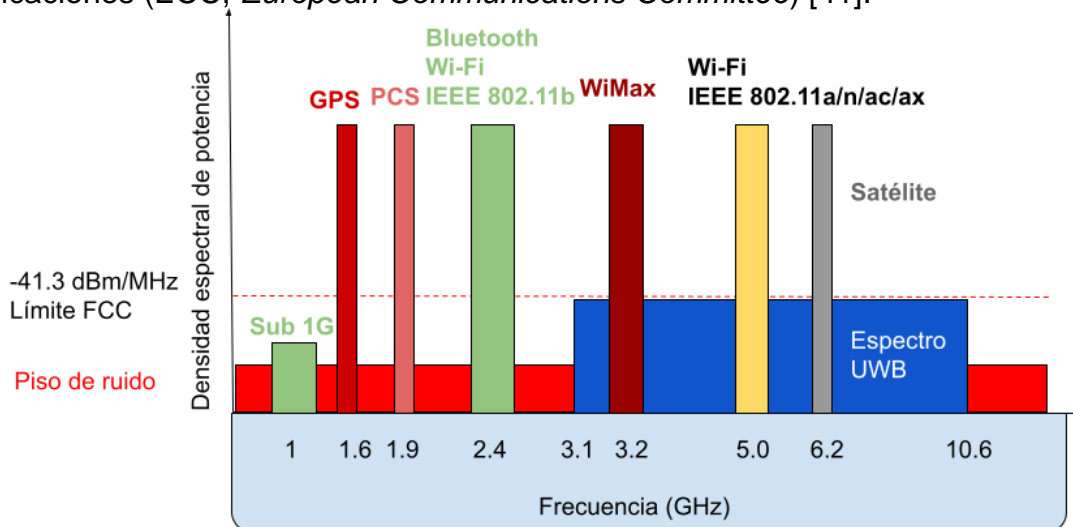


Figura 1.9 Espectro de señales de radiofrecuencias.

1.10.2 Ventajas de UWB

La tecnología UWB tiene las siguientes ventajas: baja complejidad del transmisor y receptor; gran ancho de banda de más de 500 MHz y baja densidad espectral de potencia de la señal de transmisión de -41.3 dBm/500 MHz debido a la transmisión de pulsos de radiofrecuencia de muy corta duración, lo que le permite ocupar a sus señales bandas de frecuencias de otros servicios sin interferencias; bajo consumo de energía menor a 5 microamperios; diversidad en frecuencia, lo que le brinda al sistema robustez frente al multitrayecto y por ende al desvanecimiento del canal; seguridad o baja probabilidad de interceptación; brinda comunicación a varios dispositivos (acceso múltiple) debido al amplio rango de frecuencias en el que puede operar; y muy alta exactitud de posicionamiento del orden de los centímetros [32]. Las principales desventajas de UWB están relacionadas con su corto alcance; la interoperabilidad con otros sistemas de Radiofrecuencia en la banda comercial GSM; y su escalabilidad.

1.10.3 Regularización y Estandarización

Desde el 2002, Estados Unidos permitió el uso sin licencia de la tecnología UWB en bandas de frecuencia compartidas o no gubernamentales con las limitaciones de potencia y ancho de banda ya mencionadas previamente. Japón en 2006 definió la máscara espectral para este tipo de sistemas [43]. Posteriormente, el IEEE inició un proceso de estandarización, involucrando a los grupos de trabajo: IEEE 802.15.3a para WPAN de alta velocidad de transmisión de datos e IEEE 802.15.4a para WPAN de baja velocidad de transmisión de datos. En el grupo de trabajo IEEE 802.15.3a (TG3a) se realizaron dos propuestas basadas en UWB: Secuencia Directa (DS-UWB, *Direct-Sequence Ultra-Wideband*) y OFDM Multi Banda (MB-OFDM, *Multi-Band Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*). El estándar MB-OFDM de la Asociación Europea de Fabricantes de Computadores (ECMA, *European Computer Manufacturers Association*) fue aceptado por la Organización Internacional de Normalización (ISO, *International Organization for Standardization*), en el cual el espectro UWB entre 3.1 y 10.6 GHz se divide en 14 bandas, cada una con un ancho de banda de 528 MHz, las cuales se dividen en seis grupos, como se muestra en la Figura 1.10. El TG3a se disolvió oficialmente en 2006 debido a la incertidumbre regulatoria y del mercado. El estándar IEEE 802.15.4a proporciona comunicaciones de datos y posicionamiento de alta exactitud para redes con bajas velocidades de transmisión de datos (entre 110 Kbps y 851 kbps; y entre 6.81 Mbps y 27.24 Mbps) y bajo consumo de energía, las cuales pueden operar en tres bandas diferentes: entre 250 MHz y 750 MHz entre 3.1 GHz y 5.0 GHz; y entre 6.0 GHz y 10.6 GHz. IEEE 802.15.4a es el primer estándar UWB que incorpora localización. En 2007, el estándar IEEE 802.15.4a fue aprobado por la IEEE Standards Association (SA) [44].

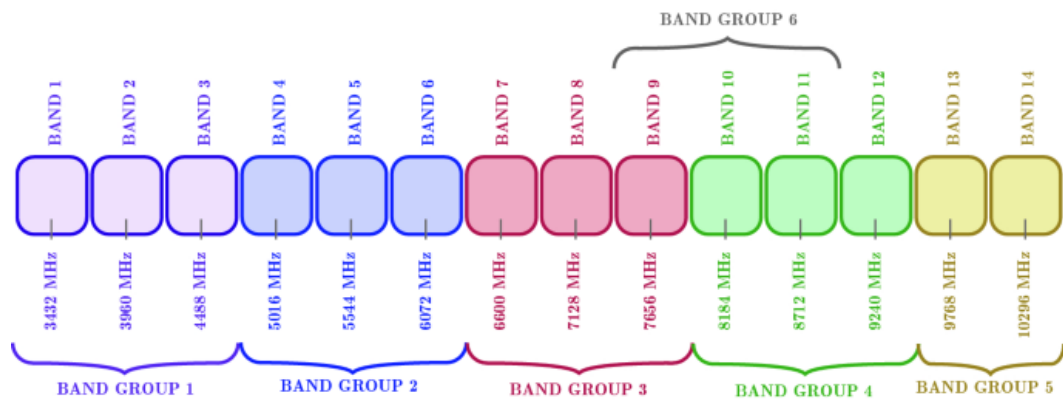


Figura 1.10 Asignación de canales UWB.

Capítulo 2 ANÁLISIS Y DISEÑO

Para el desarrollo de un sistema prototipo de posicionamiento que permita el análisis de la exactitud en un escenario de interiores usando UWB se utilizó una metodología de desarrollo ágil [48]. Los beneficios de este tipo de metodologías permiten flexibilidad y adaptabilidad a las necesidades del trabajo de grado. De acuerdo con los objetivos definidos en el trabajo de grado se tiene que la metodología Proceso Racional Unificado (RUP, *Rational Unified Process*) es una adecuada opción.

RUP es una metodología de desarrollo de software ágil orientada a objetos y con tres características esenciales: dirigido por la arquitectura, iterativo e incremental [49]. En la Fig. 2.1 se describen cuatro fases de RUP: iniciación, elaboración, construcción y transición. Cada fase contiene seis disciplinas de desarrollo: modelado de negocios, requisitos, análisis y diseño, implementación, pruebas y despliegue; y tres disciplinas de soporte: gestión del cambio, gestión del proyecto y entorno [47]. Cada fase tiene entre una y varias interacciones donde algunas disciplinas requieren más tiempo que otras de acuerdo con la fase en que se encuentren [50-51].

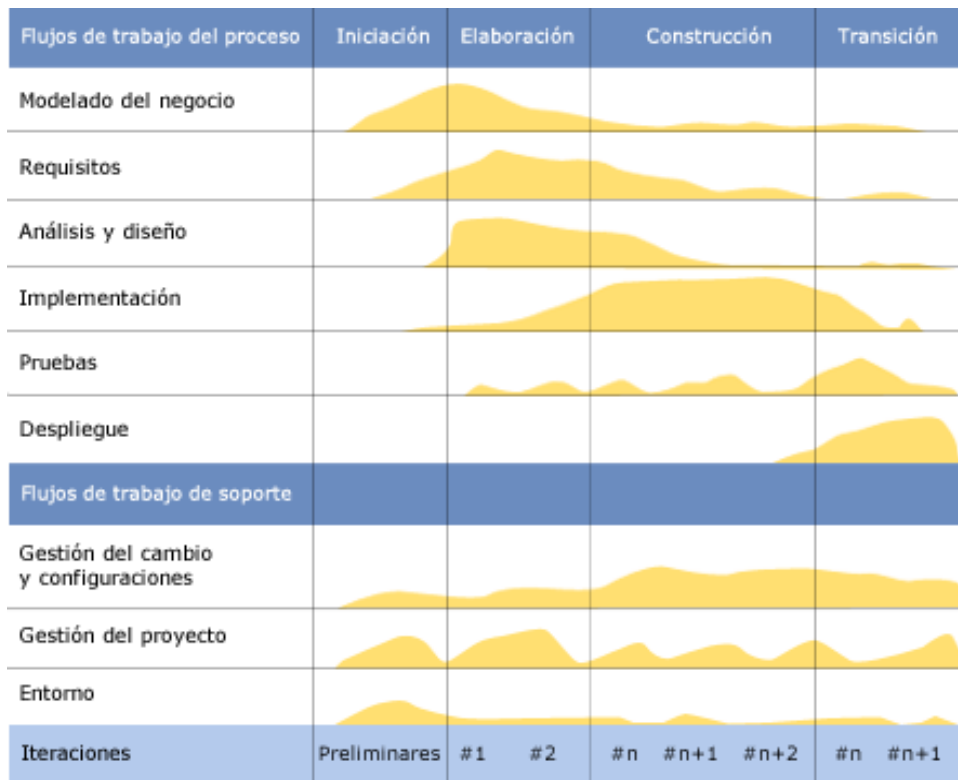


Figura 2.1 Diagrama de esfuerzo de la metodología RUP.

En la fase de **iniciación** se busca delimitar y definir el alcance del proyecto, así como los actores y casos de uso esenciales. Los resultados de esta fase son: un glosario inicial, el plan del proyecto, un documento de requisitos funcionales y un prototipo exploratorio. Las disciplinas que más esfuerzo llevan durante esta fase son el modelado del negocio y el levantamiento de requisitos. En la fase de **elaboración** se busca entender el contexto del problema o necesidad, seleccionar los casos de uso que ayuden a definir la arquitectura del prototipo y a desarrollar el plan. Los resultados de esta fase son los requisitos no funcionales y una mayor descripción de la arquitectura. Las disciplinas que más esfuerzo

llevan durante esta fase son la depuración de requisitos y el análisis y diseño. En lo relacionado con el trabajo de grado durante esta fase se realiza la selección de la métrica y técnica más adecuada para el sistema de posicionamiento basado en la tecnología UWB. Se consideran los dispositivos comerciales disponibles. En la fase de **construcción** se tiene como objetivo principal implementar las funcionalidades del sistema prototipo de forma incremental e implementar los posibles cambios. Los resultados de esta fase son un prototipo operacional y un plan de pruebas para la siguiente fase. La disciplina que más esfuerzo requiere durante esta fase es la implementación y es usual las pruebas unitarias o de validación sobre el funcionamiento de los dispositivos seleccionados. Finalmente, en la fase de **transición** se realiza la ejecución del plan de pruebas, se revisan y se corrigen defectos o malos funcionamientos y se verifica que el prototipo cumpla con los requisitos propuestos. Un resultado de esta fase es un prototipo operacional probado y la documentación final [47-49].

La metodología RUP no establece un camino fijo y obligatorio por seguir, por lo cual, de acuerdo con las necesidades y alcances del trabajo de grado se optó por adaptar las fases de RUP a las principales fases que se necesitan dentro de la ejecución del trabajo de grado. De esta manera, en la Fig. 2.2 se muestra el diagrama resultante donde se agrupa la esencia de RUP en cuatro etapas que representan el flujo de tareas a seguir. Se mantiene en el ciclo general y dentro de cada fase el proceso iterativo e incremental.

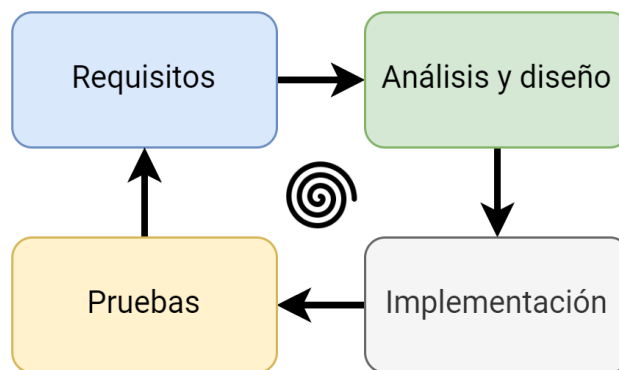


Figura 2.2 Ciclo de metodología RUP adaptada.

2.1 REQUISITOS

De acuerdo con la pregunta de investigación y los objetivos del trabajo de grado se definen los requisitos funcionales y no funcionales (calidad) que permitan aportar hacia su cumplimiento. A continuación, se describen los requisitos:

2.1.1 Requisitos Funcionales

- Establecer la posición de un nodo móvil en un escenario de interiores.
- Emplear dispositivos de bajo costo y bajo consumo de energía en el sistema prototipo.
- Utilizar una técnica y métrica adecuada a la tecnología UWB.

2.1.2 Requisitos no Funcionales

- Alcanzar una exactitud inferior a 1 metro en condiciones de LOS.

- Lograr un seguimiento constante del nodo móvil.
- Proporcionar una cobertura del 90% en el escenario de interiores seleccionado.

De acuerdo con los niveles de madurez tecnológica descritos en el Capítulo 1 y a los objetivos propuestos se implementó un sistema prototipo en nivel de madurez tecnológica TRL3 (investigación aplicada) [46]: pruebas de concepto de las características analíticas y experimentales. Este nivel de madurez tecnológica implicó la realización de pruebas analíticas, pruebas de concepto o escala en laboratorio orientadas a demostrar la factibilidad técnica a nivel teórico de los conceptos tecnológicos. Este nivel TRL3, adicionalmente, implica la validación de los componentes de una tecnología específica, aunque esto no derive en la integración de todos los componentes en un sistema completo.

2.2 ANÁLISIS Y DISEÑO

En la Fig. 2.3 se muestra el diagrama general de bloques de un sistema de posicionamiento. El sistema está conformado por tres bloques: Captura de datos, procesamiento de la información y reporte. En el primer bloque se ubican los nodos ancla en posiciones conocidas en un escenario definido y el nodo móvil intercambia señales con los nodos ancla a través de una tecnología de radiofrecuencia. En el segundo bloque se procesan los datos recibidos por el nodo móvil y se utiliza la métrica y técnica adecuada para estimar su posición. En el tercer bloque, se realiza un proceso de evaluación y visualización de la posición del nodo móvil.

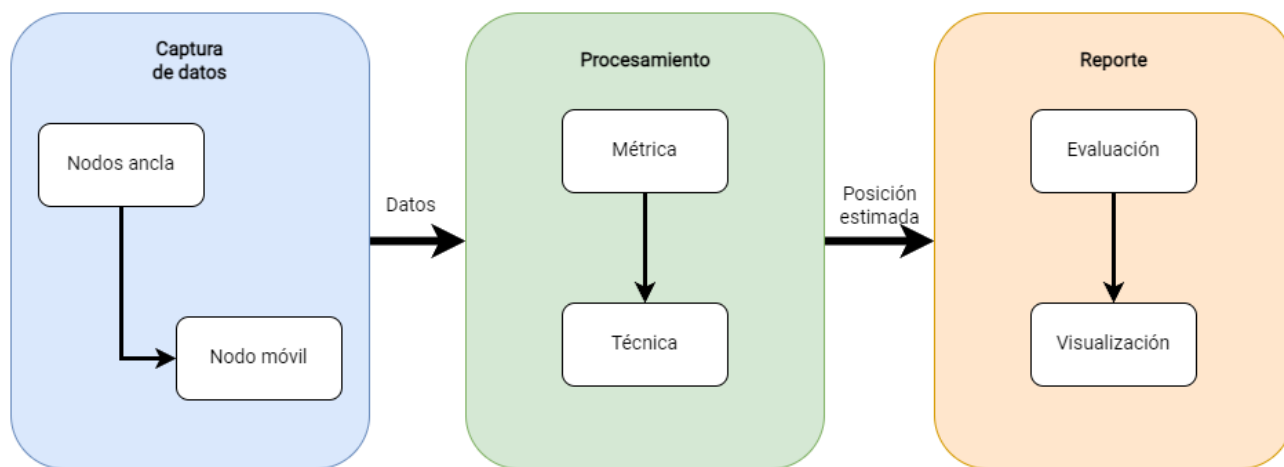


Figura 2.3 Diagrama general de bloques del sistema prototipo.

Con base en el diagrama de bloques anterior y con la información presentada en el Capítulo 1 del presente documento, se encontró que la mayoría de los kits de desarrollo basados en la tecnología de comunicación UWB cuentan con las métricas de operación: basadas en tiempo de vuelo (ToF, TDoA, TWR) e intensidad de señal recibida (RSSI). Por lo tanto, se adapta el diagrama general presentado en la Fig. 2.3 para el sistema prototipo de posicionamiento y en la Fig. 2.4 se muestran los cuatro bloques que lo componen y el intercambio de información entre los bloques basado en la tecnología UWB. En el bloque de nodos ancla estos intercambian señales con el nodo móvil. El bloque del nodo móvil representa el nodo con posición desconocida, el cual recibe señales de los nodos ancla y obtiene medidas de esas señales (TWR, RSSI). El bloque algoritmo contiene el

procesamiento, filtrado y selección de las medidas para estimar la posición. El bloque evaluación permite analizar, si está definido, el desempeño del sistema prototipo (exactitud) y graficar los resultados de la estimación de la posición del nodo móvil.

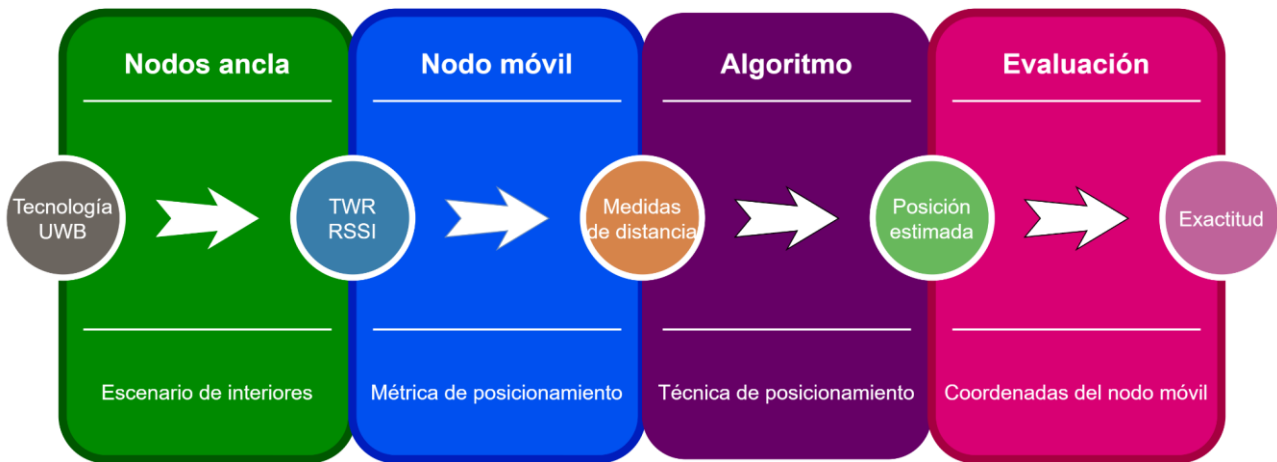


Figura 2.4 Diagrama en bloques del funcionamiento de un sistema de posicionamiento basado en UWB.

Una vez definido los bloques del sistema prototipo y seleccionado la tecnología a utilizar es necesario determinar la métrica y técnica adecuada para el sistema prototipo de posicionamiento.

2.2.1 Selección de la Métrica y Técnica de Posicionamiento

Considerando la información expuesta en el Capítulo 1 del marco teórico y la bibliografía consultada [52-54] se muestran en la Tabla 2.1 y 2.2 el resumen de las métricas de posicionamiento con algunas características representativas y el resumen de las técnicas de posicionamiento, respectivamente.

2.2.1.1 Métrica de Posicionamiento

La Tabla 2.1 muestra una comparación de las métricas y sus principales características asociadas al desempeño de un sistema de posicionamiento. La tabla incluye las características: **costo**, referente al esfuerzo por implementar la infraestructura necesaria para utilizar esa métrica, incluye el hardware y software especializado; **condición LOS**, relacionado con la degradación que presenta un sistema de posicionamiento usando determinada métrica al perder esta condición entre el nodo ancla y un nodo móvil; **sincronización**, una característica enfocada a las métricas basadas en tiempo, la cual implica una misma base de referencia de tiempo entre los nodos ancla y el nodo móvil, un valor importante dentro de la estimación de distancias; **exactitud**, una característica que indica el error entre la distancia real y la distancia estimada por la métrica usada, la cual permite analizar el desempeño de un sistema de posicionamiento; **fuentes de información**, indica la naturaleza de donde la métrica obtiene la información; **complejidad**, en sentido amplio abarca los procesos computacionales y de implementación para la métrica escogida; por último, **las tecnologías** representan las principales tecnologías que soportan el uso de dicha métrica.

De la información presentada en la Tabla 2.1 se seleccionan solo las métricas consideradas por la tecnología UWB. Se observa que las métricas basadas en tiempo de vuelo presentan una alta exactitud, sin embargo, ToF requiere sincronización de los relojes internos de los nodos para su correcta operación, lo cual agrega complejidad y un factor de error adicional. TDoA requiere condición LOS y sincronización entre los nodos ancla para un correcto funcionamiento. Solo las métricas TWR y RSSI soportan mejor las condiciones NLOS. De acuerdo con la literatura consultada [52-54], las métricas PoA y AoA por sí mismas no son adecuadas para un sistema de posicionamiento por su alta dependencia con la condición LOS y por la complejidad asociada; sin embargo, su integración en un sistema híbrido con TDoA ayuda a mejorar la exactitud, en especial de sistemas de posicionamiento basados en UWB [52]. La métrica basada en imágenes se descarta al no coincidir con la tecnología definida para el trabajo de grado, pero se destaca su alta exactitud. Para la selección de la métrica se considera aquella que represente mejores características asociadas con el objetivo del trabajo de grado como la exactitud, por lo tanto, se descarta el uso de RSSI como métrica, finalmente, la métrica TWR o RTT como la definen en algunas referencias [55] presenta en conjunto las mejores características para su uso en el sistema prototipo de posicionamiento, por lo tanto, se selecciona la métrica TWR.

Métrica/ Característica	ToF	TDoA	TWR	PoA	AoA	RSSI	Basado en imágenes
Costo	Medio	Medio	Medio	Alto	Alto	Bajo	Alto
LOS	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No	Sí
Sincronización	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No	No
Exactitud	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Baja	Muy alta
Fuente de información	Tiempo	Tiempo	Tiempo	Fase	Ángulo	Potencia	Imágenes
Complejidad	Baja	Media	Media	Alta	Alta	Baja	Alta
Tecnologías	UWB, Ultrasonido	UWB	UWB	RFID, BLE, UWB, WLAN	RFID, BLE, UWB, WLAN	RFID, BLE, UWB, WLAN	Visión

Tabla 2.1 Comparación de métricas para el posicionamiento.

2.2.1.2 Técnica de Posicionamiento

La Tabla 2.2 muestra una comparación de las técnicas y sus principales características asociadas al desempeño de un sistema de posicionamiento. La Tabla 2.2 muestra cinco características: **hardware adicional**, la cual representa la posibilidad de implementación de la técnica con los dispositivos comerciales más comunes sin necesidad de una infraestructura adicional; **los nodos mínimos**, hace referencia a la cantidad de fuentes de información que necesita la técnica para estimar la posición del nodo móvil; la **métrica**, la cual establece la relación de posibilidad entre ella y la técnica empleada; la **exactitud**, una característica que indica el error entre la distancia real y la distancia estimada por la métrica

usada; y **complejidad**, la cual implica la cantidad de proceso computacional y de implementación requerido para la métrica escogida.

De acuerdo con la información presentada, a las comparaciones de la Tabla 2.2, a la métrica seleccionada asociada a la tecnología UWB y a la literatura consultada [52-54] se concluye que la técnica de multilateración es una opción adecuada.

Técnica/ característica	Fingerprinting	Triangulación	Multilateración	Proximidad	Análisis de visión
Exactitud	Baja	Alta	Alta	Baja	Muy alta
Métrica	RSSI	AoA	RSSI, ToA, TDoA, TWR	RSSI, TWR	Imágenes
Complejidad	Baja	Media	Baja en 2D Media en 3D	Baja	Alta
Hardware adicional	No	Sí	No	Sí	Sí
Nodos mínimos	No define	3	3	1	1

Tabla 2.2 Comparación de técnicas para el posicionamiento.

2.2.2 Dispositivos Hardware

Para la construcción del sistema prototipo es necesario la adquisición de dispositivos comerciales que operen con la tecnología UWB. Se realiza una revisión general en la literatura sobre los dispositivos más utilizados y con mejores desempeños [57-63]. De la consulta se encontraron las marcas: Pozyx, Decawave/Qorvo, Localino, Sewio, Eliko or Airtls, WimU PRO, Ubisense 7000, BeSpoon, Timedomain y Zebra. Adicionalmente, se encuentra que la mayoría de la bibliografía de carácter técnico, de implementación y de pruebas utilizan los dispositivos de la marca Decawave. Adicionalmente, los autores en [59] realizaron una comparación entre Ubisense, BeSpoon, y DecaWave para IPS en condiciones NLOS y en depósitos industriales (robots, vehículos, etc.), concluyendo que los dispositivos Decawave brindan mayor exactitud en promedio que los sistemas Ubisense y BeSpoon. Finalmente, se determina que los dispositivos de Decawave son adecuados para los objetivos del trabajo de grado. En la siguiente sección se selecciona el dispositivo/kit que represente la mejor relación funcionalidad/precio.

2.2.3.1 Dispositivos Decawave

Decawave/Qorvo es una empresa de semiconductores pionera en la tecnología IR-UWB, además es miembro de la UWB Alliance y conocida por la fabricación de circuitos integrados CMOS de UWB bajo el estándar IEEE802.15.4a/z. En 2020 Qorvo adquirió Decawave. Los dispositivos desarrollados por Decawave se enfocan principalmente en el uso de métricas basadas en tiempo de vuelo como ToF, TWR y TDOA, con niveles de exactitud del orden de los centímetros [65-67]. En la Tabla 2.3 y 2.4 se muestran los módulos y kits disponibles en la página oficial de Qorvo [64]. Durante la fase de selección del dispositivo, los módulos *DWM3000* y *DWM3001C* llevaban poco tiempo de comercialización y no se conocía

información de su uso en escenarios de interiores; quedando dos módulos disponibles por considerar: *DWM1000* y *DWM1001*. De las dos opciones se observa que el módulo *DWM1001* tiene más funcionalidades como conexión BLE y el sensor de movimiento; por lo tanto, se selecciona el módulo *DWM1001* como el módulo adecuado para el objetivo del trabajo de grado. En la siguiente sección se mencionan los principales detalles técnicos de este módulo. Algunos de ellos cuentan con una unidad de microcontrolador (MCU, *Microcontroller Unit*).

Módulo/ Detalle	DWM1000	DWM1001	DWM1004C	DWM3000	DWM3001C
Descripción	Módulo transceptor UWB con operación en rangos 3.5 - 6.5 GHz	Módulo transceptor UWB a 6.5 GHz con MCU y sensor de movimiento	Módulo transceptor UWB UWB de 4. - 6.5 GHz con MCU y sensor de movimiento	Módulo transceptor UWB en 6-5 y 8 GHz	Módulo transceptor UWB en 6.5 y 8 GHz con MCU, BLE SoC y sensor de movimiento
Canales UWB	1, 2, 3, 4, 5, 7	1, 2, 3, 4, 5, 7	1, 2, 3, 4, 5, 7	5, 9	5, 9
Antena integrada	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
MCU	Suministrada por el cliente	Nordic Semiconductor nRF52832 Cortex-M4	STMicroelectronics STM32L041 G6U6S Cortex-M0+	Suministrada por el cliente	Nordic Semiconductor nRF52833 Cortex-M4
Memoria MCU (KB)	N/A	512	32	N/A	512
Bluetooth®	No	Sí	No	No	Sí
Sensor de movimiento	No	STMicroelectronics LIS2DH12TR	STMicroelectronics LIS3DH	No	STMicroelectronics LIS2DH12TR
Métricas integradas	TWR Tag o Ancla, TDoA Tag o Ancla	TWR Tag o Ancla, TDoA Tag o Ancla	TDoA Tag	TWR Tag o Ancla, TDoA Tag o Ancla	TWR Tag o Ancla, TDoA Tag o Ancla
Vida de batería	Meses (TWR), Años (TDoA)	Meses (TWR), Años (TDoA)	Años (TDoA)	Meses (TWR), Años (TDoA)	Meses (TWR), Años (TDoA)
Exactitud de	< 15 (2D), <	< 15 (2D), <	< 15 (2D), <	< 15 (2D), <	< 15 (2D), <

Localización (cm)	30 (3D)	30 (3D)	30 (3D)	30 (3D)	30 (3D)
Voltaje (V)	2.8 a 3.6	2.8 a 3.6	2.8 a 3.6	2.4 a 3.6	2.5 a 3.6
Dimensiones (mm)	23.0 x 13.0 x 2.9	26.2 x 19.1 x 2.6	31.0 x 16.5 x 1.27	23.0 x 13.0 x 2.9	27 x 19.13 x 3.2

Tabla 2.3 Módulos UWB de Decawave/Qorvo.

De acuerdo con el módulo seleccionado se adquiere el kit *MDEK1001*, el cual está enfocado en los RTLS. El kit se adapta a las necesidades del trabajo de grado al proveer 12 dispositivos para ser usados en la construcción del sistema prototipo de posicionamiento como nodos ancla y nodo móvil.

Kit/Detalle	DWM1001-DEV	DWM3000EVB	DWM3001CDK	MDEK1001
Descripción	Placa de desarrollo de transceptor UWB	Módulo transceptores de UWB, Arduino Shield	Kit de desarrollo con módulos transceptores UWB	Kit de desarrollo con módulo transceptor UWB.
Módulo base	DW1000 IC	DW3110 IC	DW3110 IC	DW1000 IC
Contenido	1 placa de desarrollo con módulo DWM1001	1 Shield Arduino con módulo DWM3000	1 placa de desarrollo con módulo DWM3001C	12 placas de desarrollo DWM1001-DEV encapsuladas
Ideal para	Evaluación del hardware como ancla, etiqueta o puerta de enlace	RTLS UWB al mismo tiempo que proporciona flexibilidad a los desarrolladores en la selección de MCU	Evaluación del hardware como ancla o etiqueta	Evaluación del hardware como ancla, etiqueta o puerta de enlace; construyendo un RTLS

Tabla 2.4 Kits Decawave.

2.2.3.2 DWM1001-DEV/DWM1001

De acuerdo con la información consultada sobre el kit *MDEK1001* de Decawave [68-72], se encontró que este es un kit de evaluación y desarrollo que permite al usuario evaluar el módulo *DWM1001* del mismo fabricante. El módulo *DWM1001* está basado en el chip transceptor UWB *DW1000* de Decawave con una antena UWB; el chip multiprotocolo nRF52832 de Nordic Semiconductor con una antena BLE; el sensor de movimiento LIS2DH12TR de STMicroelectronics; y el circuito regulador de energía, los cuales se presentan en la Fig. 2.5. Además, el kit de desarrollo cuenta con un *firmware* de soporte

para la implementación de WPAN y de RTLS. Adicionalmente, cuenta con el certificado del Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*), y cumple con las regulaciones de Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, *Federal Communications Commission*) y con Innovación, Ciencia y Desarrollo Económico Canadá (ISED, *Innovation, Science and Economic Development Canada*) [69].

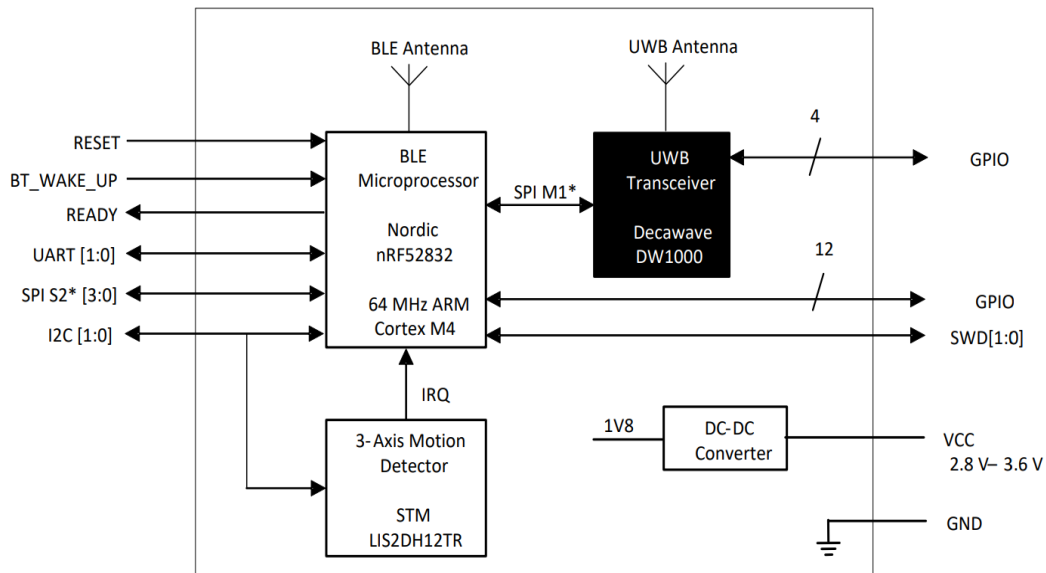


Figura 2.5 Diagrama de bloques del módulo DWM1001.

Las características principales del kit *MDEK1001* son las siguientes [70]:

- Un RTLS listo para usar, que incluye dispositivos configurables como nodos anclas y etiquetas o nodos móviles (y soporte de puerta de enlace).
- Instalación y configuración rápida y sencilla.
- 12 unidades *DWM1001* configurables como anclas o etiquetas.
- El módulo permite ser configurado y controlado a través de una API y a través de interfaces de comunicación UART/SPI/Bluetooth.
- El kit permite la edición o modificación del *firmware* del kit para adaptación a aplicaciones específicas.
- El kit incluye aplicación de configuración y localización para tabletas y teléfonos inteligentes con sistema operativo Android 6.0 o 7.0.
- El kit incluye una aplicación web de configuración, control y localización.
- El kit incluye el modo de suspensión para bajo consumo de corriente, el cual es menor a 15 μ A.
- El módulo *DWM1001* tiene fijo el modo de operación en el canal 5 de UWB a 6489.6 MHz (valor nominal 6.5 GHz).
- El módulo *DWM1001* tiene fija la velocidad de transmisión datos en 6.81 Mbps.
- El módulo *DWM1001* permite lograr una densidad espectral de potencia igual a -41.3 dBm/MHz.
- La documentación establece en condiciones LOS una distancia máxima de operación de 60 m.

La descripción de los componentes principales del módulo *DWM1001* [69] se presenta en las siguientes secciones y se resalta la recomendación del fabricante sobre la orientación

del dispositivo acorde a su polarización vertical, lo cual implica poner el dispositivo de forma vertical para lograr un patrón de radiación omnidireccional en el plano XZ. La Fig. 2.6 muestra la ganancia de antena (dBi) vs. Ángulo para esa disposición [69].

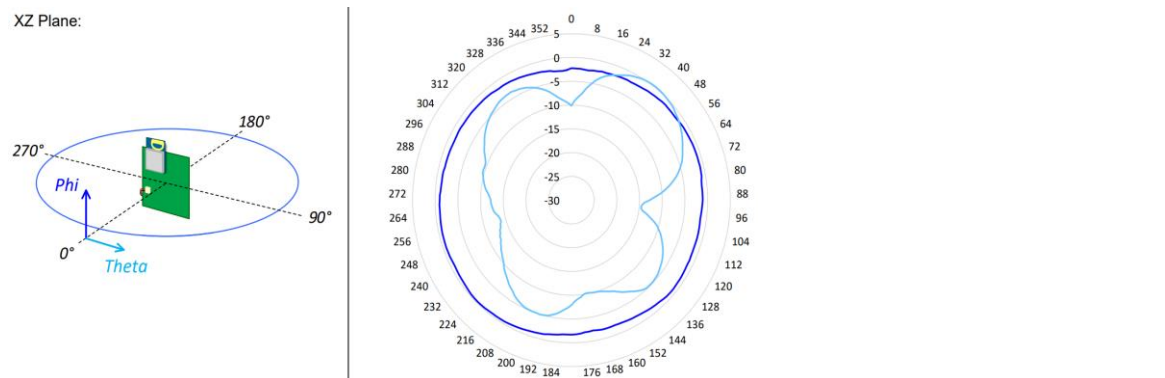


Figura 2.6 Patrón de radiación de antena.

2.2.3.2.1 Transceptor DW1000

El transceptor UWB *DW1000* es el elemento encargado de implementar la red de nodos ancla y nodo móvil, y evaluar la TWR con el nodo móvil (etiqueta) para estimar su posición. El *DW1000* cuenta con un oscilador a cristal que opera en 38.4 MHz, opera en seis bandas de frecuencia diferentes entre 3.5 GHz y 6.5 GHz, con dos anchos de banda diferentes: 500 MHz y 900 MHz, y tres velocidades de transmisión de datos diferentes: 110 kbps, 850 kbps y 6.8 Mbps. Sin embargo, la implementación del *DWM1001* limita al transceptor *DW1000* a una sola frecuencia central de 6.5 GHz y un ancho de banda de 500 MHz. Este transceptor tiene una memoria persistente (AON, *Always-ON*) la cual se utiliza para mantener los datos de configuración, aunque el sistema se encuentre en estados de bajo consumo. Los sensores de voltaje y temperatura incluidos en el módulo permiten al usuario disponer de sus valores [69].

2.2.3.2.2 Microprocesador Bluetooth nRF52832

El módulo nRF52832 de Nordic Semiconductor integra: un chip inalámbrico en 2.4 GHz que proporciona conectividad Bluetooth, interfaz utilizada para la configuración del sistema; y un microprocesador ARM Cortex-M4 con memoria flash de 512kB y una memoria RAM de 64kB y que ejecuta el *firmware* y permite la funcionalidad RTLS. El módulo *DWM1001* puede configurarse como nodo ancla (nodo fijo o de referencia del sistema) o un nodo móvil o nodo objetivo (etiqueta) o como nodo puente (pasarela o puerta de enlace) para conectar el sistema a otras redes. Este módulo se muestra en la Fig. 2.5 [69].

2.2.3.2.3 Sensor de Movimiento STM LIS2DH12TR

Este sensor de movimiento es un acelerómetro de tres ejes de alto desempeño y bajo consumo de energía. El sensor se puede configurar por el usuario con distintas escalas $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$ y es capaz de medir aceleraciones con toma de datos de 1 Hz hasta 5.3 kHz. Su funcionamiento está garantizado para un rango de temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este módulo se muestra en la Fig. 2.5 [69].

2.2.3 Software

El kit *MDEK1001* incluye algunas herramientas necesarias para la comunicación, modificación y recolección de datos de los dispositivos. Las herramientas se mencionan de forma general a continuación [69]:

2.2.3.1. Segger y J-Link

Un entorno de desarrollo sólido integrado para la compilación de los códigos fuentes para descargarlos dentro de los módulos *DWM1001*.

2.2.3.2. MobaXTerm

Herramienta para conectarse remotamente, por puertos y acceder por la línea de comandos. Se utilizó para comunicarse con el módulo *DWM1001* y ejecutar comandos preestablecidos.

2.2.3.3. DRTLManager

Aplicación Android para comunicarse por BLE con los dispositivos o nodos en su configuración de fábrica y realizar mediciones de posicionamiento.

2.2.3.4. Matlab

Plataforma de programación con énfasis en la ingeniería y ciencia de datos, la cual es utilizada para procesar, relacionar, graficar, y analizar los datos capturados durante la ejecución de pruebas.

2.3 IMPLEMENTACIÓN DE VALIDACIÓN

Para la correcta evaluación y construcción del sistema prototipo se realizan, inicialmente, pruebas de validación. Estas pruebas consisten en analizar el desempeño de los dispositivos para comunicaciones punto a punto. A continuación, se describen las consideraciones, los escenarios utilizados y las pruebas realizadas en la validación:

2.3.1 Escenarios de Pruebas

Se consideran tres escenarios para evaluar el desempeño a nivel de exactitud del sistema prototipo: un escenario exterior (ESC1) con dimensiones aproximadas de 78 m x 115 m, que corresponde a la Cancha el Diamante de la Universidad del Cauca, como se muestra en la Fig. 2.7; un escenario interior (ESC2) con dimensiones aproximadas de 3 m x 50 m, que corresponde al pasillo del segundo piso del edificio de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET) de la Universidad del Cauca, como se muestra en la Fig. 2.8 ; y finalmente, un escenario interior (ESC3), con dimensiones de 6.9 m x 9.7 m, que corresponde al salón 127 del IPET de la misma Universidad, como se muestra en la Fig. 2.9.



Figura 2.7 ESC1: escenario exterior cancha el Diamante.

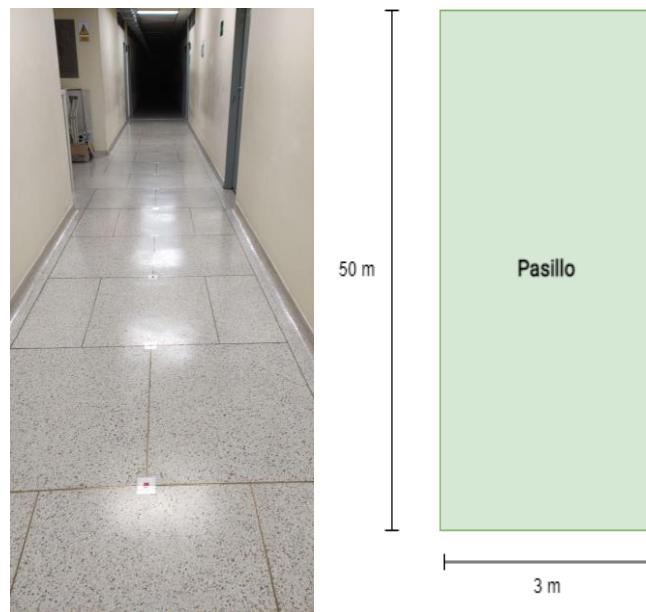


Figura 2.8 ESC2: escenario interior pasillo.

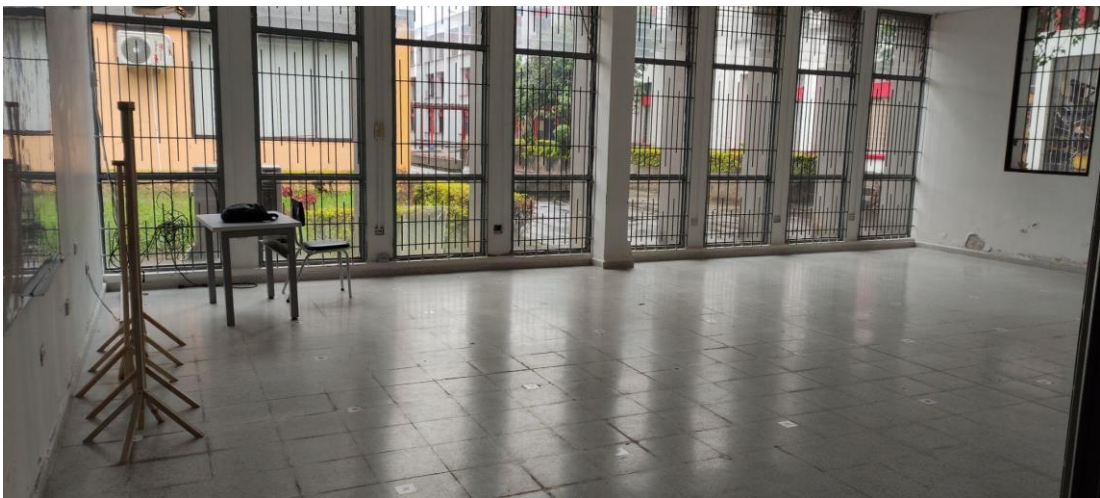


Figura 2.9 ESC3: escenario interior salón.

2.3.2 Equipos de Soporte

Para la estructuración del escenario es necesario el apoyo de herramientas que faciliten la toma de medidas y la disposición de los dispositivos dentro de los escenarios. A continuación, se listan de forma general.

2.3.2.1 Equipos de Prueba (Nodos UWB)

El kit *MDEK1001* de desarrollo contiene 12 dispositivos *DWM1001* que pueden ser configurados como nodo ancla, nodo móvil, nodo escuchador y nodo puente o pasarela (*gateway*). En la Fig. 2.10 se muestra la cara frontal e interior de un dispositivo *DWM1001*. Este dispositivo cumple con el estándar UWB IEEE 802.15.4a.



Figura 2.10 Dispositivo DWM1001.

2.3.2.2 Computadores Portátiles

Para la realización de la campaña de medidas se utilizan dos equipos de cómputo. En la Tabla 2.5 se presentan las fichas técnicas generales.



Equipo	Descripción técnica
	S.O: Windows 10 Procesador: Ryzen 7 3700u RAM: 20 GB Asus VivoBook 15
	S.O: Windows 10 Procesador: Intel Core i5-8250U RAM: 4 GB Asus VivoBook 14

Tabla 2.5 Características técnicas de los equipos de cómputo a utilizar.

2.3.2.3 Cables de Conexión Eléctrica y de Datos

Se utilizan cables USB para conexión de los dispositivos *DWM1001* a los computadores, cables conectores para las baterías externas, cargadores auxiliares de alimentación, y extensiones eléctricas.

2.3.2.4 Fuentes de Alimentación

Para la alimentación de los dispositivos *DWM1001* se cuenta con cuatro pilas, dos baterías externas (según referencia del manual), un cargador y un banco de energía. En la Tabla 2.6 se muestran las características técnicas básicas de los elementos mencionados. En la Fig. 2.11 se muestran las fuentes de alimentación.




Batería	Características
	Voltaje de salida: 3.7 V Corriente de salida: 3000 mAh Tipo: Litio Recargable
	Voltaje de salida: 3.7 V Corriente de salida: 750 mAh Tipo: Litio Recargable
	Voltaje de salida: 5 V Tipo: Corriente de salida: 1000 mAh Recargable

Tabla 2.6 Alimentación disponible.



Figura 2.11 Tipos de fuentes de alimentación.

2.3.2.5 Cinta Adhesiva

Elementos auxiliares para marcar los puntos de medida en los escenarios de interiores y asegurar la posición de los dispositivos durante las pruebas. Se utilizan tres tipos de cintas para asegurar también los dispositivos y sus elementos.

2.3.2.6 Cordel y palos de madera

Particularmente, para el escenario de exteriores, se utilizan una cuerda y palos de madera para fijar las marcas a tierra y con ello identificar las marcas de referencia, los cuales tienen una distancia de 1 metro entre sí, definidos previamente. Se tienen en cuenta las recomendaciones generales para marcar en un terreno los puntos de medida. La Fig. 2.12 presenta el cordel y los chuzos de madera.



Figura 2.12 Cordel y chuzos de madera.

2.3.2.7 Flexómetro

Dado que en el pasillo y en la cancha se tienen distancias superiores a los 10 m se utiliza un instrumento de medida con mayor alcance para asegurar la medida correcta de distancia entre las marcas de referencia. La Figura 2.13 presenta el flexómetro utilizado.



Figura 2.13 Flexómetro de 50 m.

2.3.2.8 Trípodes para Dispositivos

Para las pruebas se construyen 5 trípodes de madera, 4 de ellos a una altura de 1.50 m que soportan a los nodos anclas; y el restante a una altura de 1.30 m para el nodo móvil. La Fig. 2.14 muestra los dos tipos de trípodes.



Figura 2.14 Trípodes.

2.3.2.9 Pegatinas de Referencia

Para los escenarios de interiores se utilizan unas pegatinas para la identificación de los puntos de medida o de referencia (*ground truth*), como se muestra en la Fig. 2.15. Con ellas se busca minimizar el error por ubicación de los nodos o dispositivos en los escenarios.

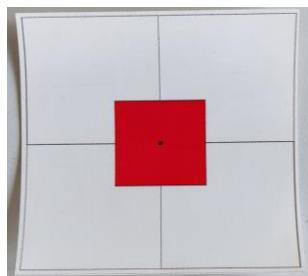


Figura 2.15 Pegatinas de referencia.

2.4 PRUEBAS

Con el fin de llegar a cabo una correcta, ordenada y replicable campaña de medidas de validación de los dispositivos se establece un plan de acción para la toma de medidas con dos tipos de pruebas:

- A. Evaluación y análisis del desempeño³ a nivel físico de un enlace de comunicación de datos basado en UWB.
- B. Evaluación y análisis del desempeño⁴ de un sistema de posicionamiento basado en UWB.

El primer tipo de prueba tiene como objeto además de la evaluación y análisis del desempeño de un enlace de comunicación basado en la tecnología UWB, identificar aspectos esenciales y de importancia para el segundo tipo de pruebas, el cual se relaciona directamente con el objeto del trabajo de grado. A continuación, se detalla el modelo general considerado para la campaña:

2.4.1 Modelo General de Pruebas

El modelo general de pruebas consta de dos modelos de pruebas. En el primer modelo de pruebas, las mediciones se obtienen al establecer la comunicación entre dos dispositivos (uno transmisor y otro receptor) en línea de vista (sin obstáculos), con el objeto de evaluar y analizar el desempeño del enlace de comunicación, modelo que se muestra en la Fig. 2.16. En el segundo modelo de pruebas, las mediciones se realizan al establecer la comunicación entre cuatro nodos ancla y un nodo móvil, con el objeto de evaluar y analizar el desempeño del sistema de posicionamiento, modelo que se muestra en la Fig. 2.17.

³ Alcance del enlace de comunicaciones y obtención de la curva de tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*) contra relación señal a ruido SNR).

⁴ Evaluación de la exactitud de la localización de un nodo móvil objetivo.

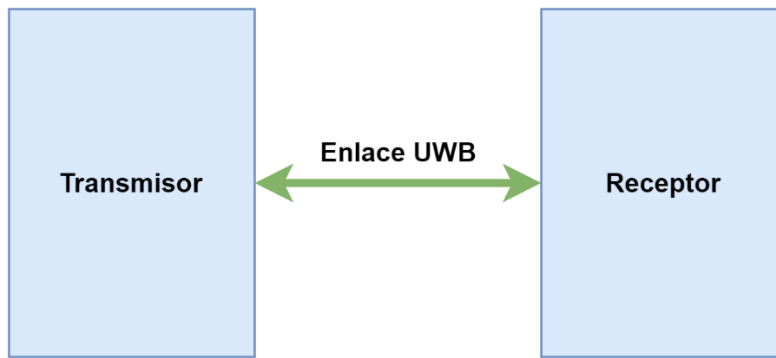


Figura 2.16 Modelo general enlace de comunicación.

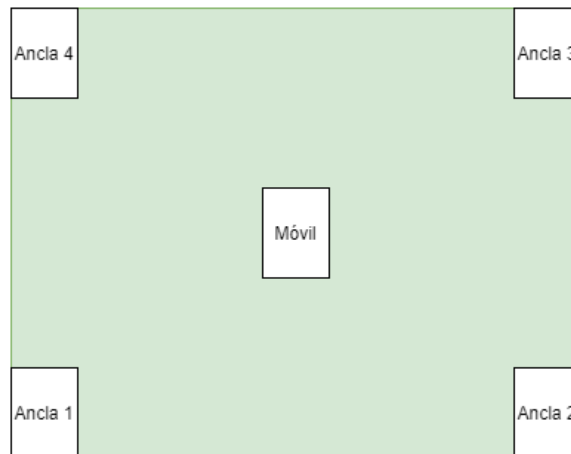


Figura 2.17 Modelo general sistema de localización.

2.4.2 Detalle del Plan de Pruebas

Esta sección presenta una descripción general de los procedimientos a realizar en el plan de pruebas general, donde se incluye una descripción completa de los dos tipos de pruebas. Se plantea una descripción detallada e ideal de todas las consideraciones que se deben tener en cuenta al momento de realizar una campaña de medidas. Los análisis que consideran el efecto sombra se mencionan, pero no se consideran como trabajo futuro. De manera previa a las pruebas realizadas, y con el fin de garantizar los escenarios de prueba, las medidas a utilizar, y los equipos, elementos y aplicaciones necesarias para las pruebas, se realizaron los siguientes procedimientos:

- Selección de los dos escenarios para realizar las mediciones: exteriores (cancha de fútbol) e interiores (pasillo y salón de la facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones).
- Modelar los escenarios en herramientas como Matlab y Wireless-InSite.
 - Estimar la cobertura o alcance de los nodos en los escenarios modelados haciendo uso de una de las herramientas de simulación.
- Analizar las medidas que pueden ser obtenidas de los dispositivos (potencia recibida, tasa de error de paquetes, velocidad de transmisión de datos, tiempo de vuelo, temperatura, voltaje, etc.) y los parámetros de configuración que puedan ser modificados (potencia de transmisión, frecuencia central de operación, tasa de actualización, etc.).

- Modificar o crear una aplicación para la captura de las mediciones, definiendo posteriormente la estructura de almacenamiento de los datos. La aplicación se basó en herramientas disponibles como:
 - Matlab.
 - Aplicación móvil de Decawave para dispositivos Android (*DRTLS Manager*).
 - Python con el uso de librerías para captura de datos por puertos periféricos.
 - Aplicación de *Segger*.
- Contar con los equipos y elementos necesarios para cada una de las pruebas: trípodes o bancos de madera; nodos; fuentes de energía; computadores; metros; cinta para enmascarar; cables para corriente eléctrica; multitomas; extensiones eléctricas; y cables de datos, entre otros.

Las medidas se realizaron en cuatro etapas, que se desarrollan a continuación.

2.4.2.1 Primera Etapa de Medidas

Evaluación y análisis de validación (Exactitud vs Distancia) de un enlace entre dos dispositivos UWB en escenario de exteriores (cancha de fútbol).

- Ubicar las marcas de referencia (*ground truth*) a cada 1 m en el escenario seleccionado [73]; para ello se emplearán chuzos de madera.
- Ubicar el nodo transmisor y el nodo receptor a una misma altura (1.5 m) en el escenario seleccionado y a una orientación relativa de frente. Los nodos se colocan sobre un trípode de madera que se alinea con las marcas establecidas previamente. Las medidas se realizan en línea recta, considerando la línea imaginaria que une el nodo transmisor con el nodo receptor sin obstrucciones. En la Fig. 2.18 se muestra la distribución esperada para los dispositivos.
- Realizar y almacenar medidas de tasa de error de paquetes del enlace entre los dispositivos, para cada una de las marcas de referencia sin obstrucciones, en línea recta desde el nodo transmisor al nodo receptor. Se toman al menos 100 medidas en cada punto con el objeto de observar una tendencia estadística en las tasas de error.
- Realizar y almacenar las medidas (potencia recibida, velocidad de transmisión de datos, tiempo de vuelo, etc.) para cada una de las marcas de referencia sin obstrucciones, en línea recta desde el nodo transmisor al nodo receptor.
- Realizar y almacenar las medidas (potencia recibida, tasa de error de paquetes, velocidad de transmisión de datos, tiempo de vuelo, etc.) con un obstáculo en línea recta desde el nodo transmisor al nodo receptor (considerando una persona que obstruye la línea de vista en cercanía al receptor).
- Contrastar y analizar las medidas de potencia recibida con las estimaciones de cobertura o alcance por simulación. Análisis del alcance de los dispositivos y caracterización de los escenarios definidos⁵ y del fenómeno de sombra. Análisis de las pérdidas de propagación por obstrucciones (desvanecimiento por sombra) considerando personas. Contrastar las distancias en los puntos de medida considerados con respecto al valor de distancia que puede ser obtenido del tiempo de vuelo de la señal.

⁵ Definición para el modelo de propagación de pendiente única del exponente de propagación y las pérdidas de referencia a una distancia dada.

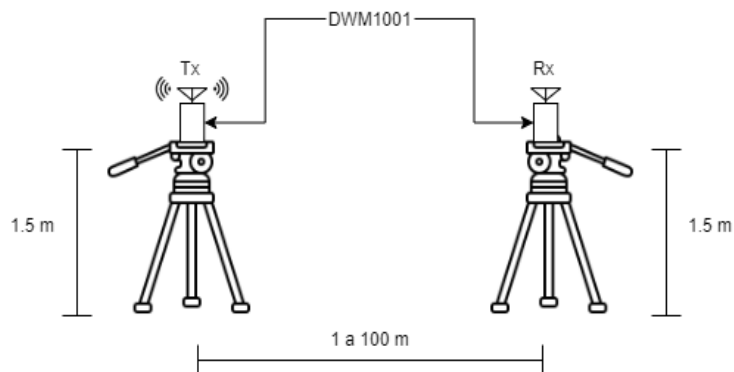


Figura 2.18 Enlace entre dos dispositivos UWB.

2.4.2.2 Segunda Etapa de Medidas

Evaluación y análisis de validación (Exactitud vs Distancia) de un enlace entre dos dispositivos UWB en interiores (pasillo y salón).

- Ubicar las marcas de referencia (*ground truth*) a cada 1 m en el escenario seleccionado [73].
- Realizar y almacenar las medidas (potencia recibida, tasa de error de paquetes, velocidad de transmisión de datos, etc.) para cada uno de los puntos de medida sin obstrucciones marcados anteriormente, en línea recta desde el nodo transmisor al nodo receptor. Se realizarán al menos 100 medidas en cada punto con el objeto de observar una tendencia estadística en el nivel de potencia recibida, las tasas de error y la distancia estimada.
- Realizar y almacenar las medidas (potencia recibida, tasa de error de paquetes, velocidad de transmisión de datos, etc.) para cada una de las marcas de referencia en línea recta desde el nodo transmisor al nodo receptor para el escenario de interiores. Se debe tener en cuenta la presencia de una persona como obstáculo entre el nodo transmisor y el nodo receptor. A una distancia cercana al nodo transmisor.
- Análisis de los resultados obtenidos de las medidas.
- Contrastar las medidas de potencia recibida con las estimaciones de cobertura o alcance por simulación. Análisis del alcance de los dispositivos en los escenarios definidos⁶ y del fenómeno de sombra. Análisis de las pérdidas de propagación cuando se presenta un obstáculo (persona) entre los nodos (desvanecimiento por sombra). Contrastar las distancias en los puntos de medida considerados con respecto al valor de distancia que puede ser obtenido del tiempo de vuelo de la señal.

2.4.2.3 Tercera Etapa de Medidas

Prueba de desempeño. Toma de medidas (construcción del *dataset*) en exteriores (cancha de fútbol⁷).

⁶ Definición para el modelo de propagación de pendiente única del exponente de propagación y las pérdidas de referencia a una distancia dada.

⁷ En un área menor a la cancha de fútbol y comparable a la medida de un salón de clase.

- Determinar si hay diferencias considerables en las medidas tomadas por el nodo móvil (en el centro del escenario de prueba) con respecto a cada uno de los nodos ancla ubicados en las esquinas del escenario de pruebas, considerando la misma posición u orientación de cada nodo ancla con respecto al nodo móvil (ver Fig. 2.19).
- Ubicar los nodos ancla a una altura de 1.5 m en el escenario de medida⁸ y el nodo móvil a una altura de 1.3 m (ver Fig. 2.19). Dividir el área entre los nodos en cuadrados de 1 m x 1 m [73], para demarcar los diferentes puntos de medida o de referencia. El nodo móvil realizará las medidas de las señales provenientes de los cuatro nodos ancla. Desde la configuración inicial de cuatro nodos ancla y un nodo móvil, el número de nodos ancla puede variar.
- Realizar y almacenar las medidas (potencia recibida y tiempo de vuelo) para cada uno de los puntos de medida sin obstrucciones.
- Realizar y almacenar las medidas (potencia recibida y tiempo de vuelo) para cada uno de los puntos de medida con obstrucciones⁹.
- **Análisis de la tercera etapa de medidas:** aplicación del algoritmo de localización para evaluación y análisis del desempeño de exactitud de localización.
 - Utilizar los *datasets* con la aplicación Navindoor o la aplicación seleccionada para estimar la posición de un nodo móvil en una ruta definida en el escenario de exteriores, empleando un algoritmo de localización.
 - Evaluar y analizar la exactitud de la estimación de la posición.

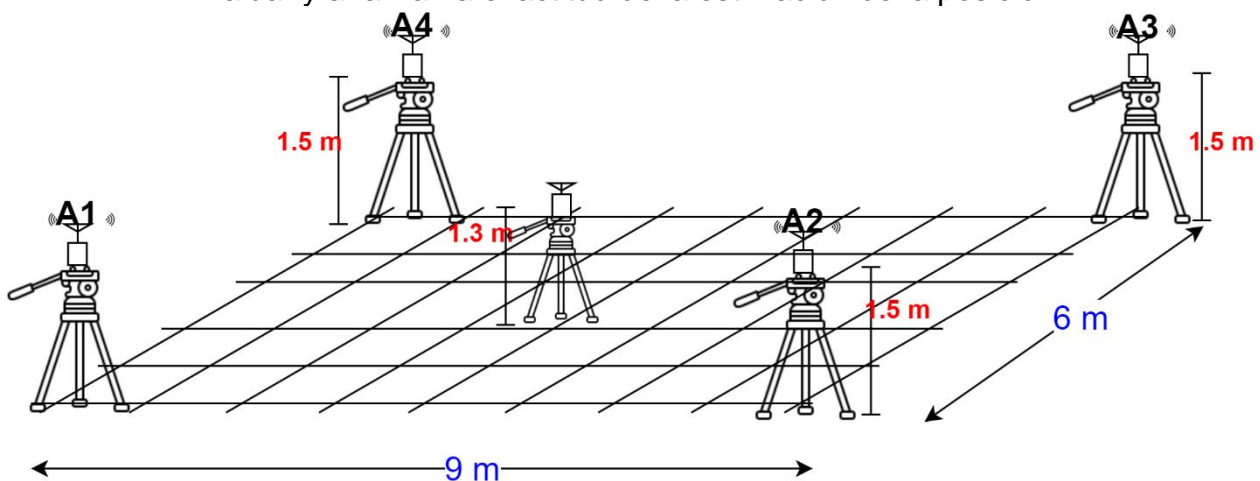


Figura 2.19 Sistema de posicionamiento con UWB.

2.4.2.4 Cuarta Etapa de Medidas

Toma de medidas (construcción del *dataset*) en interiores (salón de clase).

- Contiene el mismo procedimiento de la tercera etapa de medidas, pero en un escenario de interiores.
- **Análisis de la cuarta etapa de medidas:** aplicación de algoritmo de localización para evaluación y análisis del desempeño a nivel exactitud del sistema de posicionamiento.

⁸ Se tomó esta altura de referencia basado en la literatura sobre implementación de escenario de pruebas con dispositivos UWB [73-76].

⁹ Presencia o cercanía de una persona al nodo móvil.

- Utilizar los *datasets* con la aplicación Navindoor o la aplicación seleccionada para estimar la posición del nodo móvil en una ruta definida en el escenario de interiores (salón de clase), empleando el algoritmo de localización.
- Evaluar y analizar la exactitud de la estimación de la posición.
- Analizar el efecto cuando el nodo móvil se encuentra fuera del escenario de medida (otro salón, o detrás de una pared).

2.4.3 Protocolo de Medidas

La Fig. 2.20 muestra un esquema general a seguir para la toma de medidas y construcción del *dataset* para cada una de las pruebas. El protocolo consiste en cuatro etapas:

- a. **Preparación:** Contiene todas aquellas actividades previas necesarias para la toma de medidas.
 - Preparación del escenario: describe la selección del escenario y la definición de las marcas de referencia.
 - Preparación de los dispositivos: describe el aseguramiento de la alimentación de todos los dispositivos y el tipo de soporte que requieren.
 - Definición de prueba con o sin obstrucciones: selección de los tipos de obstáculos presentes en la prueba.
- b. **Configuración:** Contiene las actividades relacionadas con la configuración del hardware y el software para la toma de medidas.
 - Configurar nodos anclas y nodo móvil: establecer el canal de comunicación, la tasa de actualización (número de medidas por posición), los nodos móviles/anclas, etc.
 - Configuración de la aplicación: de acuerdo con el tipo de prueba, ya sea de medida de rango (alcance entre dos dispositivos) o de posicionamiento. La aplicación se debe configurar de manera distinta dependiendo del tipo de prueba.
- c. **Ejecución:** Contiene las actividades más importantes del plan de pruebas correspondientes a la toma de medidas.
 - Encender y revisar los dispositivos UWB: verificar uno por uno la correcta alimentación de los dispositivos y su correcto funcionamiento individual.
 - Inicio de la aplicación de captura de datos: De acuerdo con la aplicación configurada inicializar la captura de datos.
 - Toma de medidas en cada uno de los puntos demarcados para el nodo móvil en los escenarios de prueba.
- **Reporte:** Contiene las actividades paralelas y posteriores a la toma de medidas.
 - Organización del conjunto de datos: organizar la información por columnas dentro del archivo de forma que facilite un posterior análisis. Los datos crudos (*raw data*) obtenidos en la etapa de ejecución son unificados por prueba y por escenario para uso futuro como *dataset*.
 - Procesamiento de los datos: De acuerdo con la intención de la prueba, los datos serán preprocesados o filtrados para análisis futuros.
 - Presentación de los resultados: presentar por medio de un reporte de avance, de gráficas, o archivos planos los resultados obtenidos. Adicionalmente, se puede preparar un video demostrativo del funcionamiento de los dispositivos o de la prueba realizada.

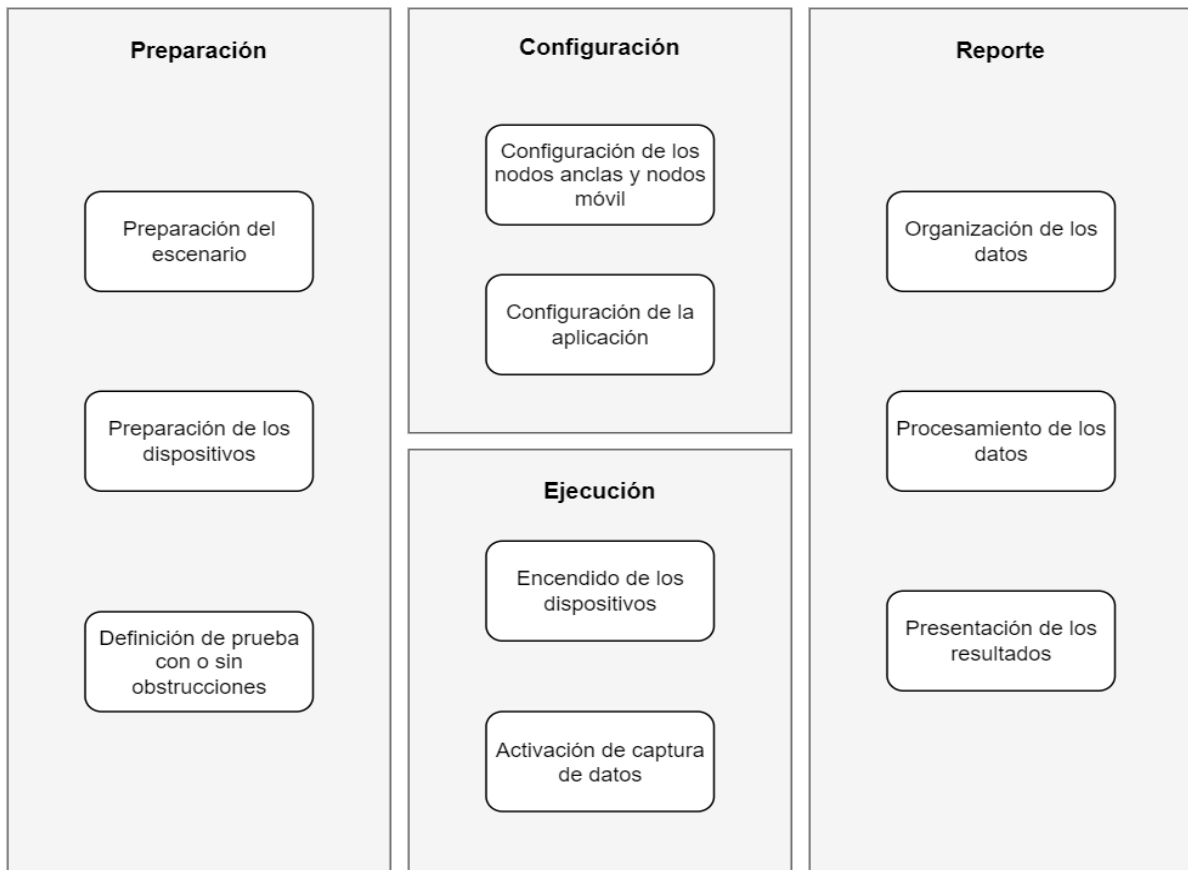


Figura 2.20 Protocolo de medidas.

2.5 EJECUCIÓN DEL PLAN DE PRUEBAS DE VALIDACIÓN

Para la construcción del sistema prototipo se realizó de forma preliminar un conjunto de pruebas de validación enfocadas a validar el desempeño de los dispositivos. Estas pruebas corresponden a la primera y segunda etapa de medidas de la sección anterior. Se realiza una modificación al código base del repositorio público de Decawave para este propósito [77]. En la tabla 2.7 se muestra la configuración definida. Dicha configuración también se emplea en la ejecución de pruebas de posicionamiento.

Variable	Valor
Canal	5 (6.5 GHz)
Frecuencia de repetición de pulso (PRF, <i>Pulse Repetition Frequency</i>)	64 MHz
Longitud del preámbulo	128 símbolos
Tamaño del preámbulo de adquisición (PAC, <i>Preamble Acquisition Chunk Size</i>)	8 símbolos
Código de preámbulo para TX	10
Código de preámbulo para RX	10

Delimitador de Inicio de Trama (SFD, <i>Start Frame Delimiter</i>)	Estándar
Tasa de actualización	6.8 Mbps
Modo de Encabezado de capa Física (PHR, <i>PHY Header</i>)	Estándar
Tiempo de espera para recibir SDF	129 ms
Velocidad de la luz	299702547 m/s
Período de retardo entre medidas	250 ms
Sensibilidad del receptor	-98 dBm/500 MHz
Frecuencia de operación del cristal de referencia	38.4 MHz

Tabla 2.7 Configuración para prueba de validación del desempeño.

2.5.1 Estructura del Dataset

Como parte del plan de pruebas se establece una estructura para el almacenamiento de los datos. Dentro de la configuración del código base se imprimen algunos valores que se consideran útiles. En la Tabla 2.8 se muestran las columnas que componen el *dataset* separados por espacios en blanco en archivos *.TXT* para usarlos posteriormente en los análisis.

Columna	Unidad
TX	Paquetes enviados
RX	Paquetes recibidos correctamente
RX/TX	Relación entre paquetes enviados y recibidos
TX_TIMESTAMP (dw_time)	Marca de tiempo de transmisión en unidades del dispositivo
RX_TIMESTAMP (dw_time)	Marca de tiempo de recepción en unidades del dispositivo
ToF	Tiempo de vuelo calculado del TWR en nano segundos
DISTANCE	Distancia en metros calculada por el dispositivo
STD_NOISE	Un valor absoluto que da una medida del ruido asociado a la marca de tiempo de recepción. Las siglas indican desviación estándar del ruido.
MaxNoise	Máximo valor de ruido determinado por el algoritmo

	interno de detección de borde (LDE, <i>Leading Edge Detection</i>).
FP	Índice del primer trayecto dentro de las muestras tomadas por el dispositivo. Ubicado por el algoritmo interno LDE
AMPF1	Amplitud de la señal por primer trayecto detectado
AMPF2	Amplitud de la señal por segundo trayecto detectado
AMPF3	Amplitud de la señal por tercer trayecto detectado
N	Contador de símbolos del preámbulo
MaxCIR	Máximo valor de potencia en la respuesta al impulso del canal
TEMP_VOL	Valor compuesto leído del dispositivo que incluye valores de temperatura y voltaje
TEMPERATURE	Temperatura calculada del dispositivo en grados centígrados
VOLTAGE	Voltaje calculado del dispositivo en voltios
Respuesta al impulso del canal (CIR, <i>Channel Impulse Response</i>)	Valores complejos de la respuesta al impulso del canal asociado a un paquete transmitido

Tabla 2.8 Columnas del Dataset.

Dentro del análisis del *dataset* se excluyen los valores de temperatura y voltaje al observar que no se presentan variaciones considerables por punto de medida o por cambios en las distancias. El valor de ruido *STD_Noise* no se considera nominalmente. Es su valor absoluto que al compararlo con la potencia recibida del primer trayecto es un indicador de la calidad que de la medida de la marca de tiempo; una diferencia cercana entre estos dos valores refleja una calidad más pobre de la distancia estimada. Los valores complejos en CIR dependen de la configuración establecida: una PRF de 64 MHz genera 1016 muestras con la información CIR; sin embargo, no se consideran todas las muestras, dado que el algoritmo LDE interno del dispositivo [78] posiciona el primer trayecto que supere un umbral definido en la muestra de tiempo aproximada de 745; por la extensión de los datos y para no afectar el desempeño del dispositivo se imprime únicamente 40 valores aproximadamente, iniciando desde el índice de la muestra 745. Los valores de amplitud de señal en los trayectos 1, 2 y 3, al igual que los valores de N y MaxCIR, se utilizan para determinar el valor del nivel de potencia en recepción y el nivel de potencia de señal del primer trayecto. Las fórmulas empleadas para determinar el valor del nivel de potencia en la recepción y el nivel de potencia de señal del primer trayecto se presentan en (2.1) y (2.2), respectivamente. El valor de A en las ecuaciones (2.1) y (2.2): se establece en 121.74 dBm para la configuración empleada. En (2.3) se presenta la conversión de tiempo utilizada por el dispositivo para manejar las marcas de tiempo (*timestamp*), donde las letras *DTU* representan la unidad de tiempo del dispositivo DWM.

$$RSL_{rx} = 10\log\left(\frac{C * 2^{17}}{N^2}\right) - A \text{ (dBm)}, \quad (2.1)$$

$$FSL_{rx} = 10\log\left(\frac{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}{N^2}\right) - A \text{ (dBm)}, \quad (2.2)$$

$$1 \text{ DTU} = 15.65 \text{ ps}. \quad (2.3)$$

Los dispositivos *DWM1001* ofrecen la posibilidad de establecer si la medida se realizó en condiciones LOS o NLOS, considerando la diferencia entre el nivel de potencia de señal recibida (RSL, *Received Signal Level*) y el nivel de potencia de señal en el primer trayecto (FSL, *First Signal Level*). En la Tabla 2.9 se muestran los valores de referencia. La documentación no define una condición para una diferencia entre 6 dB y 10 dB, por lo tanto, para fines de decisión se toma como una condición híbrida LOS-NLOS.

RSL - FSL	Condición
< 6 dB	LOS
> 6 dB y < 10 dB	No decide, posible LOS-NLOS
> 10 dB	NLOS

Tabla 2.9 Interpretación de potencias en recepción.

2.5.2 Configuración de los Dispositivos

La Fig. 2.21 muestra el diagrama general de conexión en la prueba de validación del desempeño de enlace. El diagrama contiene tres bloques conectados: el nodo transmisor (NT), el cual se encarga de iniciar y terminar las transmisiones, y se configura para realizar un número determinado de transmisiones o con un tiempo fijo de operación; el nodo receptor (NR), el cual recibe los mensajes de NT y le responde con un acuso de recibo; finalmente, el bloque Computador/Celular o unidad de mando (UM) almacena todos los registros en un archivo plano de texto y adicionalmente, permite detener el proceso de medida o prueba. A continuación, se mencionan algunas características de cada bloque:

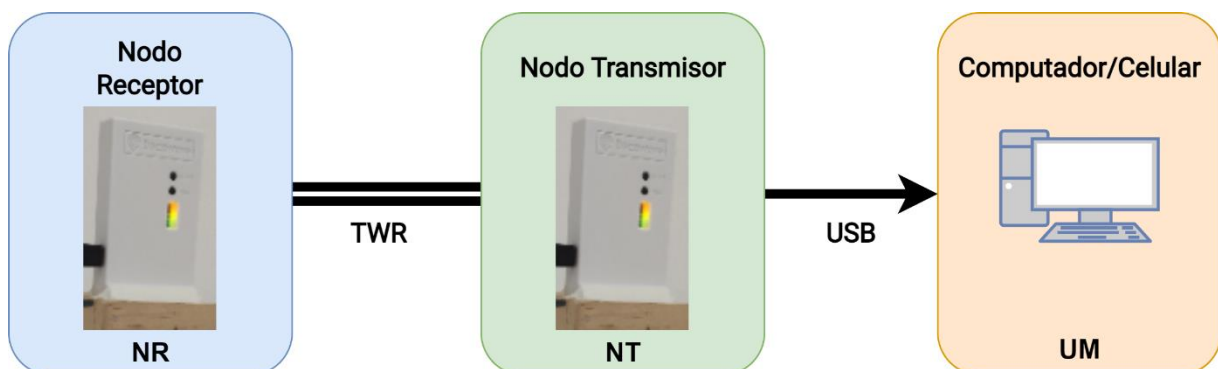


Figura 2.21 Diagrama general de la prueba de enlace.

2.5.2.1 Nodo Transmisor

El nodo transmisor (NT) es el encargado de transmitir los mensajes de encuesta (*poll*) y el mensaje propiamente dicho. La Fig. 2.22 muestra el formato estándar de las tramas enviadas, donde el preámbulo contiene entre otros campos [39]. Las longitudes del preámbulo, SFD y la carga útil de datos (*payload*) son variables y definidas por configuración. El campo de PHR tiene una longitud fija y contiene los datos de configuración del dispositivo, cómo la tasa de actualización, la duración del preámbulo, y la longitud de la franja de datos, entre otros.

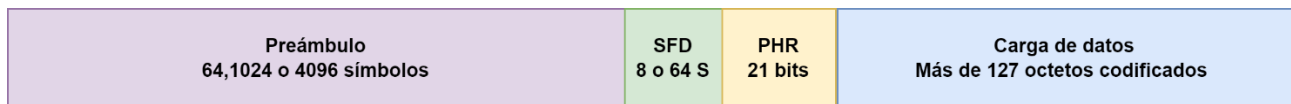


Figura 2.22 Formato del mensaje transmitido.

La Fig. 2.23 muestra el diagrama de flujo general de transmisión de un mensaje por parte del NT. El nodo se encuentra inicialmente en modo de suspensión o inactividad para reducir su consumo de energía, hasta recibir la orden de transmisión, instante en el que prepara la trama de datos y los parámetros de transmisión. Una vez se realiza la transmisión retorna al estado de inactividad [78].

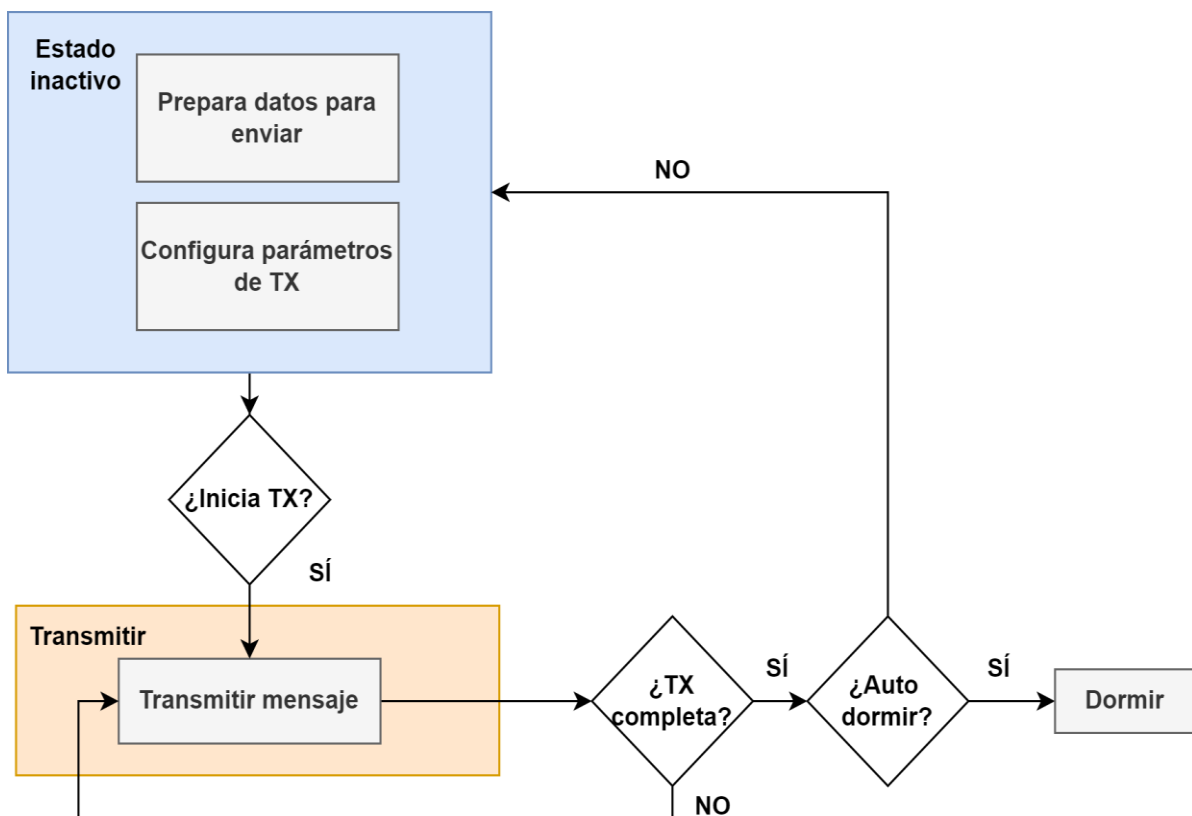


Figura 2.23 Diagrama de flujo en el proceso de transmisión.

2.5.2.2 Nodo Receptor

El nodo receptor (NR) es el encargado de recibir los mensajes. La Fig. 2.24 muestra el diagrama de flujo general de la recepción de un mensaje por parte del NR. Por defecto, los

parámetros de recepción se encuentran configurados y se encuentran en modo inactivo. Cuando el nodo receptor recibe la señal de inicio de una transmisión, el busca la secuencia del preámbulo, luego el SFD y posteriormente, los datos en la señal recibida. Una vez finalizada la recepción y sin ninguna orden adicional vuelve a su estado de inactividad. Durante todo el proceso, se tiene un contador de tiempo de espera, y en caso de superar los tiempos permitidos retorna al nodo al estado de inactividad, con el objeto de no quedar en escucha de manera indefinida [78].

2.5.2.3 Recepción de Datos

La UM puede ser representada por un computador o un celular inteligente con las aplicaciones necesarias para la lectura/escritura de periféricos. El NT está configurado para la impresión de las variables mencionadas en la Tabla 2.8, sin embargo, no se encarga ni de su almacenamiento ni de su procesamiento. Por esta razón, la función principal de la UM es guardar los datos en archivos planos con nombres relacionados a las medidas, i.e., el archivo 0105.txt indica que la toma fue realizada en la coordenada (x, y) , donde $x = 1 m$, $y = 5 m$ o por medio de marcas de tiempo para establecer los tiempos entre medidas. Estas consideraciones estandarizan y facilitan el proceso de almacenamiento, interpretación y análisis de resultados.

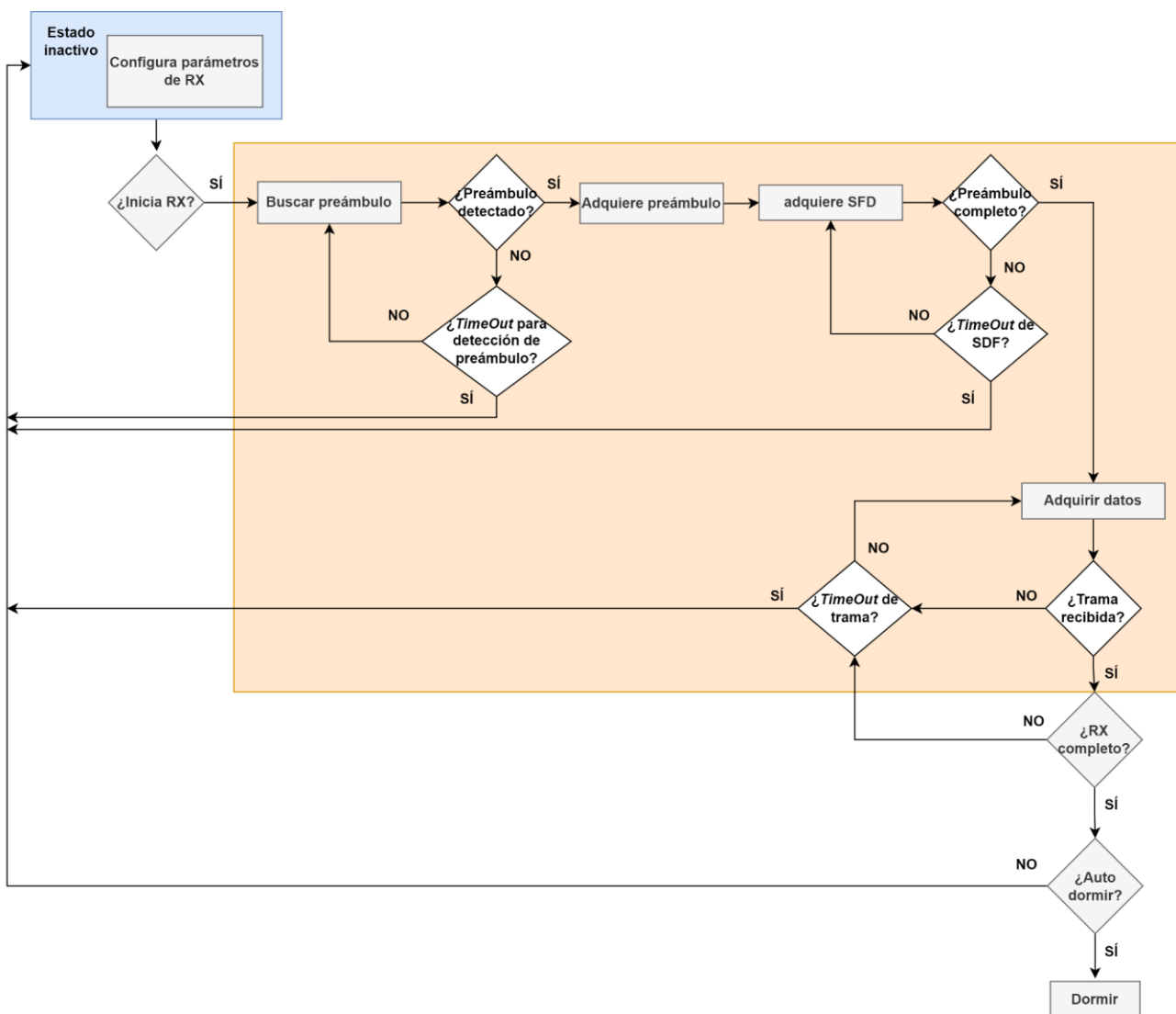


Figura 2.24 Diagrama de flujo en el proceso de recepción.

2.5.2.4 Manejo del Dispositivo con el TWR

En el Capítulo 1 sobre el marco teórico se mencionó los aspectos generales de TWR, sin embargo, el módulo DWM1001 presenta claramente un flujo de operación basado en ese protocolo considerando variaciones y correcciones propias del reloj [78]. En la Fig. 2.25 se muestra un diagrama general de una simple comunicación considerando TWR entre un nodo transmisor y un nodo receptor. De acuerdo con la Fig. 2.25, el primer mensaje (M1) es enviado por el NT y contiene la marca de tiempo del punto de partida ($tx_inicial$). El segundo mensaje (M2) es enviado por el NR y contiene dos marcas de tiempo: tiempo de llegada del primer mensaje ($rx_inicial$) y la segunda marca de tiempo ($tx_respuesta$) corresponde al tiempo en que se transmite el segundo mensaje (M2) desde el NR al NT. Con estos valores se puede calcular el tiempo de vuelo (ToF), tal como se presenta en la siguiente ecuación:

$$ToF = \left(\frac{(rx_respuesta - tx_inicial) - (tx_respuesta - rx_inicial)}{2} \right). \quad (2.4)$$

Se emplean abreviaturas para expresar (2.4) de manera diferente, lo cual da como resultado las siguientes expresiones: TR representa el tiempo de respuesta para un mensaje; y TP representa el tiempo de procesamiento del nodo receptor.

$$TR = rx_respuesta - tx_inicial, \quad (2.5)$$

$$TP = rx_respuesta - tx_inicial, \quad (2.6)$$

$$ToF = \left(\frac{TR - TP}{2} \right). \quad (2.7)$$

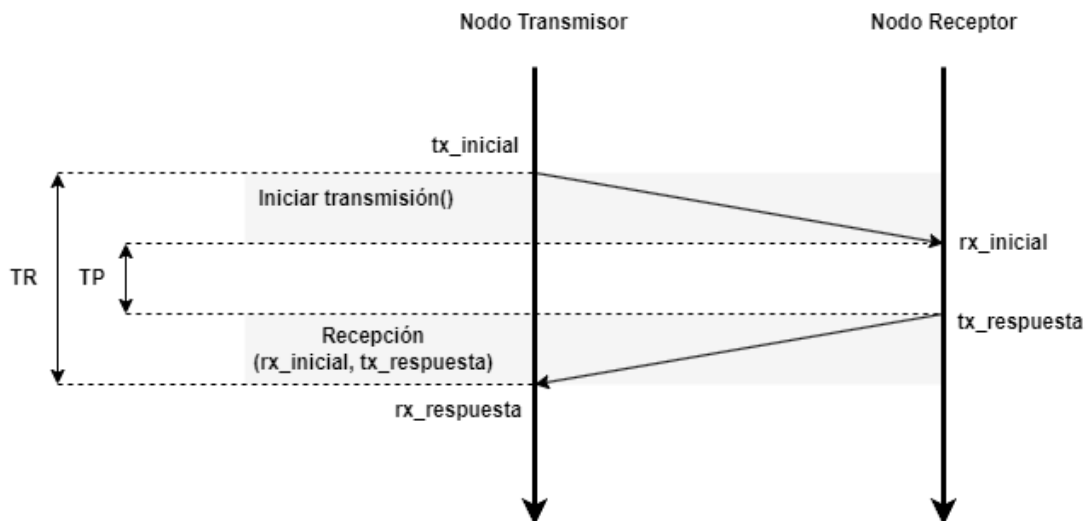


Figura 2.25 Protocolo TWR.

El módulo *DWM1001* incluye factores de conversión y de corrección de tiempo por el cristal usado. Esos aspectos técnicos se encuentran en las referencias [77-78].

Una vez, se consideran las generalidades y configuraciones de los módulos, se procede a la realización de las pruebas de validación. A continuación, se inicia con el escenario de exterior, cancha, ESC1. La Fig. 2.26 muestra el flujo general para la obtención del tiempo de vuelo en las pruebas de enlace.

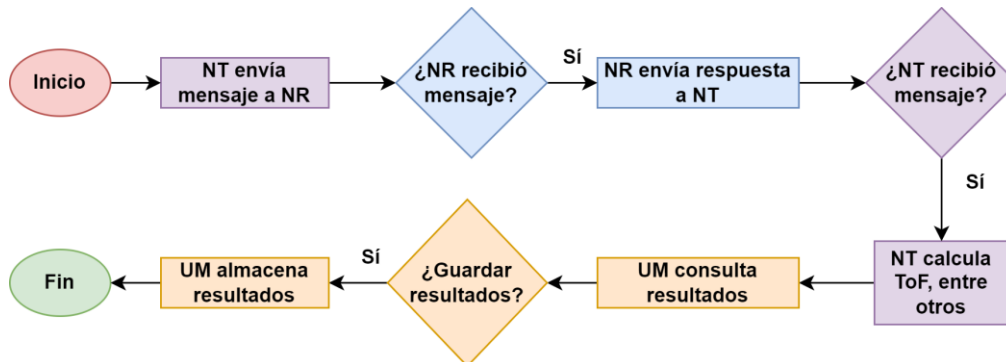


Figura 2.26 Diagrama general de la prueba enlace.

2.5.3 Pruebas de Validación

Después de la definición del plan general de pruebas y las consideraciones sobre el funcionamiento de los dispositivos *DWM1001*, se procede a realizar medidas de validación y de desempeño del enlace. Estas corresponden a las etapas de medida 1 y 2 en los escenarios ESC1, ESC2 y ESC3. Para facilitar el reconocimiento de los tipos de pruebas de validación en las gráficas se utilizará la convención siguiente: *P1-ESC1-LOS*, donde **P1** indica Prueba 1, **ESC1** indica el escenario 1 (de tres posibles) y **LOS/NLOS** indica si hubo o no obstrucción con respecto a alguno de los nodos, de acuerdo con lo establecido en el plan de pruebas, donde la altura de la persona que generó el obstáculo fue de 1.62 m. Se presenta una restricción para las medidas de validación en el ESC1, dado que el objetivo principal es comparar el desempeño a nivel de exactitud entre el escenario de interiores y el escenario de exteriores, entonces, se limita la distancia máxima en ESC1 a 47 m para coincidir con la longitud máxima del ESC2; sin embargo, se probó que los dispositivos cuando alcanzan una distancia mayor a 75 m presentan una gran cantidad de pérdida de paquetes. Además, esta distancia coincide con la lograda en las notas de aplicación de *DWM1001* [79].

2.5.3.1 Validación en ESC1

Para mayor confiabilidad en las pruebas de validación, estas se realizaron en un día con tiempo atmosférico favorable. Se marcó el terreno con las marcas de referencia separados entre sí de 1 metro. En la Fig. 2.27 se presenta la separación de los dispositivos a 1 metro: transmisor (izquierda) y receptor (derecha) en condición de LOS. En la ejecución de medidas, el receptor se alejó del transmisor un metro, coincidiendo con las marcas de referencia previamente establecidas. En cada punto de medida se tomaron en promedio 100 medidas.



Figura 2.27 Ubicación de transmisor-receptor en ESC1.

Dentro de la preparación de la prueba, se capturaron las señales WiFi y BLE presentes en el escenario por medio de aplicaciones móviles disponibles, lo cual se hizo con el fin de considerar el posible efecto de interferencia durante las pruebas. En la Fig. 2.28 se muestran los resultados, en los cuales se observa que para WiFi solo se detecta una señal en el canal 149 con una RSSI atenuada, una distancia estimada a la fuente de la señal de cerca de 30 m y una frecuencia de operación igual a 5745 MHz, la cual no interfiere con la frecuencia central de operación de los dispositivos UWB [79].

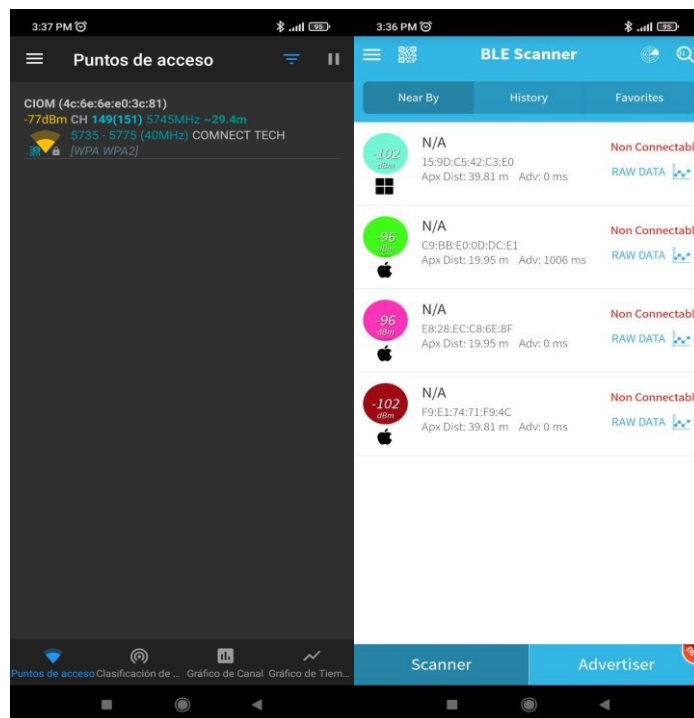


Figura 2.28 Presencia de otras señales de radiofrecuencias en ESC1.

En la Fig. 2.29 se muestran dos consideraciones realizadas en el ESC1: el uso del trípode para ubicar los dispositivos correctamente sobre las marcas establecidas y el uso de fuentes de alimentación tipo batería para facilitar el desplazamiento dentro del ESC1.



Figura 2.29 Preparación del ESC1.

2.5.3.1.1 Prueba de Tendencia Estadística P1-ESC1-LOS

Como parte inicial de las pruebas, se busca verificar que los dispositivos DWM1001 arrojan medidas fiables, en función de la desviación estándar. Para determinar la tendencia estadística de las métricas obtenidas por los módulos *DWM1001* en condición LOS, se fijó una distancia de 5 m entre el transmisor y receptor. Esta distancia se seleccionó debido a que fue utilizada en el proceso de calibración en el canal 5 (6.5 GHz) de los *DWM1001* [80]. Se estableció un tiempo de ejecución mayor a 15 minutos y el resultado fueron 5443 registros almacenados. En la Tabla 2.10 se muestran los datos empleados en la construcción del histograma. De acuerdo con pruebas preliminares se determinó que el ancho apropiado de las barras del histograma es 2 cm (0.02 m), dado que permite visualizar de mejor manera la tendencia de los datos en el histograma. En la Fig. 2.30 se muestra el histograma resultante, en el cual se tiene que el rango entre 0.1843 y 0.2043 m presenta la mayor frecuencia de ocurrencia (1433 ocurrencias).

Ocurrencia por rango	[16 55 225 674 1278 1433 1093 469 163 34 1 0]
Límites de los rangos para cada barra del histograma (m)	[0.0843 0.1043 0.1243 0.1443 0.1643 0.1843 0.2043 0.2243 0.2443 0.2643 0.2843 0.3043 0.3243]
Rangos/Barras	12
Ancho del rango (m)	0.0200

Tabla 2.10 Información del histograma para P1-ESC1-LOS.

De la Fig. 2.30 y la Tabla 2.10 se puede concluir que el error en distancia para una separación entre transmisor y receptor de 5 m no supera los 32.43 cm ni es inferior a los 8.43 cm. Al igual que no se presentaron errores negativos.

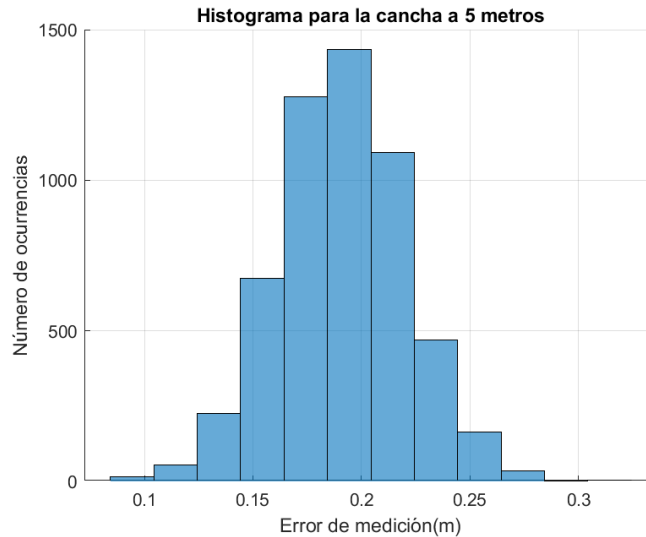


Figura 2.30 Histograma del error de distancia para P1-ESC1-LOS a 5 m.

Partiendo del histograma se construye la función de densidad de probabilidad (PDF, *Probability Density Function*) y la función de distribución acumulativa (CDF, *Cumulative Density Function*) como se muestra en la Fig. 2.31. Con la CDF se busca encontrar la probabilidad de que la variable aleatoria asociada al error de estimación de la distancia sea igual o menor a un determinado valor. Se utilizó la distribución normal, de acuerdo, a la tendencia estadística obtenida del histograma. De la CDF se puede concluir que la probabilidad de encontrar un error menor a 25 cm es igual a 0.9643. En el PDF se observa que la distribución de la distancia error se concentra, efectivamente, alrededor de los 20 cm.

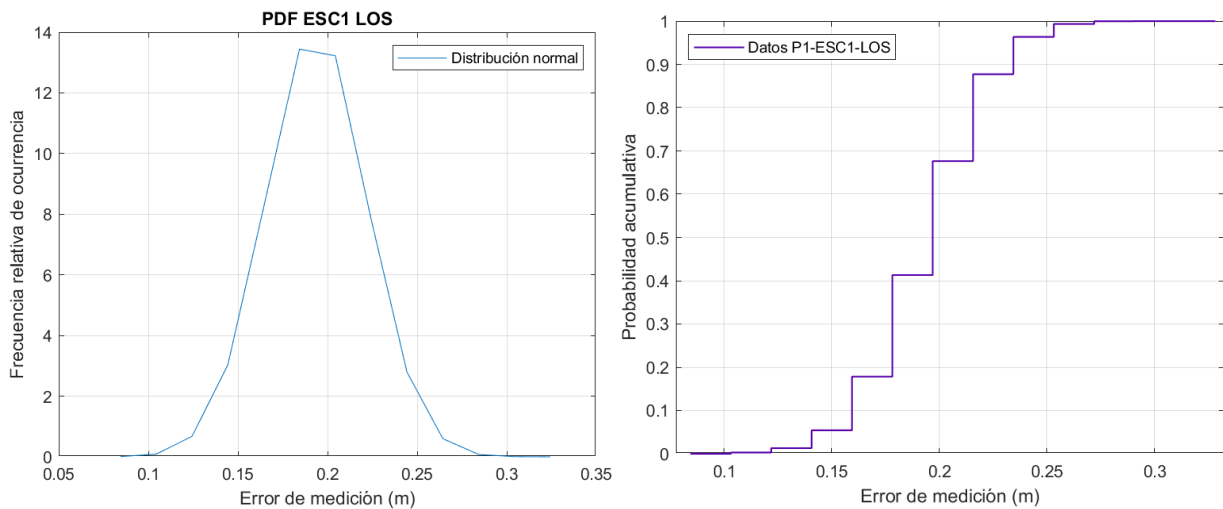


Figura 2.31 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para P1-ESC1-LOS a 5 m.

En el *Anexo E* se presenta con mayor detalle los resultados de la herramienta *fitmethis* (Matlab) y la prueba Chi-Cuadrado. De acuerdo con la lista de *fitmethis* de las distribuciones que más se ajustan al conjunto de datos de la prueba, se observa que la prueba Chi-cuadrado para los datos muestreados (un conjunto más pequeño) acepta las pruebas de hipótesis para las distribuciones t-Location-Scale y Normal. En la Fig. 2.32 se presenta la tendencia de la PER en función del número de paquetes transmitidos para una distancia entre transmisor y receptor de 5 m y las tres primeras distribuciones de la lista de *fitmethis*

gráficas por *DistributionFitter*. De las figuras se observa que se presenta solo una pérdida de un paquete en 5444 paquetes transmitidos.

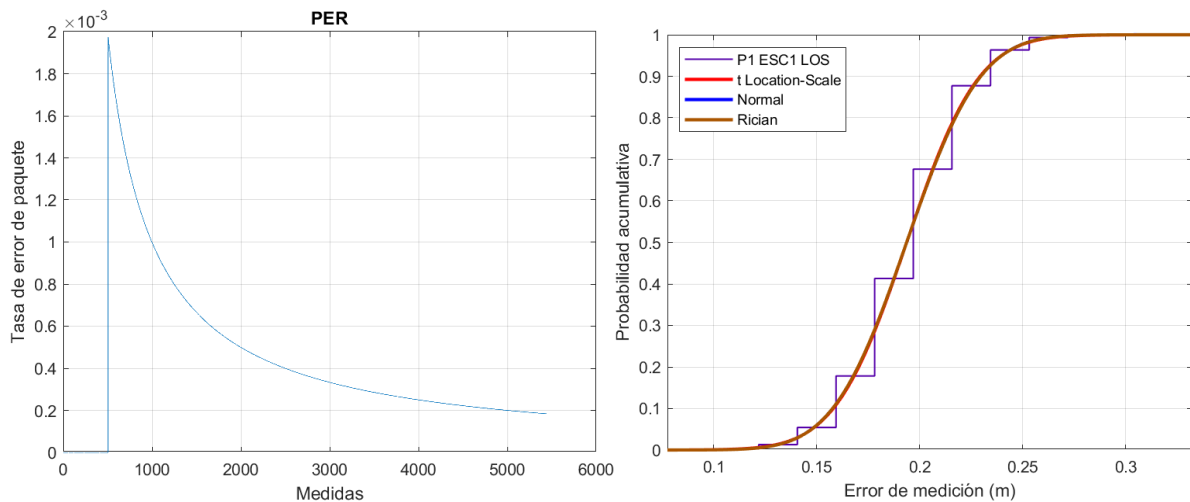


Figura 2.32 Tasa de error de paquetes y funciones de distribución acumulativa aproximadas por Matlab para P1-ESC1-LOS a 5 m.

En la Tabla 2.11 se resumen los datos de P1-ESC1-LOS a 5 m donde la media del error de distancia es menor a 20 cm, con una desviación estándar alrededor de los 28 cm (baja dispersión). Finalmente, se tiene una PER menor al 1% indicando un funcionamiento fiable de los dispositivos UWB *DWM1001*.

Dato	Valor
Medidas	5443
Media (m)	0.1937
Desviación estándar (m)	0.028075
PER (%)	0.0184

Tabla 2.11 Resultados de P1-ESC1-LOS a 5 m.

2.5.3.1.2 Pruebas de Validación P2-ESC1

Para evaluar la exactitud entre los dispositivos se consideran dos tipos de medidas dentro del escenario ESC1. La primera prueba P2-ESC1-LOS consiste en separar los dispositivos *DWM1001* en pasos de un metro tomando aproximadamente 100 medidas por marca de referencia. Los dispositivos se encuentran en todo tiempo en condición LOS, es decir, sin ningún obstáculo entre ellos. La segunda prueba P2-ESC1-NLOS consiste en repetir la prueba anterior manteniendo la presencia de una persona cerca a alguno de los nodos, en este caso, al nodo receptor. La Fig. 2.33 muestra la exactitud de las medidas a lo largo de las 47 marcas de referencia. La gráfica de la izquierda representa la prueba sin obstáculos (LOS); y la gráfica de la derecha representa la prueba con el obstáculo (NLOS), en la cual existe una región vacía correspondiente a las distancias de 34 m, 35 m, 44 m, 45 m, 46 y 47 m, donde el NT no logró establecer una comunicación con el NR. De ambas gráficas se puede notar que el comportamiento de los dispositivos para las dos condiciones fue muy

similar y que a partir de los 35 m la exactitud decrece considerablemente en comparación con las primeras distancias.

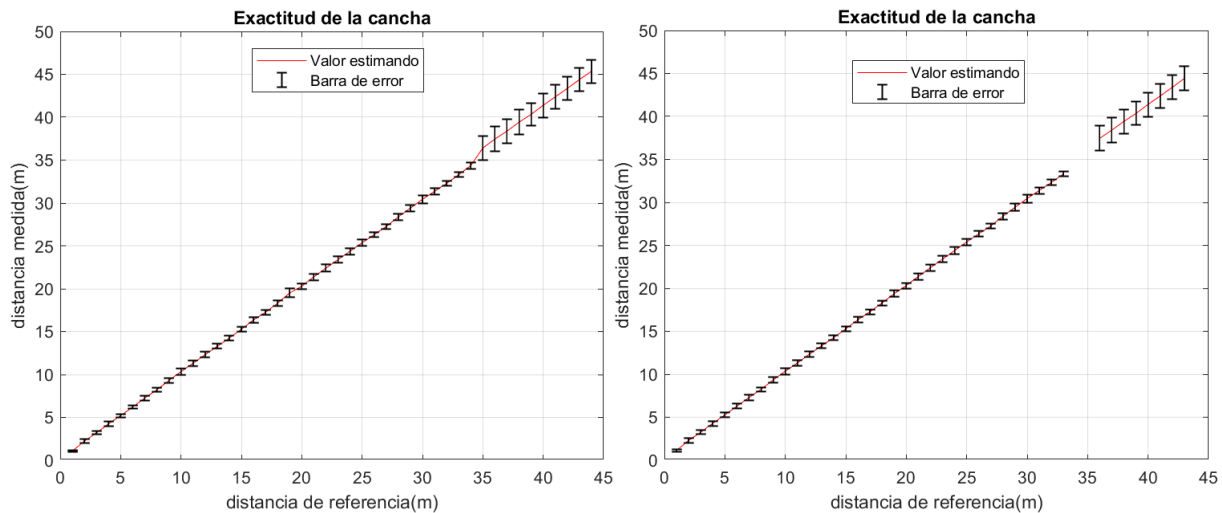


Figura 2.33 Exactitud contra distancia para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.

En la Tabla 2.12 se muestran los resultados más representativos de las medidas y su comparación para los dos tipos de pruebas. Partiendo de la información de la tabla se pueden sacar las siguientes conclusiones: primero, el incremento porcentual del máximo error en NLOS en comparación con LOS fue de 0.8015 %; segundo, en cuanto al error promedio general de todas las medidas este fue ligeramente menor para la condición NLOS, ya que obtuvo un decremento porcentual de -3.4226 %. Sin embargo, no se considera como un dato determinante por la naturaleza generalizadora de los promedios en los análisis, al no considerarse en conjunto con la dispersión de estos. Una comparación valor a valor entre cada tipo de datos revela que la presencia de una persona al nodo receptor en una cercanía menor a los 30 cm no afectó el desempeño en los valores extremos analizados para el escenario de exteriores.

P2-ESC1-LOS		P2-ESC1-NLOS	
Máximo error (m)	1.4472	Máximo error (m)	1.4588
Mínimo error (m)	0.074404	Mínimo error (m)	0.1199
Máxima desviación estándar (m)	0.039797	Máxima desviación estándar (m)	0.043357
Mínima desviación estándar (m)	0.022971	Mínima desviación estándar (m)	0.023347
Máximo RMSE (m)	1.4474	Máximo RMSE (m)	1.4592
Mínimo RMSE (m)	0.080747	Mínimo RMSE (m)	0.123

Error promedio (m)	0.55279	Error promedio (m)	0.53387
Desviación estándar promedio (m)	0.02994	Desviación estándar promedio (m)	0.033072
Temperatura promedio (°C)	31.6909	Temperatura promedio (°C)	32.1248
Voltaje promedio (v)	3.3757	Voltaje promedio (v)	3.3761

Tabla 2.12 Comparación de resultados P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.

La Fig. 2.34 muestra el comportamiento del error promedio por distancia de referencia. La gráfica de la izquierda representa la condición LOS y la gráfica de la derecha la condición NLOS. Ambas gráficas muestran un comportamiento similar para distancias menores a 35 m, para las cuales la distancia de error es menor a 50 cm; sin embargo, a partir de los 33 m se incrementó el error de distancia. Se verificó que entre el NT y el NR no existían obstáculos en la cercanía inmediata, solo se contaba con una estructura en forma de salón y una malla de enrejamiento a una distancia mayor a los 50 m. Para las distancias de 33 m y 34 m se repite la prueba para verificar el resultado y descartar un posible fallo relacionado con la alimentación de los dispositivos, sin embargo, el resultado fue el mismo. Al igual que lo evidencia el hecho de que tanto en condiciones de LOS y NLOS se presente la irregularidad en la vecindad de la distancia de 33 m.

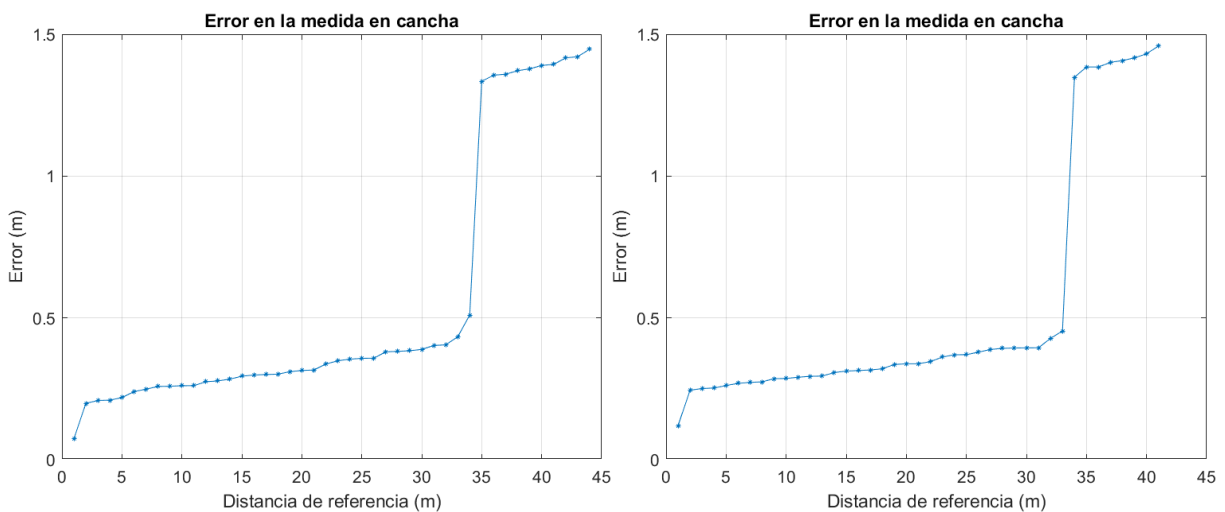


Figura 2.34 Error contra distancia para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.

En la Fig. 2.35 se grafica el comportamiento de la desviación estándar en cada una de las marcas de referencia para el escenario ESC1 en condición LOS y condición NLOS. Se observa que los valores fluctúan entre puntos, sin embargo, el margen de variación no es mayor a los 1.5 cm y el máximo valor de desviación estándar es inferior a los 4.5 cm. Adicionalmente, de la Fig. 2.35 se presenta para NLOS mayores picos de dispersión de valores, incluyendo la franja de medidas sin comunicación entre los dispositivos NT y NR.

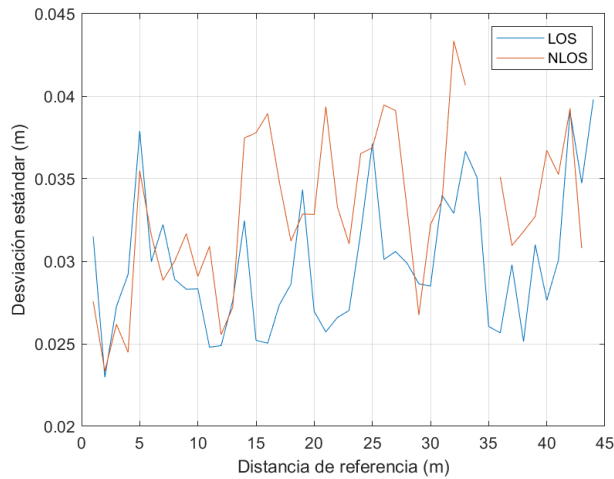


Figura 2.35 Desviación estándar para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.

A partir de las figuras anteriores y las tablas se deduce que después de los 30 m se presenta una pérdida en la información, por lo tanto, en la Fig. 2.36 se presenta el comportamiento de PER por marca de referencia (distancia). Si bien los datos de la PER se obtienen de forma independiente para efectos de interpretación se grafican de forma continua. De la Fig. 2.36 se observa como para condiciones NLOS existen unas mayores pérdidas de paquetes, dando como resultado que en los puntos críticos de los 33 y 34 m se presente el mayor valor de pérdida.

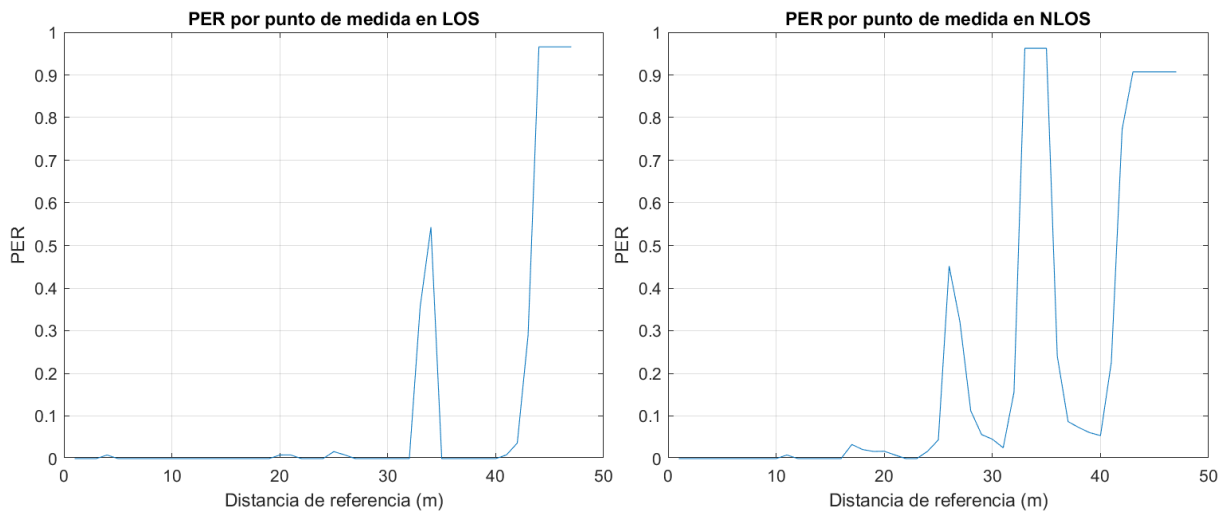


Figura 2.36 Tasa de error de paquetes para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.

De acuerdo con los resultados presentados en las figuras se puede asegurar que la ejecución de las pruebas P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS tienen dos comportamientos relacionados para la distancia de referencia de 30 m y diferente para las otras distancias, que para efectos de mención se llamará **umbral**. Los dispositivos se comunican con un muy buen desempeño, evaluado a partir de la distancia error promedio y la desviación estándar, para distancias menores al umbral. La prueba se realizó en una parte central y aleatoria de la cancha de fútbol y con el material fotográfico disponible no se logró recrear las marcas de referencia, lo cual no permite tipificar la zona y los obstáculos o reflectores que posiblemente incrementaron el error promedio para distancias cercanas al **umbral**. Por lo tanto, para fines de interpretación se tiene en cuenta los datos obtenidos en distancias menores al umbral. La Fig. 2.37 muestra en la gráfica de la izquierda el histograma del error de medición de distancia en condición LOS y en la gráfica de la derecha el histograma del

error de medición de distancia en condición NLOS; Los dos histogramas se construyeron utilizando todo el conjunto de datos, lo cual permitió analizar la ejecución de P2-ESC1 de forma completa. La primera observación para destacar es que los datos para LOS están más concentrados (menor desviación estándar) respecto al valor medio; y la segunda observación a destacar es la presencia en ambas gráficas de un comportamiento estadístico en el error de medición alrededor de los 1.4 m, los cuales corresponden a las mediciones que están por encima del valor de distancia umbral.

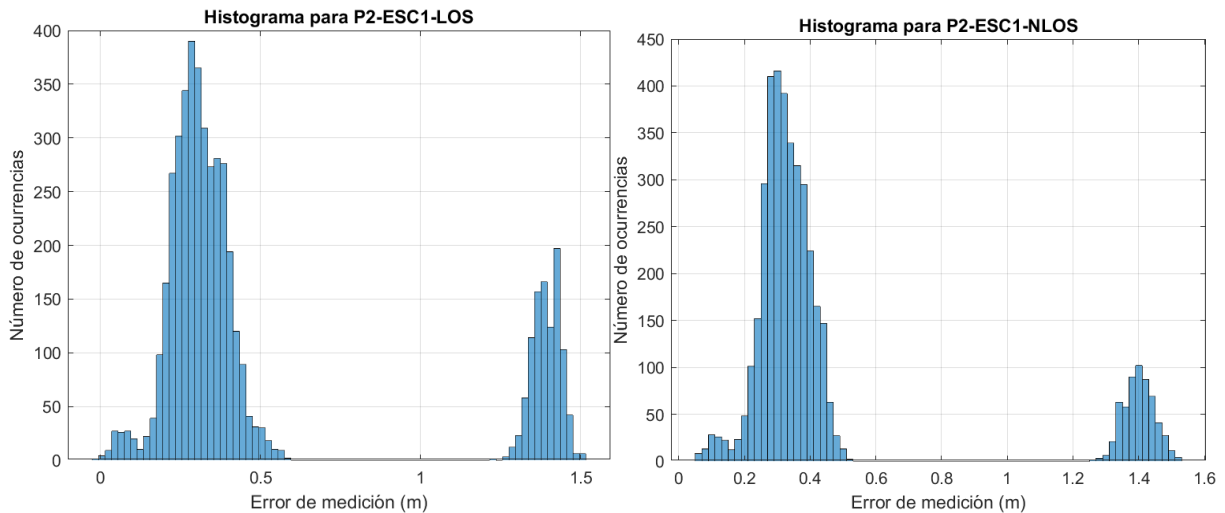


Figura 2.37 Histograma del error de distancia para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.

Es importante determinar el tipo de distribución que mejor se adapte a los resultados. En el *Anexo E* se presenta con mayor detalle los resultados de la herramienta *fitmethis* (Matlab) y la prueba Chi Cuadrado. De acuerdo con la lista de *fitmethis* sobre las distribuciones que más se ajustan al conjunto de datos de la prueba, se observa que el conjunto de datos para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS presenta dos distribuciones mezcladas cada una; por lo cual se dividen y se analizan por separado. La Fig. 2.38 muestra las primeras tres distribuciones por cada subconjunto a partir de la herramienta *Distribution Fitter* (Matlab). La prueba Chi Cuadrado rechaza las pruebas de hipótesis de las primeras distribuciones de cada prueba, pero acepta la distribución normal para el conjunto 1 de la prueba P2-ESC1-NLOS.

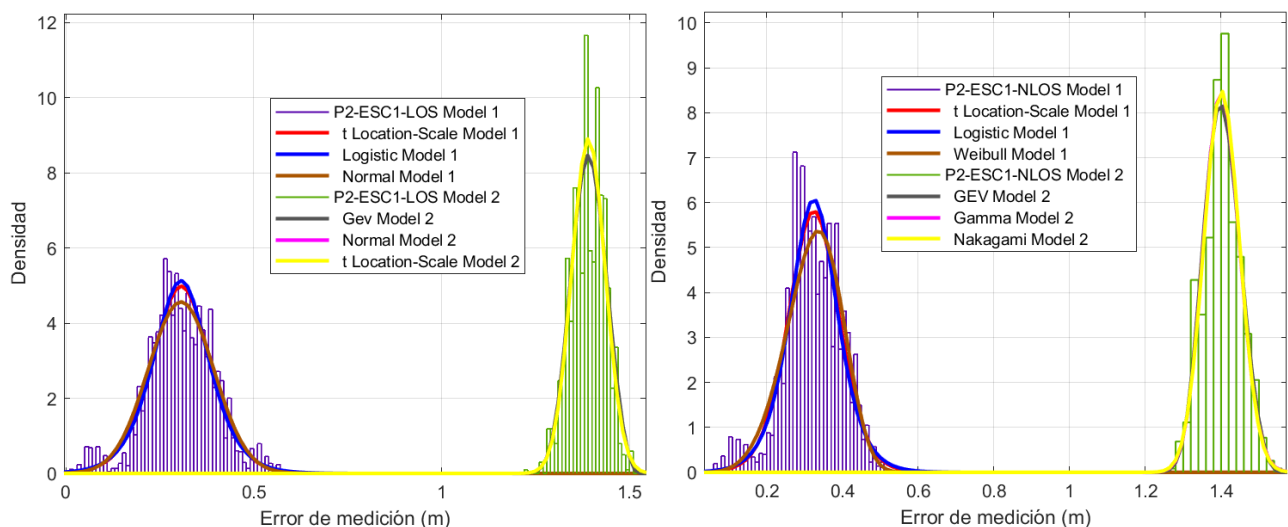


Figura 2.38 Función de densidad de probabilidad para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.

A partir de la Fig. 2.38, se analiza el comportamiento de las CDF para las tres primeras distribuciones de cada prueba. En la Fig. 2.39 se puede observar cómo el separar el conjunto de datos de la CDF aproximada acerca mucho más los resultados prácticos a las distribuciones de referencia. Finalmente, se obtiene que cada subconjunto tiene una distribución más ajustada, al igual que se observa una similitud entre las distribuciones de los conjuntos 1 de cada prueba y la de los conjuntos 2.

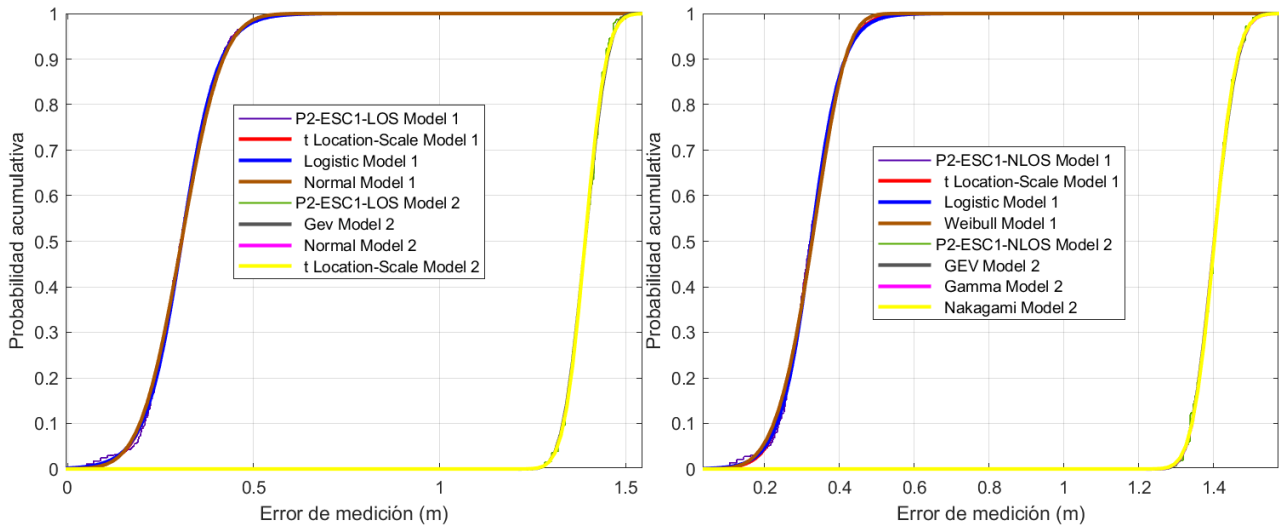


Figura 2.39 Función de distribución acumulativa para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.

2.5.3.1.2.1 Análisis de Potencia de Recepción

Una característica importante de los dispositivos DWM1001 es su capacidad para medir los niveles de potencia de recepción de la señal (RSL) y de la componente correspondiente al primer trayecto (FSL) para una transmisión, esto se realiza a través de un proceso interno no determinado; estas potencias se obtienen a partir de la aplicación de (2.1) y (2.2). En la Fig. 2.40 se muestra el comportamiento de la potencia recibida respecto a la distancia, adicionalmente, se asocian los resultados al modelo de pendiente única, para lo cual se estima el exponente de propagación. Sin embargo, se encontró que los valores que generan una curva más aproximada a la curva de pérdidas de propagación de la señal tienen un valor inferior al esperado, validado y probado para exteriores. Partiendo de este comportamiento inesperado se revisó el funcionamiento en detalle de los dispositivos, encontrando que existe un complejo y elaborado sistema de control de potencia de transmisión, la cual varía de acuerdo con criterios de ancho de banda, temperatura y voltaje, duración de los paquetes transmitidos, pérdidas de propagación, entre otros. Dicha configuración permite lograr un uso eficiente de la energía de la batería del dispositivo. Para los fines del trabajo de grado los valores de potencia no son obligatorios, entonces, se deja este aspecto como trabajo futuro.

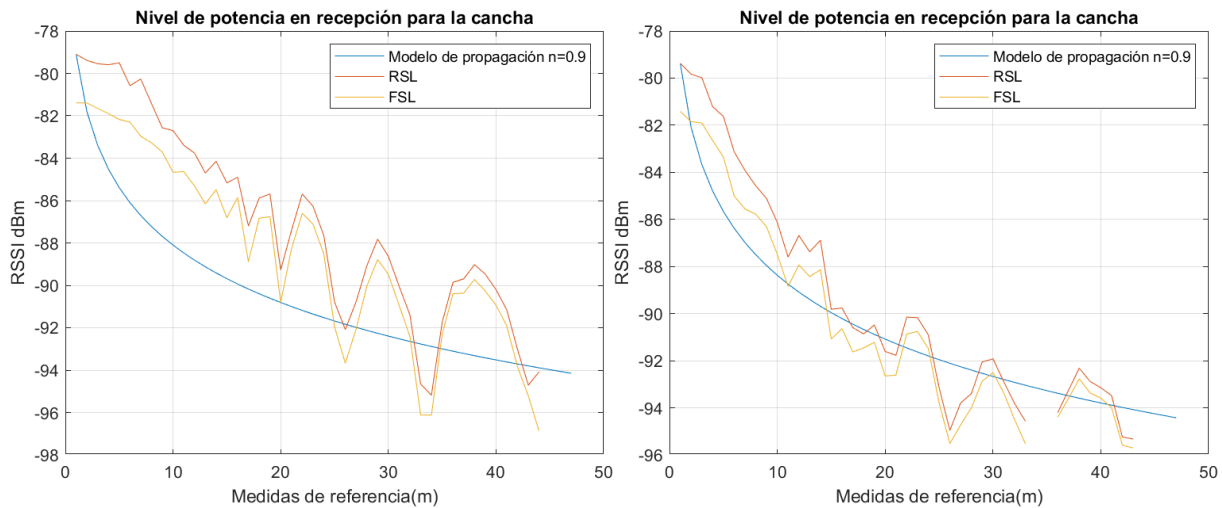


Figura 2.40 Niveles de potencia para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.

Los valores de potencia recibida pueden ser considerados para la estimación de la distancia por lo cual se realizaron pruebas que infortunadamente llevaron a valores de distancia con errores considerables, por lo tanto, también se descartó su uso como métrica auxiliar (RSSI) y se dejó para trabajos futuros. Sin embargo, los dispositivos DWM1001 hacen uso de los valores RSL y FSL con otro propósito, y es determinar si existe condición de LOS o condición de NLOS entre dos nodos. Esto se realiza teniendo en cuenta los valores mostrados en la Tabla 2.9, a partir de los cuales se construye una gráfica de decisión que se muestra en la Fig. 2.41. En la gráfica de la izquierda, en la cual siempre hay condición de LOS, se puede observar cómo hay una clara correspondencia con la interpretación de la diferencia entre los valores de RSL y FSL que arroja el dispositivo, con excepción en las distancias de 45 m, 46 y 47 m, debido a que en esos puntos no se logró la comunicación entre los dispositivos para LOS; por otro lado, en la gráfica de la derecha, en la cual siempre hay condición de NLOS, se observa que la presencia del cuerpo humano no afectó la condición de LOS. Los puntos donde no se registraron medidas se fijaron en cero, de forma que en la gráfica aparecen como LOS-NLOS que corresponde a un estado de indecisión.

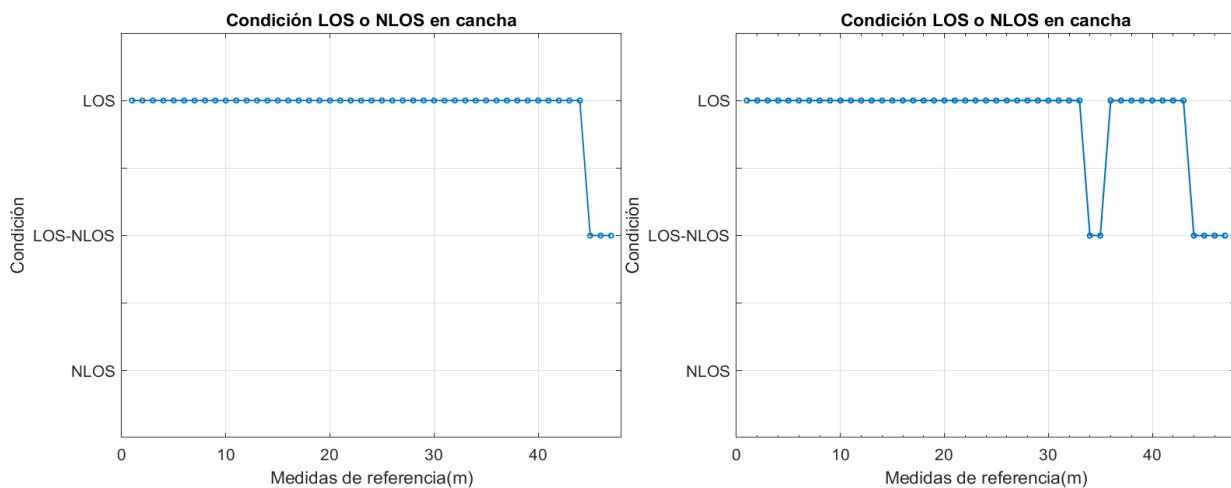


Figura 2.41 Condición de LOS/NLOS para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.

Si con la relación entre RSL y FSL se puede estimar la condición de LOS/NLOS, también existe una relación entre el valor de la amplitud del primer trayecto y el valor de STD_NOISE, mostrados en la Tabla 2.8, que permite determinar la calidad de la medida de

tiempo. De acuerdo con la documentación del fabricante, la cercanía entre esos valores refleja la existencia de multitrayecto y una menor calidad en la medida de tiempo calculada. La documentación sugiere que para la comparación se debería considerar la amplitud del segundo trayecto, AMPF2. Con esta información se construye el comportamiento para la prueba P2-ESC1 y se muestra en la Fig. 2.42. De la gráfica se puede concluir que, para las dos condiciones, LOS en la gráfica de la izquierda y NLOS en la derecha, se tienen medidas de buena calidad, según los resultados obtenidos.

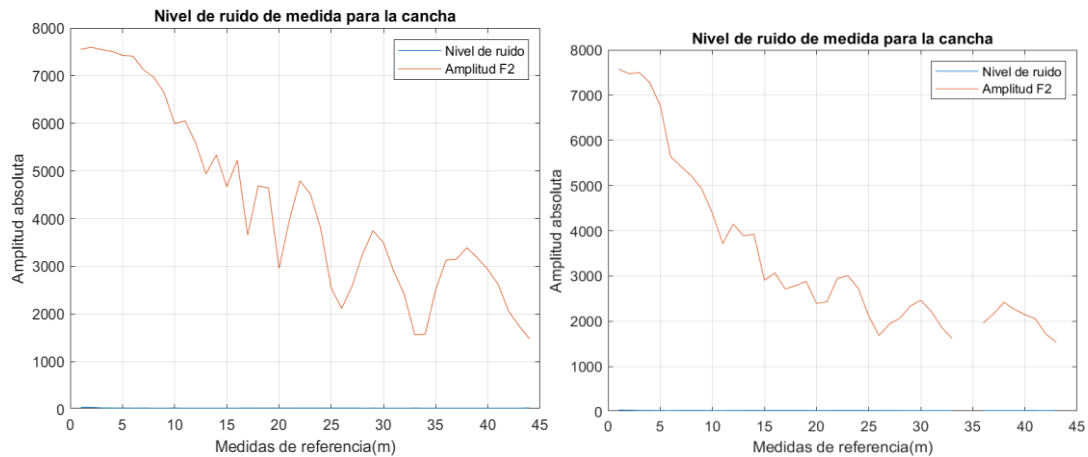


Figura 2.42 Calidad de la medida para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.

2.5.3.1.2.2 Análisis de la Respuesta al Impulso del Canal

Los registros CIR son un conjunto de valores complejos, que para la configuración utilizada son 1016 valores, que representan la respuesta al impulso del canal para una transmisión efectuada. En la Fig. 2.43 se muestran los CIR para los primeros 9 m en condición de LOS identificados por colores, en la cual se puede apreciar la existencia de un trayecto dominante, sin reflexiones considerables. Es de resaltar que en la documentación del fabricante no se aclara las dimensiones de los valores de los registros. Esta medida se utiliza para observar el comportamiento del canal cuando este es afectado por la multitrayectoria.

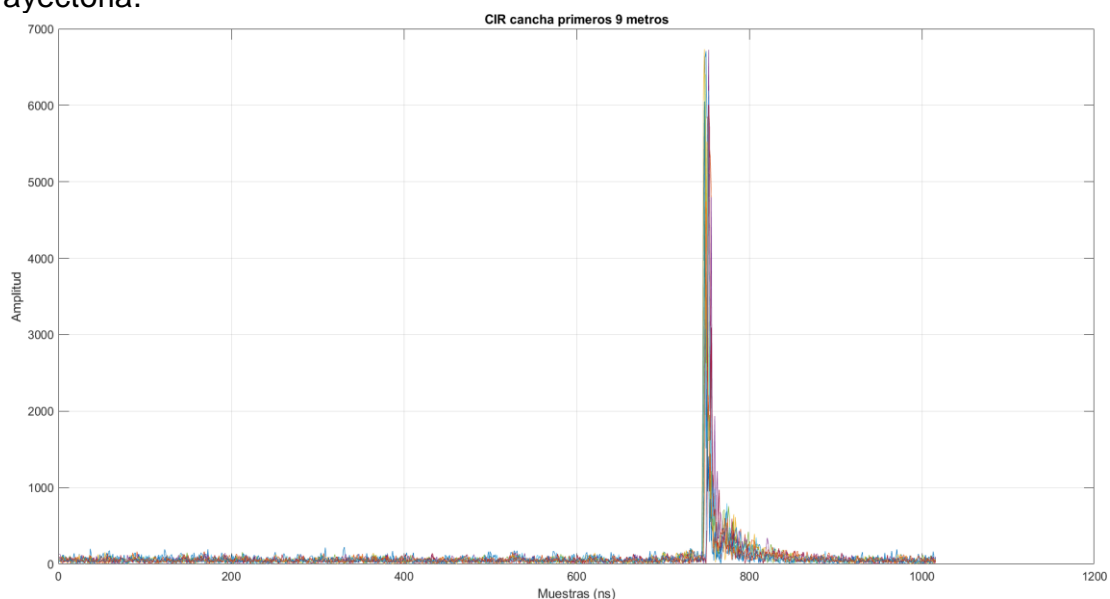


Figura 2.43 Respuesta al impulso del canal para P2-ESC1-LOS.

En la Fig. 2.44 se muestra un acercamiento a los valores alrededor de la muestra 750. Es importante aclarar que el algoritmo LDE tiene como principal propósito buscar el momento en que llega el primer trayecto, esta información es importante y es utilizada para el ajuste de la marca de tiempo. El algoritmo por temas propios e internos del dispositivo cuando encuentra el primer trayecto(rayo) lo fija en la posición o muestra (ns) de 750 nanosegundos. Es importante indicar que la gráfica de CIR tiende a tener la misma representación independiente de la distancia entre NT y NR, excepto ante la presencia de multitrayectoria.

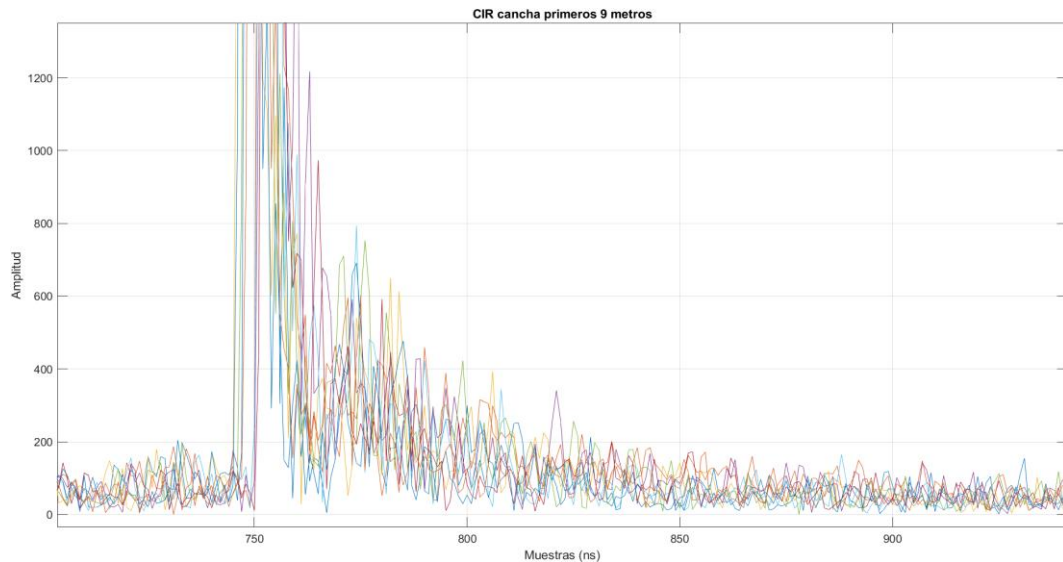


Figura 2.44 Ventana ampliada de la respuesta al impulso del canal para P2-ESC1-LOS de los primeros 9 m

La Fig. 2.45 permite comparar el comportamiento de CIR en condiciones LOS y NLOS para los primeros 4 m, en la cual se muestran los primeros valores CIR para ambas condiciones y para efectos de análisis las gráficas comienzan en cero en el eje X. De la Fig. 2.45 se puede observar cómo cambia ligeramente el comportamiento en condición de NLOS, donde las amplitudes correspondientes a reflexiones tienen amplitudes mayores o cercanas a la correspondiente al trayecto principal (mayor dispersión de los valores).

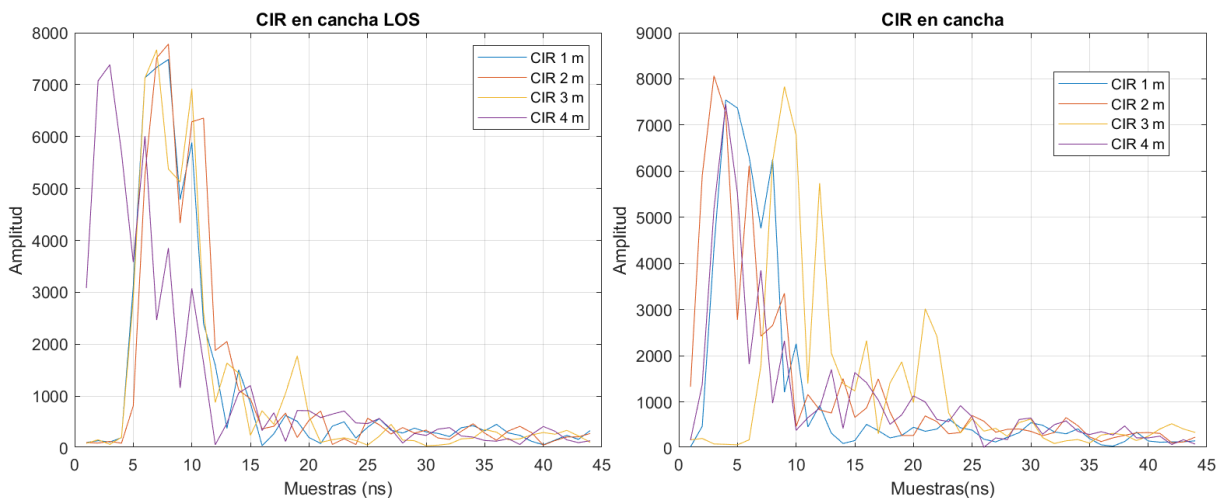


Figura 2.45 Ventana ampliada de la respuesta al impulso del canal con 4 distancias diferentes para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.

Finalmente, los dispositivos DWM1001 miden valores de temperatura y voltaje. En la Fig. 2.46 se muestran los valores promedio de voltaje por punto de medida para la prueba P2-ESC1 en ambas condiciones. A pesar del comportamiento variable que presentan las dos gráficas a lo largo de la prueba (LOS en la izquierda y NLOS en la derecha), se puede concluir que todas las variaciones están en los rangos de voltaje permitidos y recomendados para el normal funcionamiento de los dispositivos, i.e., 2.8 a 3.6 v.

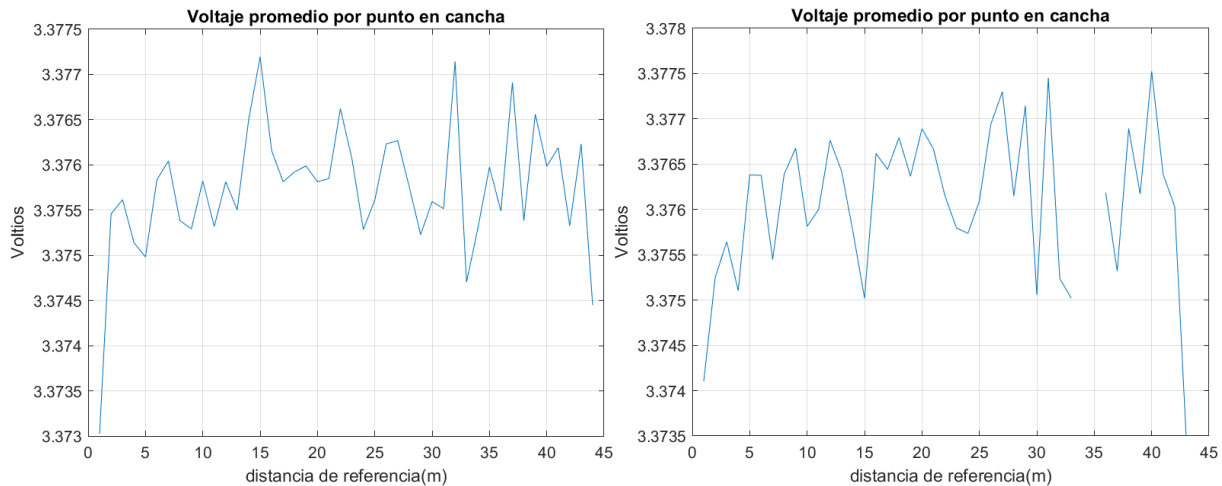


Figura 2.46 Comportamiento del voltaje promedio para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.

En la Fig. 2.47 se presenta el comportamiento de la temperatura promedio del dispositivo en cada punto de medida. Se concluye que el comportamiento es similar para ambas gráficas, las cuales fueron obtenidas en un espacio de tiempo cercano.

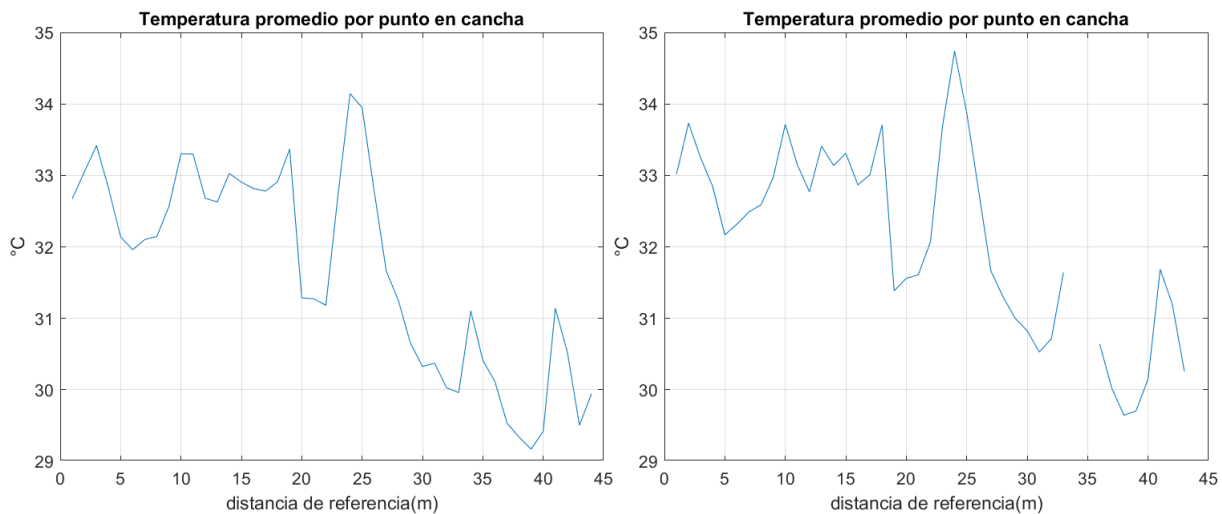


Figura 2.47 Comportamiento de la temperatura promedio para P2-ESC1-LOS y P2-ESC1-NLOS.

2.5.3.2 Validación en ESC2

En esta sección se presentan los resultados de la prueba de validación en el escenario 2: un pasillo de la facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, llamado ESC2 de ahora en adelante, y mostrado en la Fig. 2.48. Esta prueba de validación se realizó en horas de la noche buscando que el tráfico de personas fuera nulo, tanto en el pasillo como en los salones cercanos. Una vez definido el horario, se procedió a colocar las marcas de referencia a una distancia de 1 metro entre ellas, cubriendo por completo la longitud del

pasillo. La ejecución de la prueba consistió en desplazar el receptor a lo largo del pasillo, sin obstrucción entre NT y NR, y en el caso con obstrucción, con una persona enfrente del nodo receptor con una altura de 1.62 m.



Figura 2.48 Disposición del escenario ESC2.

Dado que ESC2 es un escenario de interiores, se verificó en el mismo la presencia de señales de radiofrecuencia. La Fig. 2.49 presenta el resultado de utilizar una herramienta móvil para monitorear la intensidad de señales BLE y WiFi captadas por un teléfono inteligente *smartphone*. En la gráfica se observa que durante la prueba no se detectaron dispositivos BLE, pero sí se detectaron varias señales en 2.4 GHz y 5.8 GHz, pero ninguna en cercanía a la frecuencia central de operación de los dispositivos.

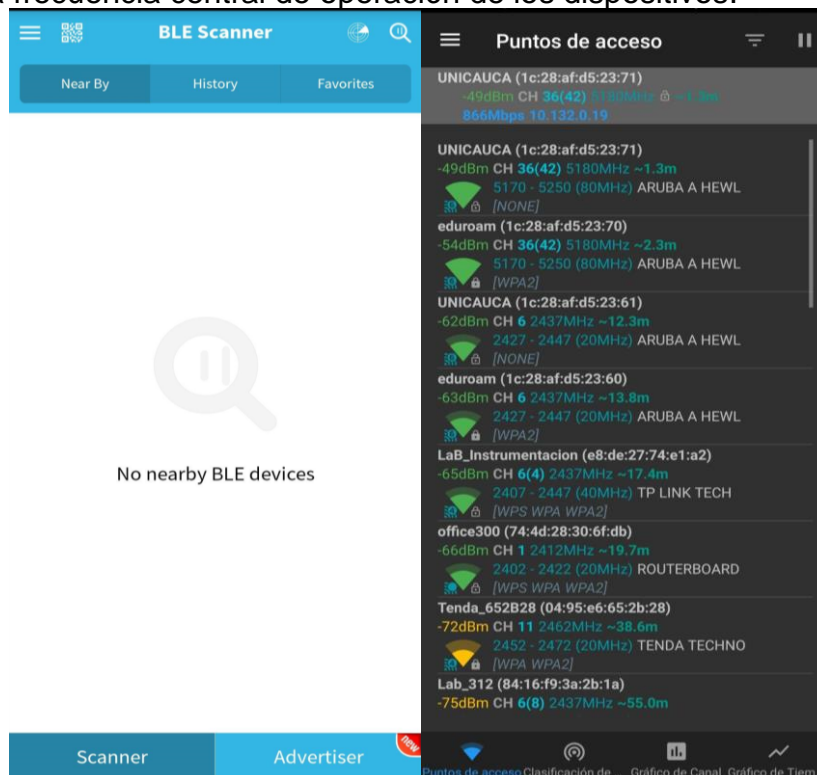


Figura 2.49 Recepción de señales de RF en ESC2.

2.5.3.2.1 Prueba de Tendencia Estadística P3-ESC2-LOS

De la misma manera en qué se validó el comportamiento en el escenario ESC1, se procedió a validar el desempeño de los dispositivos (tendencias estadísticas) bajo la misma configuración, a una distancia entre NT y NR igual a 5 m en condición LOS y con una cantidad similar de medidas 5454. Con el conjunto de resultados obtenidos se construyó un histograma. La Tabla 2.13 presenta las características consideradas para la representación del histograma, en la cual se puede observar que la distancia de error en el rango de 0.2944 a 0.3144 presenta la mayor frecuencia relativa.

Ocurrencia por rango	[65 287 806 1412 1526 879 368 93 12 4]
Límites de los rangos	[0.2344 0.2544 0.2744 0.2944 0.3144 0.3344 0.3544 0.3744 0.3944 0.4144 0.4344]
Rangos	10
Ancho del rango (m)	0.02

Tabla 2.13 Información del histograma para P3-ESC2-LOS.

De la Fig. 2.50 y la Tabla 2.13 se puede concluir que la distancia de error para una distancia entre NT y NR igual a 5 m es menor a 43.44 cm y mayor a 23.44 cm. Adicionalmente, se puede establecer que el valor medio de error es del orden de los 30 cm.

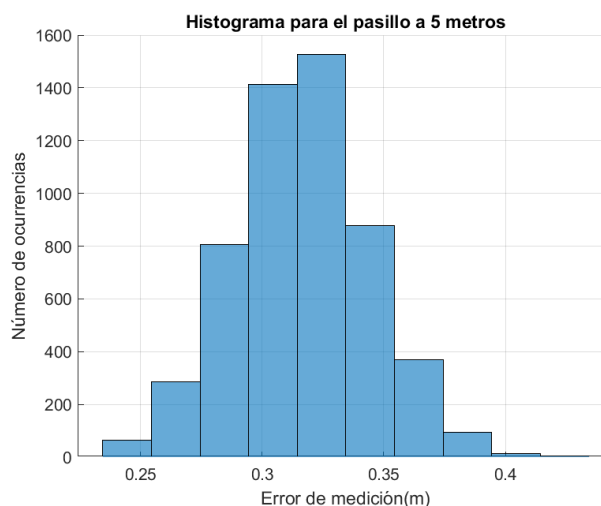


Figura 2.50 Histograma en ESC2 para P3-ESC2-LOS a 5 m.

Partiendo del histograma se construyó la PDF y la CDF con una distribución Normal como se muestra en la Fig. 2.51. Con la CDF se busca encontrar la probabilidad de que una variable aleatoria sea igual o menor a un determinado valor dentro del ESC2. De acuerdo con el histograma de la Fig. 2.50, la distribución normal representa de mejor manera la tendencia estadística del error en la estimación de la distancia(exactitud). De la figura del histograma se puede observar que la probabilidad de obtener un error menor o igual a 35 cm es igual a 0.9246. De la aproximación de la PDF se observa que la distribución de datos se concentra, efectivamente, en las cercanías de los 30 cm que equivale a su media.

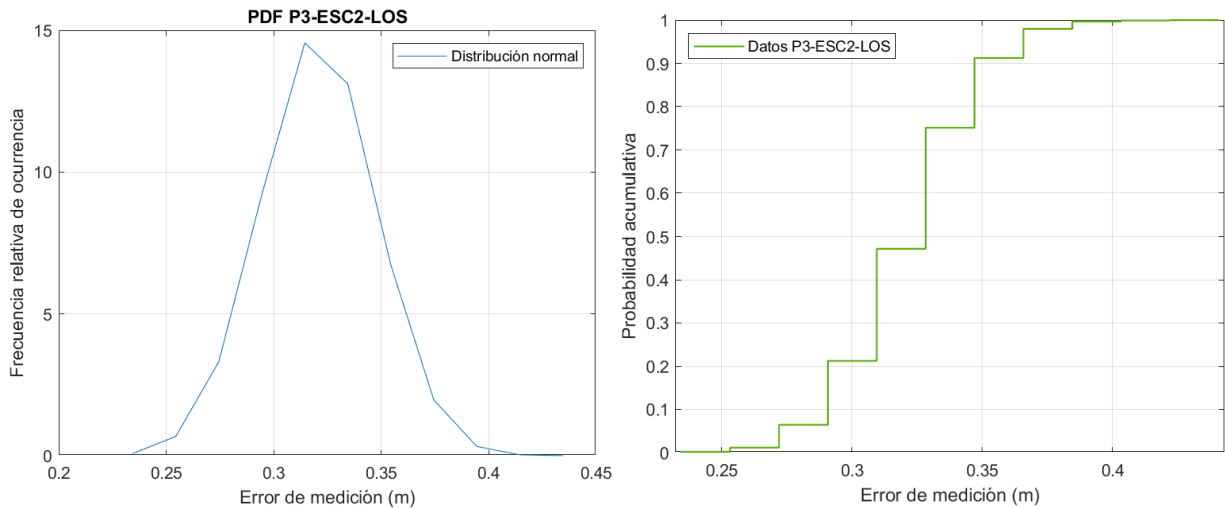


Figura 2.51 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para P3-ESC2-LOS a 5 m.

En la Fig. 2.52 se presenta en la gráfica de la izquierda la tendencia de PER en la transmisión de paquetes para una distancia de 5 m entre NT y NR, y en la gráfica de la derecha el resultado de las distribuciones que más se ajustan al conjunto de datos. En el Anexo E se detallan más los resultados. La prueba Chi Cuadrado acepta las pruebas de hipótesis t Location-Scale y Normal (no graficada). Las CDF fueron generadas por la herramienta *Distribution Fitter* (Matlab), tomando como referencia los datos de distancia de error almacenados. De la gráfica izquierda se observa que hay una mayor pérdida de paquetes de los 5444 paquetes enviados a diferencia del escenario de exteriores.

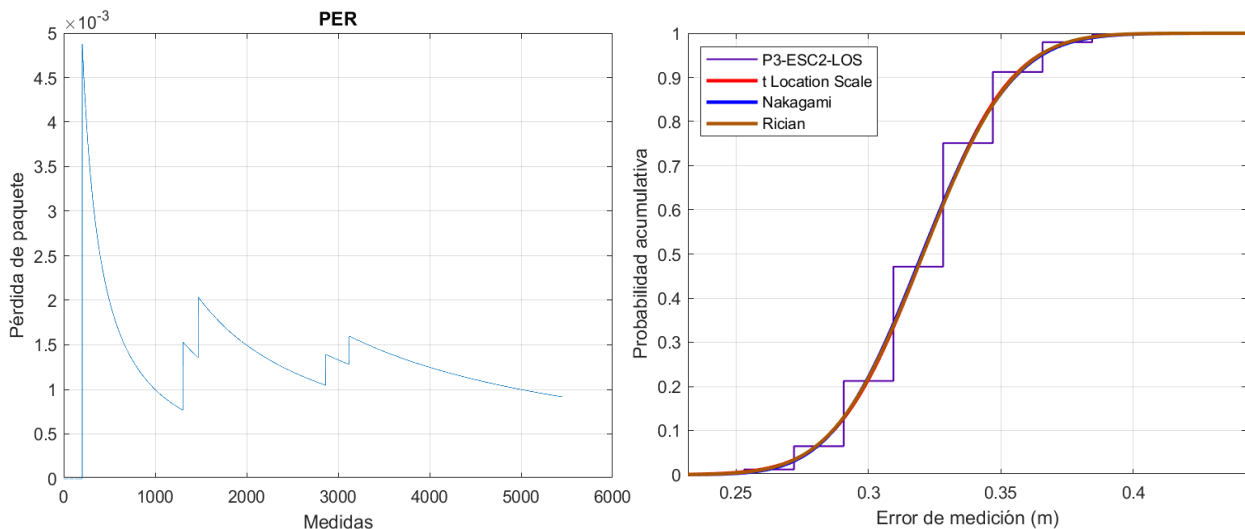


Figura 2.52 Tasa de error de paquetes y funciones de distribución acumulativa aproximadas por Matlab para P3-ESC2-LOS a 5 m.

En la Tabla 2.14 se resumen los datos de la evaluación del desempeño en P3-ESC2-LOS con un error promedio en la estimación de distancia menor a 35 cm y con una baja desviación estándar (los datos de error se encuentran agrupados alrededor de la media con baja dispersión). Finalmente, se tiene un porcentaje de PER menor al 1%, lo cual indica un funcionamiento fiable de los dispositivos UWB DWM1001 en el escenario de interiores.

Dato	Valor
Medidas	5454
Media (m)	0.32071
Desviación estándar (m)	0.026655
PER (%)	0.0916

Tabla 2.14 Resultados de P3-ESC2-LOS a 5 m.

2.5.3.2.2 Pruebas de Validación P4-ESC2

Para determinar la exactitud se consideraron dos pruebas en este escenario ESC2. La primera prueba P4-ESC2-LOS consiste en separar los NT y NR en pasos de 1 m tomando aproximadamente 100 medidas por marca de referencia, garantizando en todo momento la condición LOS entre dispositivos, es decir, sin ningún obstáculo entre ellos. La segunda prueba P4-ESC2-NLOS consiste en repetir la prueba anterior manteniendo la presencia de una persona cerca a alguno de los nodos, en este caso, al NR. La Fig. 2.53 muestra la exactitud de las medidas a lo largo de las 47 marcas de referencia. La gráfica de la izquierda representa la prueba sin obstáculos (LOS) y la gráfica de la derecha representa la prueba con el obstáculo (NLOS). Se puede observar que en ambas pruebas en ningún momento se pierde la comunicación entre los dispositivos. De ambas gráficas se puede notar que la exactitud de los dispositivos para las dos condiciones es muy similar y que el error promedio no incrementa considerablemente al aumentar la distancia.

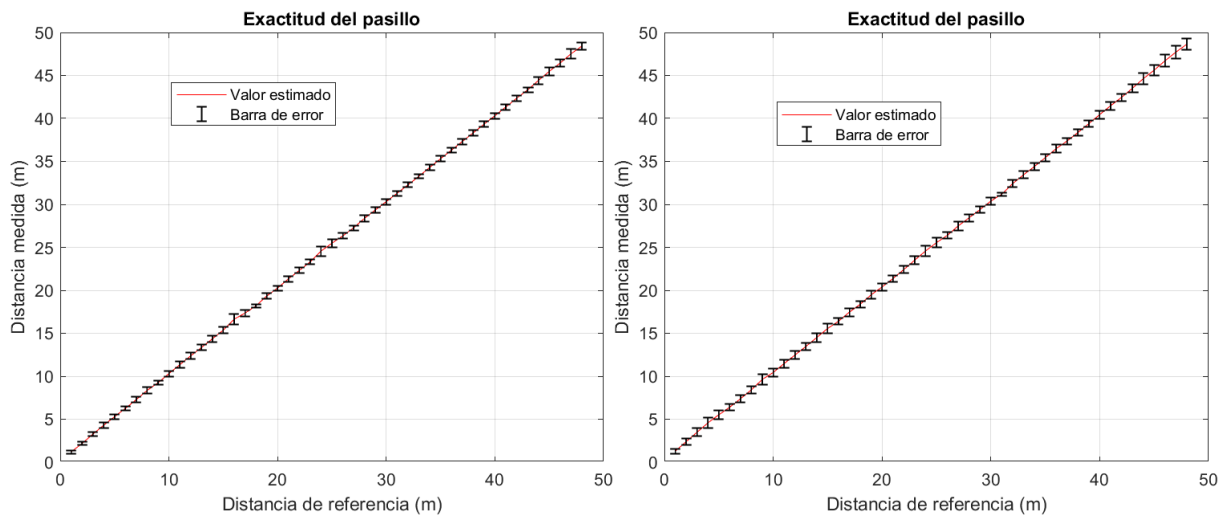


Figura 2.53 Exactitud contra distancia para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.

En la Tabla 2.15 se muestran los resultados y los valores representativos en los dos tipos de prueba para su comparación. Partiendo de la información de la tabla se observa que el incremento porcentual del máximo error en NLOS respecto a LOS fue de 12.01 %. Una comparación valor a valor entre cada tipo de datos revela que la presencia de una persona al nodo receptor en una cercanía menor a los 30 cm para este escenario sí afectó el desempeño en los valores de desviación estándar y RMSE.

P4-ESC2-LOS		P4-ESC2-NLOS	
Máximo error (m)	0.64267	Máximo error (m)	0.71989
Mínimo error (m)	0.17188	Mínimo error (m)	0.18799
Máxima desviación estándar (m)	0.17289	Máxima desviación estándar (m)	2.7568
Mínima desviación estándar (m)	0.020802	Mínima desviación estándar (m)	0.0248
Máximo RMSE (m)	0.64435	Máximo RMSE (m)	2.7526
Mínimo RMSE (m)	0.1748	Mínimo RMSE (m)	0.28446
Error promedio (m)	0.33788	Error promedio (m)	0.46409
Desviación estándar promedio (m)	0.037324	Desviación estándar promedio (m)	0.16224
Temperatura promedio (°C)	30.0179	Temperatura promedio (°C)	23.2413
Voltaje promedio (v)	3.3463	Voltaje promedio (v)	3.3871

Tabla 2.15 Comparación de resultados para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.

En la Fig. 2.54 se muestra el comportamiento de la exactitud por distancia de referencia. La gráfica de la izquierda representa la condición LOS y la gráfica de la derecha la condición NLOS. Ambas gráficas muestran un comportamiento similar; sin embargo, los valores de error promedio siempre fueron mayores en condiciones NLOS. Se observó que la distribución del pasillo contenía algunos elementos que afectan las medidas como la presencia de puertas, un televisor, un extintor, y una bahía en el sector de baños. Para las distancias mayores a 40 m se evidencia una menor exactitud.

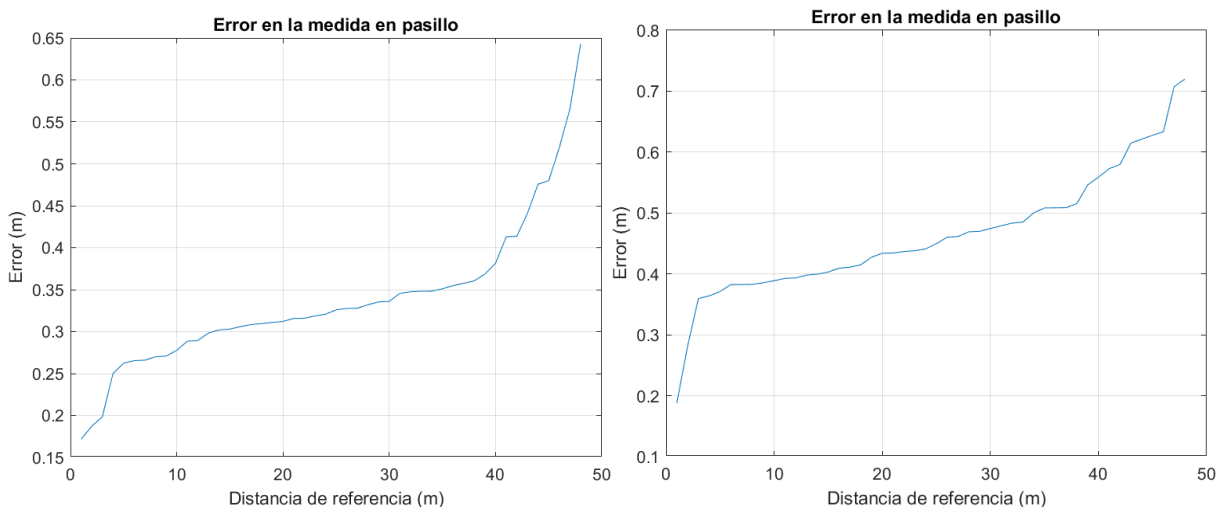


Figura 2.54 Error promedio contra distancia para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.

En la Fig. 2.55 se muestra el comportamiento de la desviación estándar en cada una de las marcas establecidas para el escenario ESC2. Se observa que para condiciones LOS la desviación estándar no tuvo grandes variaciones y se mantuvo con valores menores a 0.2 m. A diferencia de ese comportamiento, se encuentra que para la condición de NLOS la desviación estándar tuvo un pico grande de variación en la cercanía a los 3 m, además, sus valores fueron mayores con respecto a la condición LOS, en la mayoría de los casos.

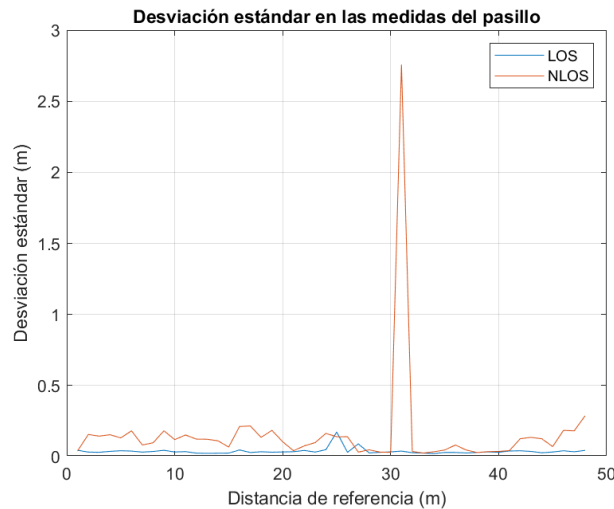


Figura 2.55 Desviación estándar para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.

La Fig. 2.56 muestra el comportamiento de PER por marca de referencia. Si bien los datos de la PER se obtienen de forma independiente, para efectos de la interpretación se grafican de forma continua. De la Fig. 2.56 se observa como para condiciones NLOS existen mayores pérdidas de paquetes y los incrementos se dan con la distancia.

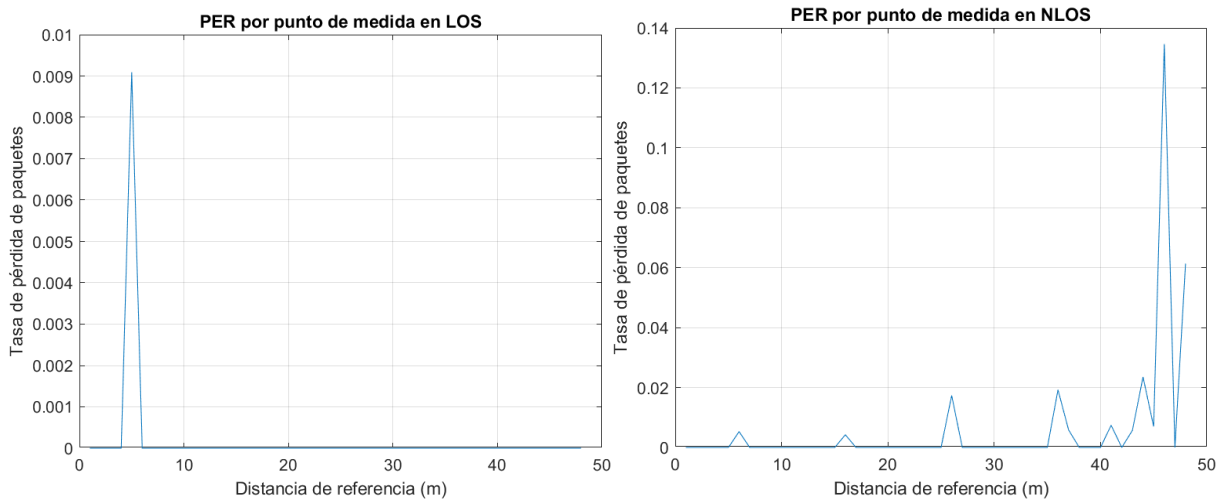


Figura 2.56 Tasa de error de paquetes para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.

De acuerdo con las gráficas presentadas se puede asegurar que los resultados de evaluación del desempeño (exactitud y precisión) en P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS corresponden a distribuciones centradas cerca de sus respectivos errores promedios. Para la construcción de los histogramas se consideraron todos los errores de medición(exactitud) para el escenario ESC2; por lo cual en la gráfica de NLOS (derecha) se observa que el eje X va hasta 3 m, esto dado que se presentó un solo error de medición cercano a ese valor; sin embargo, el histograma para NLOS muestra que los errores están agrupados alrededor de la media.

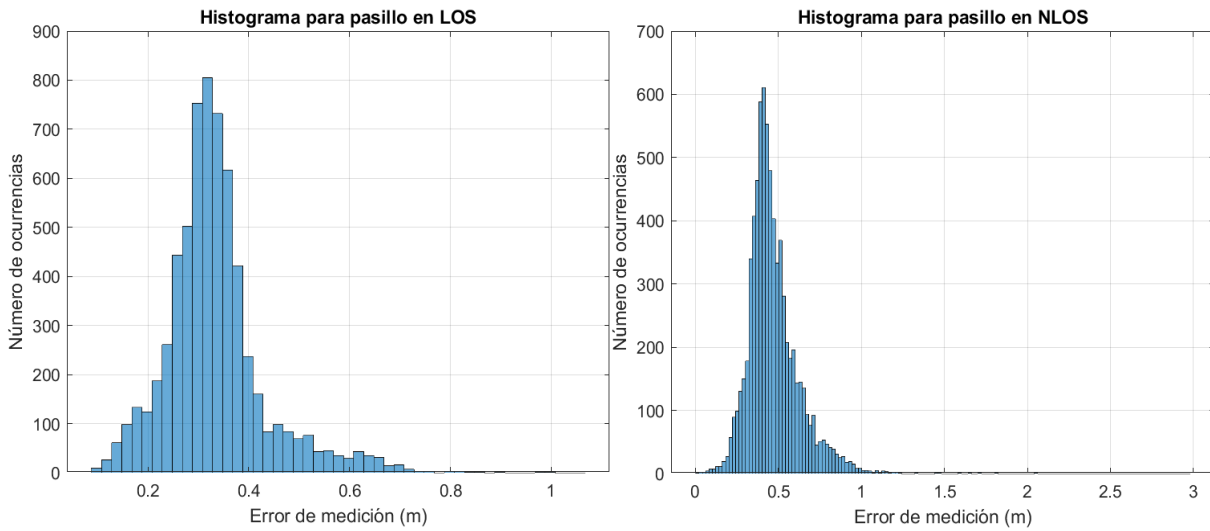


Figura 2.57 Histograma para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.

Los histogramas de la Fig. 2.57 presentan la necesidad de averiguar el tipo de distribución que mejor se adapte a los datos almacenados. En el Anexo E se detallan los procedimientos para determinar las distribuciones más ajustadas al conjunto de datos de las pruebas P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS. La prueba Chi Cuadrado rechaza las pruebas de hipótesis para las tres primeras distribuciones de cada prueba. La Fig. 2.58 muestra las distribuciones construidas con *Distribution Fitter* (Matlab) donde se puede observar que para ambas pruebas el tipo de distribuciones más ajustada (Log Logistic) es la misma.

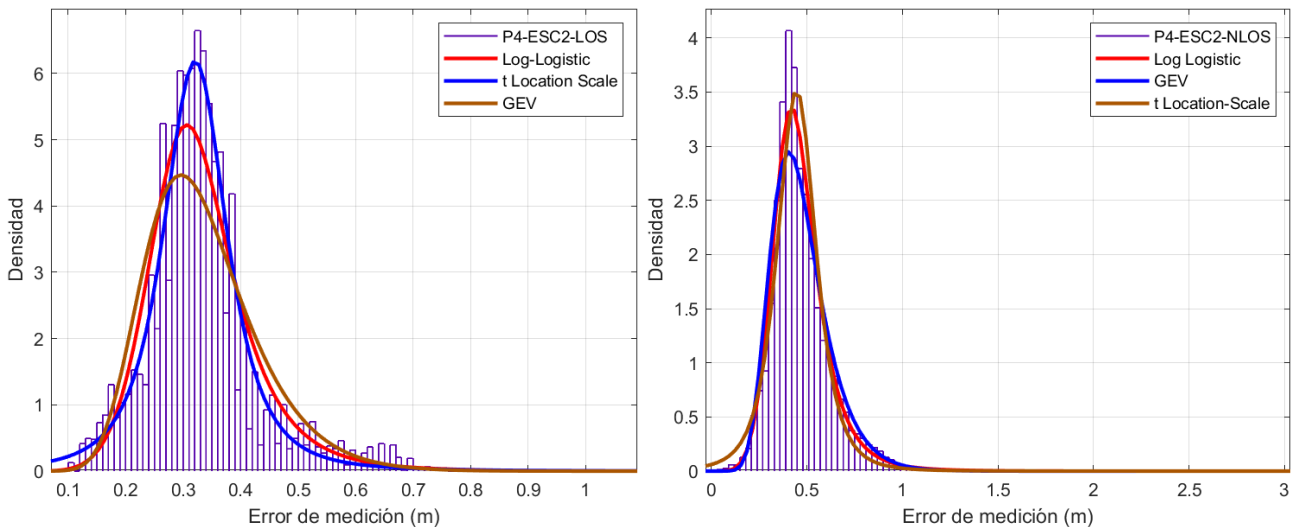


Figura 2.58 Función de densidad de probabilidad para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.

En la Fig. 2.59 se grafican las CDF empírica y las tres primeras CDF más ajustadas de acuerdo con los resultados (Anexo E), donde se observa la aproximación entre ellas para LOS y NLOS.

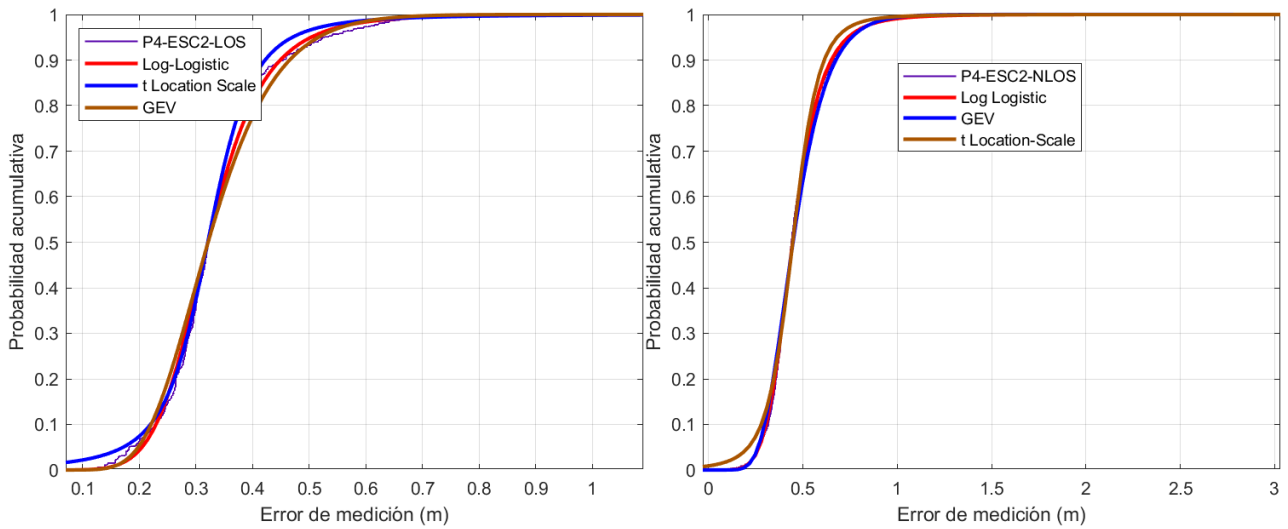


Figura 2.59 Función de distribución acumulativa para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.

2.5.3.2.2.1 Análisis de Potencia en Recepción

En la Fig. 2.60 se muestra el comportamiento de la potencia recibida respecto a la distancia en ESC2 para LOS (Izquierda) y NLOS (derecha), adicionalmente, se gráfica el modelo de pendiente única, para lo cual se calcula el exponente de propagación. Sin embargo, se encontró que los valores que generan una curva más aproximada a la curva de pérdidas de propagación de la señal tienen un valor incongruente con la teoría y que ha sido validado y probado para escenario de interiores, por la razón ya antes expuesta. Particularmente, se encuentra que la potencia de recepción no varía mucho conforme incrementa la distancia. En algunas distancias puntuales se ven caídas que se explican por forma del escenario de prueba, como la presencia de la entrada o bahía a la zona de baños. Se tiene el caso de que bajo condiciones de NLOS se perciba una potencia en recepción inferior a distancias más cortas e incremente a distancias mayores. Por lo tanto, se descarta el uso del modelo de pendiente única para intentar modelar el sistema con los dispositivos y bajo la configuración empleada.

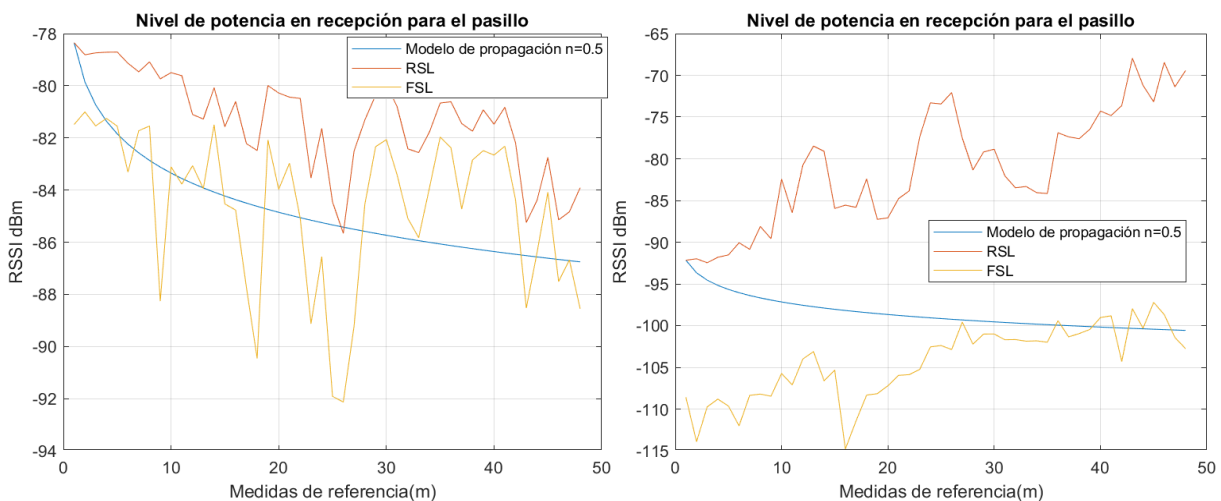


Figura 2.60 Nivel de potencia para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.

Se utilizaron los valores de RSL para estimar la distancia, sin embargo, los errores de distancia fueron enormes (exactitud pobre), por lo tanto, se descartó su uso como métrica auxiliar y se dejará para trabajos futuros. En la Fig. 2.61 se muestra la condición de

operación LOS/NLOS para los valores de RSL y FSL. En la gráfica de la izquierda, en la cual siempre hay condición de LOS, se observa cómo hay una alta correspondencia (43/47) realizando la estimación desde las medidas; y la incertidumbre (condición LOS-NLOS) se debe a cambios en la estructura del pasillo, mencionados anteriormente. Por otro lado, en la gráfica de la derecha, en la cual siempre hay condición de NLOS, se observa que la presencia del cuerpo humano afectó y diferenció considerablemente las medidas de RSL y FSL, permitiendo estimar con 100% de aciertos la condición de NLOS.

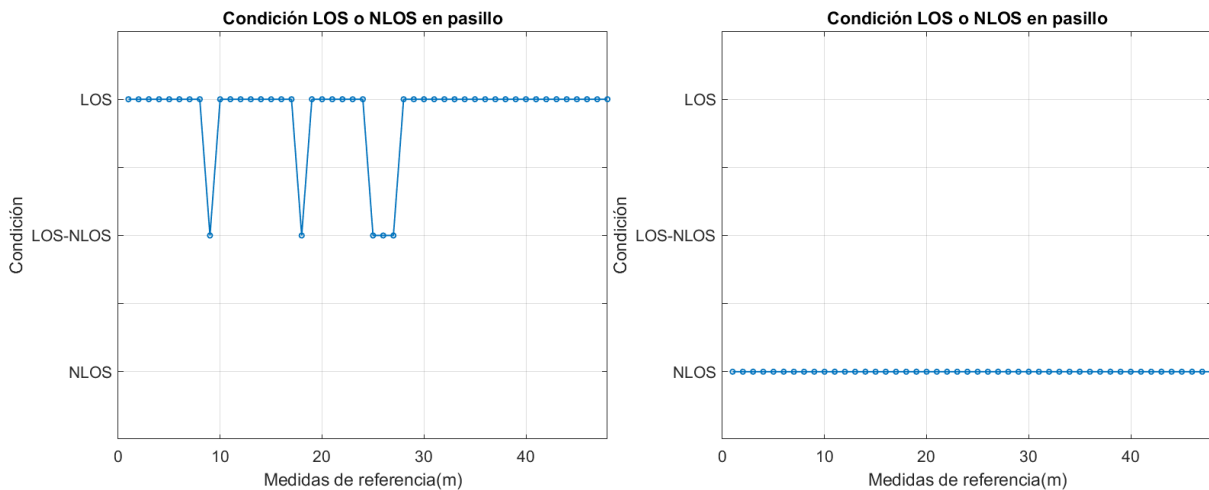


Figura 2.61 Condición de LOS/NLOS para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.

De la Fig. 2.62 se puede observar que para la prueba P4-ESC2-LOS(Izquierda) en la mayoría de las medidas se tiene una buena calidad. En contraste, se evidencia que para la prueba P4-ESC2-NLOS(Derecha) se tienen puntos donde la diferencia entre el valor del segundo trayecto y el nivel de ruido es menor, indicando una menor calidad en la estimación del tiempo.

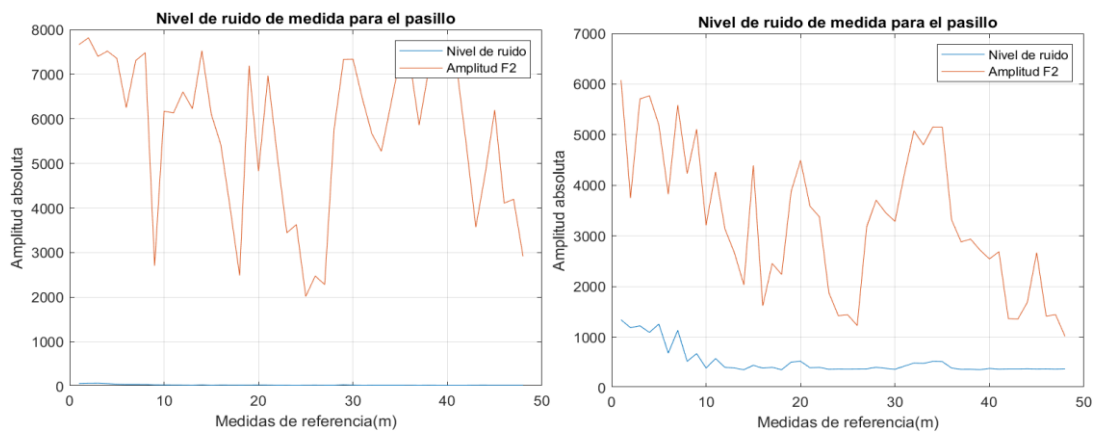


Figura 2.62 Calidad de la medida para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.

2.5.3.2.2 Análisis de la Respuesta al Impulso del Canal

En la Fig. 2.63 se muestran los CIR para los primeros 5 m para condición de LOS (izquierda) y NLOS (derecha) en el escenario ESC2, en la que se puede apreciar que tanto para condición de LOS como condición de NLOS, la amplitud de señales que no corresponden

al primer trayecto tiene mayor presencia. En el caso de NLOS las amplitudes de las señales de los diferentes trayectos son comparables o presentan una menor diferencia entre ellas.

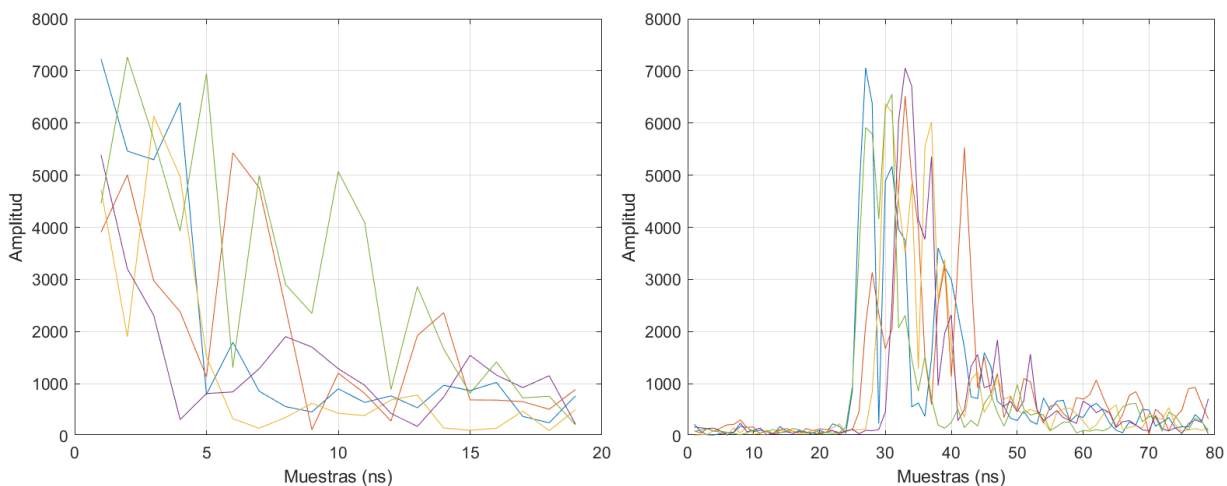


Figura 2.63 Ventana ampliada de la respuesta al impulso del canal con 5 distancias diferentes para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.

La Fig. 2.64 muestra el comportamiento de la temperatura promedio del dispositivo en cada marca de referencia. Se concluye que el comportamiento es diferente para ambas gráficas, esto en la medida que las pruebas fueron realizadas en un espacio de tiempo diferente. Adicionalmente se muestra un incremento ligero en la temperatura para ambos casos con el aumento de la distancia.

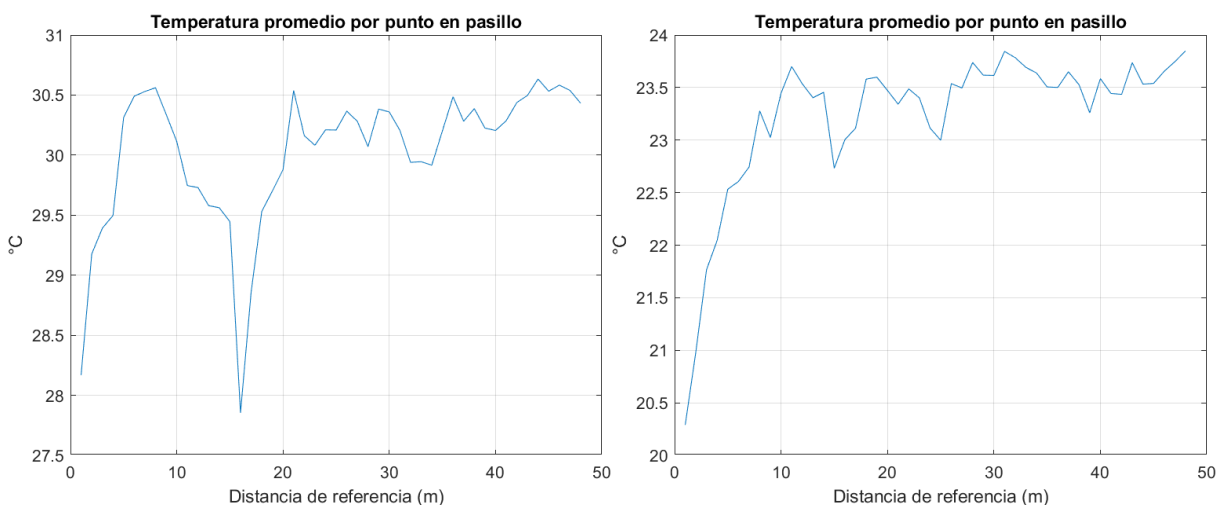


Figura 2.64 Temperatura para P4-ESC2-LOS y P4-ESC2-NLOS.

2.5.3.3 Validación ESC3

En esta sección se presentan los resultados de la prueba de validación en el escenario 3: un salón de la facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, llamado ESC3 de ahora en adelante. En la Fig. 2.65 se muestra el salón y las señales WiFi-capturadas por un smartphone. Se detectaron varias señales en 2.4 GHz y 5.8 GHz, pero ninguna en cercanía a la frecuencia central de operación de los dispositivos. Esta prueba de validación se realizó en horas de la mañana en un fin de semana buscando que el tráfico de personas fuera bajo en los salones cercanos. Una vez definido el horario, se procedió a colocar las

marcas de referencia a una distancia de 1 metro entre ellas, cubriendo por completo la longitud del salón. La ejecución de la prueba consistió en desplazar el receptor a lo largo del salón, sin obstrucción entre NT y NR. No se realizaron pruebas con obstrucción.

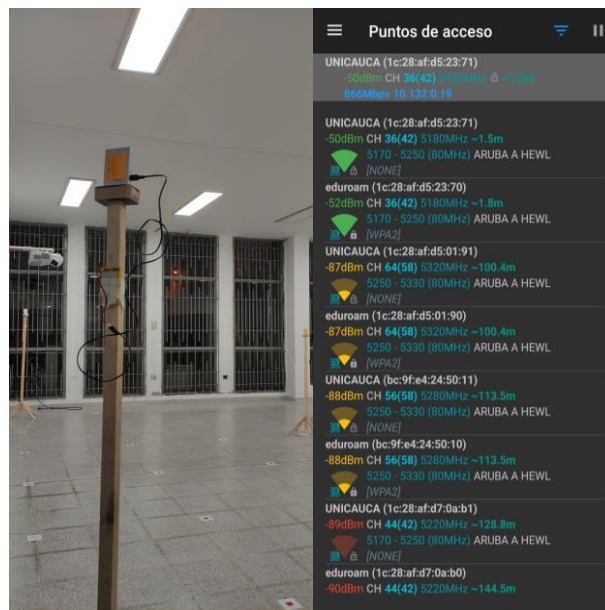


Figura 2.65 Evidencia en ESC3 y presencia de señales WiFi.

2.5.3.3.1 Prueba de Tendencia Estadística P5-ESC3-LOS

De la misma manera en qué se validó el comportamiento en el escenario ESC2, se procedió a validar bajo la misma configuración con condición LOS, una distancia de separación de 5 m y con una cantidad similar de medidas tomadas (5458), la tendencia estadística de la estimación de error de distancia(exactitud). Con el conjunto de resultados se construye un histograma (ver Fig. 2.66). La Tabla 2.16 presenta las características utilizadas, en las cuales el rango de 0.3520 a 0.3720 m presenta la mayor frecuencia relativa.

Ocurrencia por rango	[17 89 394 965 1250 1116 865 518 197 43]
Límites de los rangos	[0.2720 0.2920 0.3120 0.3320 0.3520 0.3720 0.3920 0.4120 0.4320 0.4520 0.4720]
Rangos	10
Ancho del rango (m)	0.02

Tabla 2.16 Características del histograma P5-ESC3-LOS.

De la Fig. 2.66 y la Tabla 2.16 se puede concluir que el error para 5 m es menor a 47.20 cm y mayor a 27.20 cm. Adicionalmente, se puede establecer que la distancia de error media se encuentra alrededor de los 36 cm.

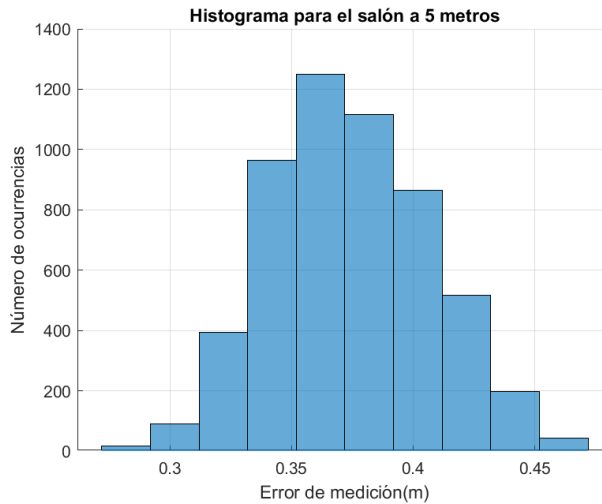


Figura 2.66 Histograma para P5-ESC3-LOS a 5 m.

Partiendo del histograma se construye la PDF y CDF utilizando Matlab para aproximar los datos a una distribución normal como se muestra en la Fig. 2.67. De la CDF se puede concluir que la probabilidad de encontrar un error menor a 45 cm es igual a 0.99. De la PDF se observa que la distribución de datos se concentra, efectivamente, en las cercanías de los 36 cm que equivale al valor medio.

En la Fig. 2.68 se presenta en la gráfica de la izquierda la PER y en la gráfica de la derecha el resultado de analizar las distribuciones que más se ajustan al conjunto de datos. En el Anexo E se detallan los procedimientos realizados para el análisis. La prueba Chi Cuadrado rechaza la prueba de hipótesis con la primera distribución Valor Extremo Generalizado (GEV, *Generalized Extreme Value*), pero acepta las pruebas de hipótesis para las distribuciones Gamma y Birnbaum Sanders. El conjunto de CDF fue generado por *Distribution Fitter* (Matlab).

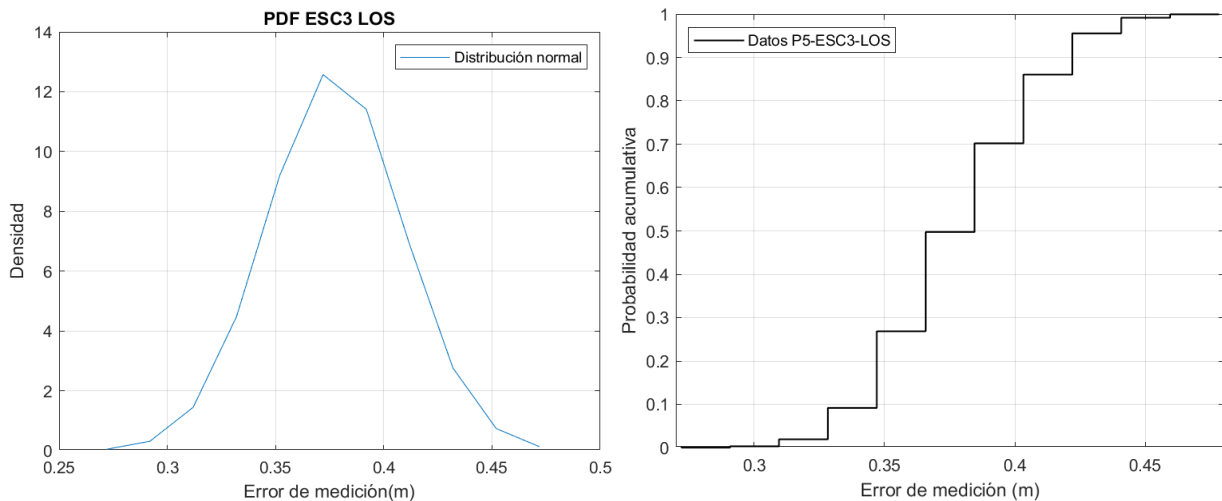


Figura 2.67 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para P5-ESC3-LOS a 5 m.

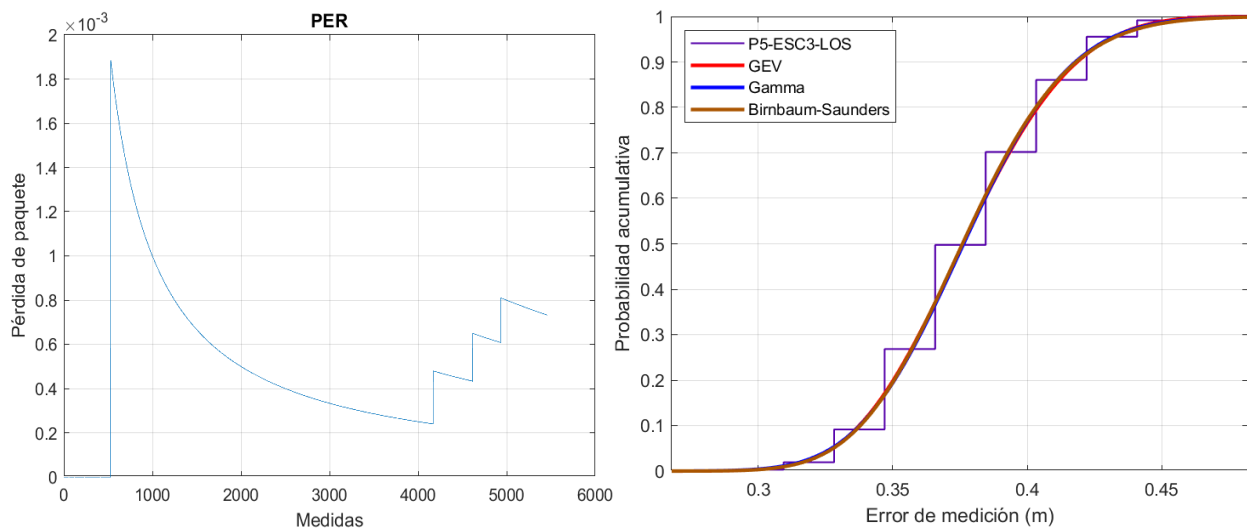


Figura 2.68 Tasa de error de paquetes y funciones de distribución acumulativa aproximadas por Matlab para P5-ESC3-LOS a 5m.

En la Tabla 2.17 se resumen los datos de la ejecución P5-ESC3-LOS, en el cual el error promedio es menor a los 38 cm y la desviación estándar es baja implicando que las medidas de error de distancia se encuentran agrupados alrededor de la media con poca dispersión. Finalmente, se obtiene un porcentaje de PER menor al 1% indicando un funcionamiento fiable de los dispositivos UWB *DWM1001*.

Dato	Valor
Medidas	5458
Media (m)	0.37722
Desviación estándar (m)	0.031286
PER (%)	0.073247

Tabla 2.17 Resultados de P5-ESC3-LOS a 5m.

2.5.3.3.2 Pruebas de Validación P6-ESC3

Para determinar la exactitud se considera solo una prueba en ESC3. En esta prueba P6-ESC3-LOS se busca separar los dispositivos *DWM1001* en pasos de 1 m y tomar aproximadamente 100 medidas por marca de referencia (9 m). Los dispositivos se encuentran en todo tiempo en condición LOS, es decir, sin ningún obstáculo entre ellos. La Fig. 2.69 muestra la exactitud de las medidas a lo largo de las 9 marcas de referencia. Se puede notar que el error promedio no incrementa considerablemente al aumentar la distancia.

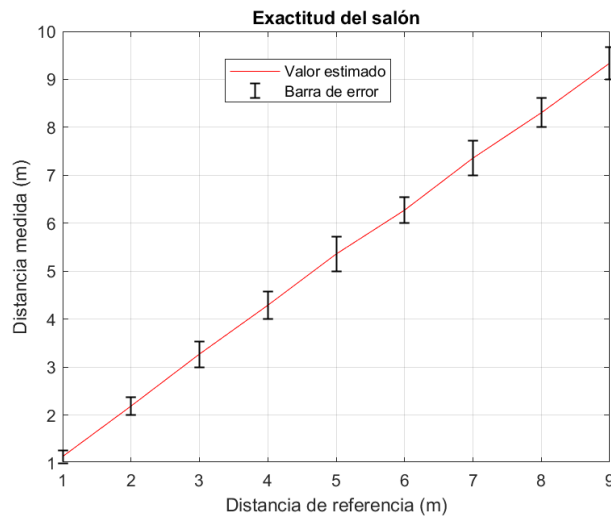


Figura 2.69 Exactitud contra distancia para P6-ESC3-LOS.

En la Tabla 2.18 se muestran los resultados de la prueba, la cual incluye los valores representativos de las medidas.

P6-ESC3-LOS	
Máximo error (m)	0.35788
Mínimo error (m)	0.13414
Máxima desviación estándar (m)	0.036293
Mínima desviación estándar (m)	0.021272
Máximo RMSE(m)	0.35921
Mínimo RMSE (m)	0.1368
Error promedio (m)	0.27877
Desviación estándar promedio (m)	0.02709
Temperatura promedio (°C)	28.9883
Voltaje promedio (v)	3.3771

Tabla 2.18 Resumen de P6-ESC3-LOS.

La Fig. 2.70 muestra el comportamiento del error promedio por distancia de referencia y un histograma. De la gráfica se puede asegurar que el error para P6-ESC3-LOS incrementó un máximo de 20 cm para las mayores distancias.

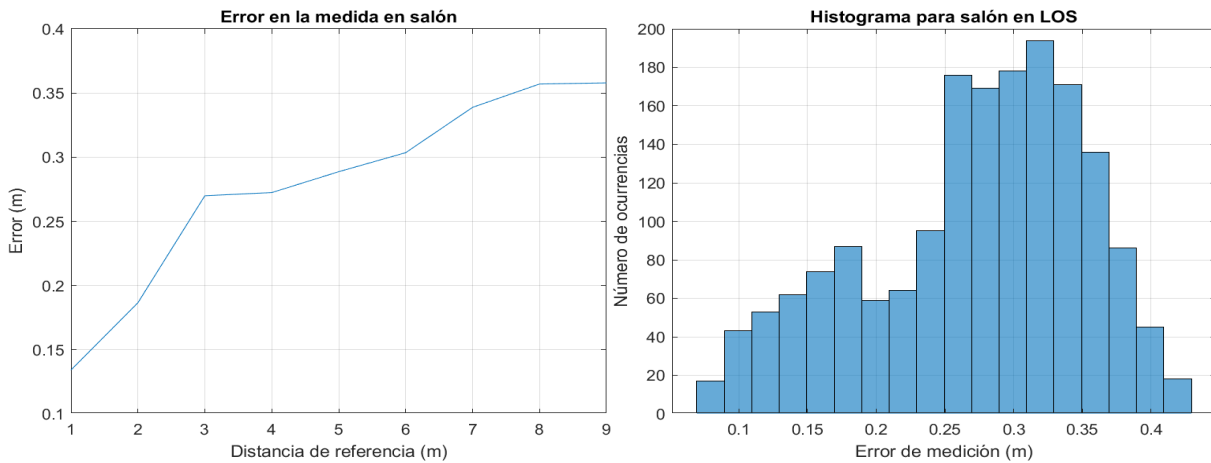


Figura 2.70 Error promedio contra distancia e histograma para P6-ESC3-LOS.

La Fig. 2.71 presenta el comportamiento de la desviación estándar promedio por distancia de referencia e igualmente con la PER. De la figura se puede observar que para el escenario de interiores ESC3 y para una corta distancia (9 m) se presentaron varias pérdidas de paquetes. Igualmente, se observa que la desviación estándar se incrementó más en las últimas distancias.

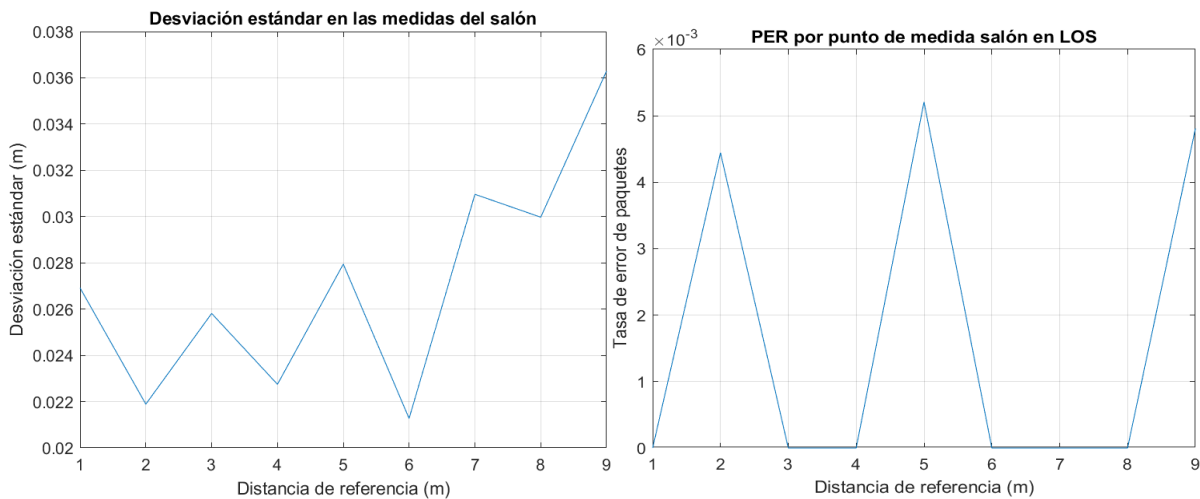


Figura 2.71 Desviación estándar y tasa de error de paquetes para P6-ESC3-LOS.

En la Fig. 2.72 se muestran los resultados de analizar las distribuciones que más se ajustan al conjunto de datos de esta prueba. A partir del histograma de la Fig. 2.70 se observa la presencia de dos distribuciones mezcladas, posiblemente normales. En el Anexo E se detalla los procedimientos para analizar, separar y ajustar las distribuciones al conjunto de datos. La prueba de Chi Cuadrado rechaza las pruebas de hipótesis de las primeras distribuciones de cada subconjunto. En la gráfica izquierda se presenta el histograma y la PDF para los datos ya separados de la ejecución de la prueba P6-ESC3-LOS usando la herramienta *Distribution Fitter* (Matlab). Se analizó con mayor atención que las distribuciones GEV son las más ajustadas a los dos subconjuntos de datos.

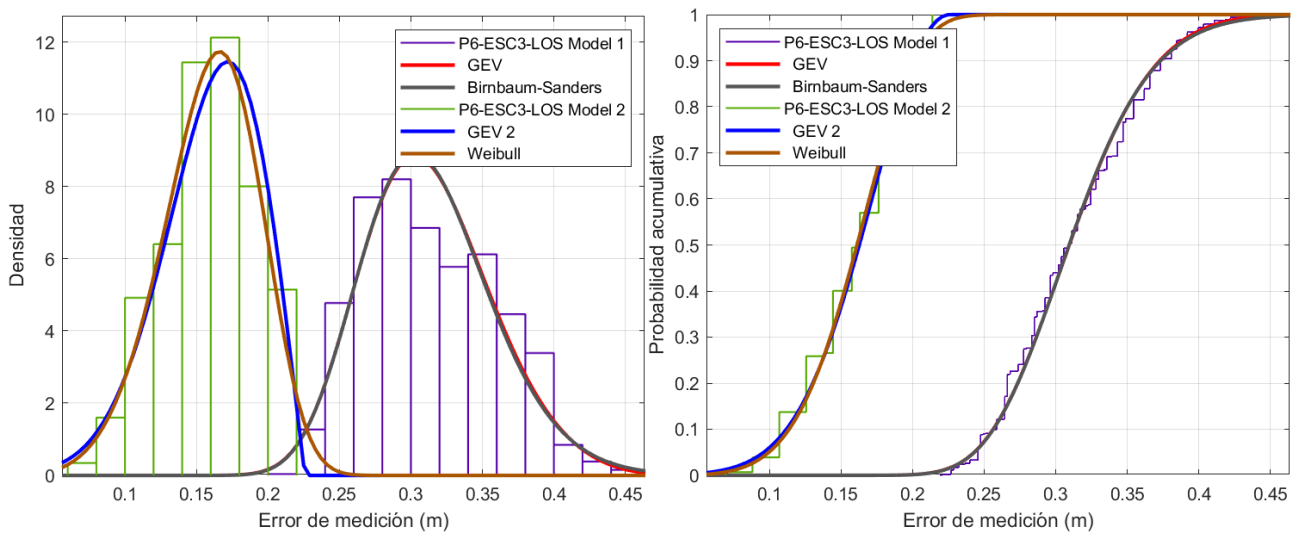


Figura 2.72 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para P6-ESC3-LOS.

2.5.3.3.2.1 Análisis de Potencia en Recepción

En la Fig. 2.73 se muestra el comportamiento de la potencia recibida respecto a la distancia (izquierda), adicionalmente, la gráfica contiene un modelo de pendiente única, para lo cual se calcula el exponente de propagación. Sin embargo, se encontró que los valores que generan una curva más aproximada a la curva de pérdidas de propagación de la señal tienen un valor incongruente con la teoría. Por lo tanto, se descarta el uso del modelo de pendiente única para intentar modelar el sistema con los dispositivos y bajo la configuración empleada. En la figura de la derecha se observa una diferencia más cercana en las últimas distancias entre la amplitud F2 y el nivel de ruido, lo que indica una menor calidad en la estimación de la distancia.

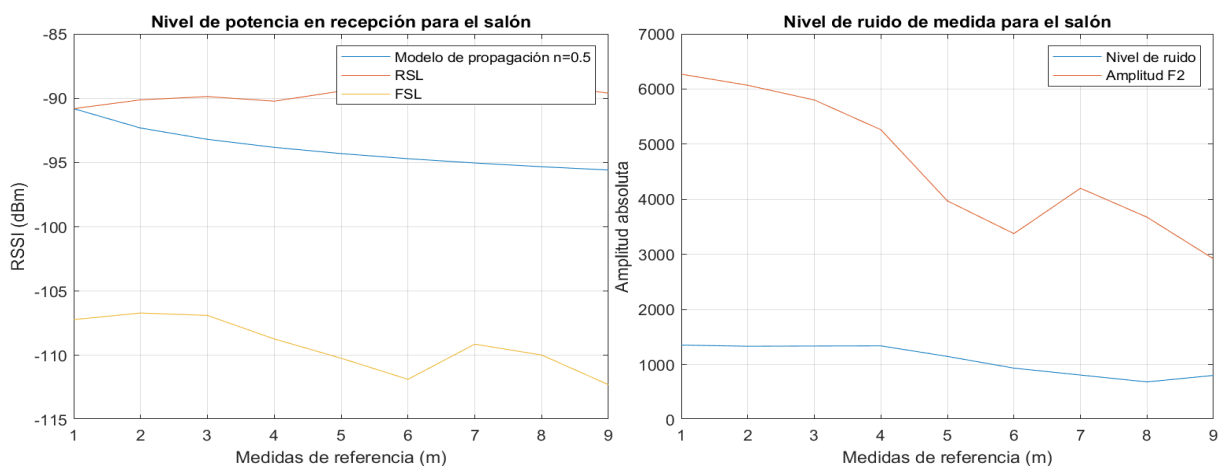


Figura 2.73 Nivel de potencia y calidad de la medida para P6-ESC3-LOS.

Los valores de RSL y FSL pueden ser utilizados para estimar si existe condición de LOS o condición de NLOS entre dos nodos. La Fig. 2.74. muestra el resultado de estimar la condición LOS/NLOS. En donde el análisis teórico indicaba que siempre hay condición de LOS se puede observar que el dispositivo determinó todo como NLOS. Esto se justifica en la posible presencia de multitrayectoria.

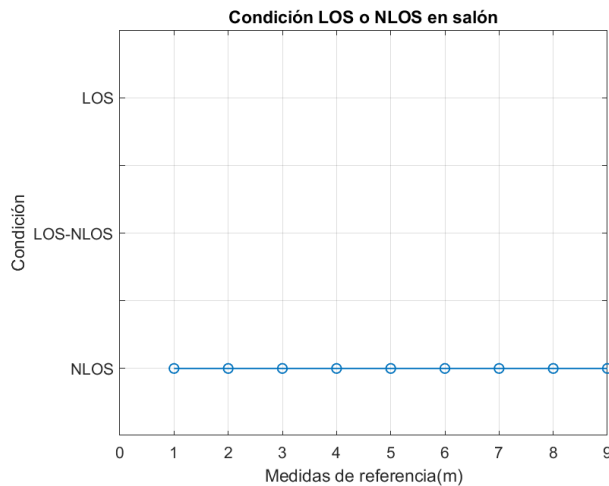


Figura 2.74 Condición de LOS/NLOS para P6-ESC3-LOS.

2.5.3.3.2 Análisis de la Respuesta al Impulso del Canal

En la Fig. 2.75 se muestran los CIR para los primeros 4 m para condición de LOS, diferenciados por colores, en donde se puede apreciar el efecto de la multitrayectoria en el ESC3.

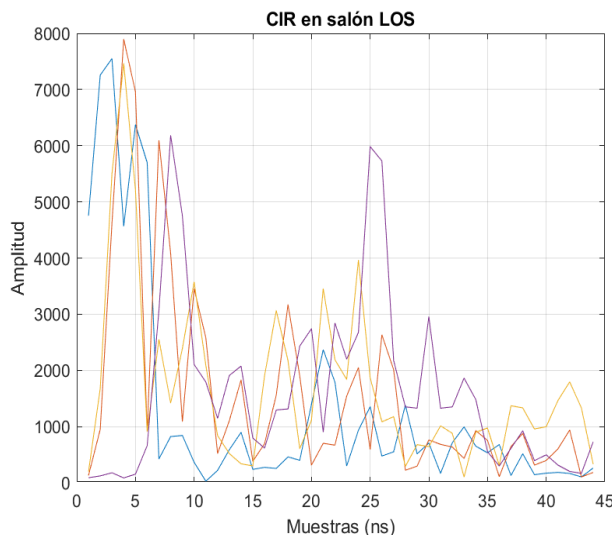


Figura 2.75 Ventana ampliada de la respuesta al impulso del canal con 4 distancias de P6-ESC3-LOS.

En la Fig. 2.76 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio y del voltaje promedio del dispositivo en cada marca de referencia. Se concluye que las variaciones son aceptables y en ningún momento de la prueba se alcanzaron valores críticos de voltaje o temperatura.

2.5.3.4 Validaciones Extras

Se realizaron algunas pruebas adicionales en la búsqueda de verificaciones y respuestas de valores logrados por los parámetros en las diferentes situaciones de los escenarios de verificación considerados. A continuación, se presentan unas pruebas complementarias:

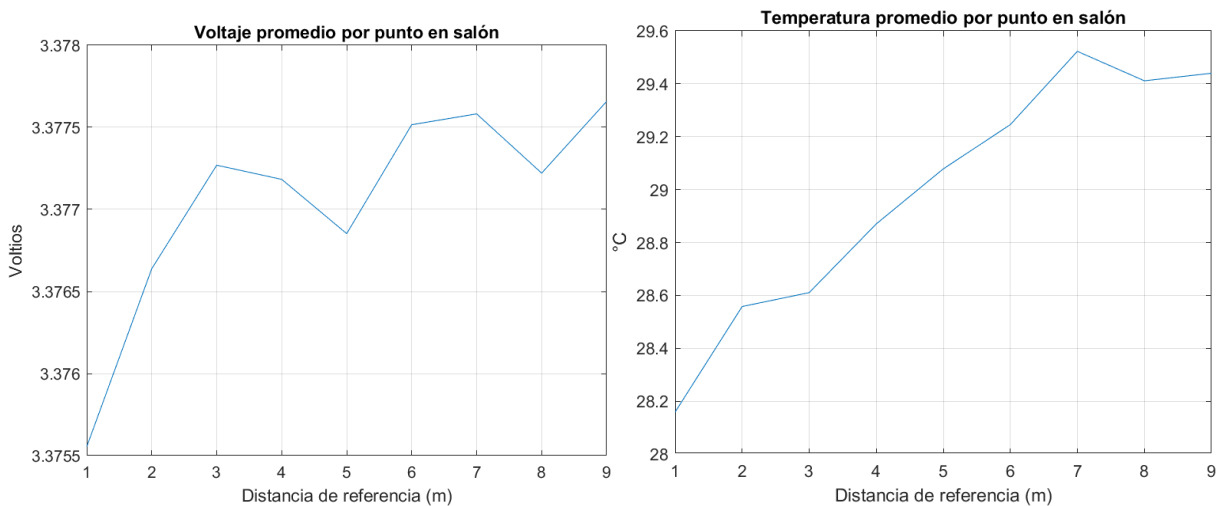


Figura 2.76 Voltaje y temperatura contra distancia para P6-ESC3-LOS.

2.5.3.4.1 Entre Muros

En esta prueba aislada se busca comprobar la capacidad de los dispositivos *DWM1001* para penetrar paredes gruesas. En la Fig. 2.77 se muestra la distribución de los dispositivos. El resultado de la prueba fue nulo, en tanto que en ningún momento se logró establecer una comunicación entre ambos dispositivos.

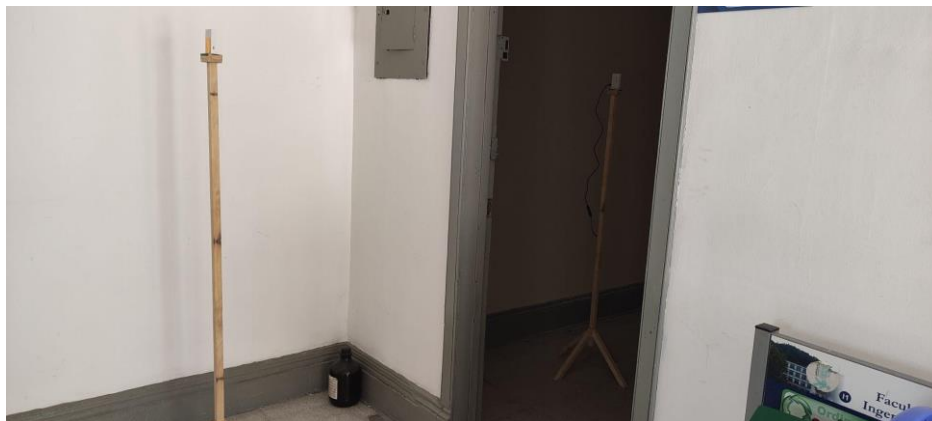


Figura 2.77 Disposición de los dispositivos para prueba entre muros.

2.5.3.4.2 En Escalera (entre pisos)

Para esta prueba aislada se ubicó el transmisor en el inicio de unas escaleras y el receptor al final. La distancia entre el NT y el NR fue de 4.10 m y se tomaron 100 medidas. En la Fig. 2.78 se muestra el comportamiento del error y su relación respecto de la media. Se destaca que el error absoluto no supere los 30 cm.

2.5.3.4.3 Puerta de Obstáculo

Para esta prueba aislada se busca determinar el efecto que genera una puerta de madera en la comunicación entre los dispositivos. En la Fig. 2.79 se presenta la distribución de los dispositivos y las condiciones del escenario.

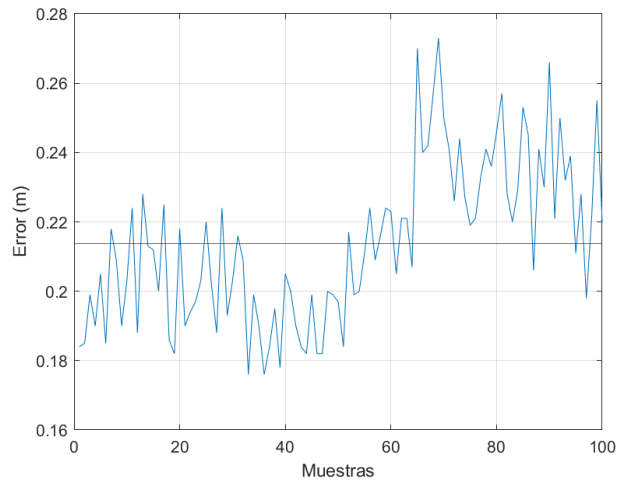


Figura 2.78 Error de medida en escaleras.



Figura 2.79 Prueba del efecto de una puerta.

En la Fig. 2.80 se presenta el comportamiento del error con la puerta abierta y con la puerta cerrada. De la gráfica se puede observar que el error promedio es menor con la puerta cerrada al igual que presenta una menor desviación estándar.

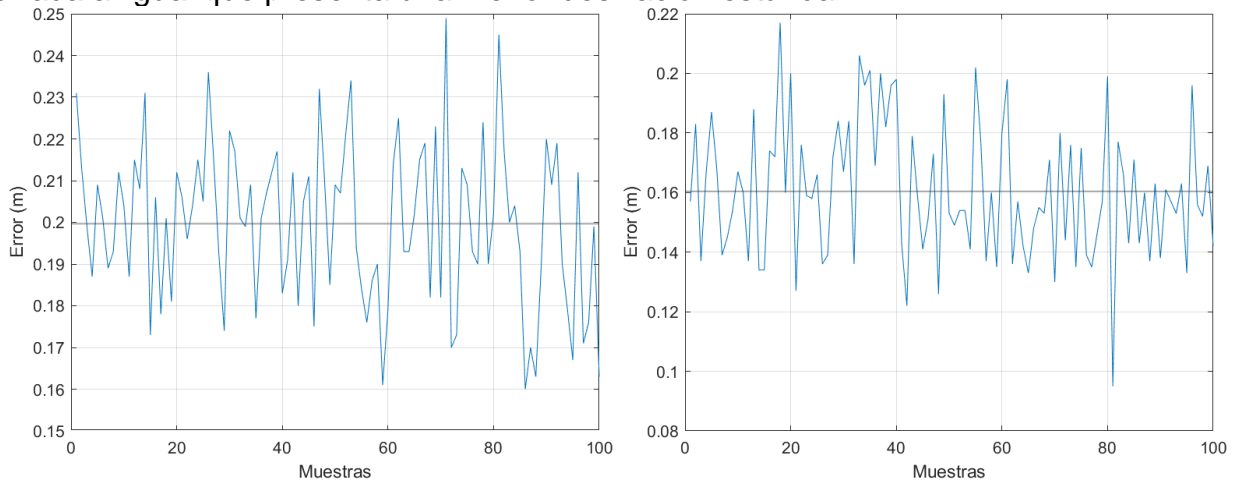


Figura 2.80 Error para puerta abierta y puerta cerrada.

2.5.3.4.4 Distancia Mínima

Con el objetivo de validar el efecto inductivo que pudiesen llegar a tener los dispositivos en su comunicación a una muy corta distancia, el NT y el NR se acercaron a una distancia mínima de 3 cm. En la Fig. 2.81 se muestra el comportamiento de la distancia de error respecto a su media, en la cual el valor promedio es de 5.47 cm.

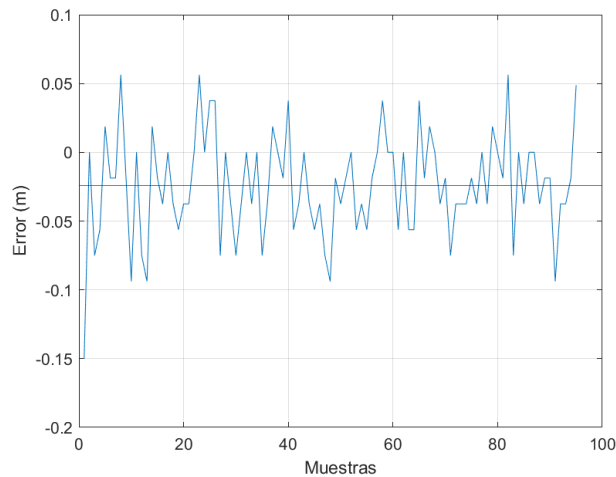


Figura 2.81 Error a 3 cm de separación.

2.5.3.4.5 Prueba Calibrada

Hasta este momento se han realizado todas las pruebas bajo una misma configuración, tanto de canal, frecuencia, longitud de preámbulos, retardos de antena entre otros. Por la cantidad y dependencia entre las variables de configuración de los dispositivos *DWM1001* se sale de los alcances del trabajo de grado generar un flujo de validación de configuración; además, justamente el dispositivo *DWM1001* ha sido certificado para sistemas RTLS de producción bajo la configuración de fábrica. Es por ello, que todas las pruebas se han realizado modificando solamente los valores que imprime y la forma de capturarlos, más no su configuración interna [68]. Como parte aislada se buscó un proyecto abierto basado en los repositorios de Decawave [77]. Este proyecto calibró algunas de las variables de los dispositivos y se enfocó en interiores. En la Fig. 2.82 se muestran los errores por medida para el pasillo usando la configuración calibrada de prueba. Dado que las modificaciones a la configuración por defecto de los dispositivos fueron muchas y distribuidas a lo largo del código no se incluyen en el documento, los archivos están disponibles en el repositorio público [68].

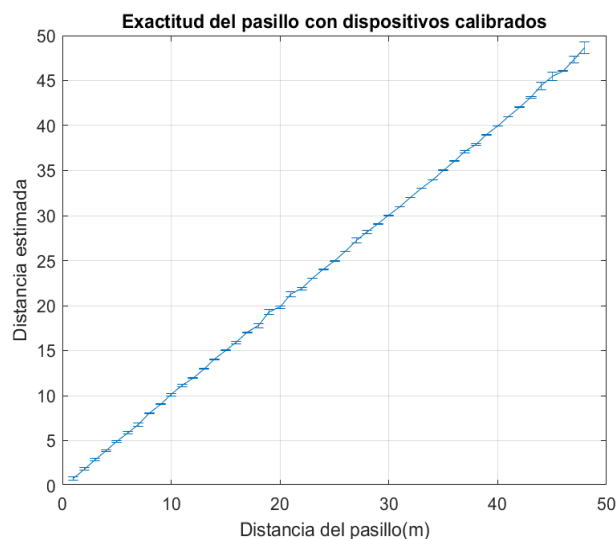


Figura 2.82 Prueba calibrada en pasillo.

En la Tabla 2.19 se resumen los datos obtenidos para esta prueba. La característica principal consiste en apreciar que se alcanzó un error promedio muy bajo en comparación con otras pruebas. Además, el error máximo es inferior a 1 m.

Máximo error (m)	0.6497
Mínimo error (m)	0.00251
Máxima desviación estándar (m)	0.14263
Mínima desviación estándar (m)	0.01205
Error promedio (m)	0.0409
Desviación estándar (m)	0.1763

Tabla 2.19 Resultados para prueba calibrada.

En la Fig. 2.83 se muestra el comportamiento de la potencia de recepción y el error promedio. De la gráfica se puede observar cómo bajo otra configuración diferente esta vez sí se presentó un mayor decremento en el nivel de potencia en recepción, con un mayor exponente de propagación.

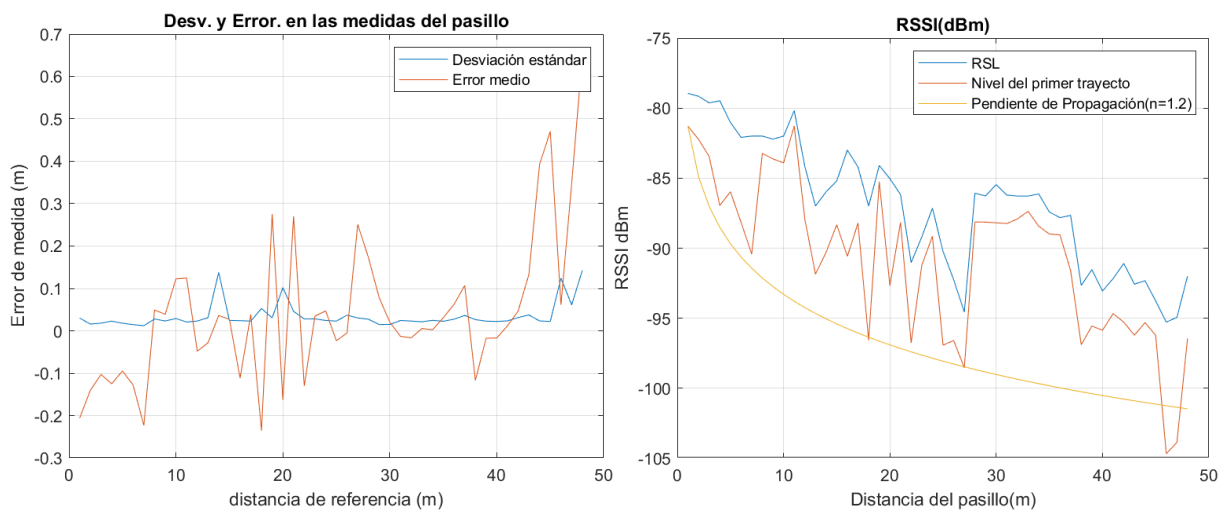


Figura 2.83 Desviación estándar y nivel de potencia en recepción para distancia mínima.

Lamentablemente, al utilizar dicha configuración en un escenario de exteriores y en el escenario del salón presentó un desempeño similar o peor a la configuración de base del fabricante. Por lo tanto, al no tener la misma certificación y respaldo que cuenta la configuración por defecto de Decawave, se decidió seguir utilizando la misma para el resto de las pruebas.

2.5.4 Comparaciones

Finalmente, en la Tabla 2.20 se presenta una comparación entre las pruebas realizadas en los tres escenarios. A partir de la información mostrada se procede a sacar algunas conclusiones: la primera, solo en exteriores se alcanzó el mayor error, y hubo puntos de

medida en los cuales se perdió la comunicación. El mínimo error fue similar en todas las pruebas. En todos los casos, los mejores resultados a nivel de exactitud se dan cuando hay condición LOS. Por otro lado, los menores valores de error de distancia promedio se dieron en los dos escenarios de interiores en condición LOS.

Variable	ESC1		ESC2		ESC3
	LOS	NLOS	LOS	NLOS	LOS
Máximo error (m)	1.4472	1.4588	0.64267	0.71989	0.35788
Mínimo error (m)	0.074404	0.1199	0.17188	0.18799	0.13414
Máxima desviación estándar (m)	0.039797	0.043357	0.17289	2.7568	0.036293
Mínima desviación estándar (m)	0.022971	0.023347	0.020802	0.0248	0.021272
Máximo RMSE (m)	1.4474	1.4592	0.64435	2.7526	0.35921
Mínimo RMSE (m)	0.080747	0.123	0.1748	0.28446	0.1368
Error promedio (m)	0.55279	0.53387	0.33788	0.46409	0.27877
Desviación estándar promedio (m)	0.02994	0.033072	0.037324	0.16224	0.02709

Tabla 2.20 Comparación de medidas para los tres escenarios.

2.6 SIMULACIONES

Luego de seleccionar los espacios de prueba, para estimar y validar el alcance de los dispositivos, se utilizaron las herramientas AutoCAD LT 2022 para generar los planos, y Wireless InSite para construir los diferentes escenarios y obtener la cobertura. Para lo anterior, fue necesario tomar las medidas de cada uno de los escenarios considerados y de otros elementos como puertas, ventanas y columnas. Una vez se construyó el plano, la imagen se exportó a Wireless InSite. Se recomienda definir con precisión el espaciamiento de píxeles, ya que este valor indica, qué tanto escalar la imagen a la medida correspondiente. Para determinar este valor, se debe dividir el valor de una medida de longitud real del escenario entre las dimensiones en píxeles asignados a esa medida en la imagen del plano. Una vez se construye el escenario, es posible editar sus características, incluso crear materiales y añadir otros elementos. Luego, se selecciona el área de estudio, en la cual se ubica y configura el elemento transmisor y los puntos de recepción. Finalmente, se establece la frecuencia (6.4 GHz) y el ancho de banda (500 MHz) correspondiente a señales UWB.

De la Fig. 2.84, Fig. 2.85 y Fig. 2.86 se observa cómo la potencia decae en función de la distancia, y que a distancias de 50 m todavía se logra comunicación, ya que la potencia de la señal está por encima de la sensibilidad del dispositivo. En la Tabla 2.21 se comparan los resultados de la simulación para los tres escenarios considerados en las pruebas. De la

tabla se tiene que, para los escenarios interiores, en algunas partes se observa un aumento en la intensidad de la señal, lo cual se debe a la suma coherente de múltiples reflexiones de la señal. También se puede observar que la dispersión del retardo es baja para cada escenario, en especial para la cancha de fútbol donde la multitrayectoria es menor.

CARACTERÍSTICA	CANCHA (min - max)		PASILLO (min - max)		SALÓN (min - max)	
	Dispersión del retardo	0.279 ps	61.48 ps	4.668 ns	32.57 ns	4.21 ns
Pérdidas de propagación	49 dB	82.6 dB	49.8 dB	85.2 dB	47.1 dB	73.2 dB
Potencia RX	-95.3 dBm	-61.7 dBm	-79.9 dBm	-62.5 dBm	-85.9 dBm	-59.8 dBm

Tabla 2.21 Resultados de la simulación para los tres escenarios.

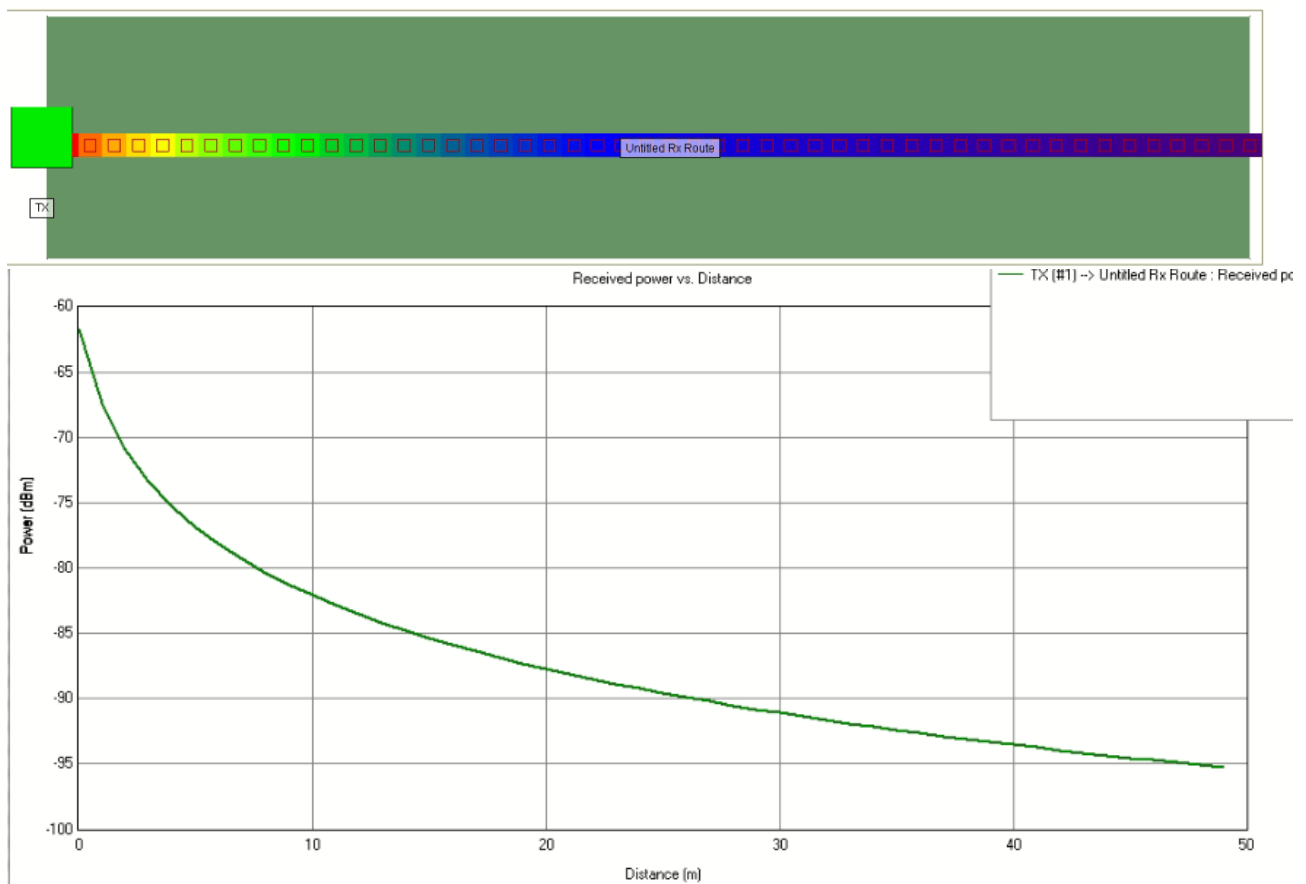


Figura 2.84 ESC1 - Potencia RX contra distancia.

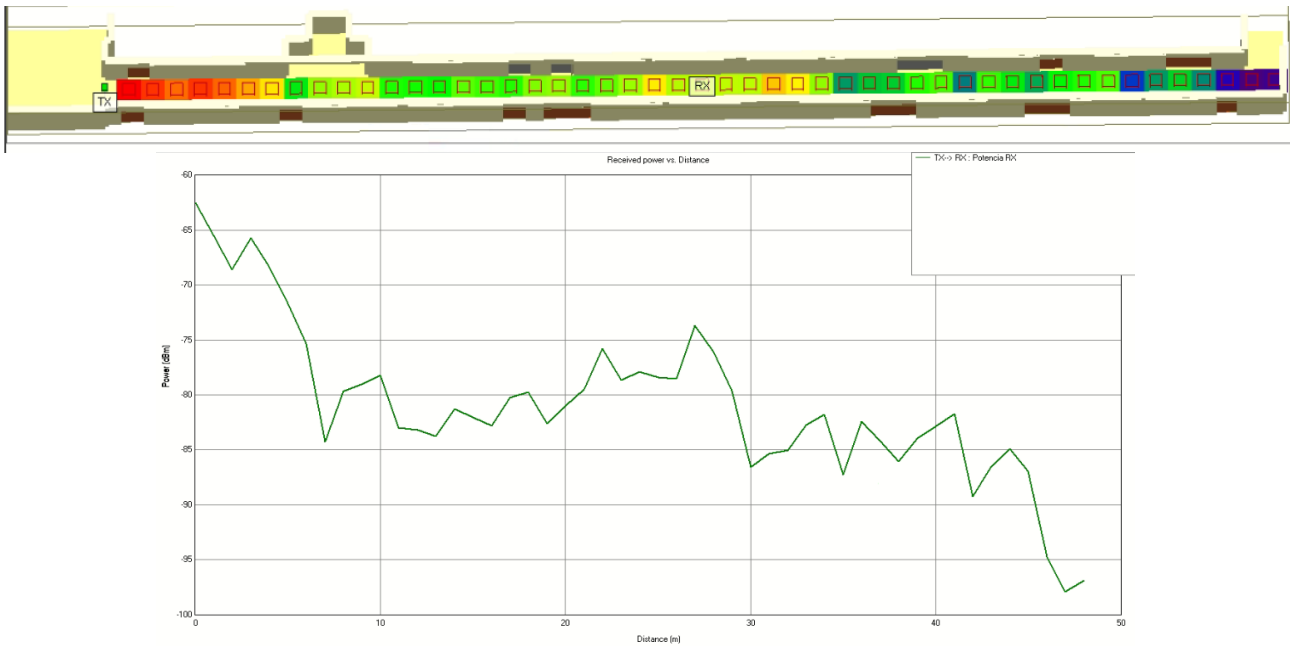


Figura 2.85 ESC2 - Potencia RX contra distancia.

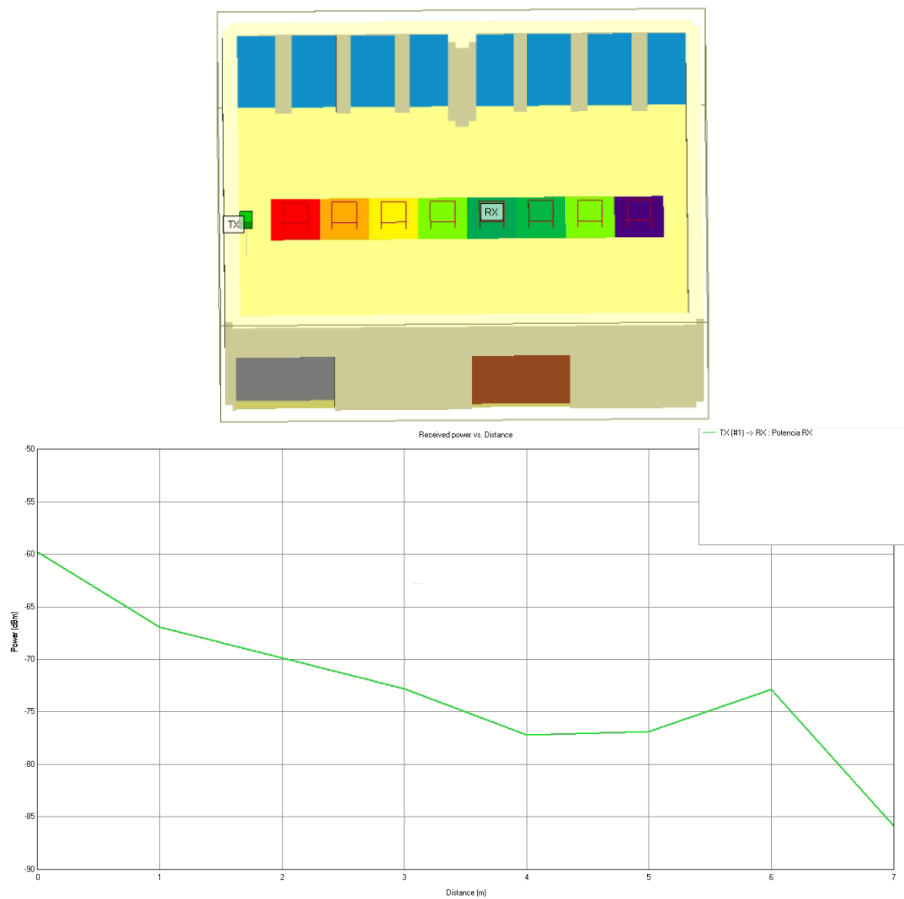


Figura 2.86 ESC3 - Potencia RX contra distancia.

Capítulo 3 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

El sistema prototipo de posicionamiento en interiores propuesto utilizó la técnica de multilateración para estimar la posición del nodo móvil. De acuerdo con lo expuesto en el Capítulo 2 se seleccionó la métrica de TWR, la cual es compatible con la técnica de multilateración/trilateración para estimar la posición del nodo móvil. En este capítulo se aborda el análisis del desempeño a nivel de exactitud del sistema prototipo de posicionamiento en interiores y de rastreo en una trayectoria específica. A continuación, se mencionan detalles de la implementación de la técnica de multilateración/trilateración, el diseño considerado para el sistema de posicionamiento y se detallan con mayor especificidad las etapas 3 y 4 del plan de pruebas del Capítulo 2.

3.1 TÉCNICA DE TRILATERACIÓN/MULTILATERACIÓN

Esta técnica requiere de al menos tres nodos ancla o de referencia en posiciones conocidas en un plano (Dos dimensiones) y por lo menos de cuatro nodos ancla o de referencia en un espacio (Tres dimensiones), para estimar la posición del nodo móvil [82-84]. En la Fig. 3.1 se muestra la representación geométrica de la técnica [86]. Es recomendable que los nodos ancla o de referencia no estén ubicados en puntos colineales entre sí [85]. Existen dos enfoques para determinar la posición del nodo móvil por multilateración: un enfoque geométrico basado en un algoritmo geométrico, usado para trilateración (3 anclas); y un enfoque estadístico basado en un algoritmo de mínimos cuadrados [85].

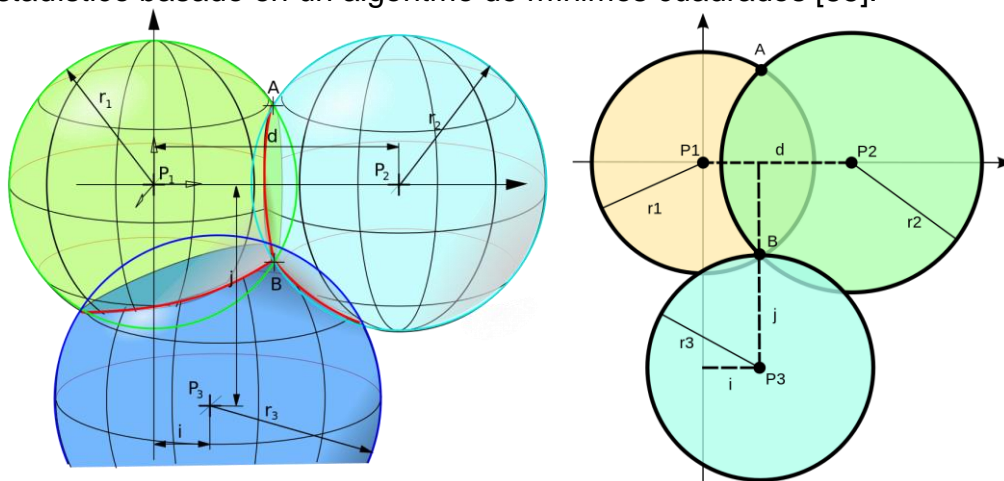


Figura 3.1 Geometría de trilateración.

La técnica de trilateración es a veces confundida con la técnica de multilateración; sin embargo, ambas técnicas se basan en el establecimiento de ecuaciones por la determinación de la distancia entre los nodos ancla y el nodo móvil; donde la técnica de trilateración utiliza solo tres nodos anclas para determinar la posición del nodo móvil en un plano. Si la multilateración se basa en las medidas de distancia directa se conoce como multilateración de rango verdadero y genera circunferencias; si la multilateración se basa en la diferencia de distancias entre nodos ancla se conoce como multilateración de pseudo-rango basada en la métrica TDOA y en la estimación de la posición por solución de curvas

hiperbólicas [87-88]. En la técnica de trilateración, si las distancias del nodo móvil a los nodos ancla o de referencia son exactas, entonces, la posición del nodo móvil corresponde a la intersección de los círculos. Si las distancias son inexactas o con un error de medida, entonces, la posición del nodo móvil en la mayoría de los casos se encuentra dentro de una región de intersección [83]. En el Capítulo 1 se presentó la teoría simplificada de las ecuaciones para la técnica de trilateración. La expresión matemática para determinar la posición del nodo móvil en dos dimensiones, haciendo uso de la distancia del nodo móvil al nodo ancla i , con $i \in \mathbb{N}$, y basado en la técnica de trilateración se presenta en (3.1). Para el desarrollo matemático se sustrae de (3.1) la misma ecuación, pero evaluada en el nodo de referencia 1 y se presenta en (3.2). La expresión final se puede expresar de forma matricial por Cramer en la (3.3). Debido al error intrínseco de las medidas la solución matricial que se muestra en la (3.4) no es posible u óptima [82][84][88].

$$d_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 \quad (3.1)$$

$$2x(x_i - x_1) + 2y(y_i - y_1) = d_1^2 - d_i^2 + x_i^2 + y_i^2 - x_1^2 - y_1^2 \quad (3.2)$$

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} d_1^2 - d_2^2 + x_2^2 + y_2^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ d_1^2 - d_3^2 + x_3^2 + y_3^2 - x_1^2 - y_1^2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

De acuerdo con la literatura [82][84-85][88-96] el error de trilateración surge por el error en la medición de distancias, el mapeo de puntos de referencia, y se ve afectado en gran medida por la disposición geométrica de los nodos ancla y el nodo móvil [88]. Como resultado, los círculos o esferas involucradas pueden no intersectarse en la posición real del nodo móvil, o incluso no intersectarse en absoluto. Por lo cual, es necesario determinar una "mejor aproximación" mínimos cuadrados, mínimos cuadrados ponderados, centroide, o propuestas nuevas [88]. Finalmente, debido a las limitaciones de la técnica geométrica de trilateración se suele utilizar el enfoque estadístico de multilateración por Mínimos Cuadrados no Lineales (NLS, *Non Linear Squares*). Por lo cual, para el sistema prototipo de posicionamiento en interiores se implementó un enfoque no geométrico basado en una regresión no lineal por mínimos cuadrados. Para los cálculos matemáticos se utilizó la herramienta *fitnlm* de Matlab. En el Anexo A se comparan tres enfoques distintos basados en multilateración en donde se observa como la opción escogida fue la que mejores resultados presentó.

3.2 DEFINICIÓN PLAN DE PRUEBAS EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO

La Fig. 3.2 muestra el modelo general del sistema prototipo de posicionamiento basado en UWB, en el cual el nodo móvil (NM) intercambia mensajes con los nodos anclas(A) o de referencia, lo que le permite estimar la distancia del NM con respecto a cada nodo ancla o de referencia. Posteriormente, el NM transmite la información sobre las distancias estimadas a cada nodo ancla a una computadora para el procesamiento (CP) para estimar la posición con la técnica de trilateración.

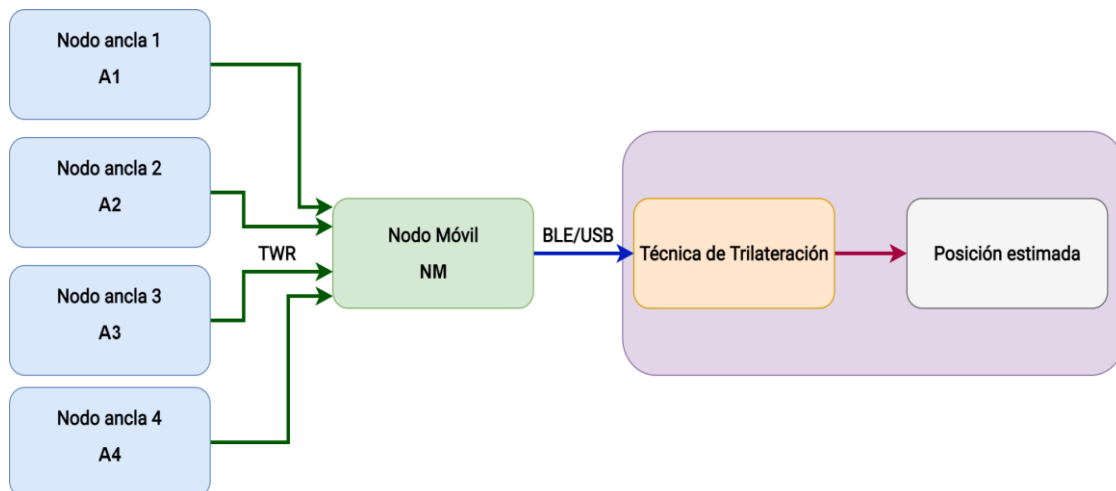


Figura 3.2 Modelo general del sistema prototipo de posicionamiento en interiores.

Para analizar el desempeño a nivel de exactitud del sistema de posicionamiento prototipo se utilizaron los escenarios ESC1 y ESC3, tanto para conocer los desempeños individuales como para compararlos entre ellos. Por lo tanto, dado que el ESC1 de exteriores cuenta con una superficie mayor que la del escenario ESC3, el escenario ESC1 se limitó a las dimensiones del ESC3, con el objeto de unificar las áreas de los escenarios de prueba. En la Tabla 3.1 se resumen las características de los escenarios.

Característica	ESC1	ESC3
Área marcada	54 m2	54 m2
Puntos de referencia	66	66
Tipo de escenario	Exterior-cancha	Interior-salón
Tipo de marcas de referencia	Chuzos de madera	Pegatinas

Tabla 3.1 Características de los escenarios.

La Tabla 3.2 muestra las coordenadas de los cuatro nodos anclas utilizados en las pruebas de desempeño. De acuerdo con la literatura [97-100] y la recomendación del fabricante de los dispositivos: Decawave, los nodos ancla se ubicaron en las esquinas de los escenarios buscando cubrir todas las áreas. En el escenario ESC3 se tuvo las siguientes condiciones: el nodo A1 cerca de una puerta metálica; el nodo A2 cerca a la pared; y los nodos A3 y A4 cerca a ventanales. El ESC1 al ser en campo abierto no contó con objetos cerca de los nodos ancla. Para el desarrollo de las pruebas el nodo móvil se ubicó en un trípode con

altura 1.3 m. En el Anexo B se muestra el resultado de variar la posición de los nodos anclas en donde la posición que mejores resultados presentó fue la distribución con los nodos anclas en las esquinas.

Ancla	X (m)	Y (m)	Z (m)
A1	0	0	1.5
A2	9	0 para ESC1 0.01 para ESC3	1.5
A3	9	6	1.5
A4	0	6	1.5

Tabla 3.2 Disposición de los nodos anclas en los escenarios ESC1 y ESC3.

Como parte de la preparación para las pruebas, los dos escenarios fueron despejados, en particular, del escenario ESC3 se retiraron todas las sillas y el escritorio del salón. Se utilizó una aplicación móvil para guardar registro de señales de radiofrecuencia presentes durante la prueba. En la Fig. 3.3 se muestran las evidencias y la disposición de la puerta. En las pruebas en el ESC3 se utilizaron tres tipos de alimentación disponibles: los nodos A1 y A2 tenían una batería de 3.7v; el nodo A3 un banco de energía de 5v; y el nodo A4 un adaptador de 5v, tal como se muestra en la Fig. 3.4.

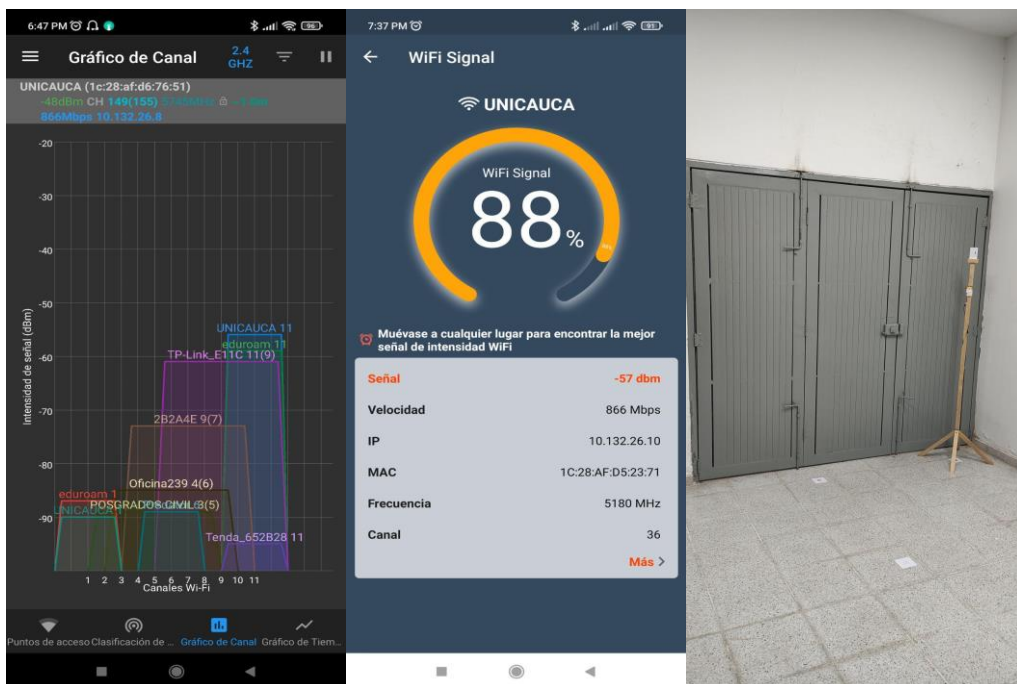


Figura 3.3 Condiciones del escenario ESC3.

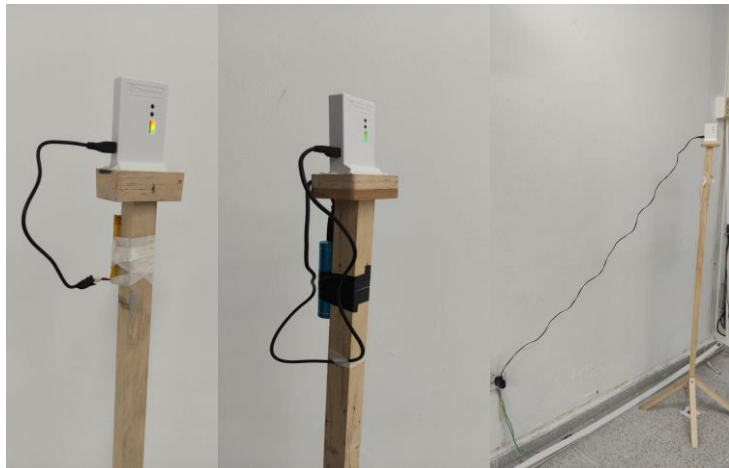


Figura 3.4 Fuentes de alimentación utilizadas.

Para la realización de las pruebas de desempeño en los escenarios ESC1 y ESC3 se utilizó la misma configuración en los dispositivos que para las pruebas de validación del Capítulo 2. En la Fig. 3.5 se muestra la aplicación utilizada para la captura de las medidas. Esta aplicación fue desarrollada por Decawave. Así mismo, los dispositivos *DWM1001* fueron configurados con el software Pila de Redes y Posicionamiento (PANS, *Positioning and Networking Stack*), ejecutable suministrado por Decawave. Igualmente, se habilitó al nodo móvil la funcionalidad de calcular su posición(3D), para comparar la exactitud lograda por el algoritmo interno que usa el dispositivo respecto al definido para el sistema prototipo de posicionamiento del trabajo de grado. Algunas de las características de PANS son funcionamiento con la métrica TWR, encriptación AES para los paquetes UWB; habilitación de los periféricos Nordic nRF52832; algoritmo interno para posicionamiento; conexión BLE con la aplicación DRTLManager; y dispositivos configurables como nodos anclas, nodos móviles o nodos *Gateway*. Finalmente, en cada marca de referencia se tomaron 200 medidas aproximadamente. Para diferenciar el posicionamiento por el algoritmo de Decawave del algoritmo propuesto, se identificaron como AD y AP, respectivamente. Se decidió utilizar una nomenclatura para identificar las pruebas, por ejemplo, la nomenclatura D1-ESC1-LOS, donde, D indica Desempeño y de esa manera se puedan diferenciar de las pruebas de validación del Capítulo 2; ESC indica el escenario de prueba; y LOS la presencia de un obstáculo. Posteriormente se define la forma de implementar la obstrucción.

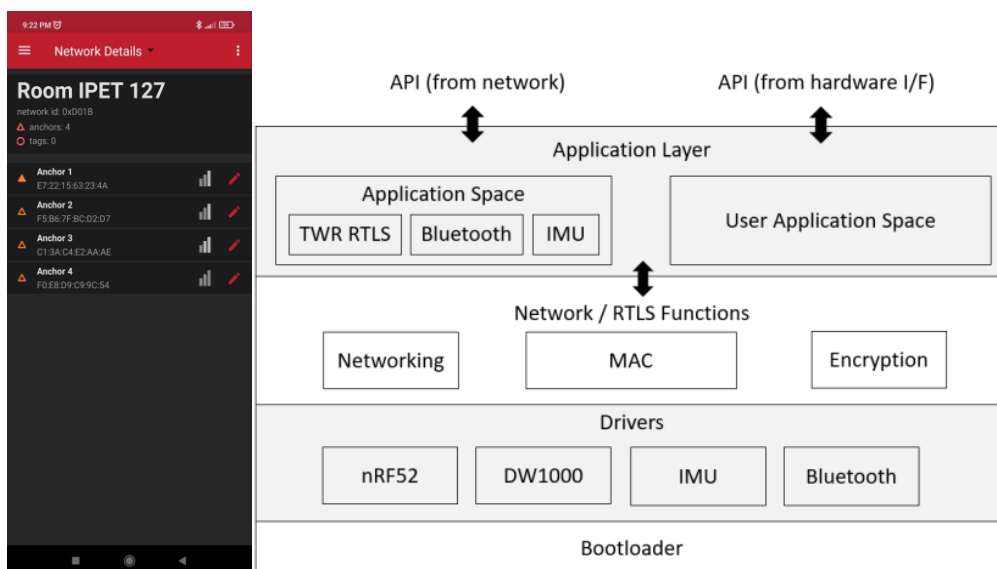


Figura 3.5 Aplicación Android DRTLManager.

3.3 PRUEBA DE DESEMPEÑO EN ESC1

Para la ejecución de la prueba de desempeño se procedió inicialmente a colocar las marcas de referencia y construir el *ground truth* según lo definido en el plan de pruebas general del Capítulo 2. Después, se ubicaron los nodos anclas según las coordenadas de la Tabla 3.2 y se realizaron las medidas. Los datos almacenados contienen la posición (3D) estimada por el algoritmo interno del dispositivo, las distancias a los 4 nodos anclas, más factores de calidad suministrados por los dispositivos que dan cuenta de la calidad de las distancias y de la posición estimada. La Fig. 3.6 muestra un registro en una marca de referencia, donde, las primeras 3 columnas son los valores de x, y, z en mm estimados por el dispositivo; seguido por el factor de calidad que para el caso de la figura es 82, donde 0 es lo mínimo y 100 lo máximo, lo cual indica una medida confiable; y finalmente, separados por punto y coma se encuentran el identificador del nodo, la distancia en mm y el factor de calidad. Para la figura se tienen cuatro nodos anclas identificados por 1028, 1DBF, 151F, 162E.

11,989,1171,82;1028,901,100;1DBF,4806,100;151F,8901,100;162E,10171,100

Figura 3.6 Registro de prueba en escenario ESC1.

Los resultados de las pruebas de desempeño en el escenario ESC1 se separaron en dos grupos. En el primer grupo (D1-ESC1-LOS) se organizaron todas las coordenadas (x, y) calculadas por AD; y en el segundo grupo (D2-ESC1-LOS) se organizaron las coordenadas (x, y) calculadas por AD.

3.3.1 Ejecución Prueba de Desempeño D1-ESC1-LOS

La Fig. 3.7 muestra el resultado de graficar las marcas de referencia y las posiciones estimadas por AD. Se puede apreciar que la gran mayoría de posiciones se encuentran muy cerca de su posición real.

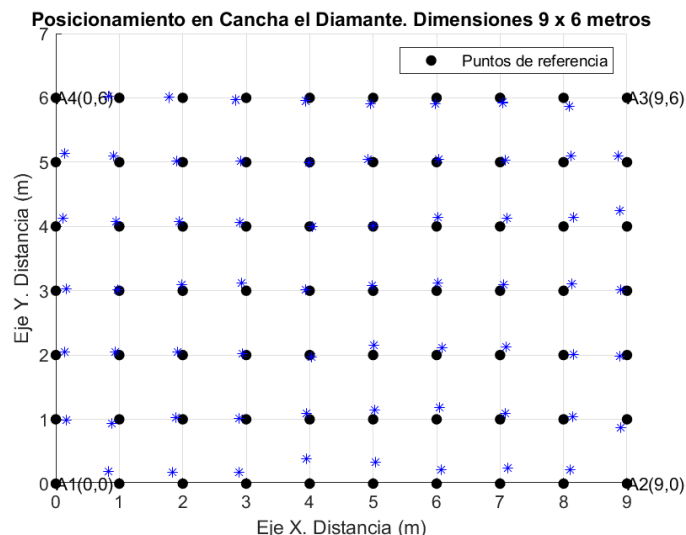


Figura 3.7 Resultados de posicionamiento en D1-ESC1-LOS.

La Fig. 3.8 muestra un mapa de calor con los errores de cada posición. Los errores se calcularon empleando (3.8), donde, (x_i, y_i) representa la coordenada de la marca de referencia y (x_j, y_j) representa la coordenada estimada de la posición estimada. A partir de los resultados, solo dos posiciones presentan un error mayor a 25 cm; y las posiciones en

los bordes horizontales presentan mayores errores que las posiciones en la parte derecha del escenario. Igualmente, en las esquinas, donde están los cuatro nodos anclas, se presenta un error cero para fines de presentar la gráfica con los puntos completos.

$$error = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \tag{3.8}$$

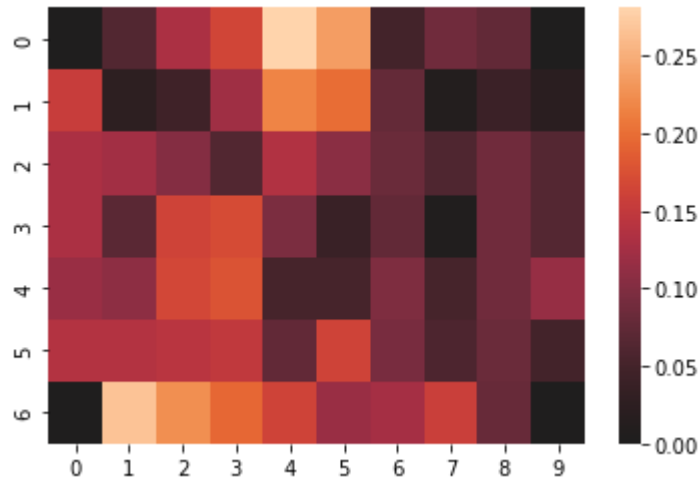


Figura 3.8 Mapa de calor de los errores en D1-ESC1-LOS.

Como parte de la ejecución de esta prueba se recorrieron las marcas de referencia de forma secuencial, desde la posición inicial (0,1) hasta la posición (9,5) procurando seguir un mismo patrón columna por columna, fila por fila como se ve en la Fig. 3.9. De esta manera, se puede comparar con mayor facilidad los errores de distancia presentados en el mapa de calor con la Fig. 3.8. De esa forma se evidencia en la figura como hacía el final de las marcas de referencia el error va decreciendo, alcanzando los valores mínimos de error.

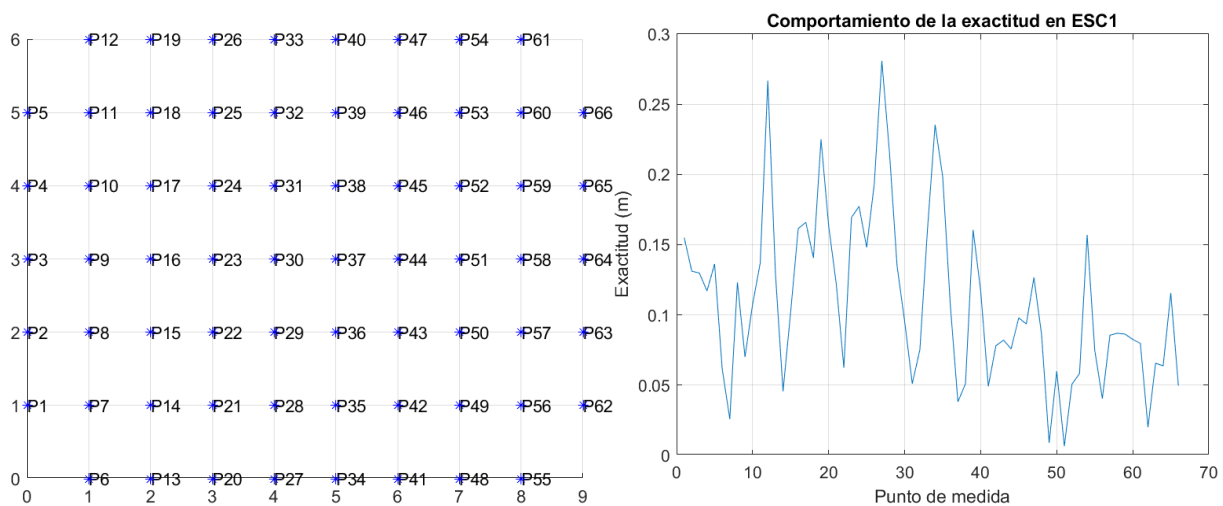


Figura 3.9 Comportamiento de la exactitud entre punto estimado y de referencia en D1-ESC1-LOS.

La Tabla 3.3 muestra los valores mínimo, máximo y promedio de error de distancia. Se observa que para el escenario de exteriores y con la configuración establecida los errores

de distancia son menores a 30 cm y que el error medio es de 11 cm, dando un valor cercano al anunciado por el fabricante de los dispositivos.

Con los resultados obtenidos de la prueba se utilizan todos los errores calculados (22831) para construir el histograma de frecuencias en donde se observa la presencia de más de una distribución, por lo cual se realiza el proceso de identificación y separación de cada subconjunto. En el Anexo E se detalla el procedimiento realizado para el análisis. A partir de los resultados obtenidos se grafica la PDF y CDF para la primera distribución de cada subconjunto utilizando la herramienta de *Distribution Fitter*. Se descarta el uso de la prueba Chi Cuadrado dado que los resultados para las primeras distribuciones de cada subconjunto arrojan cero grados de libertad y un p-valor indefinido. De la Fig. 3.10 se presenta que para los tres subconjuntos de datos la distribución que más se ajusta es GEV.

Variable	Valor
Error medio (m)	0.11018
Máximo error (m)	0.28088
Mínimo error (m)	0.0065765

Tabla 3.3 Resumen del desempeño en D1-ESC1-LOS.

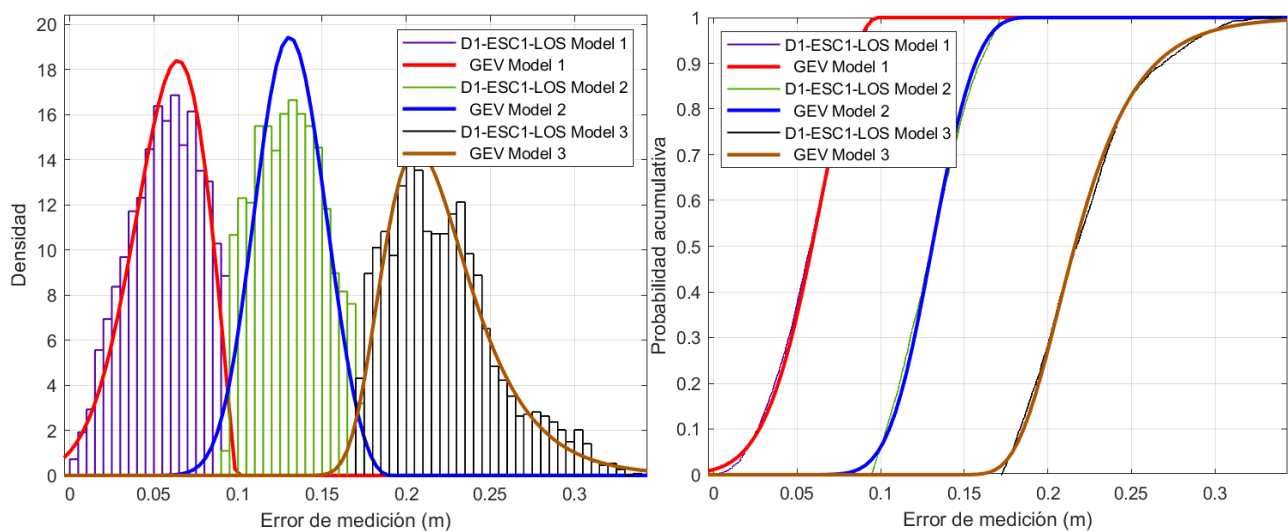


Figura 3.10 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para D1-ESC1-LOS.

3.3.2 Ejecución Prueba de Desempeño D2-ESC1-LOS

En esta sección se utilizaron las distancias a los cuatro nodos anclas calculadas por el nodo móvil durante en ESC1-LOS y se aplicó la técnica de trilateración propuesta (AP). La Fig. 3.11 muestra los resultados obtenidos, en la cual se puede observar que las posiciones estimadas están cercanas a sus marcas de referencia.

La Fig. 3.12 muestra el mapa de calor construido a partir de los errores de posicionamiento. Se evidencia que la distribución de colores tiende más a los valores superiores de la barra

vertical de referencia. Sin embargo, ambas gráficas de calor mantienen la tendencia de que en los bordes del escenario el error es mayor que en el centro de este.

La Fig. 3.13 muestra el comportamiento de la exactitud por punto de medida para la prueba D2-ESC1-LOS. Se evidencia que en esta ocasión existen picos más altos que los valores de la prueba anterior.

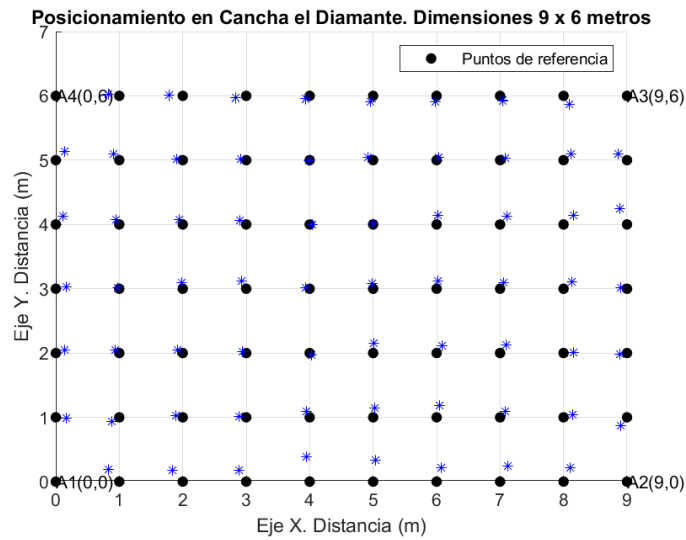


Figura 3.11 Resultados de posicionamiento en D2-ESC1-LOS.

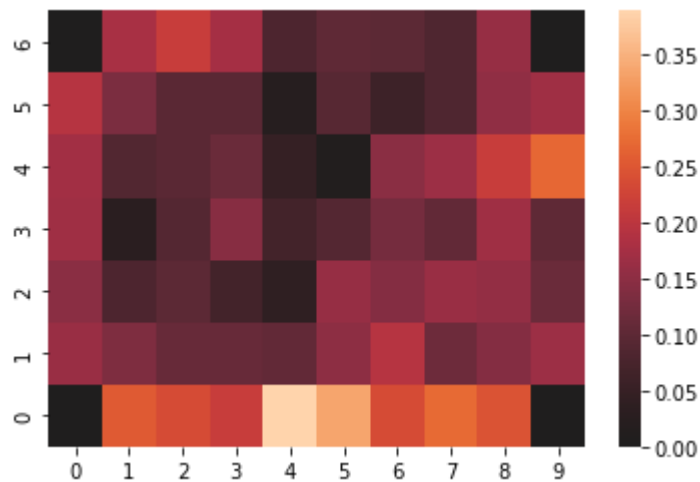


Figura 3.12 Mapa de calor de los errores de distancia en D2-ESC1-LOS.

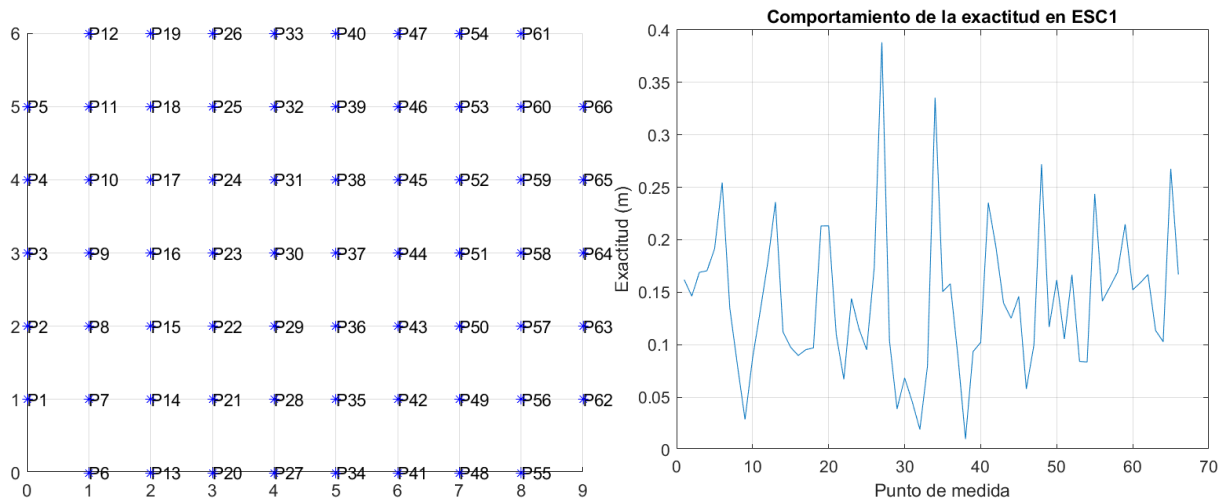


Figura 3.13 Comportamiento de la exactitud entre punto estimado y de referencia en D2-ESC1-LOS.

La Fig. 3.14 muestra de forma conjunta las desviaciones estándar de las medidas realizadas por el nodo móvil a los cuatro nodos ancla en ESC1. Esto se hace con el fin de observar la dispersión de las medidas a cada ancla en cada punto de medida. De la figura se puede observar que a lo largo de la prueba las desviaciones se mantuvieron alrededor de los 3 cm.

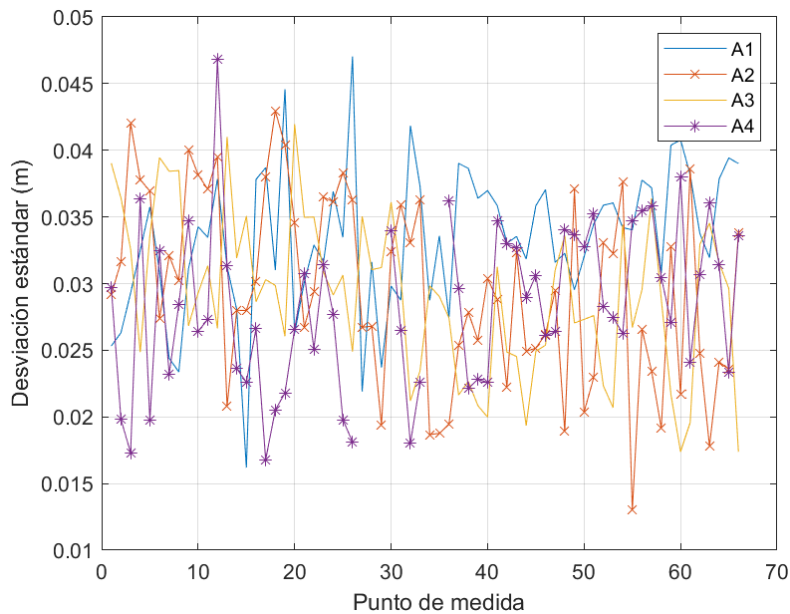


Figura 3.14 Desviación estándar por punto de medida y por ancla en D2-ESC1-LOS.

La Tabla 3.4 muestra las desviaciones estándar promedio por el nodo móvil a cada ancla. Para la construcción de esa tabla se calculó la desviación estándar por nodo ancla, utilizando las medidas de distancia en los 66 puntos de referencia.

Ancla	Desviación estándar promedio (m)
A1	0.03334

A2	0.029631
A3	0.029209
A4	0.028368

Tabla 3.4 Desviación estándar de los nodos ancla.

La Tabla 3.5 muestra la evaluación de desempeño del sistema prototipo de posicionamiento en interiores de la prueba D2-ESC1-LOS, en la cual se puede observar que se mantiene un error de distancia promedio cercano al calculado en la prueba D1-ESC1-LOS. Dicho valor sigue siendo menor al requerimiento funcional propuesto para el sistema de posicionamiento.

Variable	Valor
Error medio (m)	0.14116
Máximo error (m)	0.38823
Mínimo error (m)	0.010108

Tabla 3.5 Resumen del error de la prueba D2-ESC1-LOS

Con el conjunto de datos obtenido de todos los errores de la prueba D2-ESC1-LOS (12259) se construye su histograma de frecuencia, la PDF y la CDF con el fin de analizar el comportamiento estadístico de las medidas realizadas. En el Anexo E se detalla el procedimiento realizado para el análisis. A partir de los resultados se obtiene que las distribución GEV es la que más se ajusta al conjunto de datos. La prueba Chi Cuadrado rechaza las pruebas de hipótesis para las tres primeras distribuciones. En la Fig. 3.15 se presenta la PDF y la CDF haciendo uso de la herramienta *Distribution Fitter*. De la CDF empírica se obtiene una probabilidad de error de distancia igual o menor a 30 cm igual a 0.99.

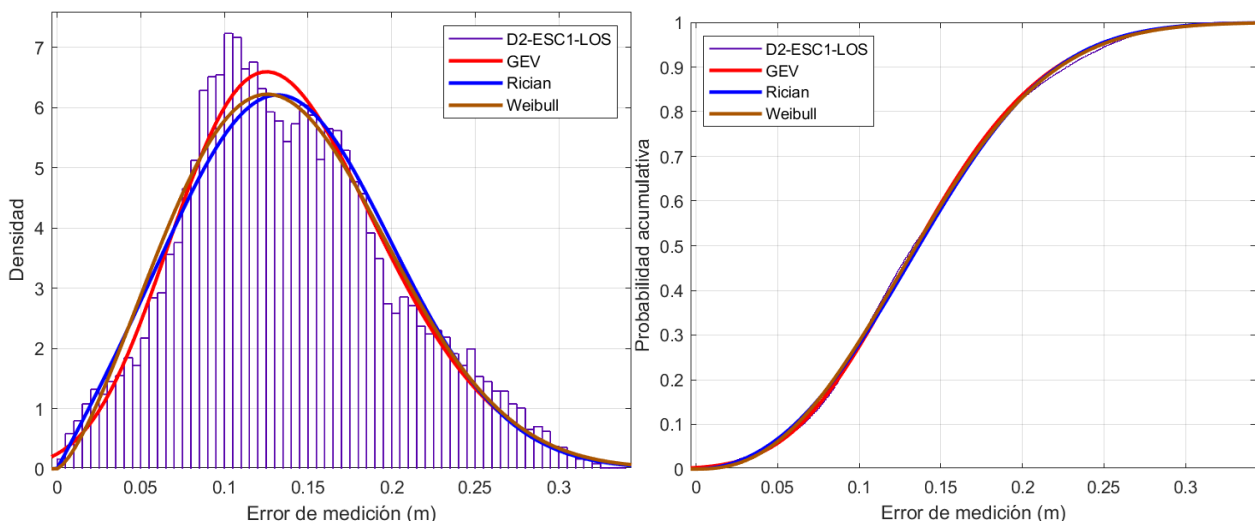


Figura 3.15 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para D2-ESC1-LOS.

3.4 PRUEBA DE DESEMPEÑO EN ESC3

Para la ejecución de las pruebas D3-ESC3-LOS y D3-ESC3-NLOS se procedió inicialmente a colocar las marcas de referencia y construir el *ground truth* según lo definido en el plan de pruebas general del Capítulo 2. Para ello se utilizaron pegatinas en el suelo con ejes de guía para colocar los nodos lo más exactos posibles en las marcas de referencia. Después se ubicaron los nodos anclas según la disposición de la Tabla 3.2 y se realizaron las medidas. Dado que el objetivo fundamental del trabajo de grado es evaluar la exactitud del sistema prototipo de posicionamiento en interiores basado en UWB, entonces, se optó por no incluir en esta sección el análisis de la exactitud generada por los algoritmos internos de los dispositivos (AD). A continuación, se describen las dos pruebas:

3.4.1 Ejecución Prueba de Desempeño D3-ESC3-LOS

Esta prueba se realizó en un salón de clases previamente despejado y con la ubicación definida para los nodos ancla. Esta prueba se realizó en condición LOS entre el nodo móvil y los nodos anclas. La transmisión de los resultados se realizó vía BLE a una aplicación Android que estuvo por fuera del escenario. En la Fig. 3.16 se muestran los resultados de aplicar la técnica de trilateración seleccionada a las distancias calculadas con la métrica implementada en este trabajo de grado, en la cual se puede observar la cercanía de las estimaciones a las posiciones reales.

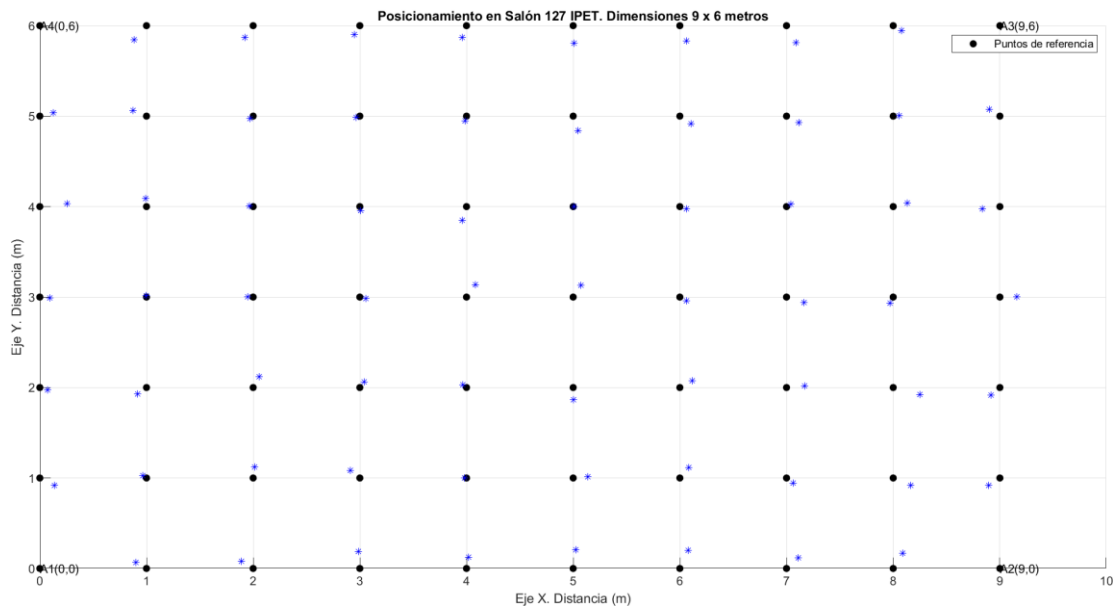


Figura 3.16 Resultados de posicionamiento en D3-ESC3-LOS.

La Fig. 3.17 muestra el mapa de calor construido a partir de los errores de posicionamiento, en la cual se confirma que los errores de distancia se incrementan en los bordes o límites del escenario de prueba.

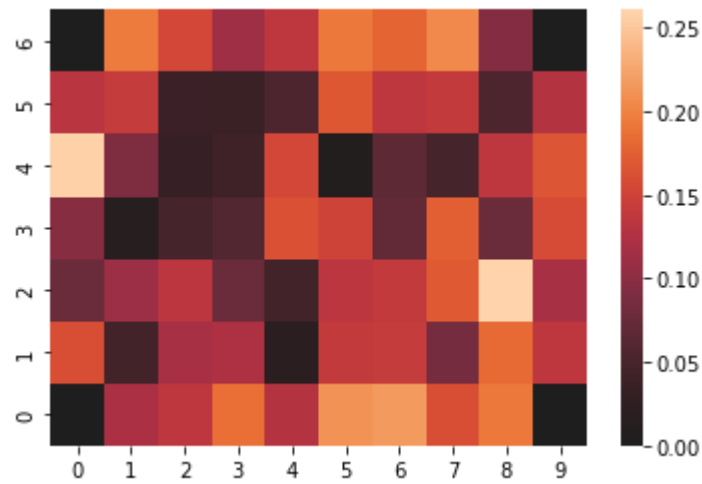


Figura 3.17 Mapa de calor del error de distancia en D3-ESC3-LOS.

La Fig. 3.18 muestra el comportamiento del error por coordenada de referencia o punto de medida para la prueba D3-ESC3-LOS, en el cual se evidencia que las variaciones son mayores o iguales a 10 cm entre medidas; además, los errores máximos se mantuvieron por debajo de los 30 cm.

La Fig. 3.19 muestra de forma conjunta las desviaciones estándar de las medidas realizadas por el nodo móvil a los cuatro nodos ancla. Esto se hace con el fin de observar la dispersión de las medidas a cada ancla en cada punto de medida. En la figura se observa que los nodos A1 y A2 presentan las mayores variaciones de su desviación estándar, siendo los más cercanos a las puertas.

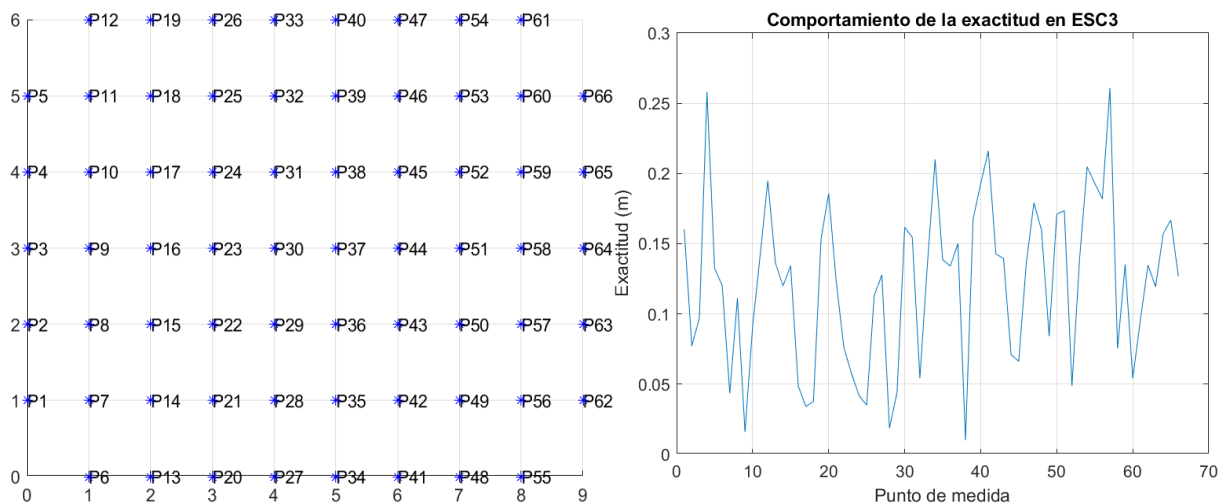


Figura 3.18 Comportamiento del error de distancia por punto de medida en D3-ESC3-LOS.

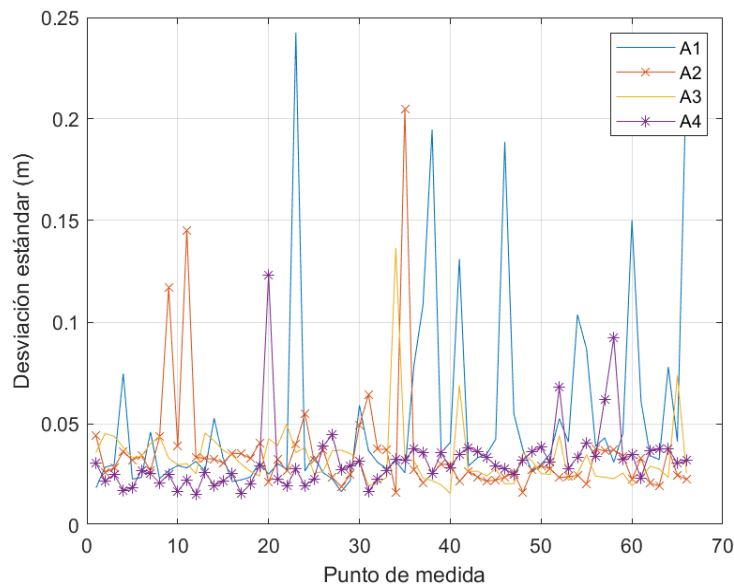


Figura 3.19 Desviación estándar de la distancia de error por punto de medida en D3-ESC3-LOS.

La Tabla 3.6 muestra las desviaciones estándar promedio por el nodo móvil a cada ancla en ESC3. Para la construcción de esa tabla se calculó la desviación estándar por nodo ancla, utilizando las medidas de distancia en los 66 puntos de referencia. Se observa que los promedios fueron mayores que en la prueba D2-ESC1-LOS, que corresponde a un escenario de exteriores.

En la Tabla 3.7 se registran los resultados de evaluación del desempeño del sistema prototipo de posicionamiento en interiores para la prueba D3-ESC3-LOS. De la tabla se puede observar que se mantiene un error de distancia promedio cercano al calculado en la prueba D2-ESC1-LOS. Dicho valor es menor al valor de requerimiento funcional propuestos para el sistema de posicionamiento.

Ancla	Desviación estándar promedio (m)
A1	0.052168
A2	0.036121
A3	0.033229
A4	0.031946

Tabla 3.6 Desviación estándar de los nodos ancla en D3-ESC3-LOS.

Variable	Valor
Error medio (m)	0.12233
Máximo error (m)	0.26086
Mínimo error (m)	0.010002

Tabla 3.7 Resumen del error de la prueba D3-ESC3-LOS.

Con el conjunto de datos obtenido de todos los errores de la prueba D3-ESC3-LOS (13263) se construye su histograma de frecuencia, la PDF y la CDF con el fin de analizar el comportamiento estadístico de las medidas realizadas. En el Anexo E se detalla el procedimiento realizado para el análisis. A partir de los resultados se obtiene que las distribución Rician es la que más se ajusta al conjunto de datos. La prueba Chi Cuadrado rechaza las pruebas de hipótesis para las tres primeras distribuciones. En la Fig. 3.20 se presenta la PDF y la CDF haciendo uso de la herramienta *Distribution Fitter*. De la PDF se observa una probabilidad de error de distancia igual o menor a 30 cm igual a 0.99.

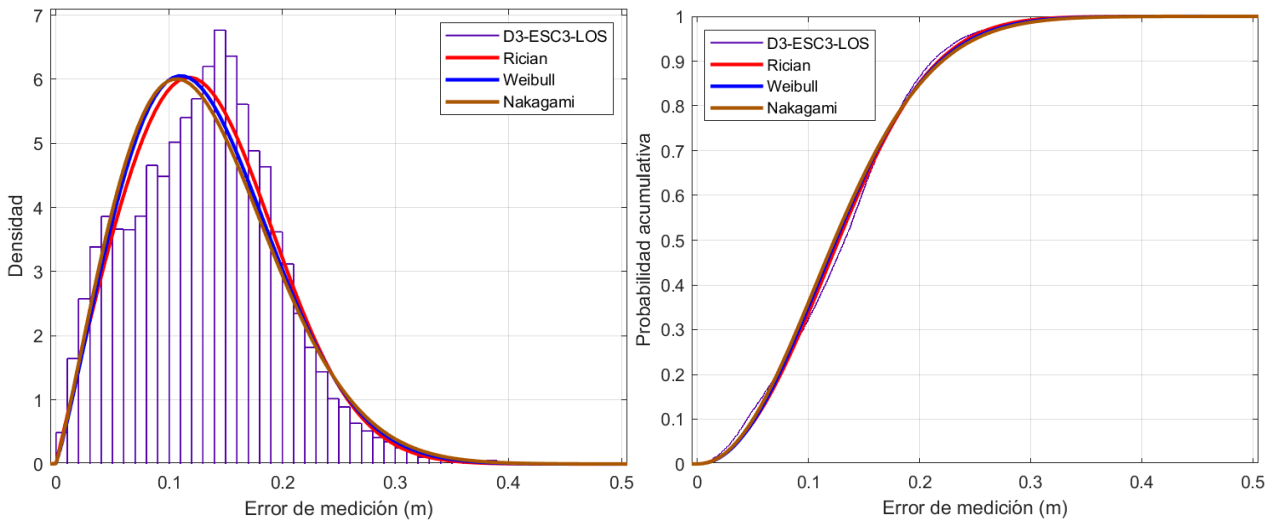


Figura 3.20 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para D3-ESC3-LOS.

3.4.2 Ejecución Prueba de Desempeño D4-ESC3-NLOS

Esta prueba de evaluación de desempeño del sistema prototipo de posicionamiento en interiores se realizó en condición NLOS, donde una persona obstaculiza la condición LOS en línea recta entre el nodo ancla A1 y el nodo móvil en todo momento, manteniendo cercanía al nodo ancla A1. En la Fig. 3.21 se observa la forma de obstrucción que se mantuvo durante la prueba. Esta se realizó con el objetivo de evaluar el efecto de la presencia humana en un solo nodo sobre el desempeño general del sistema de posicionamiento, para lo cual fue considerada la misma persona de las pruebas de validación del Capítulo 2.

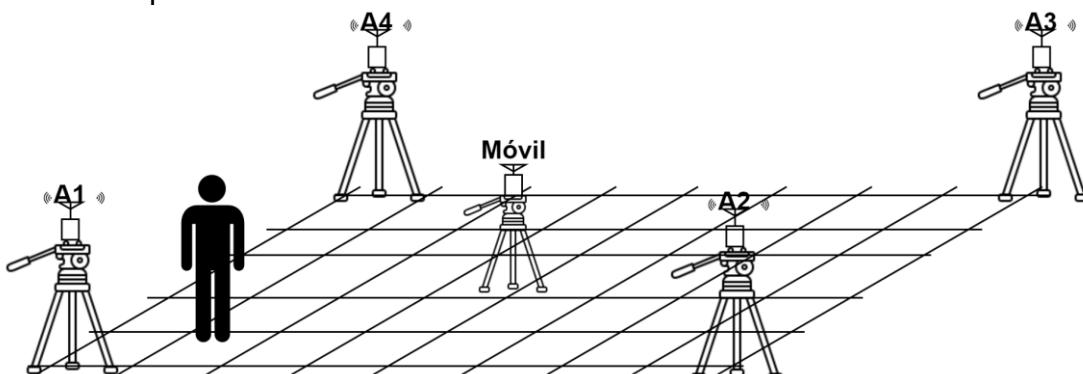


Figura 3.21 Obstáculo respecto al nodo ancla A1.

La Fig. 3.22 muestra los resultados de posicionamiento en la prueba de evaluación de desempeño en el escenario D4-ESC3-NLOS, en la cual se observa una mayor distancia

entre las posiciones estimadas y las marcas de referencia, en especial, en la coordenada (1,0).

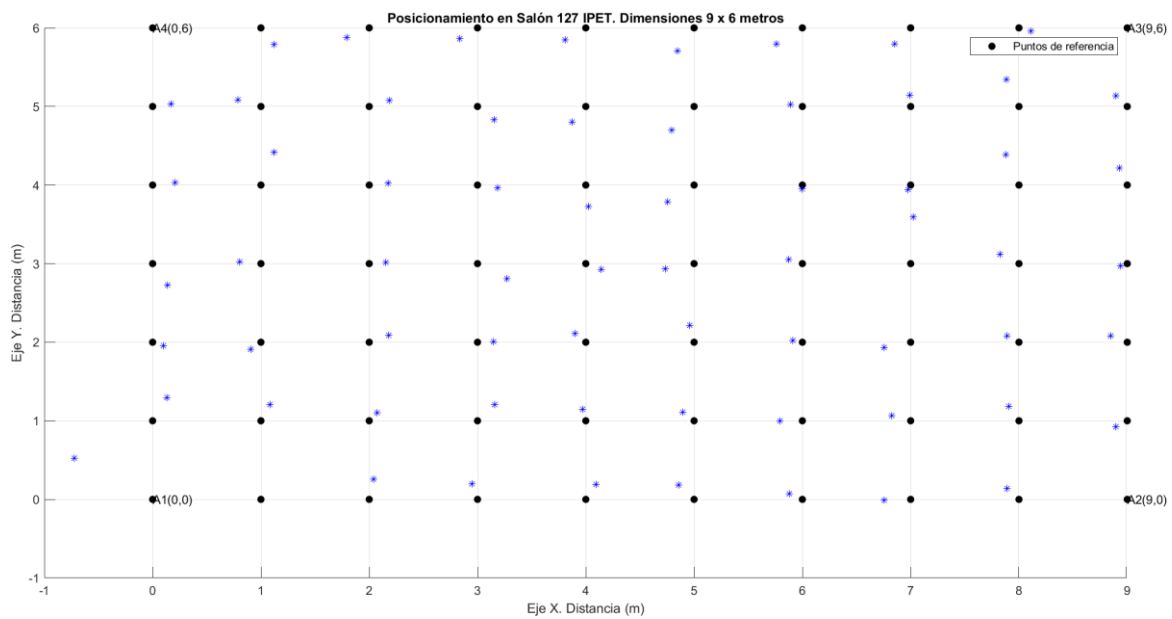


Figura 3.22 Resultados de posicionamiento en D3-ESC3-LOS.

La Fig. 3.23 muestra el mapa de calor construido a partir de los errores de posicionamiento, en la cual se evidencia que la distribución de colores para el escenario D3-ESC3-NLOS tiene dos grandes contrastes de acuerdo con la escala de colores: Una sola posición con una distancia de error mayor a 1 m y el resto de posiciones con distancias de error menores a 60 cm. Es importante resaltar que el error de mayor valor se presentó en las cercanías al nodo A1 y a la puerta metálica que se encontraba semicerrada (con una pequeña abertura).

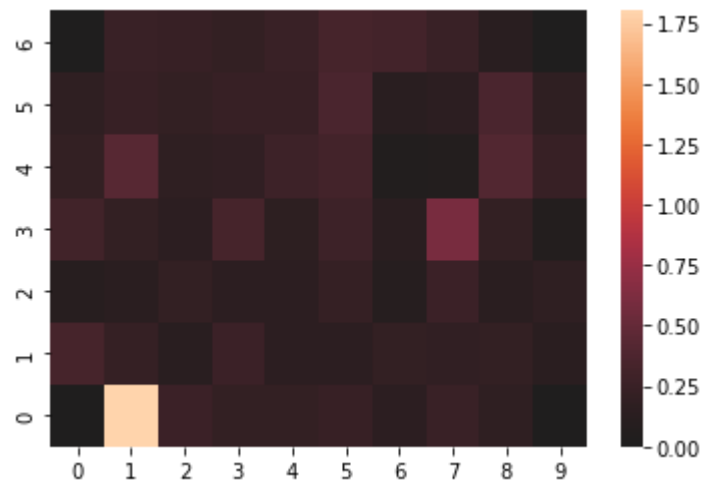


Figura 3.23 Mapa de calor de los errores de distancia en D4-ESC3-NLOS.

La Fig. 3.24 muestra el comportamiento del error (exactitud) por coordenada o punto de referencia en la evaluación de desempeño en el escenario D4-ESC3-NLOS, en la cual nuevamente se indica que se presentó una distancia de error cerca a los 2 m, además de otro pico de distancia de error cercano a los 60 cm. Por lo demás se puede apreciar que las distancias de error por lo general son menores a 40 cm.

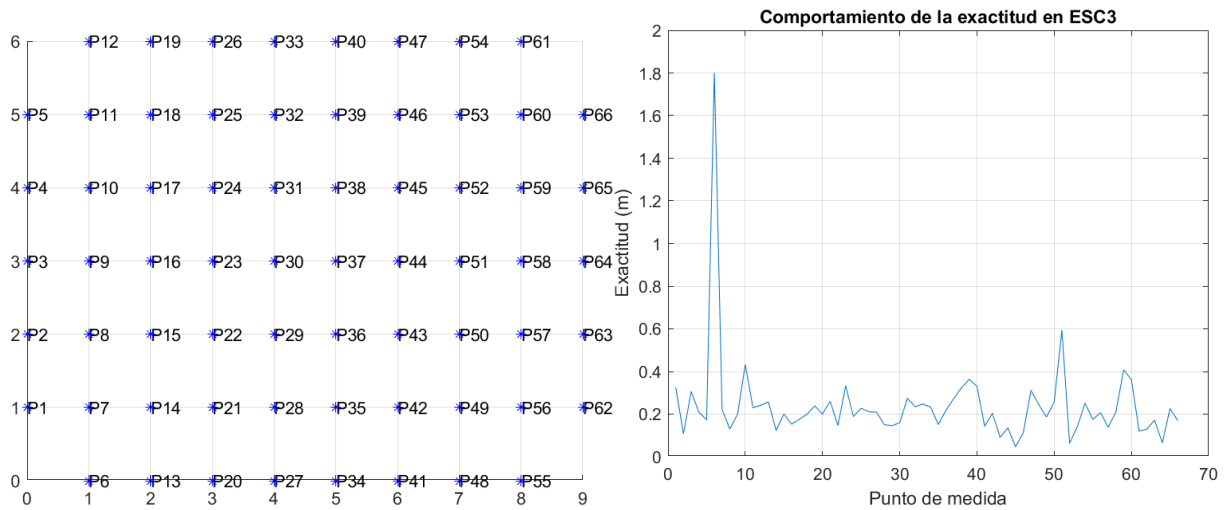


Figura 3.24 Evaluación de la distancia de error por punto de medida en el escenario D3-ESC3-NLOS.

La Fig. 3.25 muestra de forma conjunta las desviaciones estándar de las medidas realizadas por el nodo móvil a los cuatro nodos ancla. Esto se hace con el fin de observar la dispersión de las medidas a cada ancla en cada punto de medida. De la gráfica se puede observar que a lo largo de la prueba los nodos ancla A1 y A2 presentaron mayores variaciones; y las principales variaciones ocurrieron en las primeras medidas, es decir, en las cercanas al nodo A1 y a la puerta. La gráfica también permite observar cómo la presencia de un cuerpo en cercanía al nodo A1 le generó mayor dispersión a los nodos más cercanos a él, como lo es el nodo A2. También se puede observar que en la gráfica hay ausencia de valores para ciertos puntos. Esto se debe a que en esas marcas de referencia el nodo móvil no logró establecer una comunicación con alguno de los nodos anclas, por lo cual no se promedia esa medida.

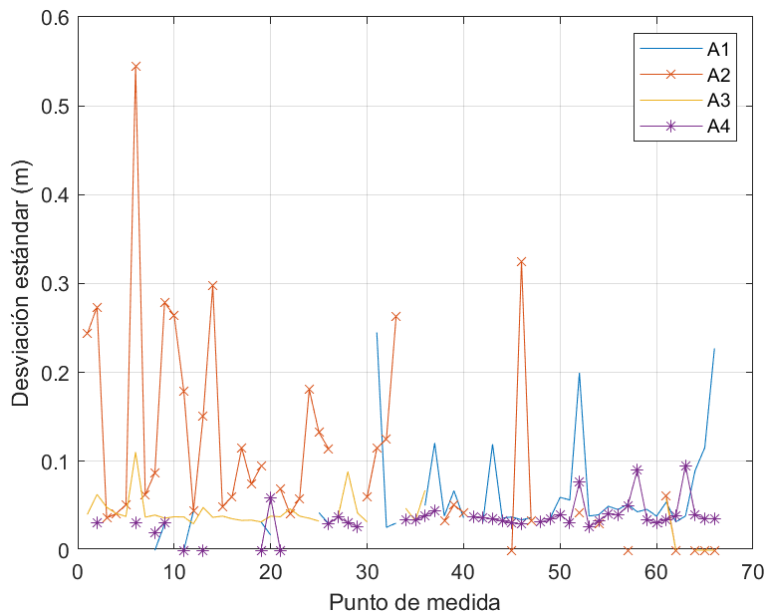


Figura 3.25 Desviación estándar en D4-ESC3-NLOS.

La Tabla 3.8 muestra las desviaciones estándar promedio por el nodo móvil a cada ancla en ESC3. Para la construcción de esa tabla se calculó la desviación estándar por nodo ancla, utilizando las medidas de distancia en los 66 puntos de referencia. De la tabla se puede observar que la mayor desviación estándar promedio de la prueba fue en el nodo

ancla A2. Al igual, se observa que los nodos ancla A3 y A4 presentaron las menores desviaciones estándar promedio. Por la forma en que estaban dispuestos los nodos ancla en la prueba de evaluación de desempeño, se considera que la colinealidad entre el nodo A1 y A2, la presencia del cuerpo humano y otros elementos del escenario como puertas y ventanas generaron estas variaciones.

Ancla	Desviación estándar promedio (m)
A1	0.056868
A2	0.10985
A3	0.037159
A4	0.035431

Tabla 3.8 Desviación estándar de los nodos ancla en D4-ESC3-NLOS.

En la Tabla 3.9 se registraron los resultados de la evaluación del desempeño del sistema prototipo de posicionamiento en interiores en el escenario D4-ESC3-NLOS. De la tabla se puede observar que se mantiene una distancia de error promedio mayor al calculado en las anteriores pruebas; sin embargo, sigue siendo menor al valor de requerimiento funcional propuesto.

Variable	Valor
Error medio (m)	0.23913
Máximo error (m)	1.802
Mínimo error (m)	0.046735

Tabla 3.9 Resumen del error de la prueba D4-ESC3-NLOS

Con el conjunto de datos obtenido de todos los errores de la prueba D4-ESC3-NLOS (5740) se construye su histograma de frecuencia, la PDF y la CDF con el fin de analizar el comportamiento estadístico de las medidas realizadas. En el Anexo E se detalla el procedimiento realizado para el análisis. A partir de los resultados se obtiene que el conjunto de datos presenta más de una distribución. En este caso la separación de los dos subconjuntos es diferenciable. La prueba Chi Cuadrado no rechaza la prueba de hipótesis para la distribución GEV para el subconjunto 2. Para el subconjunto 1 se infiere la presencia de dos distribuciones mezcladas, sin embargo, las pruebas de separación y análisis no llevaron a resultados satisfactorios. La Fig. 3.26 presenta la PDF y la CDF haciendo uso de la herramienta *Distribution Fitter*, con la primera distribución de cada subconjunto.

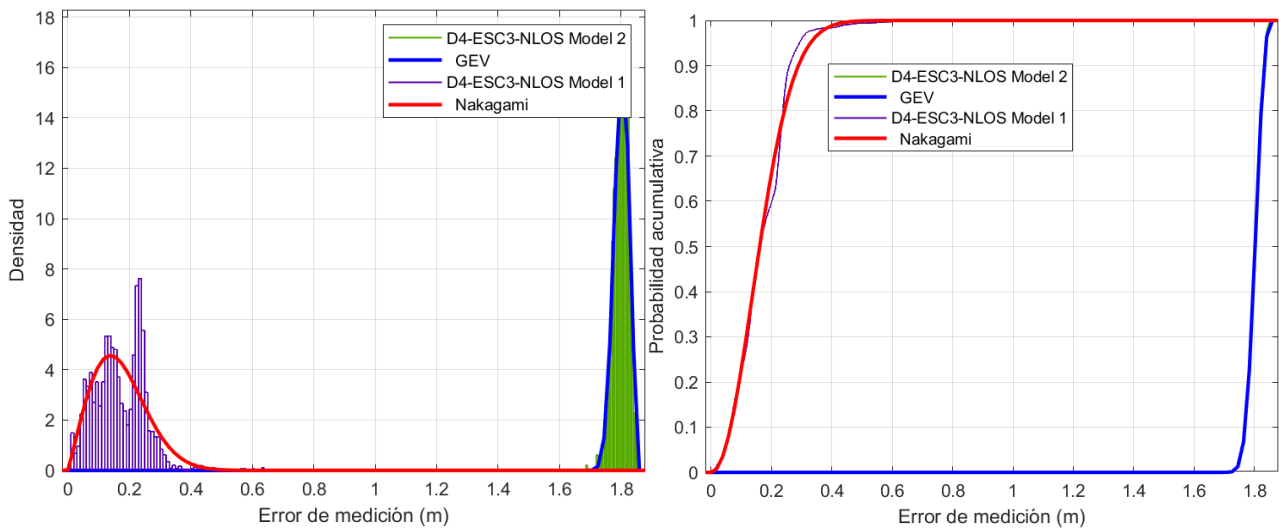


Figura 3.26 Función de densidad de probabilidad y función de distribución acumulativa para D4-ESC3-NLOS.

3.5 COMPARACIONES

Con el fin de comparar los resultados de los diferentes escenarios planteados y analizar la presencia de obstáculos en el desempeño del sistema prototipo de posicionamiento propuesto basado en la tecnología UWB, se presenta en la Tabla 3.10 el resumen de los resultados obtenidos. De la tabla se puede observar que la prueba D4-ESC3-NLOS con un nodo obstaculizado presenta el peor desempeño relacionado con la exactitud, dado que tiene el mayor error medio, el mayor máximo error y el mayor mínimo error. Al igual que se observa que bajo esa prueba los nodos ancla presentaron mayores desviaciones estándar. De la gráfica también se puede observar que el mejor desempeño relacionado con la exactitud ocurrió en la prueba D3-ESC3-LOS con el mejor error promedio, el mejor máximo error y el mejor mínimo error. De esta forma se valida que el sistema prototipo de posicionamiento en interiores basado en UWB funciona adecuadamente con gran exactitud y precisión escenarios de interiores. También, de la tabla se puede observar que de las tres pruebas en el escenario de exteriores es donde menor desviación estándar se presenta. Esto también se explica por la menor presencia de obstáculos.

Característica	D2-ESC1-LOS	D3-ESC3-LOS	D4-ESC3-NLOS
Error medio (m)	0.14116	0.12233	0.23913
Máximo error (m)	0.38823	0.26086	1.802
Mínimo error (m)	0.010108	0.010002	0.046735
Desviación estándar A1 (m)	0.03334	0.052168	0.056868
Desviación estándar A2 (m)	0.029631	0.036121	0.10985
Desviación estándar	0.029209	0.033229	0.037159

A3 (m)			
Desviación estándar A4 (m)	0.028368	0.031946	0.035431
Distribución de probabilidad	GEV	Rician	GEV/Nakagami
Escenario	Exterior-cancha	Interior-salón	Interior-salón
Obstáculos	Sin obstáculos	Sin obstáculos	Persona obstaculizando nodo A1

Tabla 3.10 Comparación de las tres pruebas de desempeño

3.6 PRUEBA DE SEGUIMIENTO O RASTREO EN ESCENARIO DE INTERIORES

De acuerdo con la funcionalidad que tienen los dispositivos DWM1001 para estimar la condición de LOS del nodo móvil con respecto a un nodo ancla y para evaluar los efectos de la presencia humana en el escenario de prueba de interiores (ESC3), se planteó una trayectoria para una persona que lleva consigo el nodo móvil en el pecho, considerando en la literatura el lugar con mejores resultados en el posicionamiento [74].

3.6.1 Definición de Prueba

Para esta prueba se consideró la misma persona que participó durante las pruebas de validación del Capítulo 2 transportando el nodo móvil en su pecho a una altura aproximada de 1.30 m. Para efectos de nomenclatura esta prueba se llamó T-ESC3. La Fig. 3.27 muestra una trayectoria con un total de 27 puntos de medida. La trayectoria inicia en la coordenada (4,3) y la flecha indica hacia dónde debe ver la persona que transporta en su pecho el nodo móvil. Para la ejecución de la prueba T-ESC3 se tomaron 100 medidas en promedio por cada punto de la ruta y de manera independiente para cada nodo ancla.

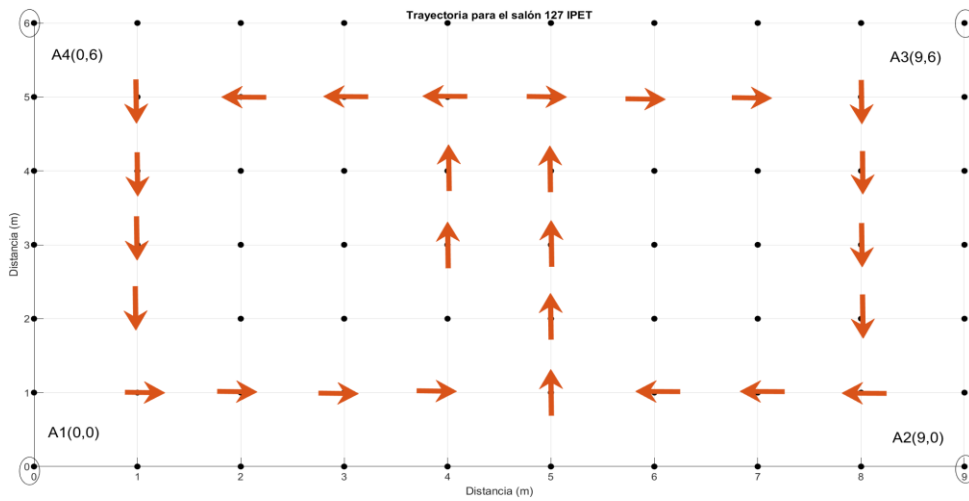


Figura 3.27 Trayectoria definida para una persona.

3.6.2 Evaluación del Desempeño en T-ESC3

La Fig. 3.28 muestra el resultado de aplicar la técnica de trilateración a los datos de distancia obtenidos en la prueba en el escenario T-ESC3. Se puede observar en la gráfica izquierda que no se generó una trayectoria cercana a la esperada y hay errores mayores a 1 m. En la gráfica derecha se describe el comportamiento de la desviación estándar promedio por punto de trayectoria y por nodo ancla. Al relacionar los 27 puntos de la trayectoria con la desviación estándar (precisión), se observa que los puntos de mayor dispersión corresponden a los lugares en los cuales la persona se encontraba de espaldas al respectivo nodo ancla.

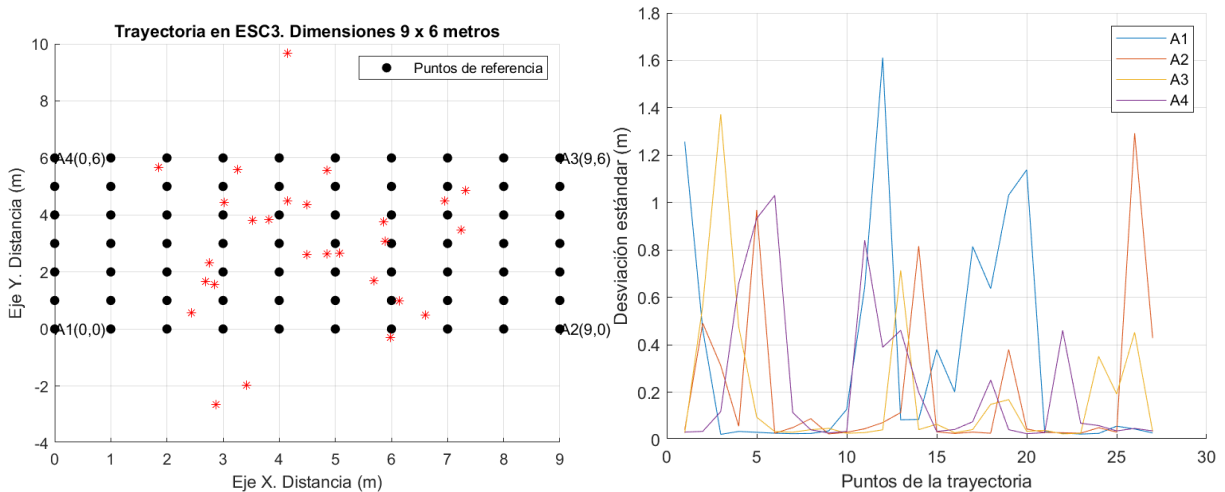


Figura 3.28 Posiciones estimadas y desviación estándar.

A partir de los resultados de la trayectoria mostrados en la figura anterior se realiza un análisis alternativo para detectar el desempeño de la trayectoria al emplear otros enfoques para la técnica de multilateración y se consideran las condiciones individuales de LOS/NLOS para cada nodo ancla a lo largo de la trayectoria con el fin de excluir al nodo ancla que mayor diferencia (mayor valor NLOS) de acuerdo con el dispositivo. Los resultados del análisis alternativo se presentan en los Anexos C y D.

3.6.3 Análisis de la Potencia y Distancia en T-ESC3

La Fig. 3.29 muestra el comportamiento promedio del nivel de potencia en recepción en el nodo móvil de las señales transmitidas por los nodos ancla y el comportamiento de la distancia calculada por el nodo móvil respecto a cada nodo. De la gráfica se puede observar cómo al aumentar la distancia del nodo móvil un nodo ancla disminuye la potencia y de igual manera cuando la persona da la espalda a los nodos ancla (obstrucción).

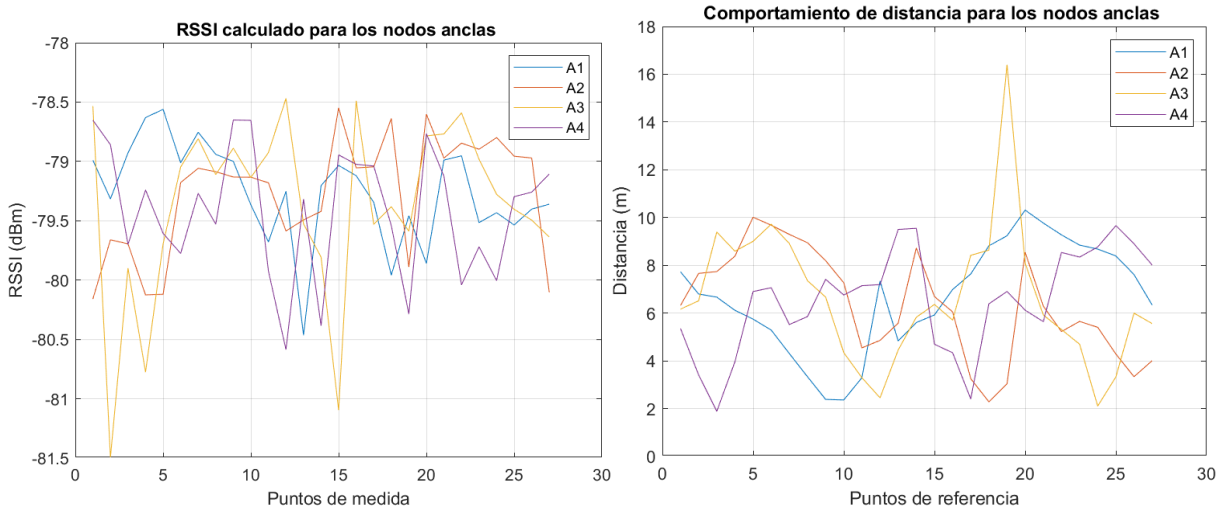
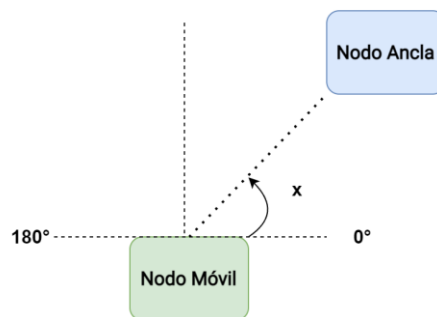


Figura 3.29 Comportamiento de RSSI y la distancia recorrida por nodo ancla.

3.6.4 Comparación Condición LOS y NLOS

La Fig. 3.30 muestra la condición LOS/NLOS y la trayectoria a seguir. Se define teóricamente cuando existe condición LOS: el nodo móvil se encuentra de frente a los ejes de las líneas punteadas. La condición consiste en que hay LOS cuando el ángulo entre las dos coordenadas está entre 0° y 180° . La figura de la derecha indica la orientación de la persona durante la trayectoria.



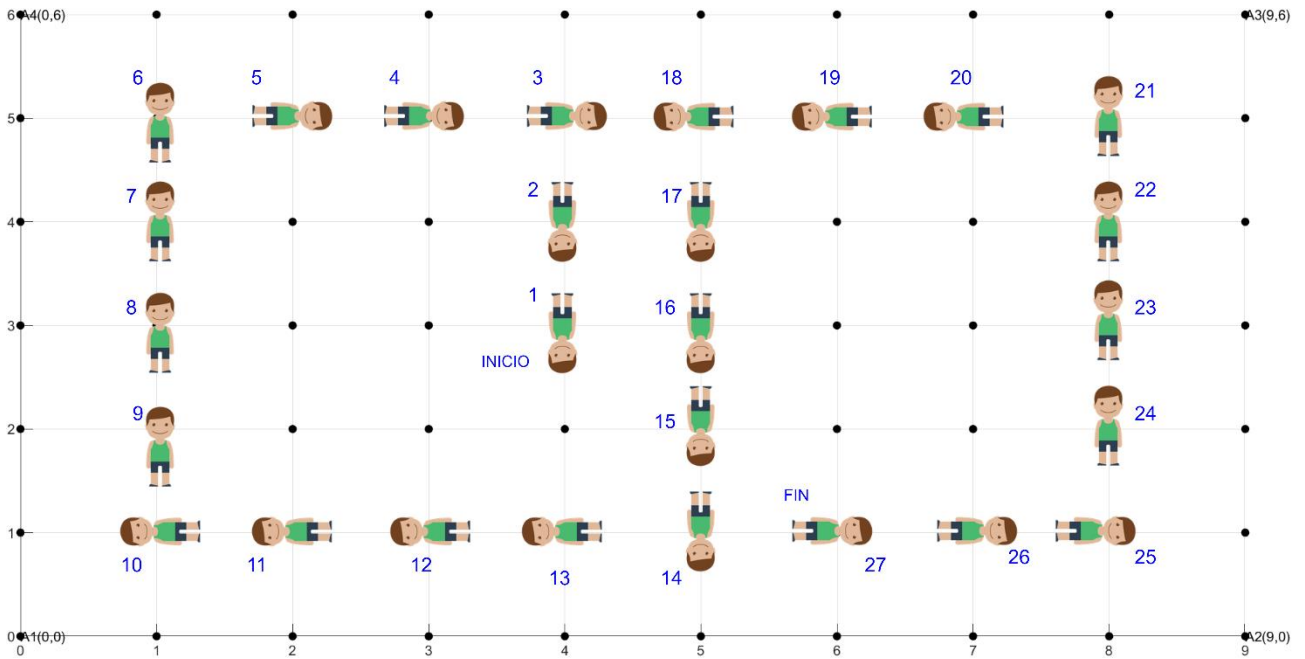


Figura 3.30 Validación de LOS y trayectoria.

En la Fig. 3.31 y la Fig. 3.32 se presentan los resultados obtenidos por la comparación de RSL y FSL. Se muestran con un esquema de colores, donde verde es LOS, amarillo es LOS-NLOS (Zona de indefinición o híbrida) y rojo es NLOS. En cada gráfica se resalta con color fucsia el nodo ancla desde el que se realizaron las medidas.

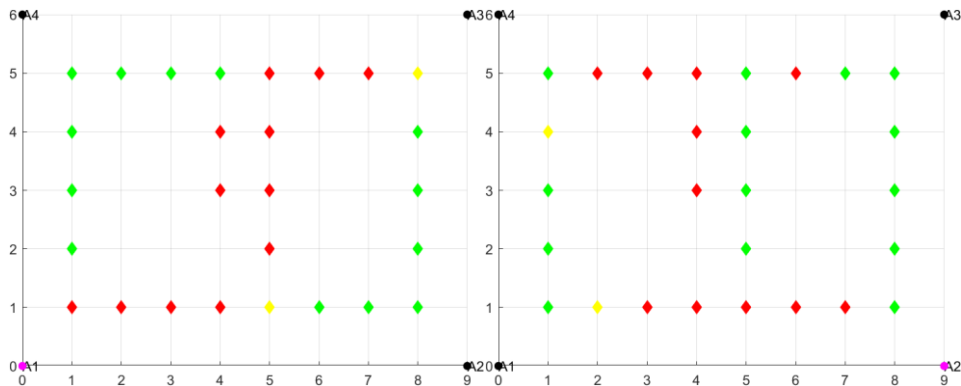


Figura 3.31 Resultado de condición LOS en los nodos ancla A1 y A2.

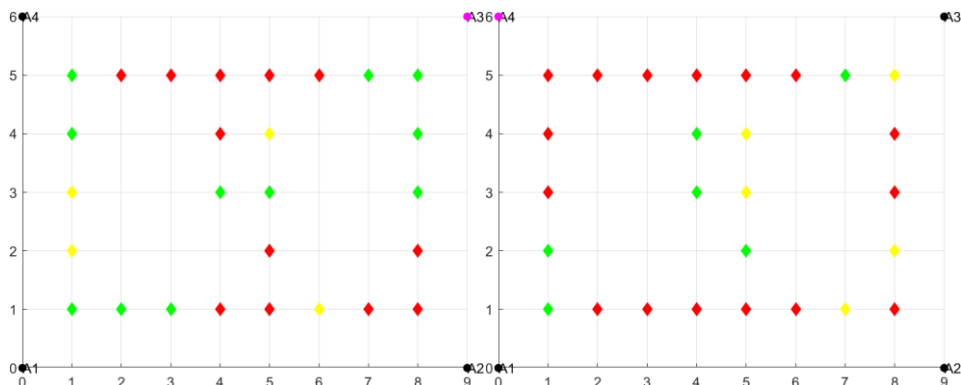


Figura 3.32 Resultado de condición LOS en los nodos ancla A3 y A4.

En la Tabla 3.11 se muestran los resultados con un porcentaje de éxito, equivalente a la relación entre aciertos totales sobre el total de puntos de medida, sin tener en cuenta los puntos de incertidumbre (rombos amarillos), entendiendo que hay error cuando para una condición LOS o NLOS el dispositivo marque NLOS o LOS, respectivamente. De la tabla se puede observar que los nodos A1 y A2 obtuvieron buenos resultados y que de forma general el porcentaje de éxito fue superior al 50%.

Nodo	Aciertos (Total=27)	Porcentaje de éxito (%)
A1	27	100
A2	20	74.0741
A3	14	51.8519
A4	18	66.6667

Tabla 3.11 Determinación de LOS y NLOS.

Capítulo 4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones y los posibles trabajos futuros a partir de lo alcanzado en este trabajo de grado, esto con el propósito de dar continuidad a la investigación sobre el posicionamiento en escenarios de interiores en la Universidad del Cauca.

4.1 CONCLUSIONES

- En el desarrollo de un sistema prototipo de posicionamiento en escenarios de interiores, con una tecnología en particular, es fundamental la selección de la métrica y la técnica de posicionamiento adecuada. Para ello es necesario considerar cuidadosamente los requerimientos del sistema, el presupuesto, las especificaciones de la tecnología a utilizar, y los dispositivos disponibles en el mercado. Para la selección de la métrica se realizó una comparación de características de funcionamiento de diferentes tecnologías, tales como, orden de la exactitud, complejidad, costo, operación en condición LOS o condición NLOS, etc., teniendo como base un estudio sobre las métricas relacionadas con la tecnología UWB. De esta búsqueda se concluyó que la métrica TWR ofrece los mejores resultados por su alta exactitud, porque no requiere de sincronización entre los nodos, puede ser utilizada en condiciones NLOS, con un costo y complejidad medio. Para la selección de la técnica se realizó un estudio sobre las principales técnicas relacionadas con UWB y luego se filtraron aquellas que fueran compatibles con la métrica ya seleccionada. De esta manera se encontró que la métrica de trilateración ofrece alta exactitud, sin requerir hardware adicional y permite estimar la posición con al menos 3 nodos de referencia o nodos ancla.
- Para la implementación del sistema de posicionamiento se consideran dispositivos con una buena relación costo-beneficio, y que su funcionamiento estuviera basado en la métrica seleccionada. Se realizó una búsqueda sobre los dispositivos comercialmente disponibles acordes a la necesidad del sistema prototipo de posicionamiento para escenarios de interiores. De la búsqueda se encontró que entre los dispositivos con mejores beneficios y prestaciones se destacaban los de la marca Qorvo/Decawave. Para los fines requeridos se seleccionó el kit *MDEK1001*, el cual incorpora 12 módulos DWM1001.
- Los dispositivos DWM1001 adquiridos para el sistema de posicionamiento vinieron calibrados para su uso en RTLS. Para verificar que las medidas fueran consistentes y confiables se realizaron un conjunto de pruebas de validación y de desempeño de la tecnología UWB en tres escenarios distintos, y con dos diferentes tipos de condición en cada escenario, i.e., condición LOS y condición NLOS. La evaluación del desempeño mostró un adecuado funcionamiento de los dispositivos con una alta exactitud y precisión.
- La validación de la tecnología para su uso en un sistema de posicionamiento se realizó considerando la exactitud (distancia de error) como métrica de desempeño. De acuerdo con los resultados obtenidos, se evidenció que en escenarios de

interiores en condición LOS, la exactitud promedio fue menor a 1 m. La probabilidad de lograr una exactitud menor a 50 cm en condiciones LOS fue mayor a 0.9. Es importante mencionar que tanto las dimensiones como la forma del escenario afectan a la exactitud, principalmente por la multitrayectoria.

- Las pruebas de validación realizadas con la obstrucción por cercanía de una persona al nodo móvil permitieron verificar el incremento de la distancia de error y la dispersión de las medidas.
- La evaluación del sistema prototipo de posicionamiento en interiores basado en UWB permitió validar la muy buena exactitud asociada a la tecnología, dado que el valor promedio de distancia de error no superó los 30 cm para los tres escenarios en los cuales se realizaron las pruebas. Lo anterior permitió dar cumplimiento al requerimiento funcional de una distancia de error menor a 1 m.
- La evaluación del desempeño del sistema prototipo de posicionamiento en interiores basado en UWB permitió observar que la presencia de un cuerpo humano en cercanía a uno de los nodos ancla incrementa la distancia de error y la dispersión de las medidas; sin embargo, se tiene que la máxima distancia de error fue menor a 30 cm.
- La evaluación del desempeño del sistema prototipo de posicionamiento en interiores basado en UWB en condición de LOS, tanto para un escenario de exteriores como para un escenario de interiores, permitió observar un buen desempeño a nivel de exactitud, con una probabilidad de que la distancia de error fuera menor a 30 cm de 0.9.
- La técnica de multilateración basada en la regresión no lineal para mínimos cuadrados presentó mejores resultados de exactitud para las pruebas de posicionamiento en comparación con la técnica de trilateración por enfoque geométrico y por mínimos cuadrados.
- La posición de los nodos anclas en las esquinas de los escenarios de prueba presentó mejores resultados respecto a la posición de los nodos en las partes intermedias de las paredes.
- La combinación de los cuatro nodos anclas para determinar la posición del nodo móvil en un escenario de interiores con un nodo obstaculizado permitió identificar cual nodo ancla estaba incrementando el error de posicionamiento, el cual no coincidió con el nodo ancla obstaculizado.
- Los conjuntos de datos resultados de las pruebas de validación para cancha y salón tuvieron que ser representados por dos distribuciones de probabilidad actuando de manera conjunta.
- La mayoría de conjuntos de datos de error para las pruebas realizadas presentaron una distribución de valor extremo generalizado (GEV, *Generalized Extreme Value*).

- A partir de la construcción del sistema de posicionamiento y su uso en escenarios de interiores se concluyó que la tecnología UWB es una muy buena opción tecnológica para los sistemas de posicionamiento en interiores.

4.2 TRABAJOS FUTUROS

A continuación, se presentan los posibles trabajos futuros que permitirán mejorar, continuar o abordar un nuevo rumbo sobre el sistema prototipo de posicionamiento desarrollado.

- Desarrollo de un sistema de posicionamiento basado en UWB capaz de gestionar la posición de varios nodos móviles de manera simultánea con una exactitud menor a un metro.
- Desarrollo de un sistema de posicionamiento basado en la tecnología UWB que funcione con más de una métrica de posicionamiento, tal como RSSI y TWR, para evaluar su desempeño.
- Desarrollo de un sistema de posicionamiento basado en las tecnologías UWB y BLE y con más de una métrica de posicionamiento, para evaluar su desempeño.
- Desarrollo de un sistema de posicionamiento basado en la tecnología UWB y en sensores de movimiento.
- Desarrollo de un sistema de posicionamiento basado en la tecnología UWB considerando los efectos sobre su desempeño al ubicar el nodo móvil en diferentes partes del cuerpo humano.
- Desarrollo de una aplicación web para la visualización del posicionamiento obtenido por un sistema de posicionamiento basado en la tecnología UWB.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Koyuncu and Huang H. Yang, "A survey of indoor positioning and object locating systems," *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 10, no. 5, May 2010, pp. 121–128.
- [2] K. Mannay, N. Benhadjyoussef, M. Machhout, and J. Urena, "Location and positioning systems: performance and comparison," in *Proc. 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)*, Dec. 2016, pp. 1–6.
- [3] M. A. Al-Ammar *et al.*, "Comparative survey of indoor positioning technologies, techniques, and algorithms," in *Proc. International Conference on Cyberworlds*, 2014, pp. 245-252.
- [4] F. Furfari, A. Crivello, P. Baronti, P. Barsocchi, M. Girolami, F. Palumbo, et al., "Discovering location based services: A unified approach for heterogeneous indoor localization systems", *Internet of Things*, vol. 13, Mar. 2021, pp. 1-32.
- [5] R. Mautz, "Indoor positioning technologies," Habilitation Thesis, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich, 2012.
- [6] Reza Zekavat; R. Michael Buehrer, "Wireless positioning systems: operation, application, and comparison," in *Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances*, IEEE, 2019, pp. 3-23.
- [7] A. Alarifi, A. M. Al-Salman, M. Alsaleh, A. Alnafessah, S. Al-Hadhrami, M. Al-Ammar, and H. Al-Khalifa, "Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances," *Sensors*, vol. 16, no. 5, May 2016, pp. 1–36.
- [8] J. Kunthoth, A. G. Karkar, S. Al-Maadeed, and A. Al-Ali, "Indoor positioning and wayfinding systems: A survey," *Human-centric Computing and Information Sciences*, vol. 10, no. 1, 2020, pp. 1–41.
- [9] G. Deak, K. Curran, and J. Condell, "A survey of active and passive indoor localisation systems," *Computer Communications*, vol. 35, no. 16, Sep. 2012, pp. 1939–1954.
- [10] A. Musa, H. Han, G. D. Nugraha, D. Choi, S. Seo and J. Kim, "A design of indoor RTLS by use of the UWB-WSN based Two Reference Points," in *Proc. 2nd International Conference on Applied Electromagnetic Technology (AEMT)*, 2018, pp. 29-33.
- [11] F. Barba Barba, "Estudio de algoritmos de localización en interiores, para tecnologías móviles de última generación," MSc. Thesis, Departamento de Ingeniería de Sistemas Telemáticos, Madrid, 2012.
- [12] Kegen Yu; Ian Sharp; Y Jay Guo, "Positioning accuracy evaluation," in *Ground-Based Wireless Positioning*, Wiley IEEE-Press, June 2009, pp. 199-222.
- [13] Kegen Yu; Ian Sharp; Y Jay Guo, "Geometric dilution of precision analysis," in *Ground-Based Wireless Positioning*, IEEE, 2009, pp.223-247.

- [14] D. Dardari, P. Closas and P. M. Djurić, "Indoor tracking: theory, methods, and technologies," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 4, April 2015, pp. 1263-1278.
- [15] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 37, no. 6, Nov. 2007, pp. 1067-1080.
- [16] S. A. Zekavat, "An introduction to the fundamentals and implementation of wireless local positioning systems," *Handbook of Position Location*, 2011, pp. 1169–1194.
- [17] J. Chóliz, Á. Hernández, and A. Valdovinos, "A framework for UWB-based communication and location tracking systems for wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 11, no. 9, Sep. 2011, pp. 1–24.
- [18] L. Mainetti, L. Patrono and I. Sergi, "A survey on indoor positioning systems," in *Proc. 22nd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2014, pp. 111-120.
- [19] F. Zafari, A. Gkelias and K. K. Leung, "A survey of indoor localization systems and technologies," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, 2019, pp. 2568-2599.
- [20] Y. Cheng and T. Zhou, "UWB indoor positioning algorithm based on tdoa technology," *10th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME)*, 2019, pp. 777-782.
- [21] S. Monta, S. Promwong and V. Kingsakda, "Evaluation of ultra wideband indoor localization with trilateration and min-max techniques," in *Proc. 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2016, pp. 1-4.
- [22] Reza Zekavat; R. Michael Buehrer, "On the performance of wireless indoor localization using received signal strength," in *Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances*, IEEE, 2019, pp.405-433.
- [23] Povalac, Ales and Jiri Sebesta. "Phase of arrival ranging method for UHF RFID tags using instantaneous frequency measurement." in *Proc. 20th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications*, pp. 1-4, 2010.
- [24] M. Ridolfi, S. Van de Velde, H. Steendam, and E. De Poorter, "Analysis of the scalability of UWB indoor localization solutions for high user densities," *Sensors*, vol. 18, no. 6, Jun. 2018, pp. 1–19.
- [25] J. H. An and L. Choi, "Inverse fingerprinting: Server side indoor localization with Bluetooth low energy," in *Proc. IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2016, pp. 1-6.
- [26] F. Seco, A. R. Jimenez, C. Prieto, J. Roa and K. Koutsou, "A survey of mathematical methods for indoor localization," in *Proc. IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing*, 2009, pp. 9-14.
- [27] Xingbin Ge and Zhiyi Qu, "Optimization WIFI indoor positioning KNN algorithm location-based fingerprint," in *Proc. 7th IEEE International Conference on Software Engineering and*

Service Science (ICSESS), 2016, pp. 135-137.

[28] Tsung-Nan Lin and Po-Chiang Lin, "Performance comparison of indoor positioning techniques based on location fingerprinting in wireless networks," in *Proc. International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing*, 2005, pp. 1569-1574.

[29] María Hernando Rábanos José, Tomás Luis Mendo, and Manuel Riera Salís José, *Comunicaciones Móviles*. Madrid: Editorial Universitaria Ramón Areces, 2015.

[30] J. V. Nagdeo, "Synchronization of anchors in a TDOA based ultra-wide band Localization System," MSc. thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2018.

[31] G. Welch and G. Bishop, "An introduction to the Kalman filter," Technical Report. University of North Carolina at Chapel Hill, USA. June 2006.

[32] N. Wang, X. Yuan, L. Ma and X. Tian, "Research on indoor positioning technology based on UWB," in *Proc. Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 2020, pp. 2317-2322.

[33] Reza Zekavat; R. Michael Buehrer, "An Introduction to Kalman filtering implementation for localization and tracking applications," in *Handbook of Position Location: Theory, Practice, and Advances*, IEEE, 2019, pp.143-195.

[34] R. Liu, C. Yuen, T. N. Do, D. Jiao, X. Liu and U. X. Tan, "Cooperative relative positioning of mobile users by fusing IMU inertial and UWB ranging information," in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017, pp. 5623-5629.

[35] J. Hyun, T. Oh, H. Lim and H. Myung, "UWB-based indoor localization using ray-tracing algorithm," in *Proc. 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, 2019, pp. 98-101.

[36] M. Ridolfi, S. Vandermeeren, J. Defraye, H. Steendam, J. Gerlo, D. De Clercq, J. Hoebeke, and E. De Poorter, "Experimental evaluation of UWB indoor positioning for sport postures," *Sensors*, vol. 18, no. 2, Jan. 2018, pp. 1–20.

[37] E. Gorrita and R. Sierra, "Aplicaciones y servicios basados en localización," *Revista Cubana de ingeniería*, Dec. 2011, pp. 1–8.

[38] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13-32, 2009.

[39] R. Simeononi et al., "Indoor positioning using Decawave MDEK1001," in *Proc. International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, 2020, pp. 1-4.

[40] P. Carbone, "Magnetic field based positioning systems". *TechRxiv*, July 2021.

[41] P. Dabove, V. Di Pietra, M. Piras, A. A. Jabbar and S. A. Kazim, "Indoor positioning using Ultra-wide band (UWB) technologies: Positioning accuracies and sensors' performances," *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, 2018, pp. 175-184.

[42] D. C. Bolaños Eraso and G. M. Salazar Lasso, "Análisis del desempeño físico de un

sistema de comunicación punto a punto basado en UWB-DS,” BSc. thesis, Universidad del Cauca, Popayán, 2019.

[43] Federal Communications Commission (FCC). Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems, First Report Order. 2002.

[44] European Commission, “Decision of February 2007 on allowing the use of the radio spectrum for equipment using ultra-wideband technology in a harmonised manner in the Community”, *Official Journal of the European Union*, February 2007.

[45] I. A. Glover and R. Atkinson, “Overview of wireless techniques,” *Wireless MEMS Networks and Applications*, Sep. 2016, pp. 1–33.

[46] Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e Innovación, “Documento de tipología de proyectos de carácter científico, tecnológico o de innovación,” Apr. 2021.

[47] “Proceso unificado de racional,” *Wikipedia*, 02-Jun-2022. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_Unificado_de_Racional. [Accessed: 30-Jul-2022].

[48] “Proceso Unificado Rational Aplicado,” *Repositorio Digital de la Facultad de Ingeniería*. [Online]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/175/A5%20C%20ap%C3%ADtulo%202.pdf>. [Accessed: 22-Jul-2022].

[49] “Rup and its phases,” *GeeksforGeeks*, 13-Jun-2022. [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/rup-and-its-phases/>. [Accessed: 30-Nov-2022].

[50] R. Ricardo, “Proceso unificado racional (RUP) vs. Scrum,” *Estudyando*, 17-Oct-2020. [Online]. Available: <https://estudyando.com/proceso-unificado-racional-rup-vs-scrum/>. [Accessed: 30-Aug-2022].

[51] L. Castellanos, “Modelo Rup – IBM,” *DTyOC*, 28-May-2016. [Online]. Available: <https://dtyoc.com/2016/06/07/modelo-rup-ibm/>. [Accessed: 30-Aug-2022].

[52] M. A. Duran, A. A. D'Amico, D. Dardari, M. Rydström, F. Sottile, E. G. Ström, and L. Taponecco, “Terrestrial Network-based positioning and Navigation,” *Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques*, pp. 75–153, Jan. 2012.

[53] K. Witrisal, C. Anton-Haro, S. Grebien, W. Joseph, E. Leitinger, X. Li, J. A. Del Peral-Rosado, D. Plets, J. Vilà-Valls, and T. Wilding, “Localization and tracking,” *Inclusive Radio Communications for 5G and Beyond*, Jan. 2021, pp. 253–293.

[54] A. Bensky, “Technologies and applications,” *Short-range Wireless Communication*, 2019, pp. 387–430.

[55] K. Mikhaylov, J. Petäjajarvi, M. Hämäläinen, A. Tikanmäki, and R. Kohno, “Impact of IEEE 802.15.4 communication settings on performance in Asynchronous two way UWB ranging,” *International Journal of Wireless Information Networks*, vol. 24, no. 2, 2017, pp. 124–139.

- [56] R. Zekavat; R. Michael Buehrer, "Implementation of Kalman filter for localization," in *Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances*, IEEE, 2012, pp. 629-647.
- [57] J. Munir, "VI Jornadas sobre tecnologías y soluciones para la automatización industrial," *Universidad de Vigo*, 07-Nov-2014. [Online]. Available: https://tv.uvigo.es/uploads/material/Video/25294/PONENCIA_GRADIANT_JAI2014.pdf. [Accessed: 30-Aug-2022].
- [58] V. Barral Vales, "Ultra wideband location in scenarios without clear line of sight: A practical approach," *thesis, Universidad Da Coruña*, 2020.
- [59] A. R. Jiménez Ruiz and F. Seco Granja, "Comparing Ubisense, BeSpoon, and DecaWave UWB location systems: indoor performance analysis," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 8, Aug. 2017, pp. 2106-2117.
- [60] F. Capraro, M. Segura and C. Sisterna, "Human real time localization system in underground mines using UWB," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 02, February 2020, pp. 392-399.
- [61] P. Reche-Soto, D. Cardona, A. Díaz, C. D. Gómez-Carmona, and J. Pino-Ortega, "Demandas tácticas de juegos reducidos en fútbol: Influencia de la Tecnología Utilizada," *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y del Deporte*, vol. 19, no. 76, Dec. 2019, pp. 1–17.
- [62] A. Umek, S. Tomažič, and A. Kos, "Application for impact position evaluation in tennis using UWB localization," *Procedia Computer Science*, vol. 147, Feb. 2019, pp. 307–313.
- [63] A. R. Jiménez, J. Godoy, and F. Seco, "Evaluación de un sistema de radio UWB para posicionamiento preciso de vehículos," *Actas de las XXXVII Jornadas de Automática 7, 8 y 9 de septiembre de 2016, Madrid*, Sep. 2016, pp. 360–367.
- [64] "Ultra-Wideband - Qorvo," *Qorvo*, 2022. [Online]. Available: <https://www.qorvo.com/products/wireless-connectivity/ultra-wideband>. [Accessed: 30-Aug-2022].
- [65] "Qorvo® Completes Acquisition of Decawave," *Qorvo*, 2020. [Online]. Available: <https://www.qorvo.com/newsroom/news/2020/qorvo-completes-acquisition-of-decawave>. [Accessed: 30-Aug-2022].
- [66] "Decawave now Qorvo," *Symmetry Electronics*, 2020. [Online]. Available: <https://www.symmetryelectronics.com/manufacturers/decawave-now-qorvo/#>. [Accessed: 30-Aug-2022].
- [67] "Decawave Crunchbase – Company Profile & Funding," 2020. [online]. Available: <https://www.crunchbase.com/organization/decawave>. [Accessed: 24-Jul-2022]
- [68] "DWM1001C – Qorvo," 2017. [online]. Available: <https://www.qorvo.com/products/p/DWM1001#documents>. [Accessed: 24-Jul-2022].
- [69] "DWM1001 Datasheet," 2017. [online]. Available: <https://www.qorvo.com/products/d/da007950>. [Accessed: 24-Jul-2022]

- [70] "DWM1001C Product Brief," 2018. [online]. Available: <https://www.qorvo.com/products/d/da007949>. [Accessed: 24-Jul-2022]
- [71] "DWM1001 Schematic," 07-Sep-2018. [online]. Available: <https://www.qorvo.com/products/d/da007971>. [Accessed: 24-Jul-2022]
- [72] "DWM1001 Firmware API Guide," 2019. [online]. Available: <https://www.qorvo.com/products/d/da007975>. [Accessed: 24-Jul-2022]
- [73] R. Simedroni *et al.*, "Indoor Positioning using Decawave MDEK1001," *International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, 2020, pp. 1-4.
- [74] T. Otim, L. E. Díez, A. Bahillo, P. Lopez-Iturri, and F. Falcone, "Effects of the body wearable sensor position on the UWB localization accuracy," *Electronics*, vol. 8, no. 11, Nov. 2019, pp. 1–14.
- [75] A. Musa, H. Han, G. D. Nugraha, D. Choi, S. Seo and J. Kim, "A design of Indoor RTLS by use of the UWB-WSN based Two Reference Points," in *Proc. 2nd International Conference on Applied Electromagnetic Technology (AEMT)*, 2018, pp. 29-33.
- [76] C. Suwatthikul, W. Chantaweksomboon, S. Manatrinon, K. Athikulwongse and K. Kaemarungsi, "Implication of anchor placement on performance of UWB real-time locating system," in *Proc. 8th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES)*, 2017, pp. 1-6.
- [77] "Simple C examples for Decawave DWM1001 hardware," *GitHub*, 15-Jun-2020. [Online]. Available: <https://github.com/Decawave/dwm1001-examples>. [Accessed: 30-Apr-2022].
- [78] "DW1000 USER MANUAL," *Qorvo*, 2017. [Online]. Available: <https://www.qorvo.com/products/d/da007967>. [Accessed: 30-May-2022].
- [79] C. Silva and E. Giovanni, "Análisis de la coexistencia de redes WI-FI y sistemas de posicionamiento en tiempo real para el tráfico de datos y el posicionamiento de objetos," thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2018.
- [80] Decawave Ltd., Application Note APS017. Maximising Range in DW1000 Based Systems. Version 1.0, 2014
- [81] Decawave Ltd., Application Note APS011. APS011 application note sources of error in dw1000 based two-way ranging (twr) schemes.
- [82] J. Figueiras, "Fundamentals of positioning," *Mobile Positioning and Tracking*, Jul. 2017, pp. 81–107.
- [83] A. Pineda-Briseño, R. Menchaca-Méndez, and G. Guzmán-Lugo, "Integrated routing and positioning in mobile ad hoc networks," *Computación y Sistemas*, vol. 20, no. 2, Jun. 2016, pp. 1–19.

- [84] R. Jarvis, A. Mason, K. Thornhill, and B. Zhang, "Indoor positioning system," thesis, Louisiana State University, Louisiana, 2011.
- [85] Simone Frattasi; Francescantonio Della Rosa, "Data fusion and filtering techniques," in *Mobile Positioning and Tracking: From Conventional to Cooperative Techniques*, IEEE, 2016, pp.109-133.
- [86] "Trilateración," *Wikipedia*, 08-Jun-2022. [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Trilateraci%C3%B3n>. [Accessed: 30-Aug-2022].
- [87] "Multilateración," *Wikipedia*, 15-Mar-2020. [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Multilateraci%C3%B3n>. [Accessed: 30-Jul-2022].
- [88] Y. Zhou, "An efficient least-squares trilateration algorithm for mobile robot localization," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009, pp. 3474-3479.
- [89] S. Gezici, I. Guvenc and Z. Sahinoglu, "On the Performance of Linear Least-Squares Estimation in Wireless Positioning Systems," in *Proc. IEEE International Conference on Communications*, 2008, pp. 4203-4208.
- [90] P. Brida, P. Cepel, and J. Duha, "A novel adaptive algorithm for RSS positioning in GSM networks," in *Proc. International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP '06)*, Patras, Greece, 2006, pp. 748–751.
- [91] K. W. Cheung, H. C. So, W. K. Ma, and Y. T. Chan, "Received signal strength based mobile positioning via constrained weighted least squares," in *Proc. IEEE International Conference on Accoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '03)*, April 2003, pp. 137–140.
- [92] A. Typiak, Ł. Rykała, and R. Typiak, "Location detection of a static object using Ultra wideband technology," in *Proc. AIP Conference Proceedings*, Oct. 2018, pp. 1–13.
- [93] X. Fang and L. Chen, "An optimal multi-channel trilateration localization algorithm by Radio-multipath multi-objective evolution in RSS-ranging-based wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 20, no. 6, Mar. 2020, pp. 1–14.
- [94] A. Carlsson, F. Golander, and F. Sandelin, "User configurable indoor positioning system using wifi trilateration and fingerprinting," thesis, Computer and Information Engineering Programme, Polacksbacken, 2017.
- [95] M. F. Mosleh, M. J. Zaiter, and A. H. Hashim, "Position estimation using trilateration based on Toa/RSS and AOA measurement," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1773, no. 1, 2021, pp. 1–11.
- [96] P. Brida and J. Machaj, "A novel enhanced positioning trilateration algorithm implemented for medical implant in-body localization," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2013, Apr. 2013, pp. 1–10.

- [97] S. Huang, Y. Guo, S. Zha, F. Wang, and W. Fang, "A real-time location system based on RFID and UWB for digital manufacturing workshop," *Procedia CIRP*, vol. 63, Jul. 2017, pp. 132–137.
- [98] A. Musa, H. Han, G. D. Nugraha, D. Choi, S. Seo and J. Kim, "A Design of Indoor RTLS by Use of the UWB-WSN based Two Reference Points," in *Proc. 2nd International Conference on Applied Electromagnetic Technology (AEMT)*, 2018, pp. 29-33.
- [99] A. Rácz-Szabó, T. Ruppert, L. Bántay, A. Löcklin, L. Jakab, and J. Abonyi, "Real-time locating system in production management," *Sensors*, vol. 20, no. 23, pp. 1–22, Nov. 2020.
- [100] R. Simeedroni et al., "Indoor positioning using Decawave MDEK1001," in *Proc. International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, 2020, pp. 1-4.

Anexo A. COMPARACIÓN TÉCNICAS BASADAS EN MULTILATERACIÓN

El presente anexo contiene la comparación gráfica de la exactitud de localización considerando el enfoque geométrico de trilateración (ENFOQUE 1) que consiste en la solución del sistema de ecuaciones para 3 nodos usando Matlab, la solución por Mínimos cuadrados Lineales (ENFOQUE 2) usando la librería de Python *localization* y Regresión No Lineal para Mínimos Cuadrados (ENFOQUE 3) usando Matlab. Los cálculos se realizaron para los escenarios definidos en el trabajo de grado.

A1. CANCHA ESC1-LOS

En esta prueba los nodos anclas están ubicados en las cuatro esquinas del área delimitada que corresponde a la cancha el Diamante. El nodo móvil se ubica en cada una de las 66 posiciones de referencia marcadas. No existen obstáculos entre el nodo móvil y los cuatro nodos anclas en ningún momento de la prueba.

A1.1 Enfoque geométrico de trilateración para los nodos 1, 2 y 3

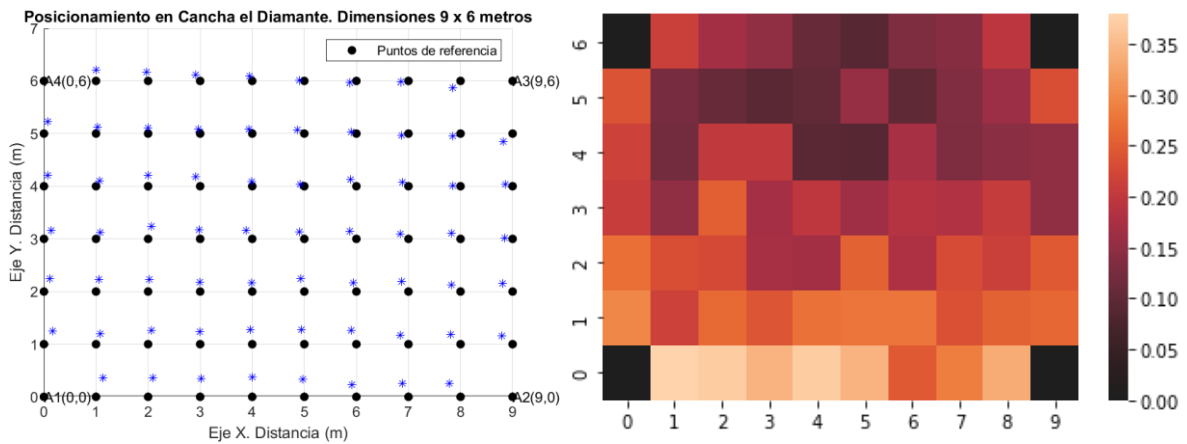


Figura. A1. 1 Posicionamiento y mapa de calor enfoque 1 en ESC1-LOS

A1.2 Enfoque de Mínimos Cuadrados

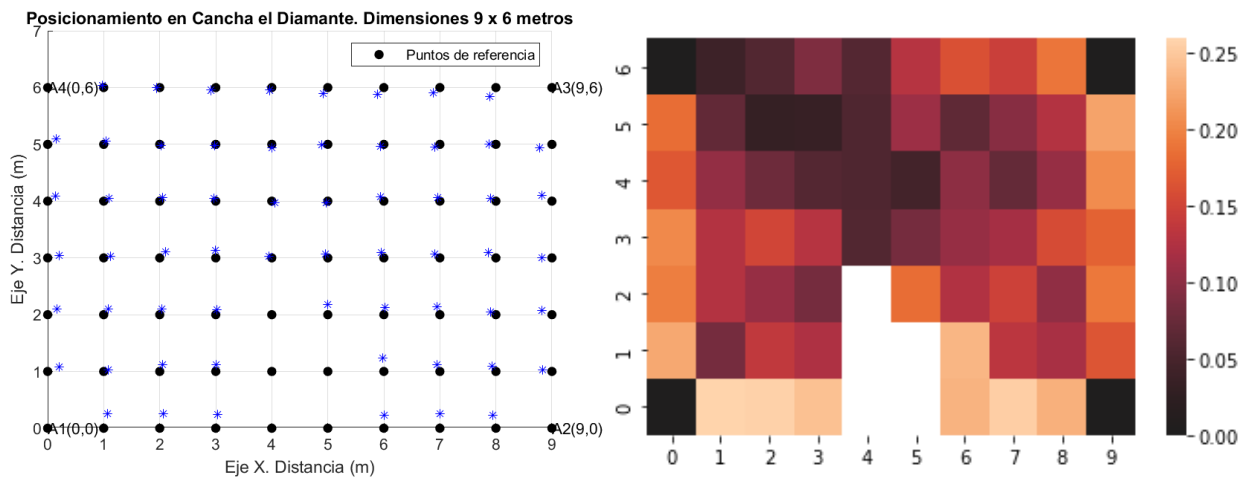


Figura. A1. 2 Posicionamiento y mapa de calor enfoque 2 en ESC1-LOS

A1.3 Enfoque de regresión no lineal para mínimos cuadrados

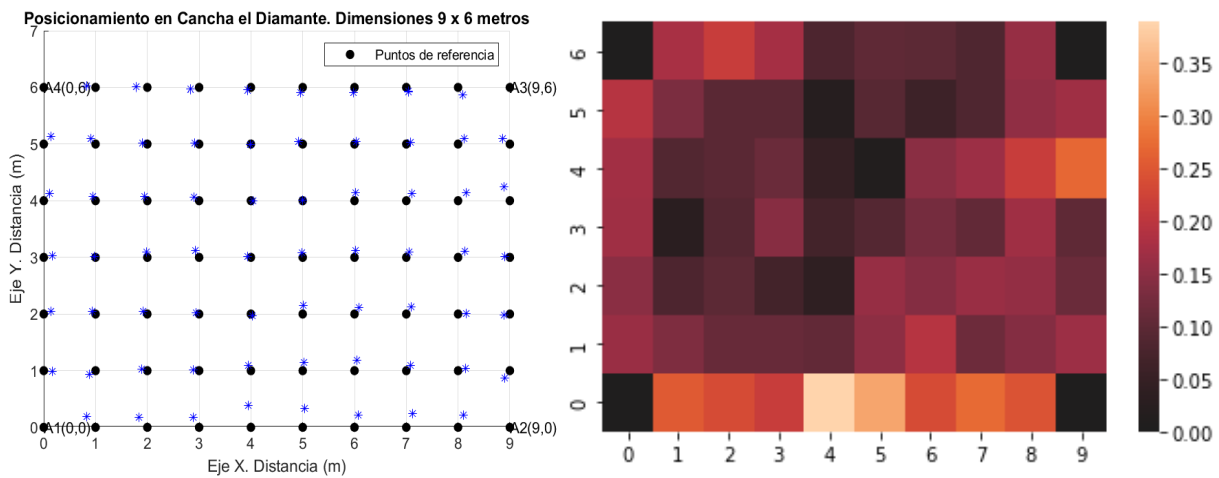


Figura. A1. 3 Posicionamiento y mapa de calor enfoque 3 en ESC1-LOS

En la Tabla Anexo 1 se comparan los resultados para los tres enfoques:

Enfoque / Error	ENFOQUE 1	ENFOQUE 2	ENFOQUE 3
Máximo error (m)	0.37917	0.25962	0.38823
Mínimo error (m)	0.089542	0.030629	0.010108
Error medio (m)	0.20447	NaN	0.14116

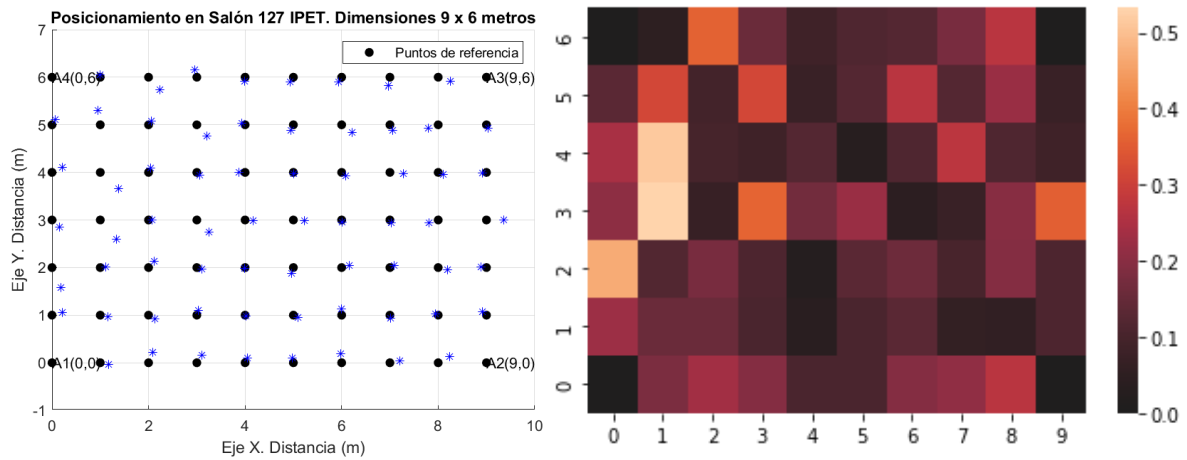
Tabla. Anexo 1 Comparación error para 3 enfoques en ESC1-LOS.

De la tabla se puede observar que para condición LOS en exteriores el enfoque 3 presentó mejores resultados generales.

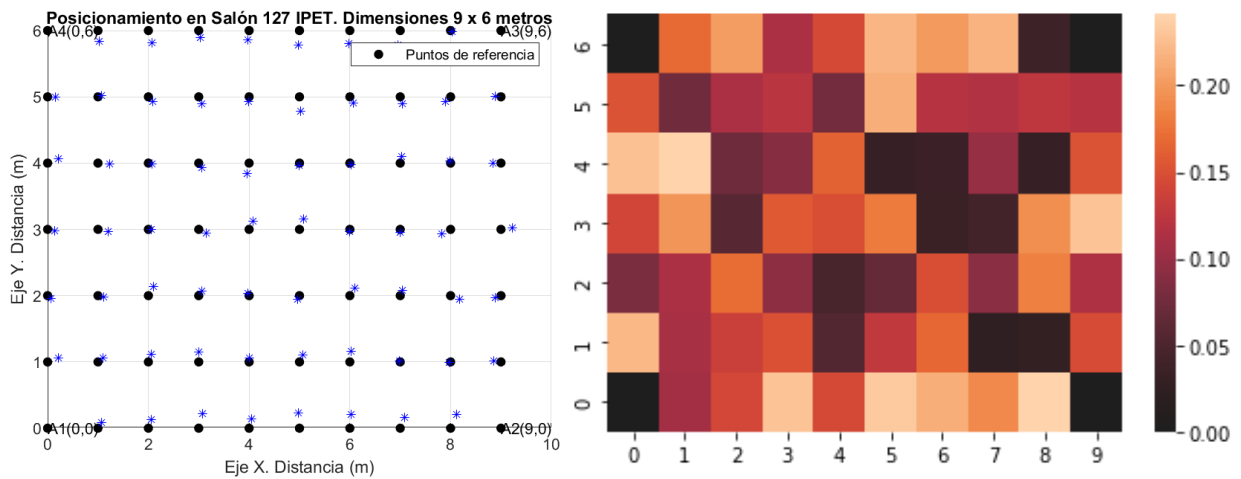
A2. SALÓN ESC3-LOS

En esta prueba los nodos anclas están ubicados en las cuatro esquinas del área delimitada que corresponde al salón 127 IPET. El nodo móvil se ubica en cada una de las 66 posiciones de referencia marcadas. No existen obstáculos entre el nodo móvil y los cuatro nodos anclas en ningún momento de la prueba.

A2.1 Enfoque geométrico de trilateración para los nodos 1, 2 y 3



A2.2 Enfoque de Mínimos Cuadrados



A2.3 Enfoque de regresión no lineal para mínimos cuadrados

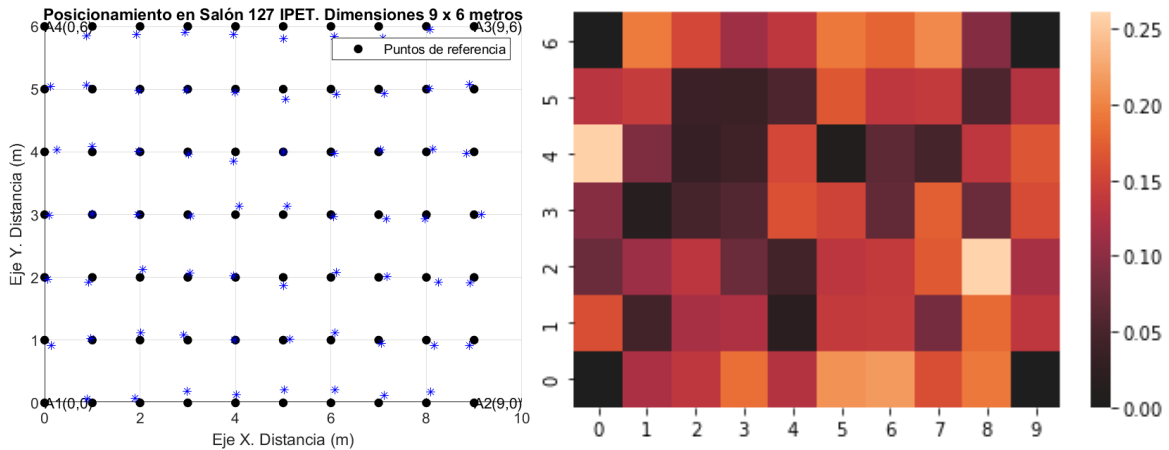


Figura. A1. 6 Posicionamiento y mapa de calor enfoque 3 ESC3-LOS.

En la Tabla Anexo 2 se comparan los resultados para los tres enfoques:

Enfoque / Error	ENFOQUE 1	ENFOQUE 2	ENFOQUE 3
Máximo error (m)	0.53231	0.24111	0.26086
Mínimo error (m)	0.021693	0.023284	0.010002
Error medio (m)	0.16991	0.13358	0.12233

Tabla. Anexo 2 Comparación error para 3 enfoques en ESC3-LOS.

De la tabla se puede observar que para condición LOS en interiores el enfoque 3 presentó mejores resultados.

A3. SALÓN ESC3-NLOS

En esta prueba los nodos anclas están ubicados en las cuatro esquinas del área delimitada que corresponde al salón 127 IPET. El nodo móvil se ubica en cada una de las 66 posiciones de referencia marcadas. Existe un obstáculo (persona) entre el nodo móvil y el nodo ancla 1(esquina inferior izquierda) durante toda la prueba.

A3.1 Enfoque geométrico de trilateración para los nodos 1, 2 y 3

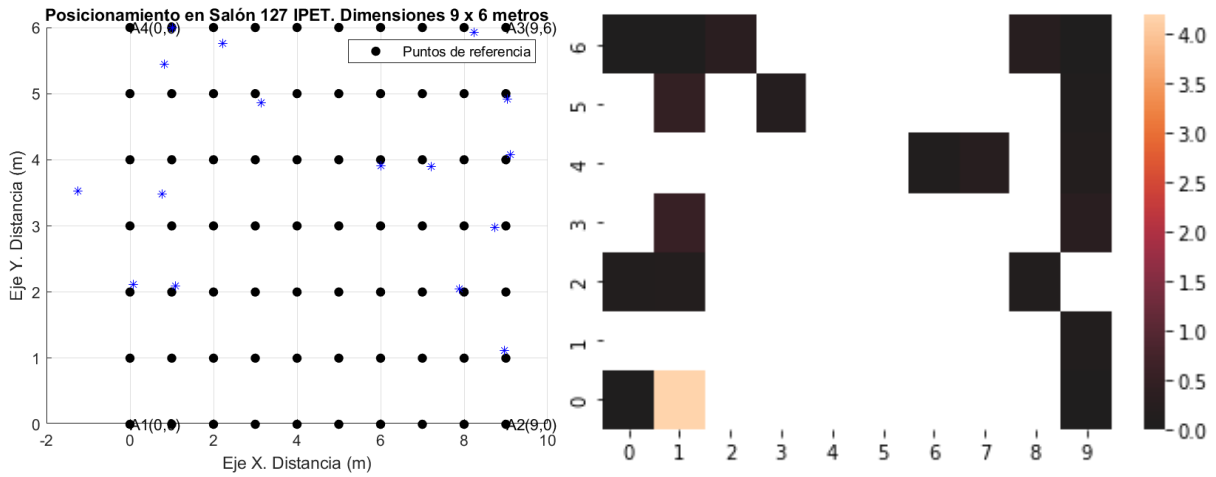


Figura. A1. 7 Posicionamiento y mapa de calor enfoque 1 ESC3-NLOS.

A3.2 Enfoque de Mínimos Cuadrados

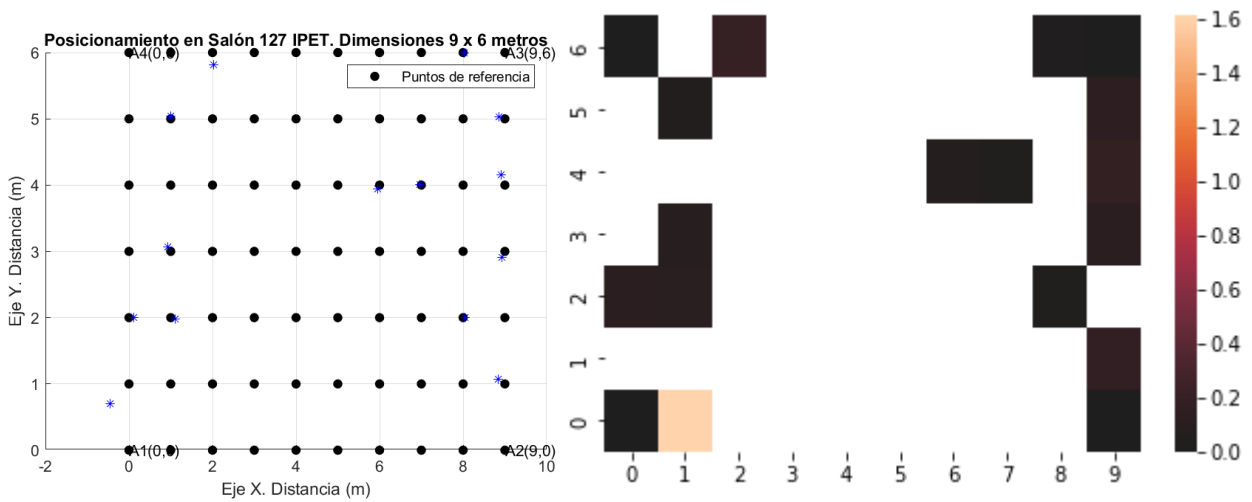


Figura. A1. 8 Posicionamiento y mapa de calor enfoque 2 ESC3-NLOS

A3.3 Enfoque de regresión no lineal para mínimos cuadrados

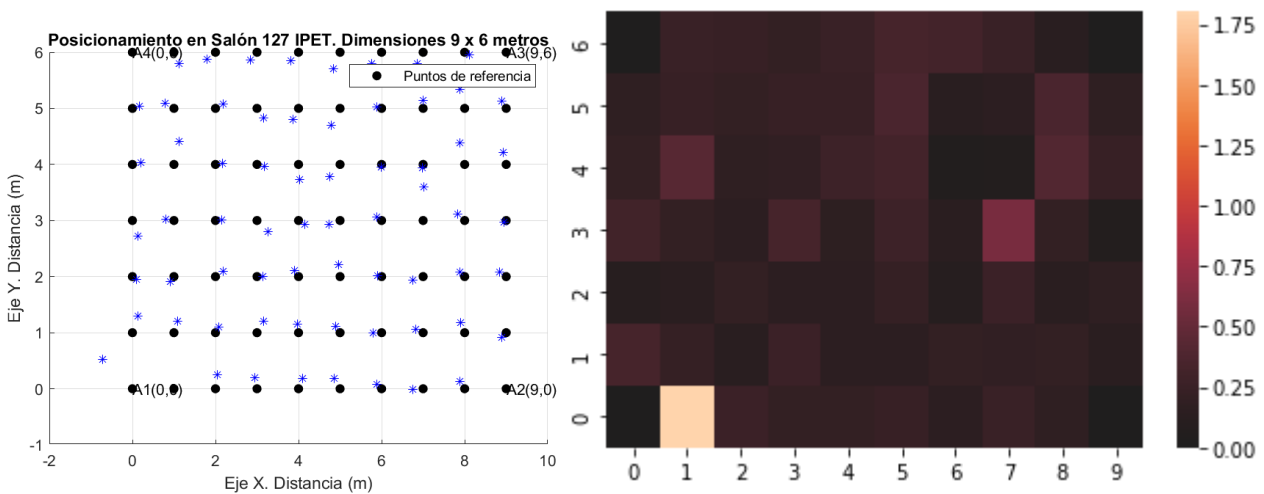


Figura. A1. 9 Posicionamiento y mapa de calor enfoque 3 ESC3-NLOS.

En la siguiente tabla se comparan los resultados para los tres enfoques:

Enfoque / Error	ENFOQUE 1	ENFOQUE 2	ENFOQUE 3
Máximo error (m)	4.1805	1.6093	1.802
Mínimo error (m)	0.019302	0.024087	0.046735
Error medio (m)	NaN	NaN	0.23913

Tabla. Anexo 3 Comparación error para 3 enfoques en ESC3-NLOS.

De la tabla se puede observar que para condición LOS en exteriores el enfoque 3 presentó mejores resultados.

Finalmente, de acuerdo con las tres tablas mostradas se concluye que la técnica de multilateración/trilateración con el enfoque 3 presentó los mejores resultados para los tres escenarios, por lo tanto, se optó por utilizarla como técnica central del trabajo de grado.

Anexo B. EXACTITUD DE LA LOCALIZACIÓN POR CAMBIO EN POSICIÓN DE ANCLAS

En este anexo se presenta el desempeño a nivel de un exactitud al variar de posición los nodos anclas en el sistema de posicionamiento basado en la tecnología de UWB. Dado que la distribución sugerida por el fabricante de los dispositivos consiste en ubicarlos en las cuatro esquinas del escenario a probar, se definió como prueba alternativa evaluar la exactitud para un escenario de interiores (salón 127 IPET) en condiciones de LOS al reubicar los nodos anclas en las parte central de cada lado. En la siguiente tabla se muestran las nuevas posiciones consideradas:

Anclas reubicadas	x (m)	y (m)
Ancla 1	4	0
Ancla 2	9	3
Ancla 3	4	6
Ancla 4	0	3

Tabla. Anexo 4 Localización de nodos anclas.

En la toma de medidas de la prueba alternativa se redujo el área de medición a 28 m^2 para no incluir los puntos colaterales a los nodos anclas. Durante la prueba alternativa se perdieron las mediciones de los puntos de referencia ubicados sobre la recta $x = 6$, por lo tanto, para realizar una comparación en las mismas condiciones se omitieron esos mismos datos del dataset central. En las siguientes figuras se muestran los resultados:

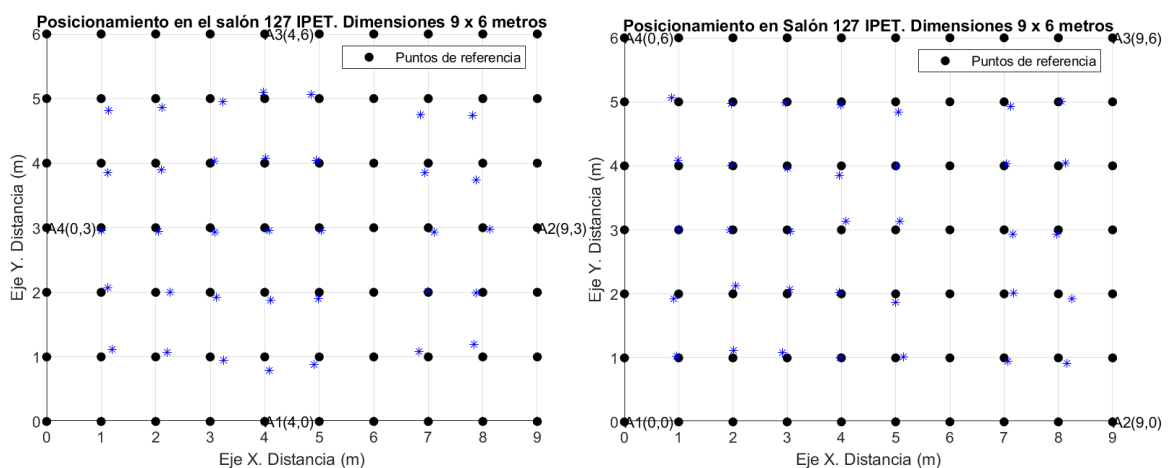


Figura. A1. 10 Izquierda. Nodos reubicados y Derecha. Nodos en esquinas.

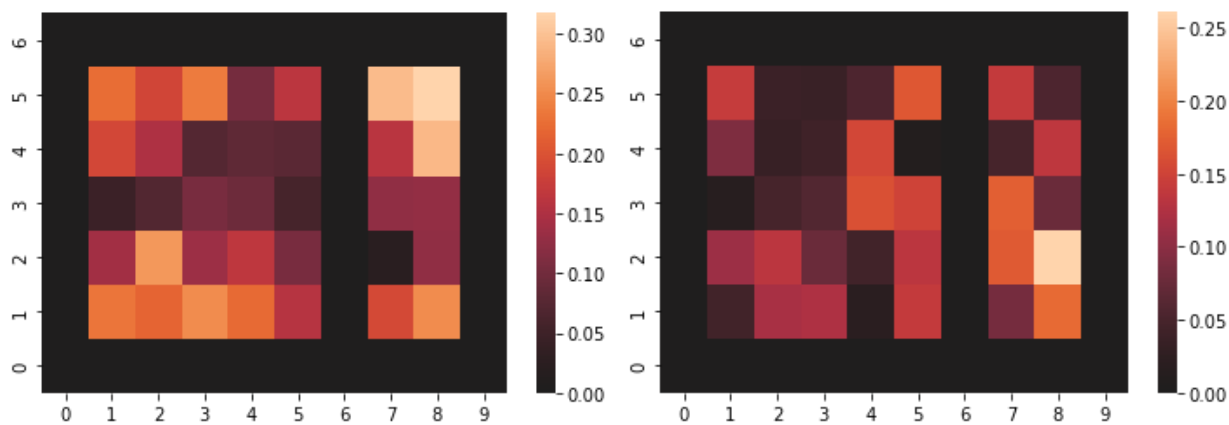


Figura. A1. 11 Izquierda. Mapa de calor del error para los nodos reubicados y Derecha Mapa de calor del error para los nodos de las esquinas.

En la Tabla Anexo 5 se presentan los resultados de la prueba, donde se observa como el error medio se mantiene inferior cuando los nodos se ubican en las esquinas del escenario de interiores. Por lo tanto, se mantiene la decisión de ubicar los nodos anclas en las esquinas.

Variable	Nodos centro	Nodos esquinas
Máximo error (m)	0.29403	0.25797
Mínimo error (m)	0.020948	0.015924
Error promedio (m)	0.15101	0.10917

Tabla. Anexo 5 Comparación de error por localización de nodos.

Anexo C. EXACTITUD DE LA TRAYECTORIA

En este Anexo se muestran los resultados de aplicar la técnica de multilateración con tres enfoques distintos: enfoque 1 usando trilateración por solución del sistema de ecuaciones; enfoque 2 usando estimación por mínimos cuadrados y el enfoque 3 usando Regresión no lineal para mínimos cuadrados. A continuación, se grafican los errores durante la trayectoria y el resultado en el mapa de posicionamiento:

C1. REGRESIÓN NO LINEAL PARA MÍNIMOS CUADRADOS

Máximo error (m)	7.8715
Mínimo error (m)	1.0733
Error promedio (m)	4.723

Tabla. Anexo 6 Error trayectoria para enfoque 3.

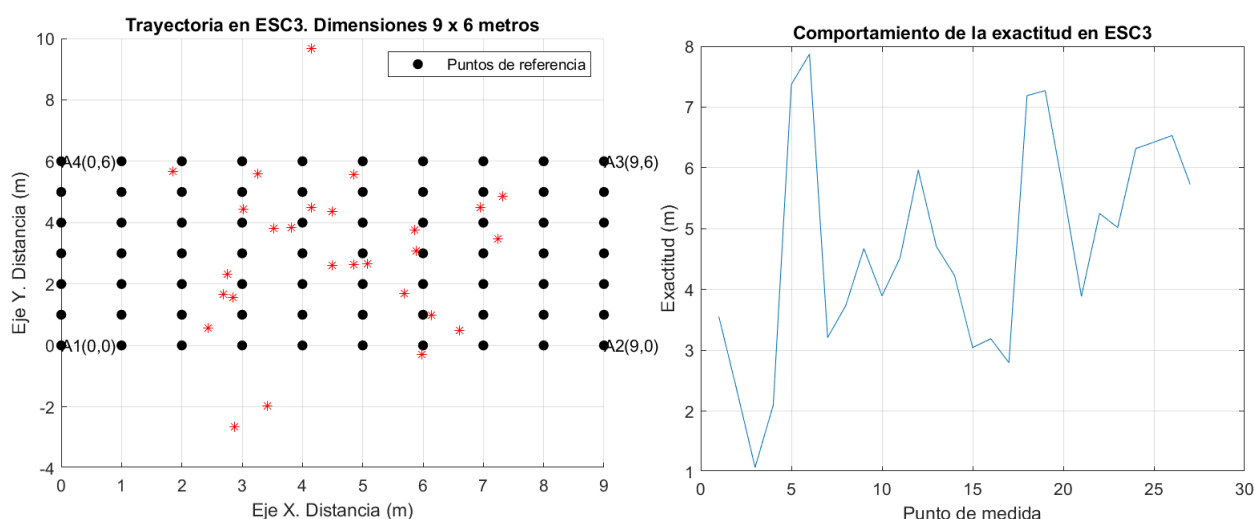


Figura. A1. 12 Trayectoria enfoque 3.

C2. RESOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES POR TRILATERACIÓN

Máximo error (m)	11.727
Mínimo error (m)	0.040544
Error promedio (m)	4.6389

Tabla. Anexo 7 Error trayectoria para enfoque 1.

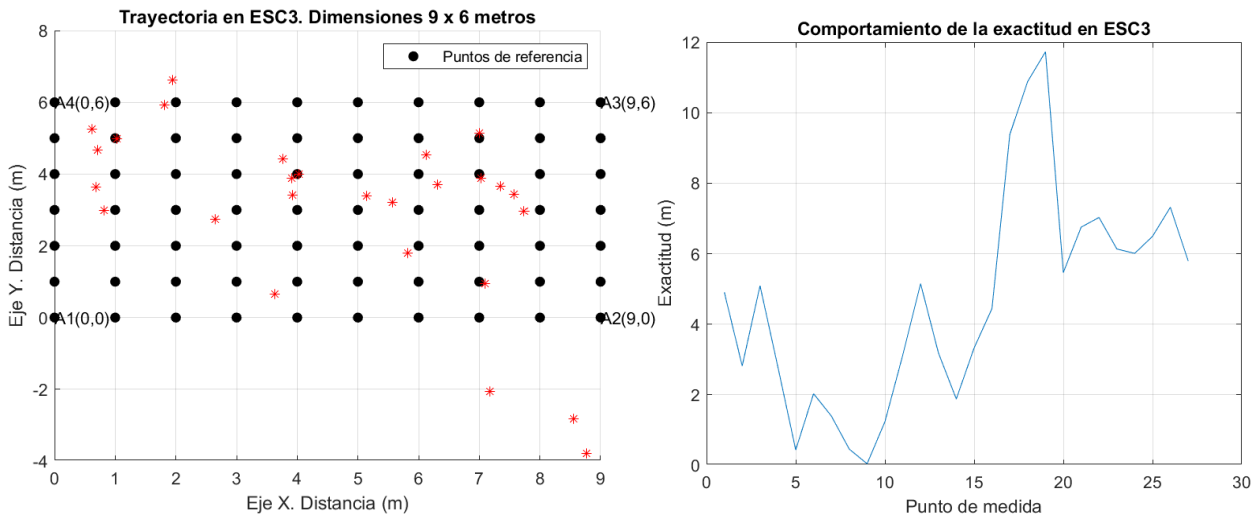


Figura. A1. 13 Trayectoria enfoque 1.

C3. ESTIMACIÓN POR MÍNIMOS CUADRADOS

Máximo error (m)	5.6951
Mínimo error (m)	4.1275
Error promedio (m)	4.9309

Tabla. Anexo 8 Error trayectoria para enfoque 2.

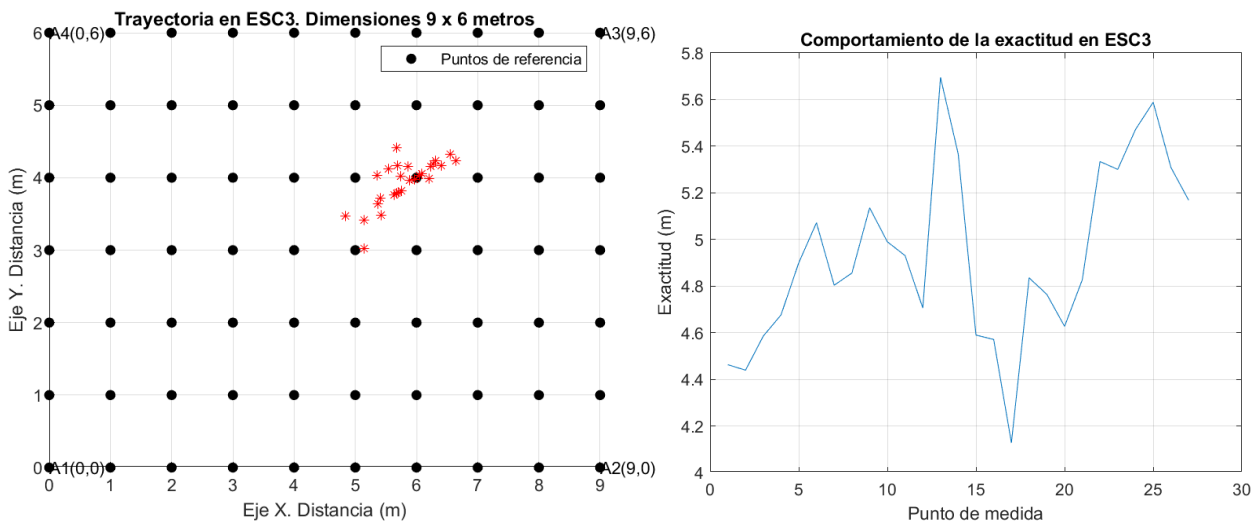


Figura. A1. 14 Trayectoria enfoque 2.

Anexo D. COMBINACIÓN DE NODOS PARA POSICIONAMIENTO

D1. ESCENARIO 3: SALÓN 127 IPET

El presente anexo muestra el resultado de utilizar la información disponible de tres de los cuatro nodos ancla en localización para el escenario en interiores del salón 127 del IPET donde el nodo ancla 1 se encuentra obstaculizado en todo momento respecto al nodo móvil. El objetivo de la prueba es identificar el nodo o los nodos que estén incrementando el error de localización. Adicionalmente, se compara el desempeño entre dos enfoques de multilateración: el geométrico (enfoque 2) y el por regresión no lineal de mínimos cuadrados (enfoque 1).

Variables	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo total
Nodos usados	1,2,3	1,3,4	2,3,4	1,2,4	1,2,3,4
Máximo error (m)	1.53	0.34945	1.3309	1.8615	1.7716
Mínimo error (m)	0.012289	0.022042	0.011901	0.033089	0.034728
Error promedio (m)	0.1861	0.16692	0.17555	0.19158	0.14182

Tabla. Anexo 9 Error vs. grupo para enfoque 1.

Dado que la técnica de Trilateración solo utiliza tres nodos se tiene que los resultados del grupo 1 y el grupo Total son exactamente iguales.

Variables	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo total
Nodos usados	1,2,3	1,3,4	2,3,4	1,2,4	1,2,3,4*
Máximo error (m)	4.1164	0.76927	3.4689	2.218	4.1164
Mínimo error (m)	0.020334	0.0050085	0.038396	0.053109	0.020334
Error promedio (m)	0.23477	0.21606	0.22135	0.25266	0.23477

Tabla. Anexo 10 Error vs. grupo para enfoque 2.

En las siguientes figuras se muestran los mapas de calor para cada grupo y para cada enfoque. De los resultados observados en las anteriores tablas se observa que el enfoque 1 presenta mejores resultados y que el grupo 2 obtuvo el mejor error promedio y máximo error. A partir de esto, se puede concluir que el nodo ancla 2 es quien genera el incremento de errores en la estimación de la posición del nodo móvil.

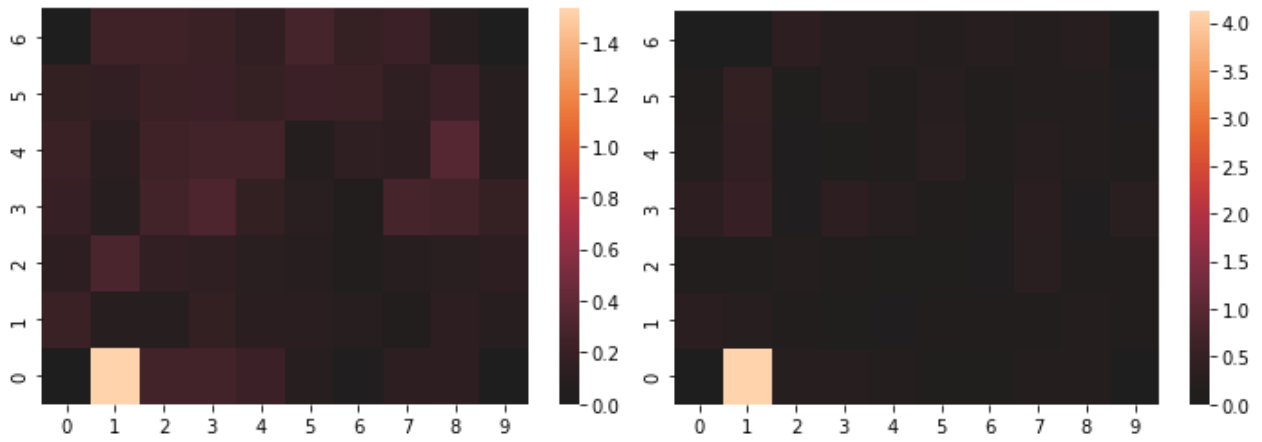


Figura. A1. 15 Mapa de calor para el Grupo 1. Izquierda Enfoque 1 y Derecha Enfoque 2.

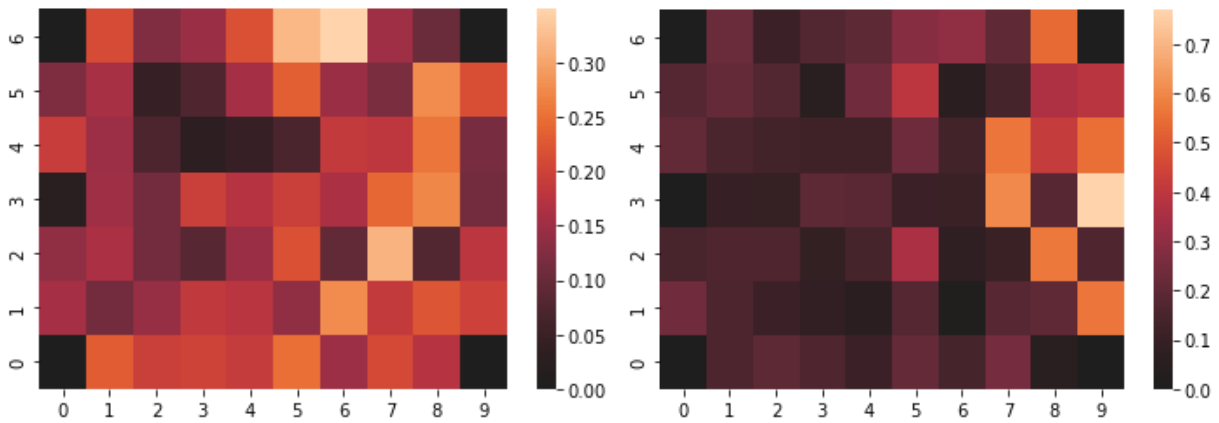


Figura. A1. 16 Mapa de calor para el Grupo 2. Izquierda Enfoque 1 y Derecha Enfoque 2.

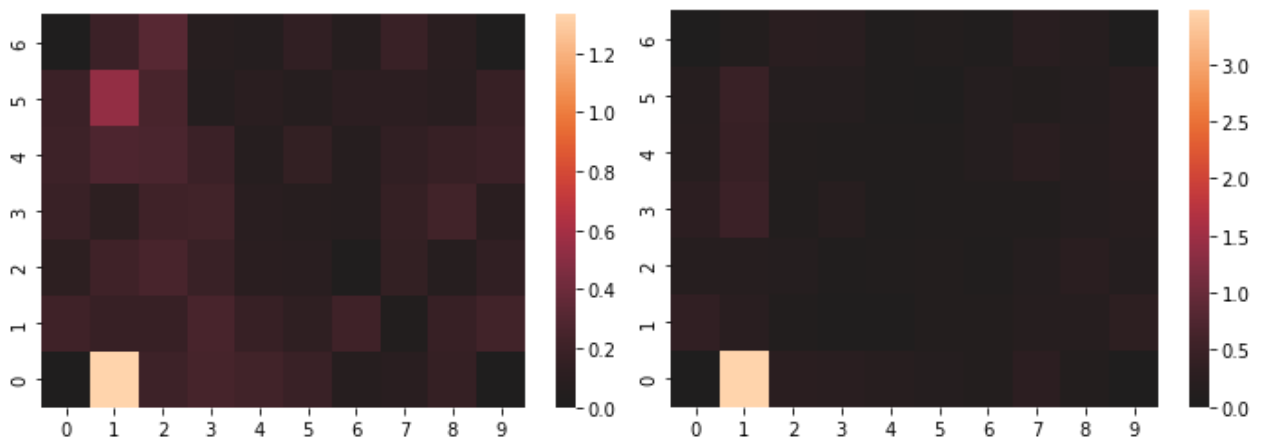


Figura. A1. 17 Mapa de calor para el Grupo 3. Izquierda Enfoque 1 y Derecha Enfoque 2.

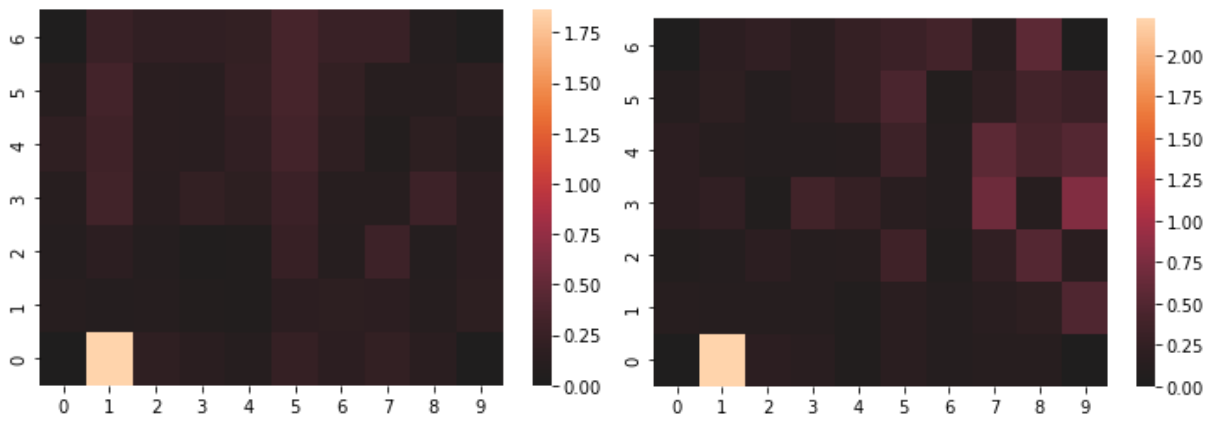


Figura. A1. 18 Mapa de calor para el Grupo 4. Izquierda Enfoque 1 y Derecha Enfoque 2.

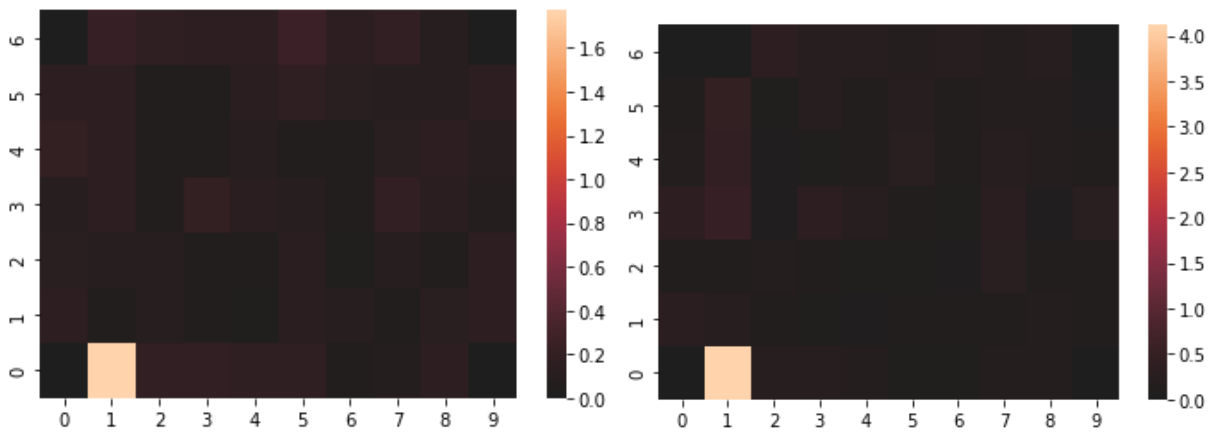


Figura. A1. 19 Mapa de calor para el Grupo Total. Izquierda Enfoque 1 y Derecha Enfoque 2.

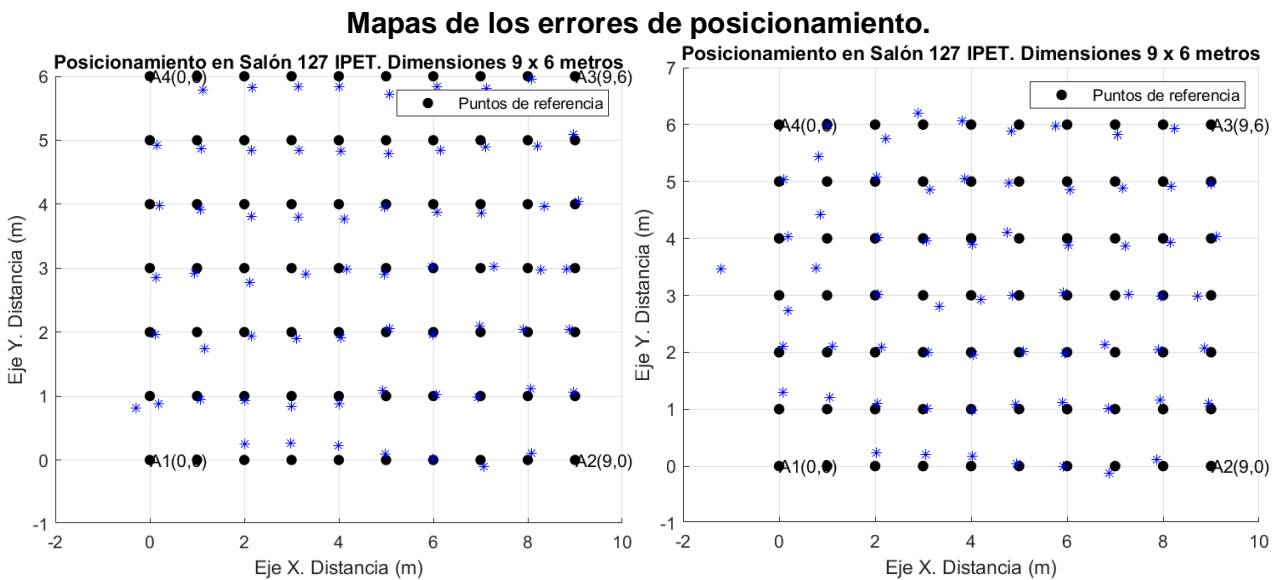


Figura. A1. 20 Mapa de posicionamiento para el Grupo 1. Izquierda Enfoque 1 y Derecha Enfoque 2.

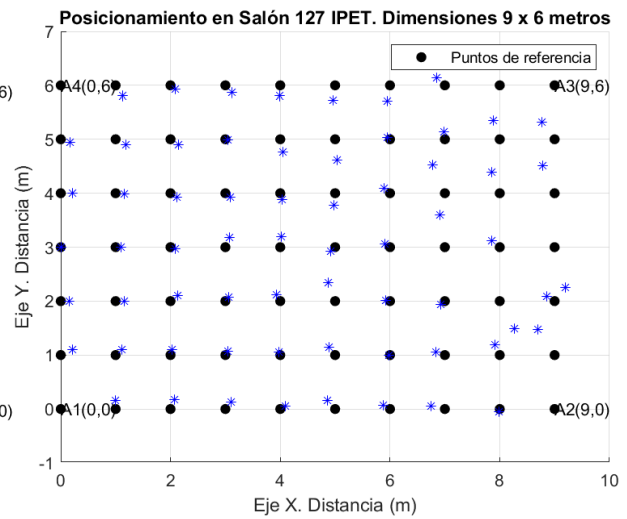
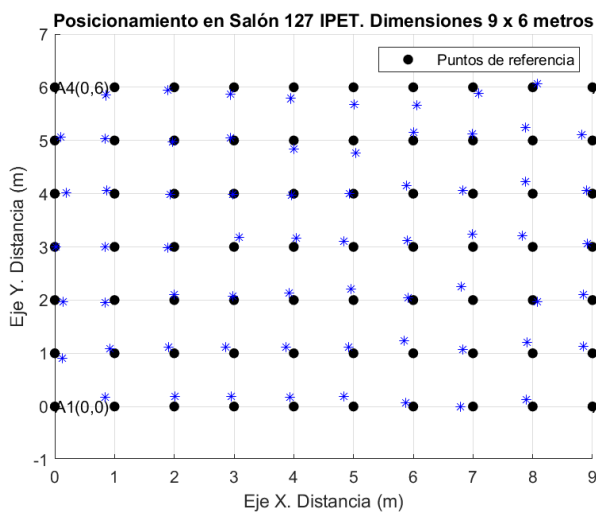


Figura. A1. 21 Mapa de posicionamiento para el Grupo 2. Izquierda Enfoque 1 y Derecha Enfoque 2.

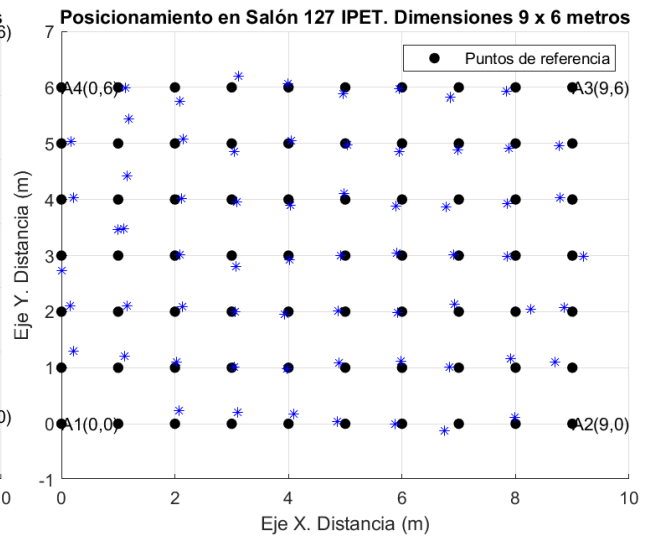
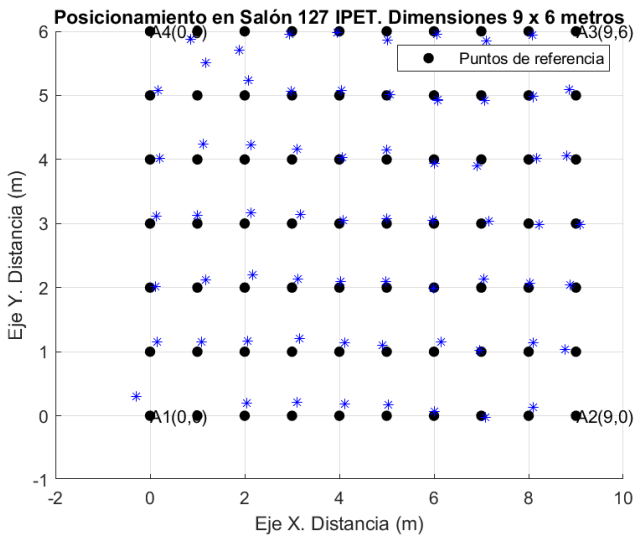


Figura. A1. 22 Mapa de posicionamiento para el Grupo 3. Izquierda Enfoque 1 y Derecha Enfoque 2.

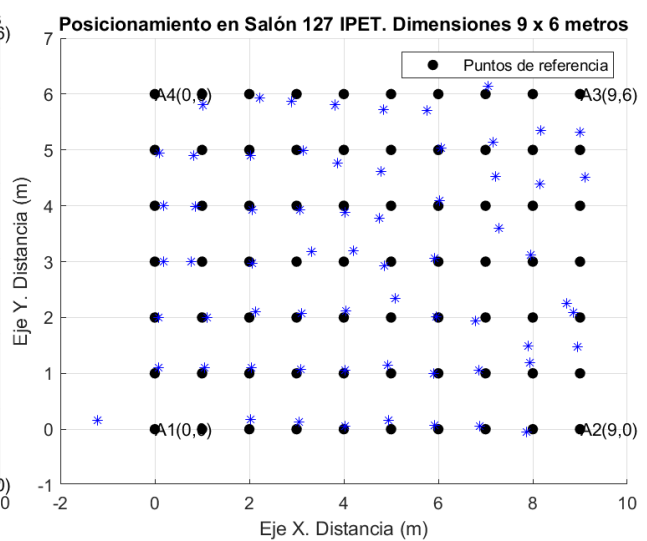
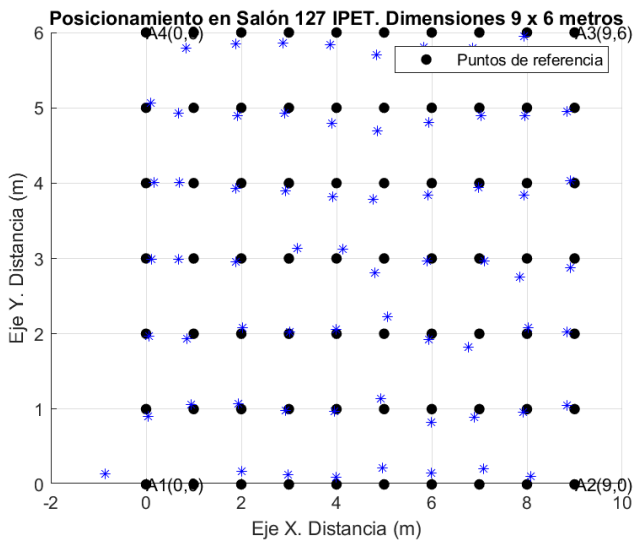


Figura. A1. 23 Mapa de posicionamiento para el Grupo 4. Izquierda Enfoque 1 y Derecha Enfoque 2.

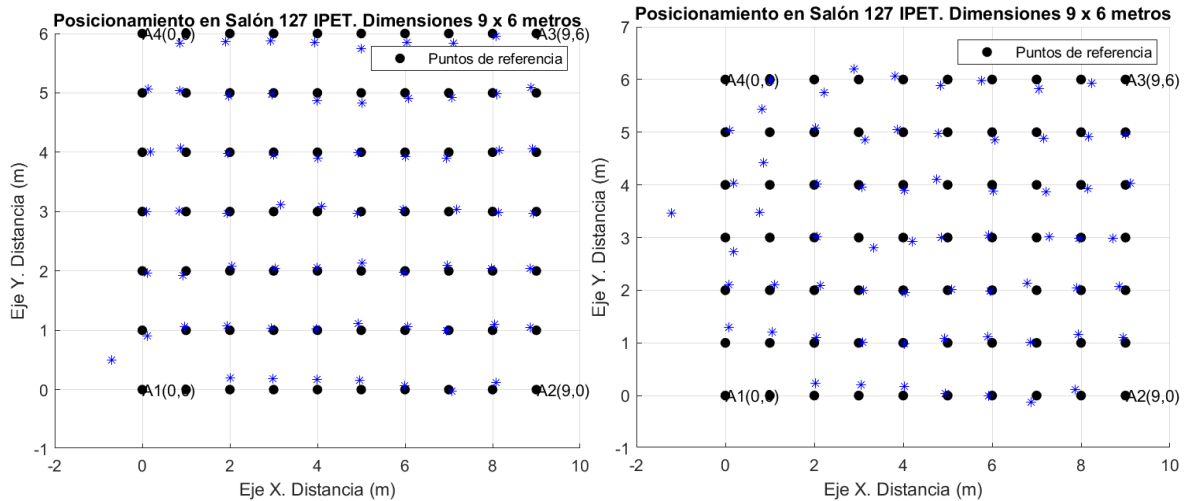


Figura. A1. 24 Mapa de posicionamiento para el Grupo Total. Izquierda Enfoque 1 y Derecha Enfoque 2.

D2. POSICIONAMIENTO EN TRAYECTORIA

En esta sección se muestran los resultados de considerar los nodos anclas que tengan condición LOS o el valor más cercano de ambas y comprobar si mejora el desempeño en la estimación de la exactitud. El procedimiento consiste en calcular la diferencia de potencia entre el primer trayecto y el nivel de recepción, luego quitar el valor más grande, es decir, un nodo, y estimar la posición con el resto de nodos ancla. En la siguiente tabla se listan los nodos usados en cada punto de medida:

Punto	Ancla 1	Ancla 2	Ancla 3
1	A1	A3	A4
2	A1	A3	A4
3	A1	A2	A4
4	A1	A3	A4
5	A1	A2	A4
6	A1	A2	A3
7	A1	A2	A3
8	A1	A2	A3
9	A1	A2	A3
10	A2	A3	A4
11	A2	A3	A4
12	A2	A3	A4

13	A2	A3	A4
14	A1	A3	A4
15	A1	A3	A4
16	A1	A3	A4
17	A2	A3	A4
18	A2	A3	A4
19	A1	A2	A3
20	A1	A2	A3
21	A1	A2	A4
22	A1	A2	A4
23	A1	A2	A3
24	A1	A2	A4
25	A1	A3	A4
26	A1	A3	A4
27	A1	A3	A4

Tabla. Anexo 11 Anclas usadas por punto trayectoria.

En la Tabla Anexo 12 se muestran los resultados de implementar esa consideración sobre la técnica y los nodos utilizados, en los cuales se observa una ligera mejoría sobre algunos puntos de la trayectoria, en comparación con el desempeño del sistema al utilizar los 4 nodos anclas. De la tabla se puede concluir que el enfoque 2 presenta resultados ligeramente mejores al enfoque 1.

Variable \ Enfoque	Enfoque 1	Enfoque 2
Máximo error (m)	8.4928	8.105
Mínimo error (m)	0.37098	0.18139
Error promedio (m)	4.7377	4.6484

Tabla. Anexo 12 Resultado trayectoria por enfoque.

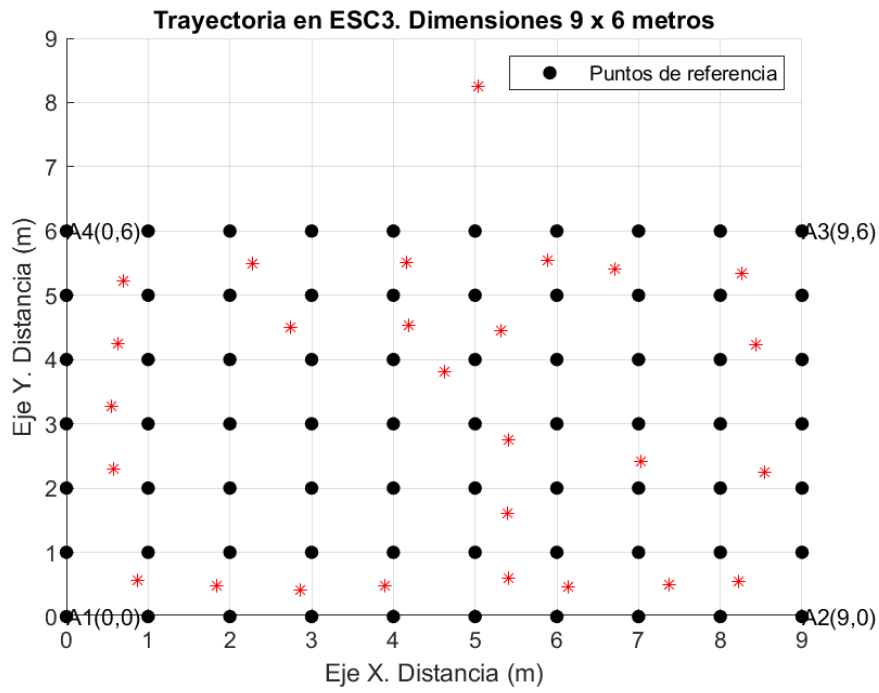


Figura. A1. 25 LSE para la trayectoria.

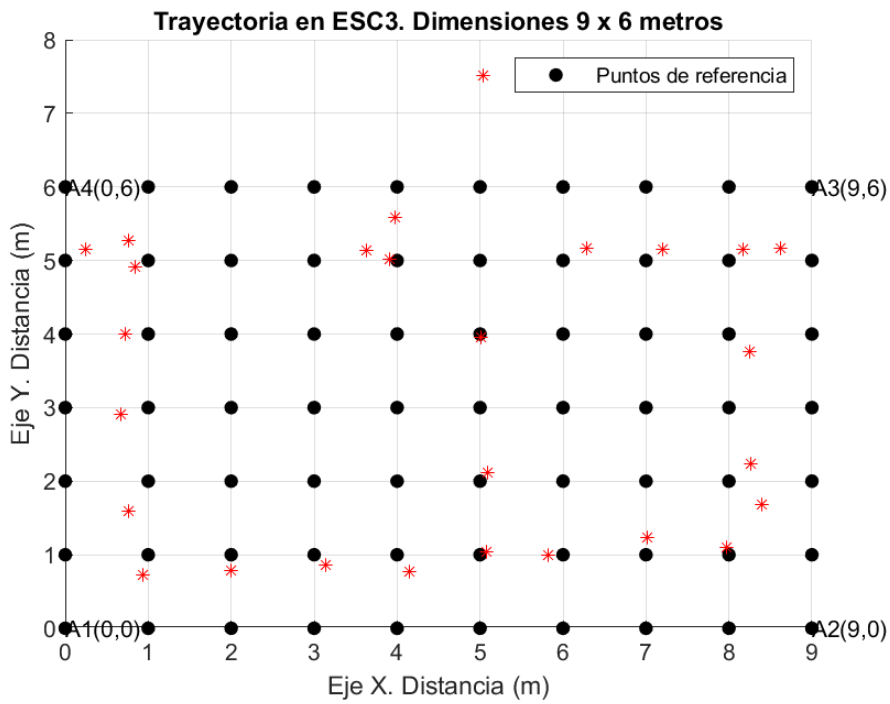


Figura. A1. 26 Trilateración para la trayectoria.

Anexos E. CLASIFICACIÓN DE LOS DATOS POR HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS

En este anexo se presenta la información utilizada en el análisis y clasificación de las distribuciones para las pruebas realizadas. Se incluyen los resultados de las pruebas de validación del capítulo 2 y los resultados de posicionamiento del capítulo 3. Se utilizan las herramientas de Matlab: *fitmethis*, *Distribution Fitter* y *chi2gof* que corresponden a la prueba Chi Cuadrado. A continuación, se detallan los temas considerados para el análisis y clasificación de las distribuciones.

De acuerdo con la referencia [1] se explican los tres principales conceptos de medición asociados a los errores presentes en las medidas realizadas: modelo de medición, error sistemático y error aleatorio.

Modelo de medición

El resultado de una medición de un instrumento de medida se puede modelar como la suma de todos los errores involucrados en la medición incluyendo errores sistemáticos (la calibración) y errores aleatorios. Este modelo generalmente no es aplicable porque siempre hay errores que son desconocidos y deben cuantificarse mediante la estimación de la incertidumbre. Se definen dos tipos de errores de medición: error sistemático y error aleatorio.

Error sistemático

El error sistemático es la desviación del valor «verdadero» de una medición que se repite constantemente cuando la medición se realiza de forma iterativa. Dado que el error sistemático tiene un patrón recurrente se puede modelar o estimar y luego compensar «fuera de línea» para aumentar la precisión del resultado de una medición.

Error aleatorio

El error aleatorio es una desviación de medición que no se repite cuando la medición se realiza de forma iterativa. Este error no tiene un valor recurrente ya que no hay un patrón específico que describa el error aleatorio, por lo cual no se puede compensar «fuera de línea». El error aleatorio se puede cuantificar mediante estadísticas como distribuciones de probabilidad junto con los parámetros: media y varianza.

El error aleatorio se puede compensar «en línea», lo que implica la compensación de una lectura en tiempo real de los resultados de medición y una retroalimentación a un sistema de control de circuito cerrado para ajustar el resultado.

E1. HERRAMIENTAS DE MATLAB

A continuación, se describen algunos aspectos generales que aportan las herramientas para su funcionamiento:

Fitmethis

Fitmethis(X) encuentra la distribución que mejor se ajusta a los datos del vector de datos X entre todas las distribuciones disponibles en la función MLE de MATLAB. Se utilizan distribuciones continuas o discretas según la entrada del usuario o el tipo de datos suministrados. Se agrega un ajuste no paramétrico (núcleo) para datos complejos. La función devuelve una matriz con los siguientes campos [2]:

- *NOMBRE*: Nombre de la distribución
- *PAR*: Vector de estimaciones de parámetros (1, 2 o 3 valores)
- *Log-L*: Log-Verosimilitud como una medida de qué tan bien se ajustan los datos a un modelo particular de distribución.
- *AIC*: Criterio de información de Akaike que se define como un estimador de la calidad relativa del modelo que tiene en cuenta su complejidad.

Distribution Fitter

La aplicación *DistributionFitter* ajusta de manera interactiva hasta 22 distribuciones de probabilidad disponibles para la PDF, la CDF, gráficas de probabilidad y funciones de supervivencia a los conjuntos de datos importados. La aplicación utiliza la regla de Freedman-Diaconis por defecto para la construcción de los histogramas. Cada ajuste de distribución cuenta con un valor de Log-verosimilitud [3].

Chi2gof

La prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado determina si una muestra de datos proviene de una distribución de probabilidad específica, con parámetros estimados a partir de los datos. La prueba agrupa los datos en contenedores, calcula los recuentos observados y esperados para esos contenedores y calcula la estadística de prueba de Chi Cuadrado.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (\text{A.1})$$

donde O_i son los conteos observados y E_i son los conteos esperados basados en la distribución hipotética. El resultado de la prueba Chi-Cuadrado χ^2 se compara con el valor crítico de la tabla de probabilidades para Ji-Cuadrado χ^2 para el nivel de significancia y los grados de libertad definidos [4].

Mezcla de distribuciones

Es un modelo de probabilidad que considera la existencia de subconjuntos de datos dentro de un conjunto general de datos. Las distribuciones de una distribución mixta pueden estar formadas por diferentes distribuciones.

E2. RESULTADOS

En el siguiente apartado se muestran los resultados de las pruebas. Cada una se identifica con las mismas siglas del documento principal, i.e., P1-ESC1-LOS para identificar la prueba 1 en escenario ESC 1 de exteriores (cancha) en condición de línea de vista (LOS) que corresponde a la prueba de tendencia estadística a 5 metros. Para cada prueba se ejecuta primero *fitmethis* donde se genera un listado ordenado de las distribuciones por el valor de Log-L, segundo *chi2gof* con el resultado de la aceptación o rechazo de la pruebas de hipótesis para la primera distribución de la lista anterior y tercero *DistributionFitter* donde se grafican las dos/tres primeras distribuciones de la lista del paso uno. Dado que la prueba de Chi Cuadrado generalmente falla cuando la muestra es de un gran tamaño, mayor a 2000 datos, se muestrea los conjuntos de datos para reducir el tamaño con la función *resample* de Matlab.

E2.1 P1-ESC1-LOS

Resultados de la herramienta *fitmethis*.

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
tlocationscale	193.70	27.39	41890.00	11720000.00	-23440000.00
normal	193.70	28.07		11720000.00	23440000.00
rician	191.60	28.23		11720000.00	23440000.00
nakagami	11910.00	38.31		11710000.00	23410000.00
beta	37430.00	155800.00		11690000.00	23380000.00
logistic	193.70	15.97		11690000.00	23370000.00
gamma	46070.00	4.21		11670000.00	23340000.00
loglogistic	-1646.00	83.78		11640000.00	23270000.00
gev	-188.10	27.86	182.40	11640000.00	23270000.00
lognormal	-1652.00	149.50		11610000.00	23220000.00
birnbaum saunders	191.50	150.00		11610000.00	23210000.00
inverse Gaussian	193.70	8559.00		11610000.00	23210000.00
weibull	205.80	7418.00		11570000.00	23140000.00
ev	207.70	28.52		11240000.00	22480000.00
uniform	84.35	328.20		7679000.00	15350000.00

rayleigh	138.40			7091000.00	14180000.00
gp	-916.70	300.90		6082000.00	12160000.00
exponential	193.70			3491000.00	-6980000.00

Tabla. Anexo 13 Distribuciones para P1-ESC1-LOS.

La prueba Chi Cuadrado rechaza las pruebas de hipótesis para las tres primeras distribuciones para todo el conjunto de datos; por lo tanto, se muestrea a una frecuencia de 1/2. Se observa que para la mitad del conjunto de datos la prueba Chi cuadrado acepta las pruebas de hipótesis para las distribuciones Normal y t Location-Scale. En la siguiente tabla se muestra el resultado para la distribución Normal:

Muestra	2721
Distribución	Normal
Prueba de hipótesis	0 - Aceptada
p-valor	0.35822
Estadística Chi-Cuadrado	5.4975
Grados de libertad (df)	5
Bordes (Edges)	[0.1163 0.1488 0.1650 0.1813 0.1976 0.2138 0.2301 0.2463 0.2788]
Valores Observados (O)	[42 177 536 844 667 339 97 19]
Valores Esperados (E)	[42.3835 187.7584 520.9115 809.6652 705.6160 344.7019 94.2729 15.6907]

Tabla. Anexo 14 Resultado Prueba Chi Cuadrado.

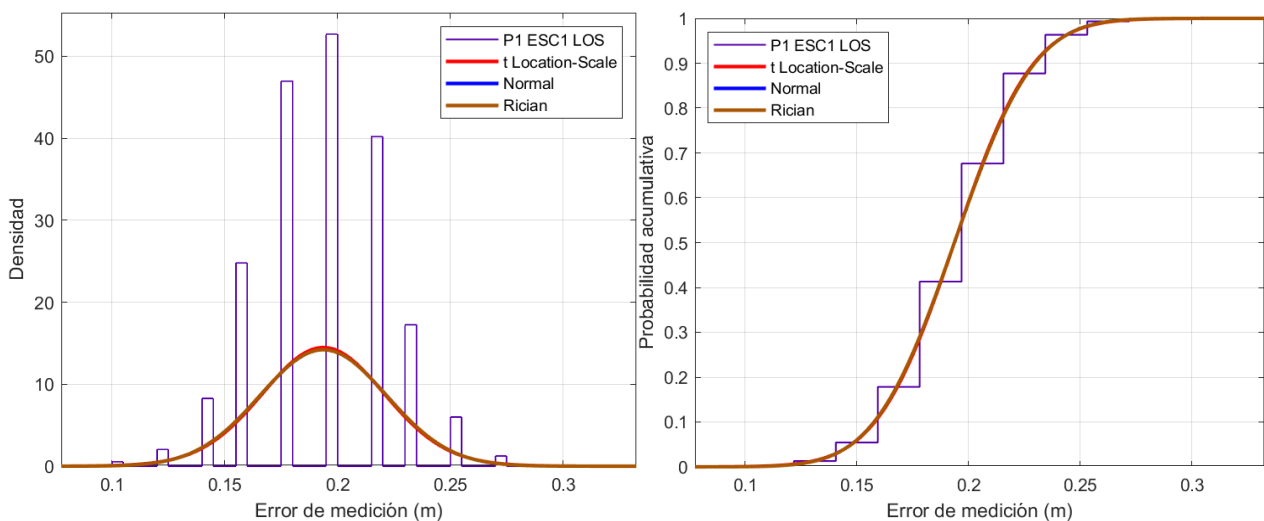


Figura. A1. 27 PDF y CDF para P1-ESC1-LOS.

E2.2 P2-ESC1-LOS

A partir del histograma de los datos se observa un posible modelo de distribución normal mezclado, por lo cual se utiliza la herramienta *fitgmdist* de Matlab que confirma la presencia de dos componentes de distribución normal con los siguientes valores:

Componente	1
Porción de mezcla	0.789485
Media	0.3062
Componente	2
Porción de mezcla	0.210515
Media	1.3910

Tabla. Anexo 15 Resultado separación de datos P2-ESC1-LOS.

Al ejecutar *fitmethis* y la prueba Chi Cuadrado no se obtuvieron resultados acertados, dado que los valores de Log-verosimilitud fueron negativos y las pruebas de hipótesis para las tres primeras distribuciones fueron rechazadas tanto para el conjunto completo de datos como para el conjunto muestreado. Por lo cual, se opta por separar el conjunto de datos en dos. Se tiene en cuenta el resultado anterior de *fitgmdist*; en esta ocasión los nuevos conjuntos de datos son claramente diferenciables por lo que se define un valor de error de separación de 1 m para separar el conjunto de datos y poder analizar a qué distribución se ajusta más a cada uno. Al ejecutar nuevamente *fitmethis* para cada subconjunto por separado se obtuvieron mejores resultados, pero la prueba Chi cuadrado rechazó las pruebas de hipótesis de las primeras tres distribuciones para los dos conjuntos. A continuación, se muestran los resultados:

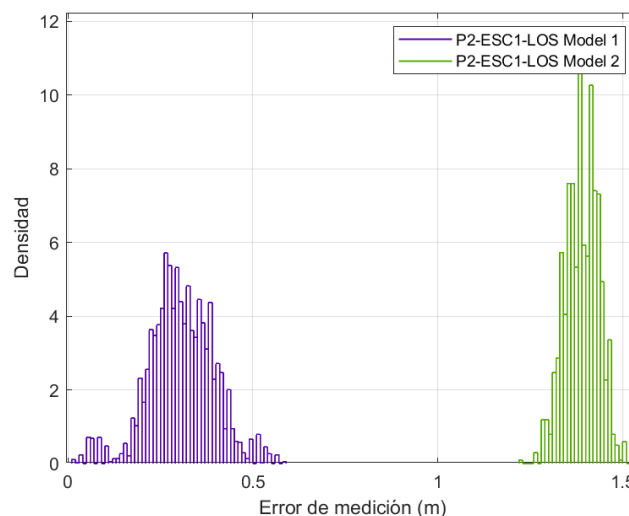


Figura. A1. 28 Histograma para P2-ESC1-LOS.

Resultado para el conjunto 1 (error inferior a 1 m).

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
tlocationscale	306.70	77.97	9683.00	3901000.00	-7795000.00
logistic	306.40	48.70		3899000.00	-7794000.00
normal	306.20	87.35		3871000.00	-7737000.00
rician	292.00	89.86		3861000.00	-7719000.00
gev	-268.50	89.57	274.70	3824000.00	-7642000.00
weibull	337.40	3838.00		3808000.00	-7613000.00
nakagami	2828.00	101.40		3698000.00	-7392000.00
beta	7050.00	16060.00		3648000.00	-7293000.00
loglogistic	-1201.00	175.70		3587000.00	-7169000.00
ev	349.60	87.62		3570000.00	-7136000.00
gamma	9350.00	32.75		3490000.00	-6977000.00
lognormal	-1238.00	372.70		3062000.00	-6120000.00
rayleigh	225.20			2826000.00	-5650000.00
birnbaumsaunders	282.20	408.80		2772000.00	-5540000.00
inversegaussian	306.20	1759.00		2736000.00	-5467000.00
gp	-800.40	469.90		2111000.00	-4218000.00
uniform	13.12	586.90		2110000.00	-4216000.00
exponential	306.20			696800.00	-1392000.00

Tabla. Anexo 16 Distribuciones para el conjunto 1 de P2-ESC1-LOS.

Resultado para el conjunto 2 (error mayor a 1 m).

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
gev	-295.50	45.61	1375.00	1711000.00	-3415000.00
normal	1391.00	44.75		1710000.00	-3415000.00
tlocationscale	1391.00	44.75	398100000 0.00	1710000.00	-3413000.00
rician	1390.00	44.76		1710000.00	-3415000.00

nakagami	241100.00	1937.00		1709000.00	-3413000.00
gamma	961300.00	1.45		1707000.00	-3411000.00
birnbaumsaunders	1390.00	32.31		1706000.00	-3408000.00
inversegaussian	1391.00	1332000.00		1706000.00	-3408000.00
lognormal	329.50	32.30		1706000.00	-3408000.00
logistic	1392.00	25.99		1692000.00	-3379000.00
loglogistic	330.30	18.71		1690000.00	-3375000.00
weibull	1412.00	33660.00		1678000.00	-3352000.00
ev	1413.00	42.03		1668000.00	-3331000.00
uniform	1224.00	1523.00		1225000.00	-2446000.00
gp	-2204.00	3356.00		182100.00	-360100.00
rayleigh	984.10			-646700.00	1295000.00
exponential	1391.00			-1347000.00	2697000.00

Tabla. Anexo 17 Distribuciones para el conjunto 2 de P2-ESC1-LOS.

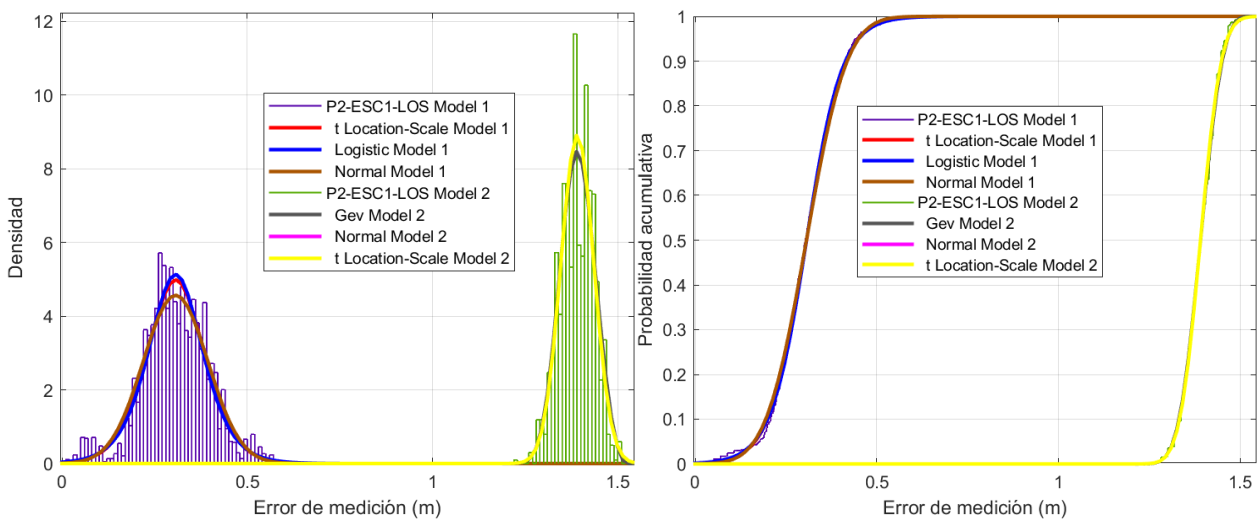


Figura. A1. 29 PDF y CDF para P2-ESC1-LOS.

E2.3 P2-ESC1-NLOS

A partir del histograma de los datos se observa un posible modelo de distribución normal mezclado. Se utiliza la herramienta *fitgmdist* de Matlab que permite confirmar dos componentes de distribución normal presentes con los siguientes valores:

Componente	1
Porción de mezcla	0.858287
Media	0.3235
Componente	2
Porción de mezcla	0.141713
Media	1.4021

Tabla. Anexo 18 Separación de datos para P2-ESC1-NLOS.

Al ejecutar la prueba Chi Cuadrado y *fitmethis* no se obtuvieron resultados acertados, dado que los valores de Log-verosimilitud fueron negativos y las pruebas de hipótesis para las tres primeras distribuciones fueron rechazadas para el conjunto completo de datos y muestreo. Se tiene un caso similar al de la prueba P2-ESC1-LOS, por lo que se aplica el mismo procedimiento de separación. A continuación, se muestran los resultados de *fitmethis* para los nuevos conjuntos de datos y para el conjunto 1 la prueba Chi Cuadrado acepta la prueba de hipótesis de una distribución normal que figura entre las primeras de la lista.

Muestra	292
Distribución	Normal
Prueba de hipótesis	0 - Aceptada
p-valor	0.13692
Estadística Chi-Cuadrado	3.9767
Grados de libertad (df)	2
Bordes (Edges)	[1.0885 1.3225 1.3693 1.4161 1.4630 1.5566]
Valores Observados (O)	[11 52 128 80 21]
Valores Esperados (E)	[12.2863 58.1804 112.5142 83.0820 25.9372]

Tabla. Anexo 19 Resultado prueba Chi Cuadrado para P2-ESC1-NLOS.

Resultados para conjunto 1 (error inferior a 1 m)

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
tlocationscale	324.60	67.20	12730.00	4248000.00	-8490000.00

logistic	324.50	41.12		4240000.00	-8476000.00
weibull	351.70	5033.00		4239000.00	-8475000.00
gev	-331.00	76.46	299.20	4233000.00	-8461000.00
normal	323.50	73.17		4230000.00	-8456000.00
rician	314.60	74.30		4225000.00	-8446000.00
nakagami	4628.00	110.00		4117000.00	-8230000.00
ev	359.10	68.04		4117000.00	-8229000.00
beta	11760.00	24660.00		4098000.00	-8191000.00
loglogistic	-1137.00	134.90		4050000.00	-8097000.00
gamma	16290.00	19.85		3982000.00	-7960000.00
lognormal	-1160.00	266.50		3760000.00	-7516000.00
birnbaumsaunders	311.80	273.80		3695000.00	-7386000.00
inversegaussian	323.50	4236.00		3686000.00	-7368000.00
uniform	50.64	524.80		2639000.00	-5274000.00
rayleigh	234.50			2620000.00	-5239000.00
gp	-1046.00	549.20		2285000.00	-4566000.00
exponential	323.50			454800.00	-907600.00

Tabla. Anexo 20 Distribuciones para conjunto 1 de P2-ESC1-NLOS.

Resultados para conjunto 2 (error superior a 1 m)

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
gev	-257.50	46.53	1385.00	957900.00	-1910000.00
gamma	889600.00	1.58		957100.00	-1910000.00
nakagami	222600.00	1968.00		957100.00	-1910000.00
birnbaumsaunders	1401.00	33.54		957000.00	-1910000.00
inversegaussian	1402.00	1246000.00		957000.00	-1910000.00
lognormal	337.40	33.54		957000.00	-1910000.00
rician	1401.00	47.02		956900.00	-1910000.00

normal	1402.00	47.00		956900.00	-1910000.00
tlocationscale	1402.00	47.00	45610000 00.00	956900.00	-1908000.00
loglogistic	337.60	19.30		948800.00	-1894000.00
logistic	1402.00	27.05		948700.00	-1893000.00
weibull	1425.00	30710.00		919100.00	-1834000.00
ev	1426.00	46.61		910700.00	-1817000.00
uniform	1262.00	1542.00		744300.00	-1485000.00
gp	-2130.00	3283.00		89090.00	-174200.00
rayleigh	992.00			-377600.00	757100.00
exponential	1402.00			-781400.00	1565000.00

Tabla. Anexo 21 Distribuciones para conjunto 2 de P2-ESC1-NLOS.

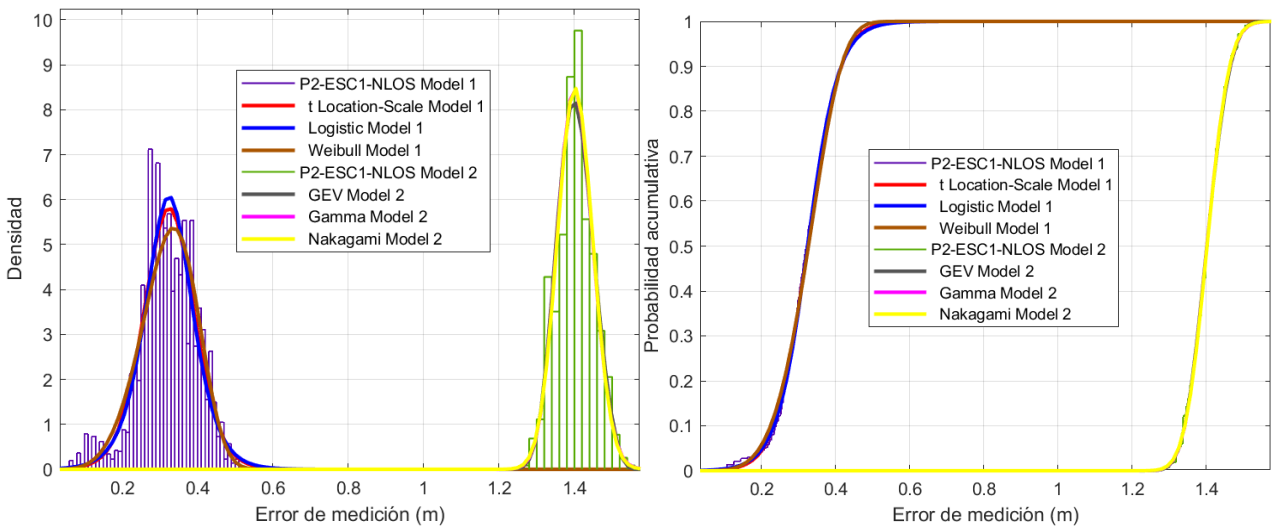


Figura. A1. 30 PDF y CDF para P2-ESC1-NLOS.

E2.4 P3-ESC2-LOS

Resultados de la herramienta *fitmethis*.

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
tlocationscale	320.70	25.96	39240.00	12030000.00	-4060000.00
nakagami	36290.00	103.60		12030000.00	-24060000.00
rician	319.60	26.70		12030000.00	-24050000.00

normal	320.70	26.65		12030000.00	-24050000.00
beta	97910.00	207400.00		12030000.00	-24050000.00
gamma	143800.00	2.23		12020000.00	-24040000.00
lognormal	-1141.00	83.67		12010000.00	-24020000.00
birnbaumsaunders	319.60	83.75		12010000.00	-24020000.00
inversegaussian	320.70	45650.00		12010000.00	-24020000.00
logistic	320.60	15.15		12000000.00	-23990000.00
loglogistic	-1139.00	47.43		11990000.00	-23970000.00
gev	-196.60	26.23	310.20	11980000.00	-23940000.00
weibull	333.00	12390.00		11720000.00	-23430000.00
ev	334.10	27.56		11490000.00	-22970000.00
uniform	234.40	440.80		8605000.00	-17210000.00
gp	-1312.00	578.50		4716000.00	-9427000.00
rayleigh	227.60			4471000.00	-8941000.00
exponential	320.70			748200.00	-1494000.00

Tabla. Anexo 22 Distribuciones para P3-ESC2-LOS.

La prueba Chi-Cuadrado rechaza las pruebas de hipótesis para las tres primeras distribuciones sobre todo el conjunto de datos; por lo tanto, se muestrea a la mitad de frecuencia. Se observa que para la mitad del conjunto de datos la prueba Chi cuadrado acepta las pruebas de hipótesis para las distribuciones normal y t Location-Scale. En la siguiente tabla se muestra el resultado para la distribución Normal:

Muestra	2727
Distribución	Normal
Prueba de hipótesis	0 - Aceptada
p-valor	0.59012
Estadística Chi-Cuadrado	3.7218
Grados de libertad (df)	5
Bordes (Edges)	[0.2297 0.2756 0.2909 0.3062 0.3216 0.3369 0.3522 0.3675 0.3828]
Valores Observados (O)	[31 135 441 821 748 412 114 25]

Valores Esperados (E)	[27.8882 143.9365 452.7199 788.8278 762.2261 408.4186 121.2103 21.7726]
------------------------------	--

Tabla. Anexo 23 Resultado prueba Chi Cuadrado para P3-ESC2-LOS.

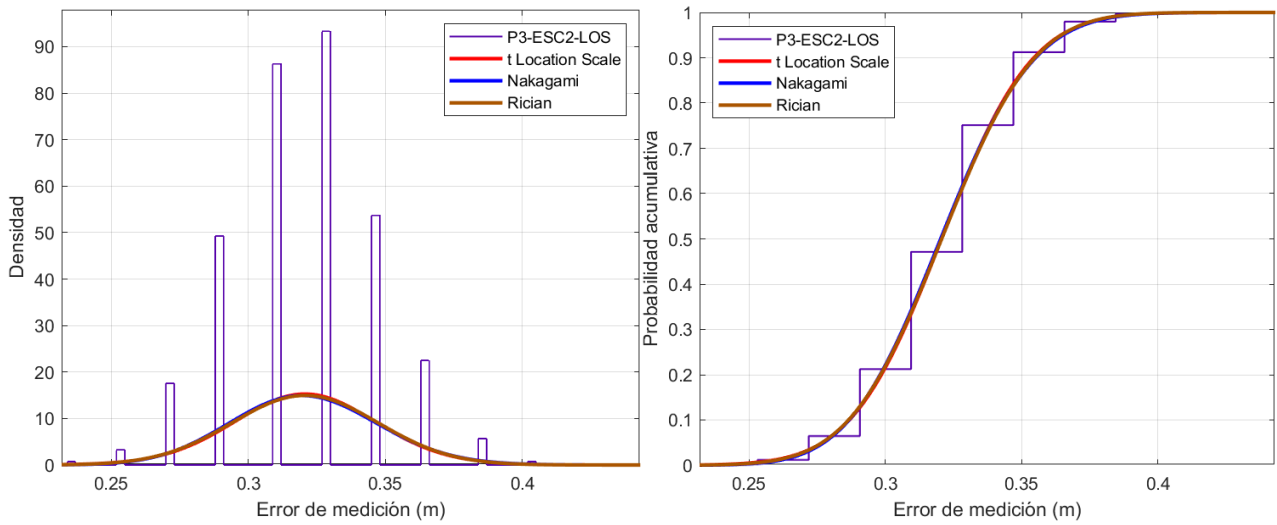


Figura. A1. 31 PDF y CDF para P3-ESC2-LOS.

E2.5 P4-ESC2-LOS

Resultados de la herramienta *fitmethis*. La Prueba Chi Cuadrado rechazó las pruebas de hipótesis para las tres primeras distribuciones.

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
loglogistic	-1136.00	152.60		6283000.00	-12560000.00
tlocationsscale	320.90	58.52	2514.00	6250000.00	-12490000.00
gev	-58.68	82.47	291.40	6075000.00	-12140000.00
logistic	325.00	50.10		6053000.00	-12100000.00
lognormal	-1140.00	289.60		6046000.00	-12090000.00
gamma	12210.00	27.28		6035000.00	-12070000.00
birnbaumsaunders	319.40	294.20		6012000.00	-12020000.00
inversegaussian	333.20	3769.00		6010000.00	-12020000.00
nakagami	3145.00	120.80		5883000.00	-11760000.00
rician	316.30	101.90		5665000.00	-11330000.00
normal	333.20	98.84		5633000.00	-11260000.00
weibull	369.00	3328.00		5444000.00	-10880000.00

rayleigh	245.80			4192000.00	-8383000.00
ev	387.10	140.00		3658000.00	-7311000.00
gp	-380.40	410.70		1701000.00	-3397000.00
exponential	333.20			622700.00	-1243000.00
uniform	88.16	1078.00		61830.00	-119700.00

Tabla. Anexo 24 Distribuciones para P4-ESC2-LOS.

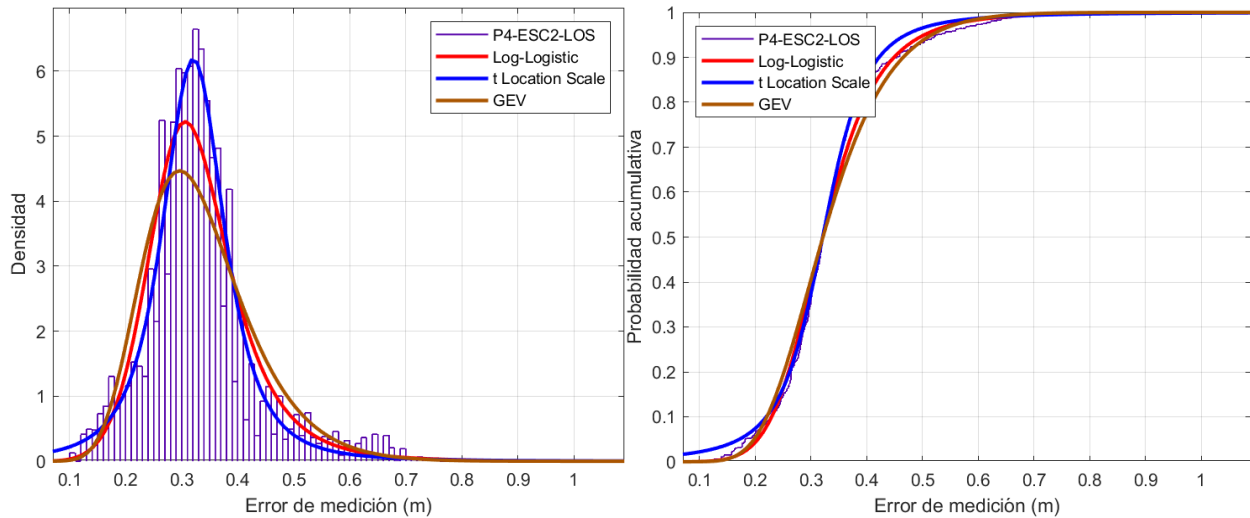


Figura. A1. 32 PDF y CDF para P4-ESC2-LOS.

E2.6 P4-ESC2-NLOS

Resultados de la herramienta *fitmethis*. La Prueba Chi Cuadrado rechazó las pruebas de hipótesis para las tres primeras distribuciones.

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
loglogistic	-807.50	171.90		4117000.00	-8229000.00
gev	-25.89	124.70	402.60	3959000.00	-7912000.00
tlocationscale	446.70	105.60	3489.00	3875000.00	-7744000.00
gamma	9971.00	47.04		3844000.00	-7684000.00
logistic	454.30	79.73		3758000.00	-7513000.00
lognormal	-808.00	326.50		3743000.00	-7482000.00
inversegaussian	469.00	3326.00		3659000.00	-7314000.00
nakagami	2575.00	244.30		3614000.00	-7225000.00

rician	437.50	162.50		3304000.00	-6603000.00
normal	469.00	155.80		3242000.00	-6481000.00
weibull	521.20	2890.00		3073000.00	-6141000.00
birnbaumsaunders	438.90	369.30		2930000.00	-5857000.00
rayleigh	349.50			2169000.00	-4335000.00
ev	553.60	366.20		-890000.00	1784000.00
gp	-171.50	517.20		-1246000.00	2495000.00
exponential	469.00			-1788000.00	3579000.00
uniform	2.15	2994.00		-8066000.00	16140000.00

Tabla. Anexo 25 Distribuciones para P4-ESC2-NLOS.

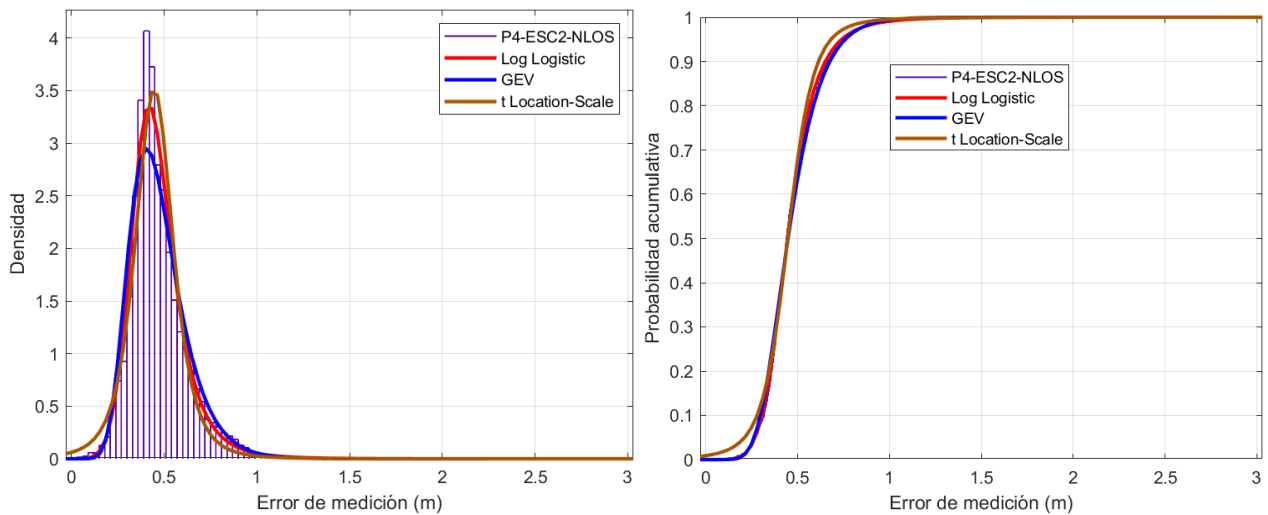


Figura. A1. 33 PDF y CDF para P4-ESC2-NLOS.

E2.7 P5-ESC3-LOS

Resultados de la herramienta *fitmethis*.

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
gev	-234.80	30.34	365.50	11200000.00	-22390000.00
gamma	145500.00	2.59		11180000.00	-22350000.00
birnbaumsaunders	375.90	83.10		11180000.00	-22350000.00
inversegaussian	377.20	54540.00		11180000.00	-22350000.00

lognormal	-978.40	83.03		11180000.00	-22350000.00
nakagami	36570.00	143.30		11170000.00	-22340000.00
beta	90430.00	149300.00		11170000.00	-22340000.00
rician	375.90	31.34		11160000.00	-22320000.00
normal	377.20	31.28		11160000.00	-22320000.00
tlocationscale	377.20	31.28	27300000 00.00	11160000.00	-22320000.00
loglogistic	-978.40	48.13		11080000.00	-22160000.00
logistic	376.60	18.14		11070000.00	-22130000.00
weibull	391.80	12580.00		10860000.00	-21720000.00
ev	393.10	31.42		10670000.00	-21340000.00
uniform	272.00	478.30		8611000.00	-17220000.00
gp	-1575.00	753.20		4795000.00	-9585000.00
rayleigh	267.70			3589000.00	-7177000.00
exponential	377.20			-136800.00	275700.00

Tabla. Anexo 26 Distribuciones para P5-ESC3-LOS.

La prueba Chi Cuadrado con datos muestreados (menor tamaño) rechazó la primera prueba de hipótesis GEV, pero aceptó las pruebas de hipótesis para las distribuciones Gamma y Birnbaum Saunders. En la siguiente tabla se muestra el resultado para la distribución Gamma:

Muestra	2729
Distribución	Gamma
Prueba de hipótesis	0 - Aceptada
p-valor	0.0735
Estadística Chi-Cuadrado	8.5456
Grados de libertad (df)	4
Bordes (Edges)	[0.2534 0.3350 0.3554 0.3758 0.3962 0.4165 0.4369 0.4573]
Valores Observados (O)	[56 374 905 878 392 114 10]
Valores Esperados (E)	[69.3152 376.9928 870.7794 879.7198 418.6469

Tabla. Anexo 27 Resultado prueba Chi Cuadrado para P5-ESC3-LOS.

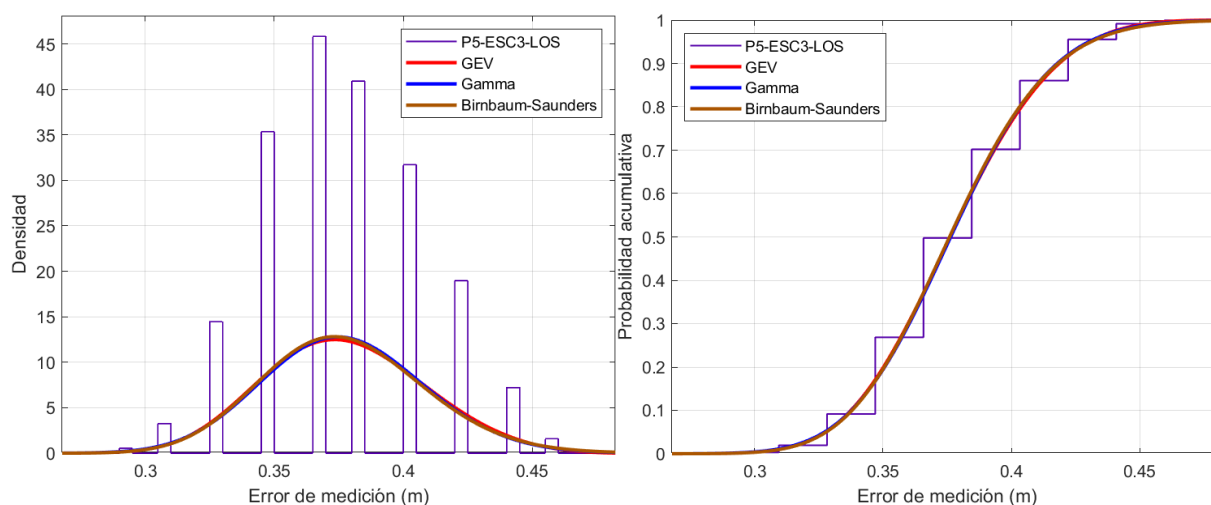


Figura. A1. 34 PDF y CDF para P5-ESC3-LOS.

E2.8 P6-ESC3-LOS

Se observa a partir del histograma la presencia de dos distribuciones posiblemente normales mezcladas. Se utiliza la herramienta *fitgmdist* de Matlab que permite confirmar dos componentes de distribución normal presentes con los siguientes valores:

Componente	1
Porción de mezcla	0.225943
Media	0.1549
Componente	2
Porción de mezcla	0.774057
Media	0.3088

Tabla. Anexo 28 Separación de conjunto para P6-ESC3-LOS.

En este caso la diferencia (límite) entre cada subconjunto no es claramente identificable, por lo cual se utiliza un algoritmo de Expectativa y maximización (EM) para separar el conjunto de datos. En la siguiente gráfica se muestra el resultado de los dos subconjuntos identificados y separados:

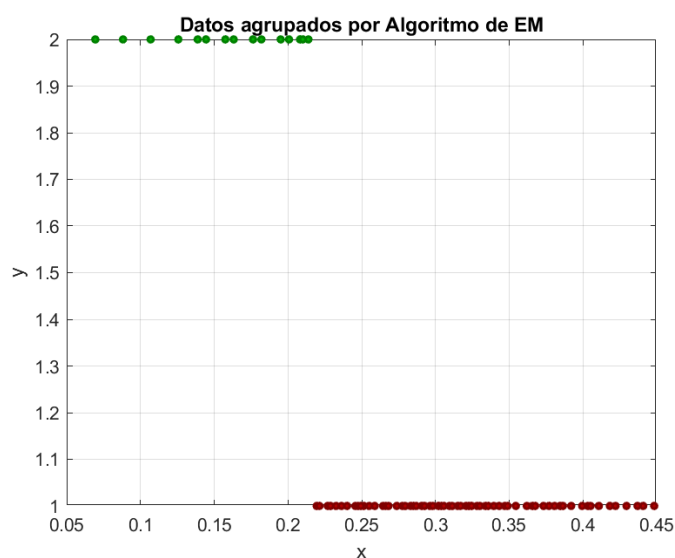


Figura. A1. 35 Separación de grupos para P6-ESC3-LOS.

Para ambos subconjuntos de datos la prueba Chi Cuadrado rechaza la prueba de hipótesis de la distribución GEV. A continuación, los resultados de la *fitmethis* para cada subconjunto:

Resultados para el conjunto de datos 1

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
gev	-181.30	42.33	294.50	2182000.00	-4357000.00
birnbaumsaunders	309.40	146.60		2176000.00	-4349000.00
inversegaussian	312.70	14470.00		2176000.00	-4349000.00
lognormal	-1173.00	146.30		2176000.00	-4347000.00
gamma	46900.00	6.67		2174000.00	-4343000.00
beta	32080.00	70490.00		2170000.00	-4337000.00
nakagami	11880.00	99.91		2169000.00	-4334000.00
rician	309.30	46.11		2160000.00	-4315000.00
normal	312.70	45.84		2159000.00	-4315000.00
tlocationscale	312.70	45.85	71140000.00	2159000.00	-4313000.00
loglogistic	-1173.00	86.88		2134000.00	-4265000.00
logistic	311.20	27.08		2122000.00	-4241000.00
weibull	332.90	7237.00		2107000.00	-4210000.00
ev	336.20	46.40		2031000.00	-4059000.00

uniform	219.50	448.30		1914000.00	-3825000.00
gp	-1203.00	539.30		1091000.00	-2179000.00
rayleigh	223.50			1069000.00	-2136000.00
exponential	312.70			210700.00	-419500.00

Tabla. Anexo 29 Distribuciones para conjunto 1 de P6-ESC3-LOS.

Resultados para el conjunto de datos 2

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
gp	-1238.00	264.70		977900.00	-1952000.00
gev	-493.00	37.24	150.30	867400.00	-1729000.00
weibull	172.50	5407.00		859200.00	-1714000.00
normal	158.90	34.44		852000.00	-1700000.00
tlocationscale	158.90	34.44	88910000 00.00	852000.00	-1698000.00
rician	154.90	34.91		851900.00	-1700000.00
ev	175.60	30.20		850300.00	-1697000.00
nakagami	5263.00	26.42		847200.00	-1690000.00
uniform	69.40	213.80		845500.00	-1687000.00
beta	16590.00	87870.00		842600.00	-1681000.00
logistic	160.00	20.28		839900.00	-1676000.00
gamma	19370.00	8.20		839100.00	-1674000.00
lognormal	-1866.00	235.20		827800.00	-1652000.00
birnbaumsaunders	154.50	236.90		827600.00	-1651000.00
inversegaussian	158.90	2791.00		827200.00	-1650000.00
loglogistic	-1846.00	134.00		824700.00	-1645000.00
rayleigh	114.90			638400.00	-1275000.00
exponential	158.90			367000.00	-732000.00

Tabla. Anexo 30 Distribuciones para conjunto 2 de P6-ESC3-LOS.

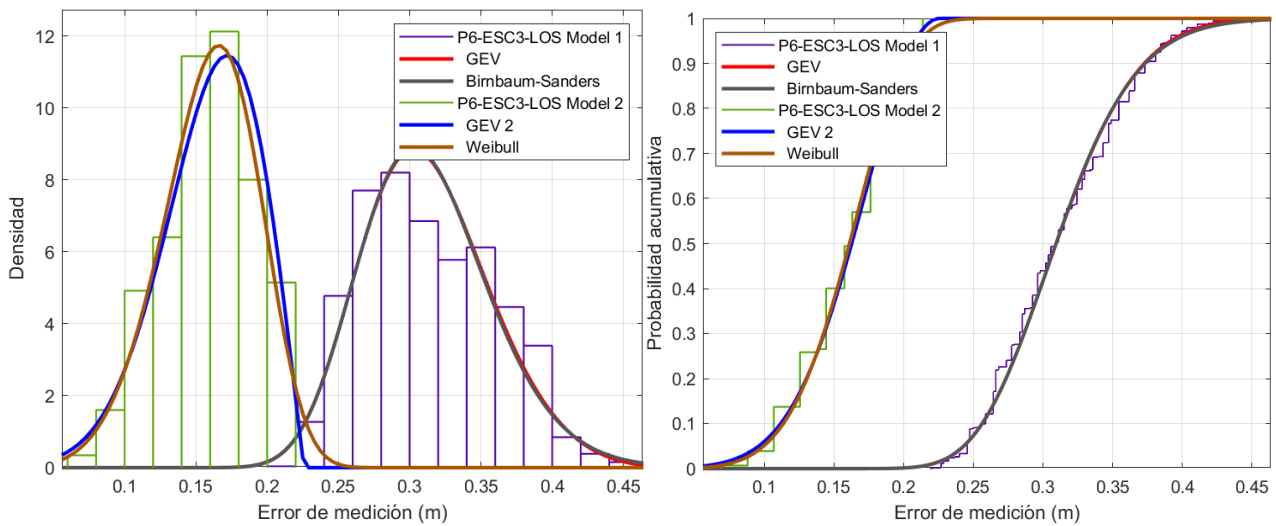


Figura. A1. 36 PDF y CDF para P6-ESC3-LOS.

E2.9 D1-ESC1-LOS

El histograma para esta prueba con un conjunto de datos (22831) presenta visualmente más de una distribución. Al igual que la lista de *fitmethis* al conjunto completo presenta valores de Log-L negativos y los resultados de la prueba Chi cuadrado fallan para las distribuciones con mayor verosimilitud y ninguna se parece visualmente. Por lo cual se aplica *fitgmdist* para determinar la media y sigma para tres (previos intentos mostraron que había más de dos) componentes.

Componente	1
Porción de mezcla	0.383674
Media	0.0570
Componente	2
Porción de mezcla	0.299836
Media	0.1261
Componente	3
Porción de mezcla	0.316490
Media	0.2096

Tabla. Anexo 31 Separación de datos para D1-ESC1-LOS.

Posteriormente con el uso de un algoritmo EM se separan los datos en tres grupos para lo cual se utilizan la media y sigma que proporciona la herramienta *fitgmdist*.

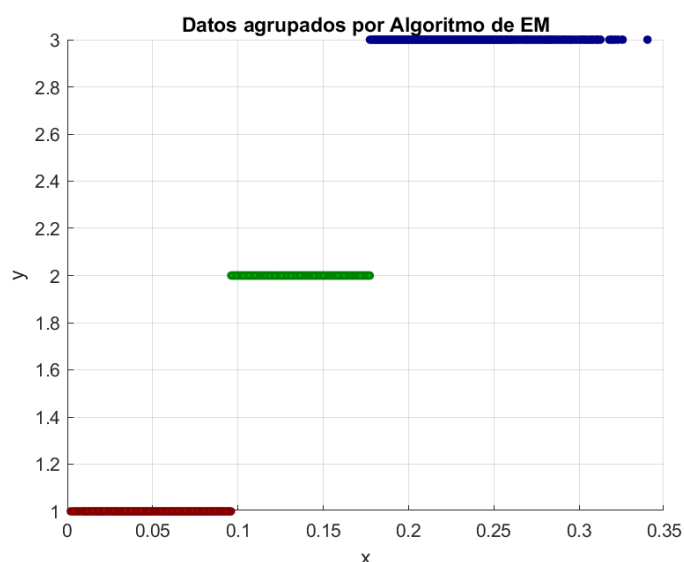


Figura. A1. 37 Separación por grupos para D1-ESC1-LOS.

A continuación, los resultados de *fitmethis* para los tres subconjuntos:

Resultados para el conjunto 1

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
gev	-486.00	23.08	51.10	8231000.00	-16460000.00
rician	50.93	22.99		8118000.00	-16230000.00
normal	56.50	21.42		8112000.00	-16220000.00
tlocationscale	56.50	21.42	61060000 00.00	8112000.00	-16220000.00
ev	66.92	18.74		8101000.00	-16200000.00
weibull	63.26	2925.00		8100000.00	-16200000.00
logistic	57.16	12.66		8013000.00	-16020000.00
nakagami	1628.00	3.65		8007000.00	-16010000.00
uniform	2.00	94.34		7971000.00	-15940000.00
gp	-1159.00	109.30		7953000.00	-15900000.00
beta	4885.00	81700.00		7845000.00	-15690000.00
gamma	5084.00	11.11		7818000.00	-15630000.00
rayleigh	42.73			7799000.00	-15600000.00
loglogistic	-2908.00	263.60		7666000.00	-15330000.00
lognormal	-2975.00	509.40		7464000.00	-14920000.00

birnbaumsaunders	48.82	553.30		7291000.00	-14580000.00
inversegaussian	56.50	171.40		7234000.00	-14460000.00
exponential	56.50			6269000.00	-12540000.00

Tabla. Anexo 32 Distribuciones para conjunto 1 de D1-ESC1-LOS.

Resultados para el conjunto 2

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
uniform	94.43	172.40		7513000.00	-15020000.00
gev	-295.80	19.88	124.00	7355000.00	-14700000.00
beta	36290.00	240800.00		7323000.00	-14640000.00
nakagami	10670.00	17.56		7323000.00	-14640000.00
gamma	41670.00	3.14		7321000.00	-14640000.00
birnbaumsaunders	129.40	156.30		7316000.00	-14630000.00
inversegaussian	131.00	5330.00		7316000.00	-14630000.00
lognormal	-2045.00	155.90		7314000.00	-14620000.00
rician	129.40	20.32		7313000.00	-14620000.00
normal	131.00	20.19		7312000.00	-14620000.00
tlocationscale	131.00	20.18	11610000 000.00	7312000.00	-14620000.00
weibull	139.70	7178.00		7260000.00	-14520000.00
loglogistic	-2042.00	93.10		7209000.00	-14410000.00
logistic	130.70	12.06		7207000.00	-14410000.00
ev	141.10	19.15		7139000.00	-14270000.00
gp	-1541.00	265.60		5598000.00	-11190000.00
rayleigh	93.70			4977000.00	-9952000.00
exponential	131.00			3041000.00	-6080000.00

Tabla. Anexo 33 Distribuciones para conjunto 2 de D1-ESC1-LOS.

Resultados para el conjunto 3

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
gev	12.49	25.50	206.70	4733000.00	-9459000.00
inversegaussian	221.90	10970.00		4672000.00	-9339000.00
birnbaumsaunders	219.70	141.80		4671000.00	-9339000.00
lognormal	-1516.00	141.50		4671000.00	-9338000.00
gamma	49060.00	4.52		4643000.00	-9283000.00
loglogistic	-1523.00	81.93		4631000.00	-9259000.00
beta	37610.00	131900.00		4625000.00	-9246000.00
nakagami	12160.00	50.28		4610000.00	-9216000.00
tlocationscale	220.80	30.93	20940.00	4572000.00	-9138000.00
rician	219.40	32.68		4570000.00	-9137000.00
normal	221.90	32.50		4569000.00	-9135000.00
logistic	219.20	18.36		4565000.00	-9125000.00
weibull	236.40	6689.00		4380000.00	-8755000.00
ev	239.20	36.87		4166000.00	-8328000.00
uniform	172.40	340.00		4065000.00	-8127000.00
rayleigh	158.60			2657000.00	-5312000.00
gp	-1104.00	375.40		2471000.00	-4939000.00
exponential	221.90			1151000.00	-2300000.00

Tabla. Anexo 34 Distribuciones para conjunto 3 de D1-ESC1-LOS.

A partir de los resultados de *fitmethis* de cada subconjunto se obtiene que la distribución GEV es la que mejor se ajusta a los datos. Se descartan los resultados de la prueba Chi Cuadrado dado que tanto para el conjunto completo como para los subconjuntos muestreados los grados de libertad dan cero y el p-valor NaN.

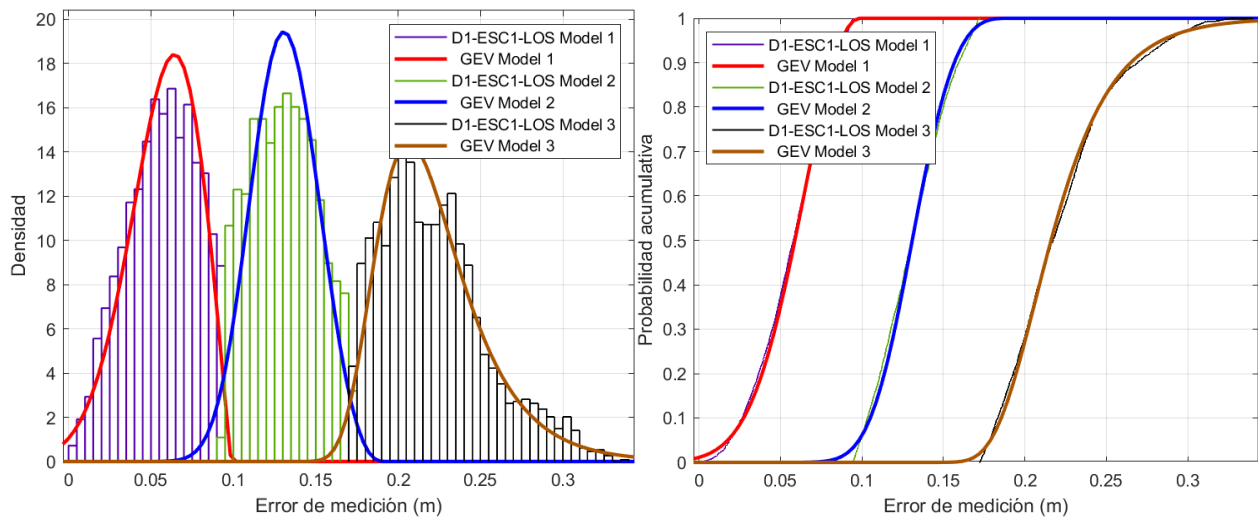


Figura. A1. 38 PDF y CDF para D1-ESC1-LOS.

E2.10 D2-ESC1-LOS

A continuación, se muestran los resultados de *fitmethis* para el conjunto completo de los datos:

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
gev	-168.80	56.66	114.90	16990000.00	-33970000.00
rician	115.70	70.37		16990000.00	-33970000.00
weibull	157.30	2401.00		16980000.00	-33960000.00
nakagami	1317.00	23.29		16940000.00	-33880000.00
normal	139.60	61.63		16770000.00	-33530000.00
tlocationscale	139.60	61.63	58220000.00	16770000.00	-33530000.00
beta	3734.00	23090.00		16730000.00	-33470000.00
rayleigh	107.90			16680000.00	-33350000.00
logistic	136.80	35.44		16600000.00	-33190000.00
gamma	4202.00	33.22		16570000.00	-33140000.00
loglogistic	-2041.00	289.50		16170000.00	-32340000.00
lognormal	-2093.00	556.70		15440000.00	-30870000.00
ev	171.40	64.46		15300000.00	-30590000.00
gp	-597.70	201.90		14680000.00	-29360000.00
birnbaumsaunders	116.00	627.00		14430000.00	-28850000.00

inversegaussian	139.60	323.30		14170000.00	-28330000.00
uniform	0.73	337.80		13330000.00	-26660000.00
exponential	139.60			11880000.00	-23760000.00

Tabla. Anexo 35 Distribuciones para D2-ESC1-LOS.

La prueba Chi Cuadrado rechazó las pruebas de hipótesis para las tres primeras distribuciones.

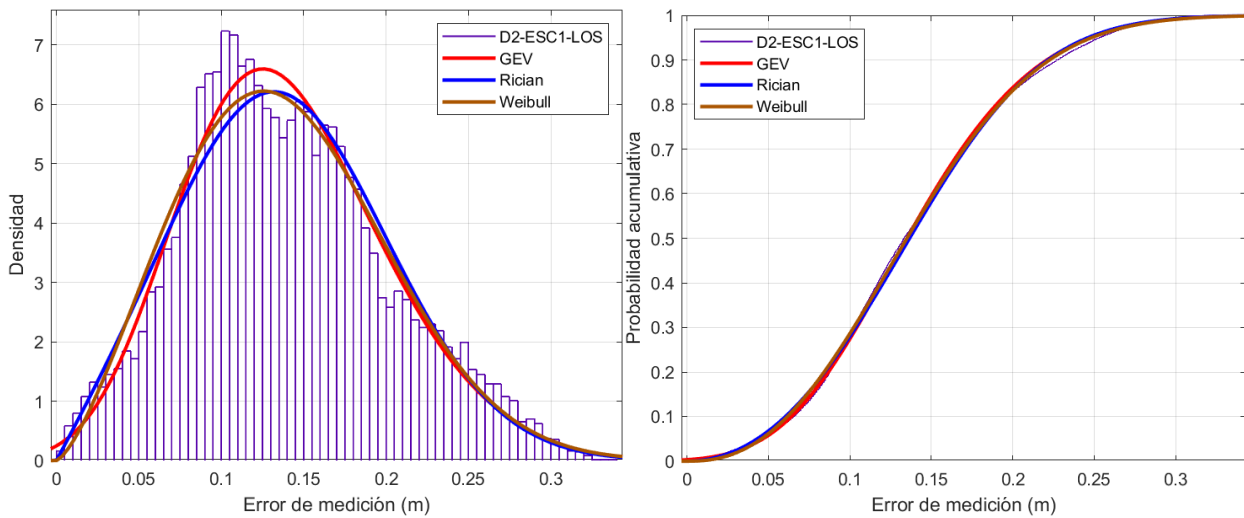


Figura. A1. 39 PDF y CDF para D2-ESC1-LOS.

E2.11 D3-ESC3-LOS

A continuación, se muestran los resultados de *fitmethis* para el conjunto completo de los datos.

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
rician	97.84	77.01		17960000.00	-35910000.00
weibull	148.20	2138.00		17890000.00	-35780000.00
nakagami	1066.00	21.43		17870000.00	-35730000.00
rayleigh	103.50			17850000.00	-35700000.00
gev	-141.20	59.13	104.90	17740000.00	-35470000.00
tlocationscale	131.30	63.03	59590.00	17620000.00	-35230000.00
normal	131.60	64.13		17610000.00	-35220000.00
beta	2924.00	19380.00		17560000.00	-35110000.00
logistic	130.40	36.81		17470000.00	-34940000.00

gamma	3238.00	40.64		17340000.00	-34680000.00
loglogistic	-2110.00	342.10		16550000.00	-33100000.00
lognormal	-2190.00	647.00		16000000.00	-32010000.00
ev	164.40	71.93		15600000.00	-31210000.00
birnbaumsaunders	103.60	718.60		15270000.00	-30540000.00
gp	-329.50	162.10		15240000.00	-30480000.00
inversegaussian	131.60	225.80		14890000.00	-29770000.00
exponential	131.60			13630000.00	-27270000.00
uniform	0.91	491.30		9450000.00	-18900000.00

Tabla. Anexo 36 Distribuciones para D3-ESC3-LOS.

La prueba Chi Cuadrado rechazó las pruebas de hipótesis para las tres primeras distribuciones.

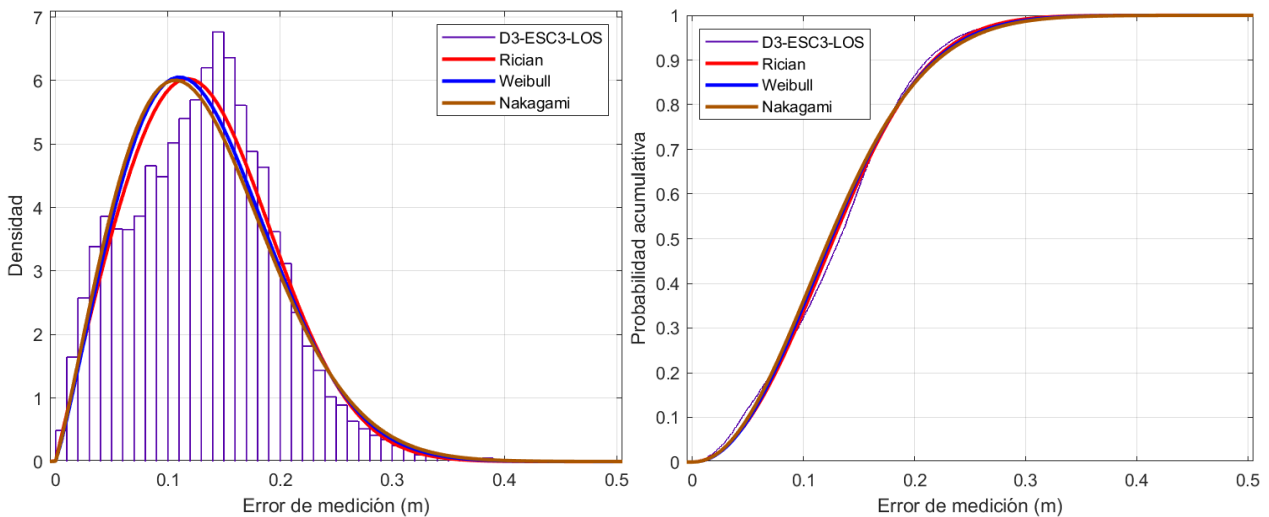


Figura. A1. 40 PDF y CDF para D3-ESC3-LOS.

E2.12 D4-ESC3-NLOS

A continuación, se muestran los resultados del uso de la herramienta *fitmethis*:

Componente	1
Porción de mezcla	0.831707
Media	0.1711
Componente	2

Porción de mezcla	0.168293
Media	1.8006

Tabla. Anexo 37 Separación de datos para D4-ESC3-NLOS.

Los resultados muestran que los datos presentan dos posibles distribuciones de probabilidad. Se procede a separar el conjunto de datos en dos. Dado que la distinción entre los dos grupos es evidente y claramente distinguible no se utiliza el algoritmo de expectativa y maximización.

Resultados para el conjunto 1

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
nakagami	1053.00	36.82		5120000.00	-10240000.00
weibull	192.80	2047.00		5118000.00	-10230000.00
rayleigh	135.70			5116000.00	-10230000.00
rician	0.60	135.70		5116000.00	-10230000.00
gev	-61.58	74.34	133.20	5097000.00	-10190000.00
beta	2815.00	13650.00		5067000.00	-10130000.00
tlocationscale	168.30	75.94	9859.00	5037000.00	-10070000.00
gamma	3319.00	51.56		5034000.00	-10060000.00
logistic	168.50	48.15		4999000.00	-9995000.00
normal	171.10	86.76		4897000.00	-9790000.00
loglogistic	-1855.00	335.40		4809000.00	-9613000.00
lognormal	-1923.00	628.30		4627000.00	-9250000.00
birnbaumsaunders	137.30	689.90		4403000.00	-8802000.00
inversegaussian	171.10	321.40		4290000.00	-8576000.00
gp	-242.70	201.00		4045000.00	-8085000.00
exponential	171.10			3653000.00	-7305000.00
ev	217.50	126.80		3340000.00	-6675000.00
uniform	5.19	821.40		969400.00	-1935000.00

Tabla. Anexo 38 Distribuciones para conjunto 1 de D4-ESC3-NLOS.

Resultados para el conjunto de datos 2

Distribución	Par1	Par2	Par3	Log-L	AIC
gev	-376.20	24.74	1793.00	2266000.00	-4526000.00
tlocationscale	1801.00	23.21	71790.00	2251000.00	-4496000.00
normal	1801.00	23.55		2251000.00	-4497000.00
rician	1800.00	23.55		2251000.00	-4497000.00
nakagami	1459000.0 0	3243.00		2250000.00	-4495000.00
gamma	5825000.0 0	0.31		2249000.00	-4494000.00
weibull	1812.00	86610.00		2249000.00	-4493000.00
lognormal	588.00	13.12		2248000.00	-4492000.00
birnbaumsaunders	1800.00	13.12		2248000.00	-4492000.00
inversegaussian	1801.00	10470000.0 0		2248000.00	-4492000.00
ev	1812.00	20.89		2246000.00	-4488000.00
logistic	1801.00	13.55		2239000.00	-4474000.00
loglogistic	588.50	7.54		2238000.00	-4471000.00
uniform	1688.00	1857.00		1721000.00	-3438000.00
gp	-2595.00	4818.00		628300.00	-1253000.00
rayleigh	1273.00			-864800.00	1732000.00
exponential	1801.00			-1534000.00	3070000.00

Tabla. Anexo 39 Distribuciones para conjunto 2 de D4-ESC3-NLOS.

Para el conjunto 2 la prueba Chi Cuadrado no rechaza la prueba de hipótesis de que el conjunto de datos provenga de una distribución GEV.

Muestra	966
Distribución	GEV
Prueba de hipótesis	0 - Aceptada
p-valor	0.3627

Estadística Chi-Cuadrado	4.3338
Grados de libertad (df)	4
Bordes (Edges)	[1.6885 1.7390 1.7559 1.7727 1.7895 1.8064 1.8232 1.8401 1.8569]
Valores Observados (O)	[8 27 86 184 244 242 150 25]
Valores Esperados (E)	[6.8561 28.3938 87.6500 180.4559 251.7371 236.6285 139.3842 34.8944]

Tabla. Anexo 40 Resultado prueba Chi Cuadrado.

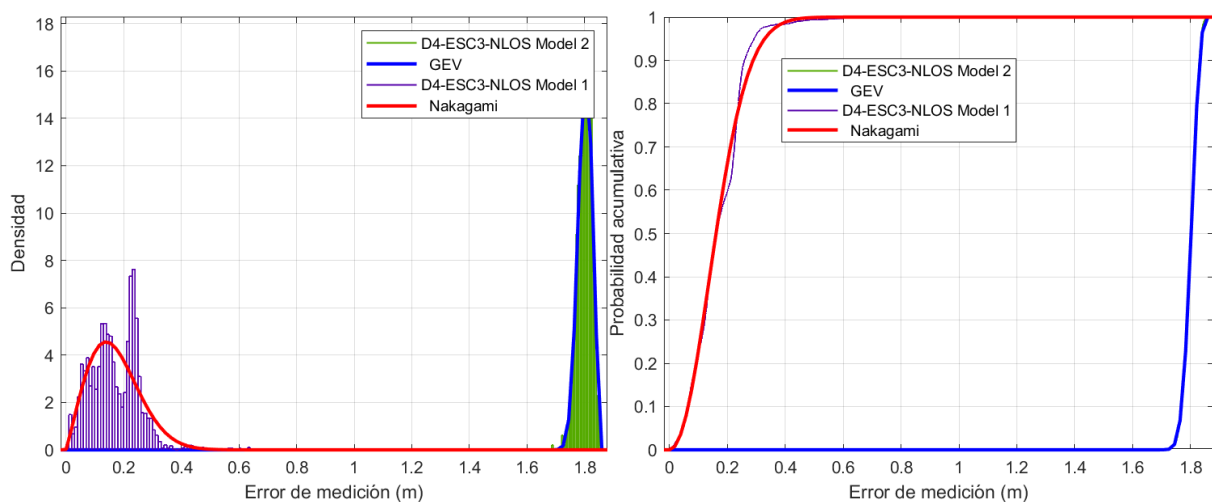


Figura. A1. 41 PDF y CDF para D4-ESC3-NLOS.

Referencias

[1] W. Syam, "Understanding measurement model, systematic error and random error," *Wasy Research*, 27-Feb-2022. [Online]. Available: <https://www.wasyresearch.com/understanding-measurement-model-systematic-error-and-random-error/>. [Accessed: 30- Aug -2022].

[2] F. de Castro, "Fitmethis," *MathWorks*, 15-Oct-2021. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40167-fitmethis>. [Accessed: 30-Aug-2022].

[3] "Open Distribution Fitter app - MATLAB distributionFitter - MathWorks América Latina," *MathWorks*. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/stats/distributionfitter.html?s_tid=srchtitle_distribution+fitter_1. [Accessed: 30-Aug-2022].

[4] "chi2gof," *Chi-square goodness-of-fit test - MATLAB chi2gof - MathWorks América Latina*. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/stats/chi2gof.html?s_tid=doc_ta. [Accessed: 30-Aug-2022].