
Desarrollo de un sistema de posicionamiento en interiores mediante Bluetooth Low Energy

Alejandro Linde Cerezo

Trabajo Final de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Índice

1. Introducción

- Objetivos del proyecto

2. Estado del arte

- BLE como IPS
- Técnicas de posicionamiento
- Algoritmos de seguimiento

3. Desarrollo del sistema

- Arquitectura
- Prototipo
- Algoritmo de posicionamiento

4. Despliegue del sistema

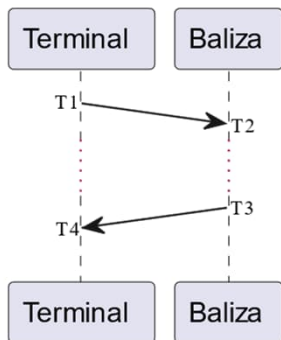
- Escenarios
- Campañas de adquisición
- Calibración y fingerprints
- Error de localización
- Posicionamiento semántico
- Seguimiento del terminal

5. Resultados y validación

6. Conclusiones y trabajo futuro

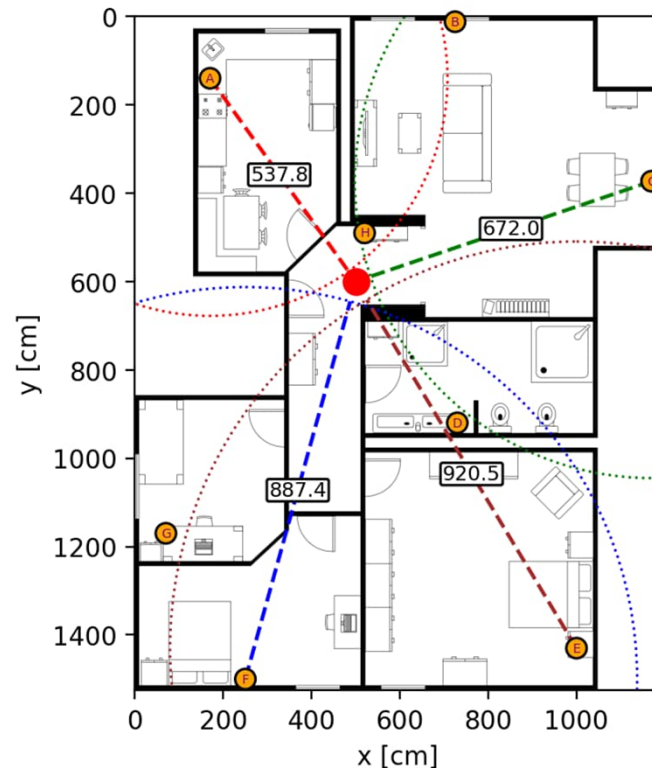
Objetivos del proyecto

Objetivo	Método de verificación	Umbral
Error del RTLS	Testeo	< 2.5 m
Uso de ToF	Inspección	-
Producción de datasets	Inspección	-
Latencia	Testeo	< 100 ms
Error de clasificación	Testeo	< 20 %
Tecnologías estándar	Inspección	-

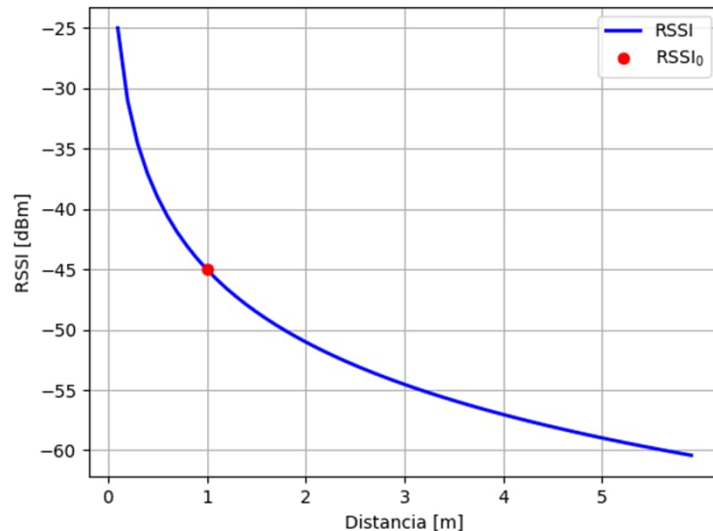
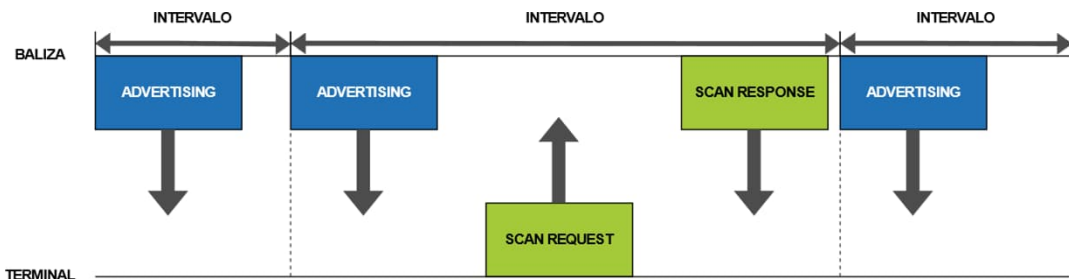
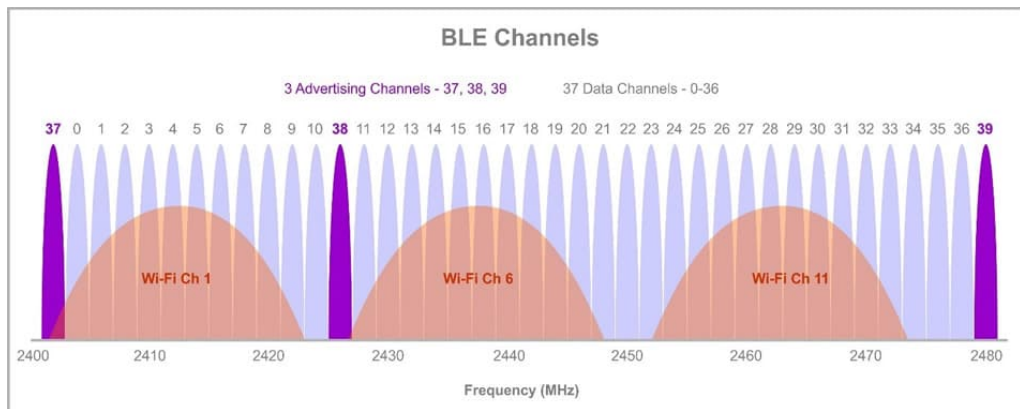


$$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} |x_i - \hat{x}_i|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1} (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}}$$

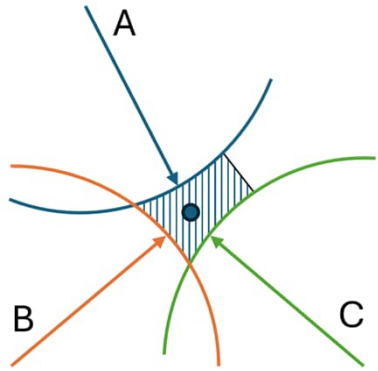


BLE como IPS



$$RSSI(d) = RSSI_0 - 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{\sigma}$$

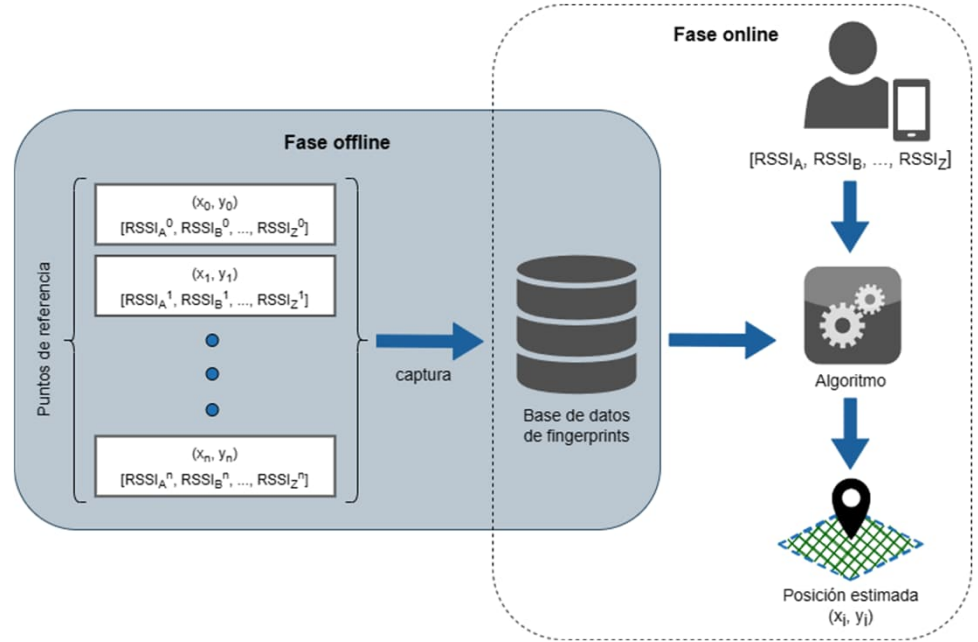
Técnicas de posicionamiento



$$\begin{cases} (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2 = d_A^2 \\ (x - x_B)^2 + (y - y_B)^2 = d_B^2 \\ (x - x_C)^2 + (y - y_C)^2 = d_C^2 \end{cases}$$

$$\min_x \|A \cdot \hat{x} - \vec{b}\|$$

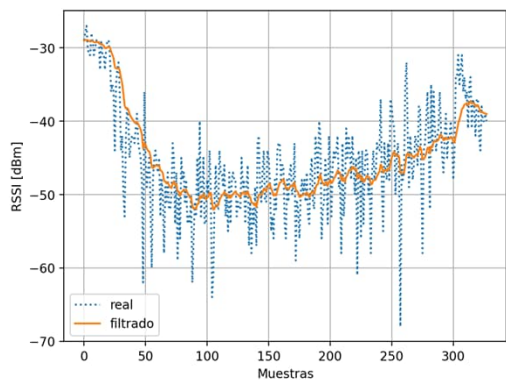
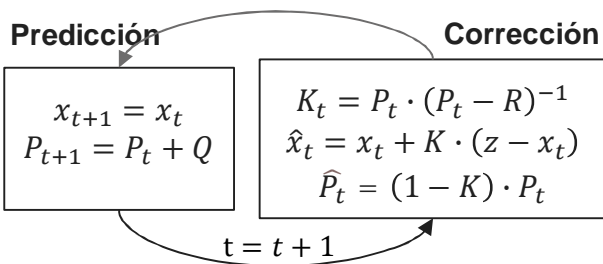
Multilateración



Fingerprinting

Algoritmos de seguimiento

Filtro de Kalman 1D

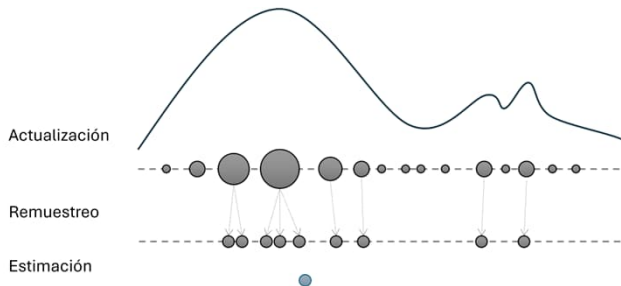


Filtro de partículas

$$\alpha_{t+1}^k = \arctan2(\hat{y}_t - y_{t+1}^k, \hat{x}_t - x_{t+1}^k) + \epsilon_a$$

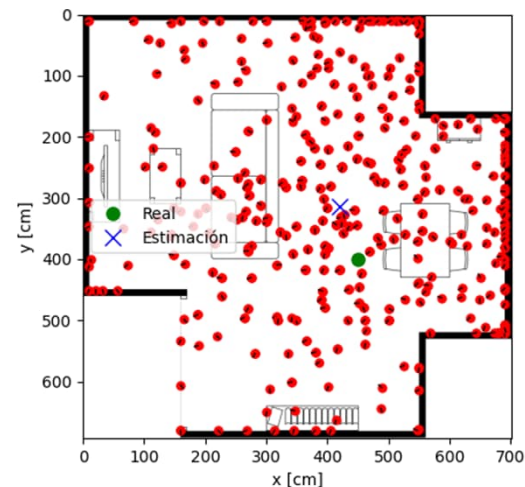
$$v_{t+1}^k = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{(\hat{x}_t - x_{t+1}^k)^2 + (\hat{y}_t - y_{t+1}^k)^2}}{\Delta t} + \epsilon_v$$

$$w_{t+1}^k = w_t^k \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{(\hat{x}_t - x_{t+1}^k)^2 + (\hat{y}_t - y_{t+1}^k)^2}}{\sigma_p} \right)^2}$$

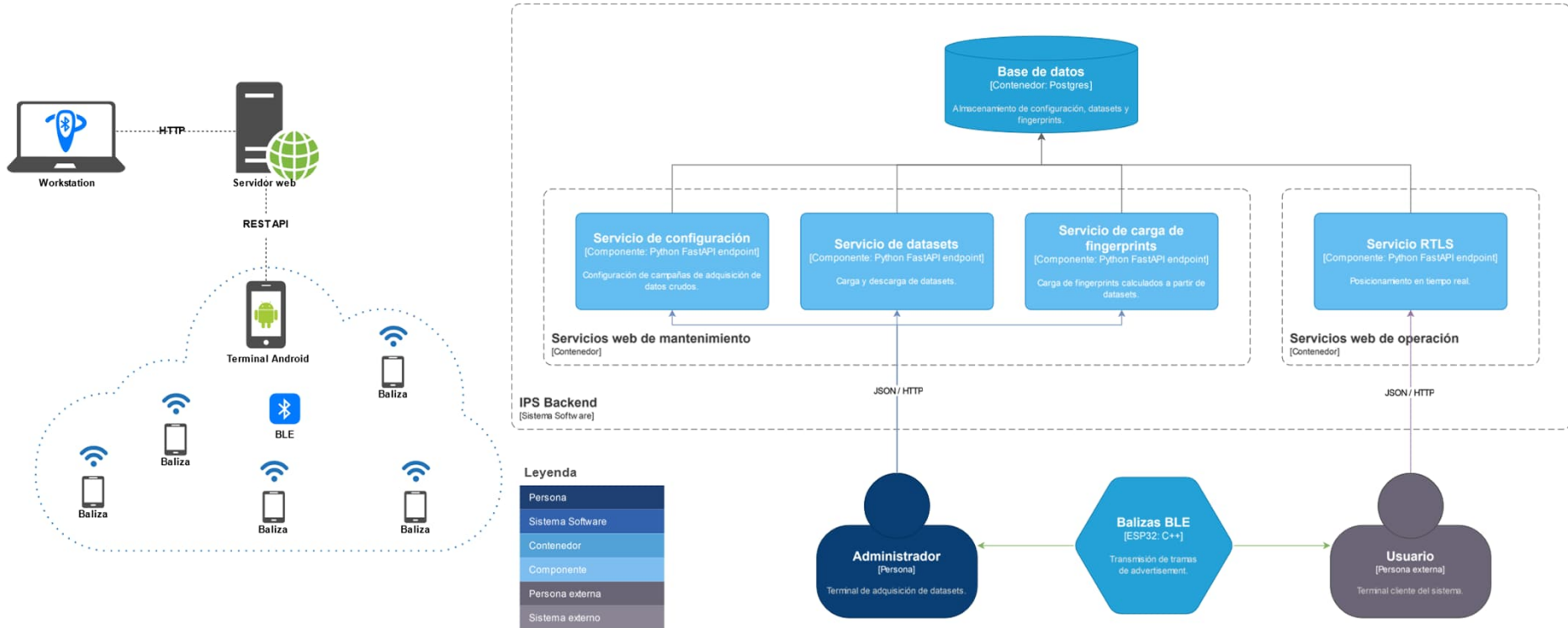


$$x_{t+1}^k = x_t^k + v_t^k \cdot \Delta t \cdot \cos(\alpha_t^k) + \epsilon_p$$

$$y_{t+1}^k = y_t^k + v_t^k \cdot \Delta t \cdot \sin(\alpha_t^k) + \epsilon_p$$



Arquitectura del sistema



Prototipo del sistema

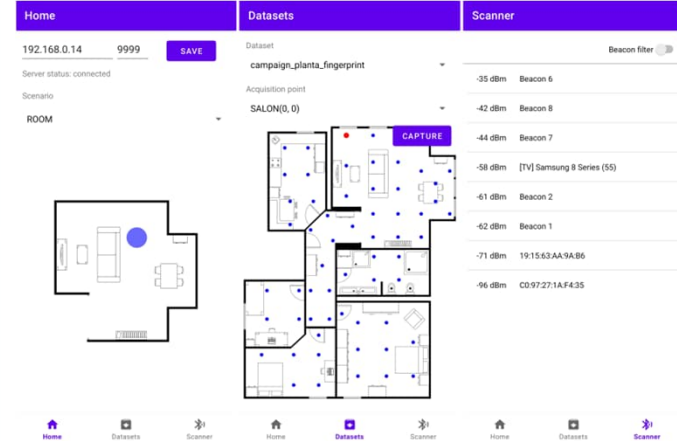
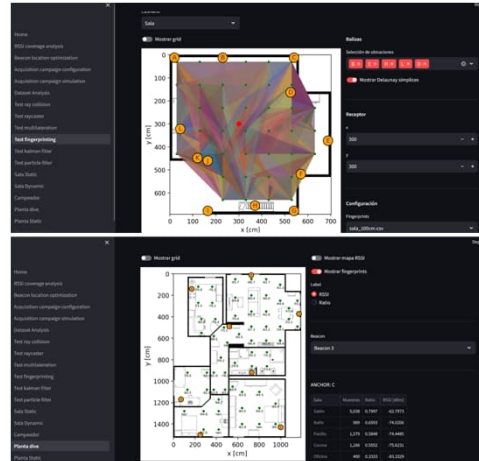
Hardware:

- Portátil: i5-12450H y 16 GB (RAM)
- Dos terminales: Android 14 y 9
- Cinco placas ESP32
- Tres placas ESP32-C3
- Baterías

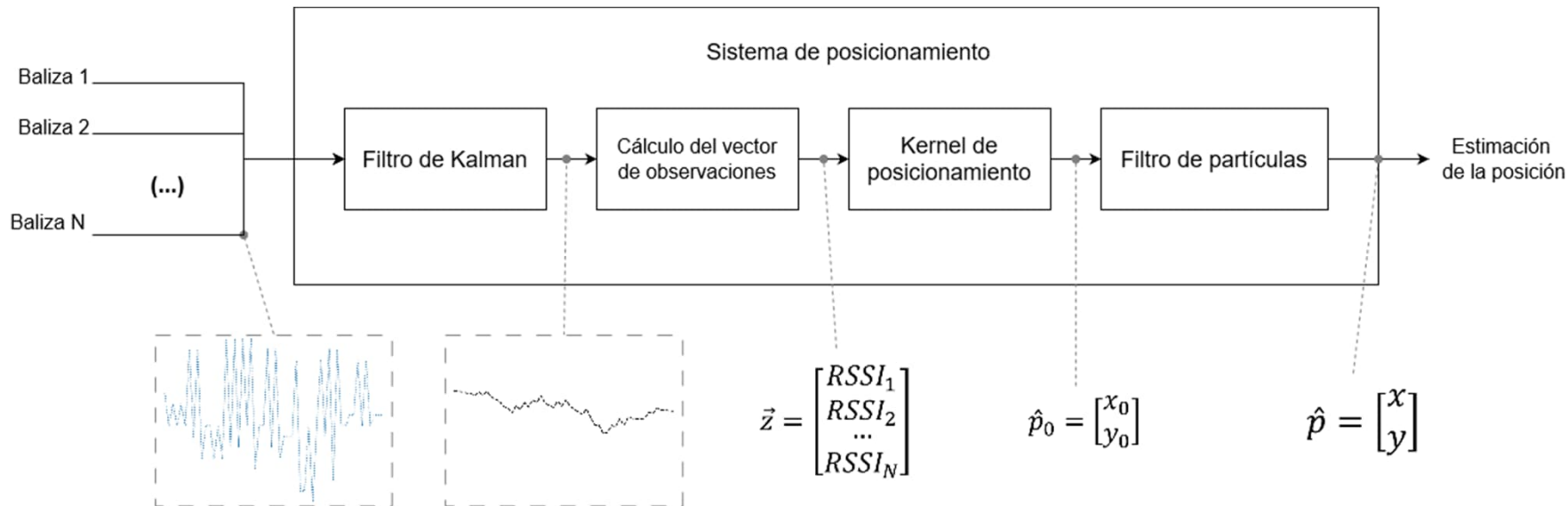


Software:

- Aplicación web con API REST
- Aplicación Android
- Herramienta de escritorio
- Programa de las balizas
- Librería de algoritmos/modelos

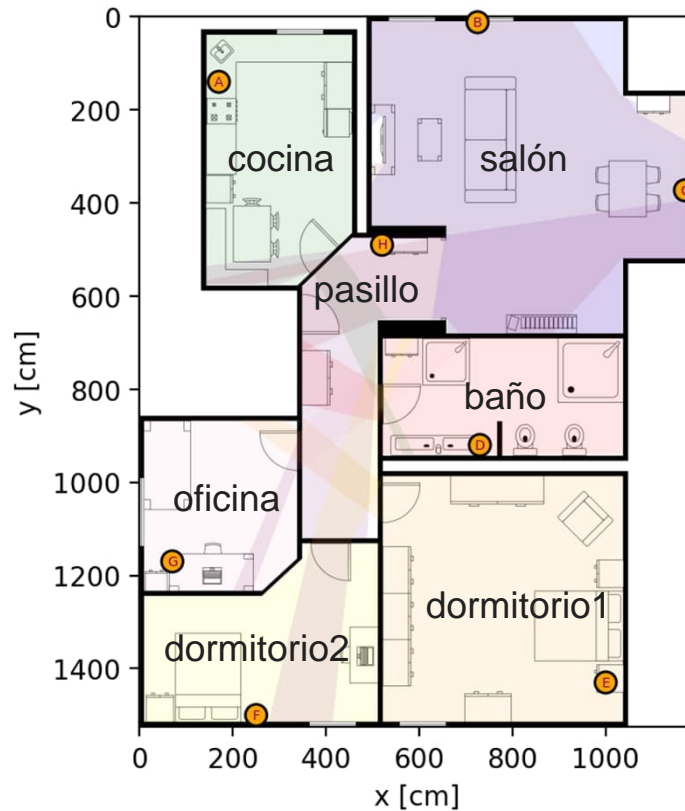
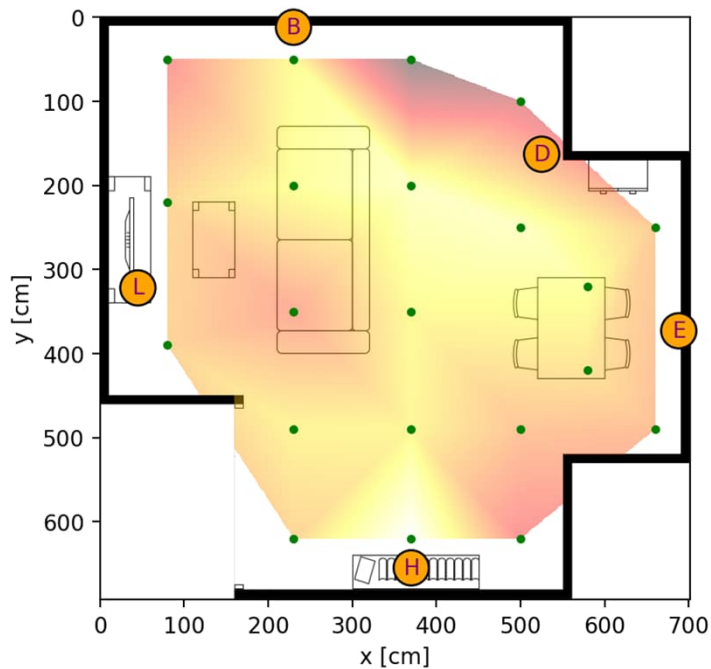


Algoritmo de posicionamiento

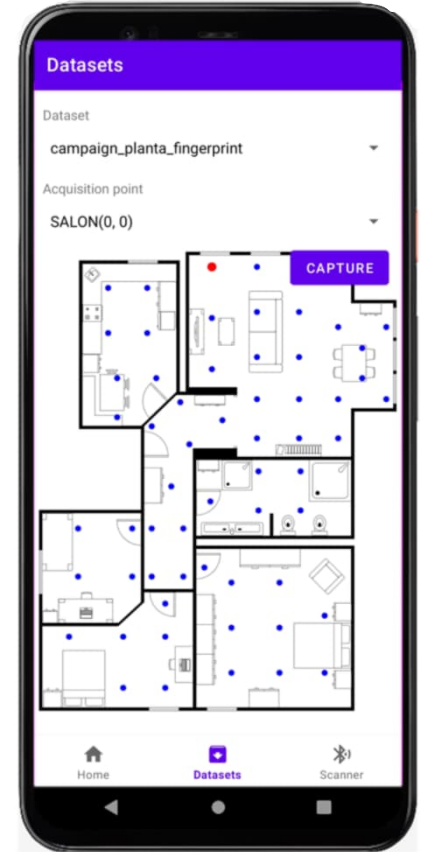
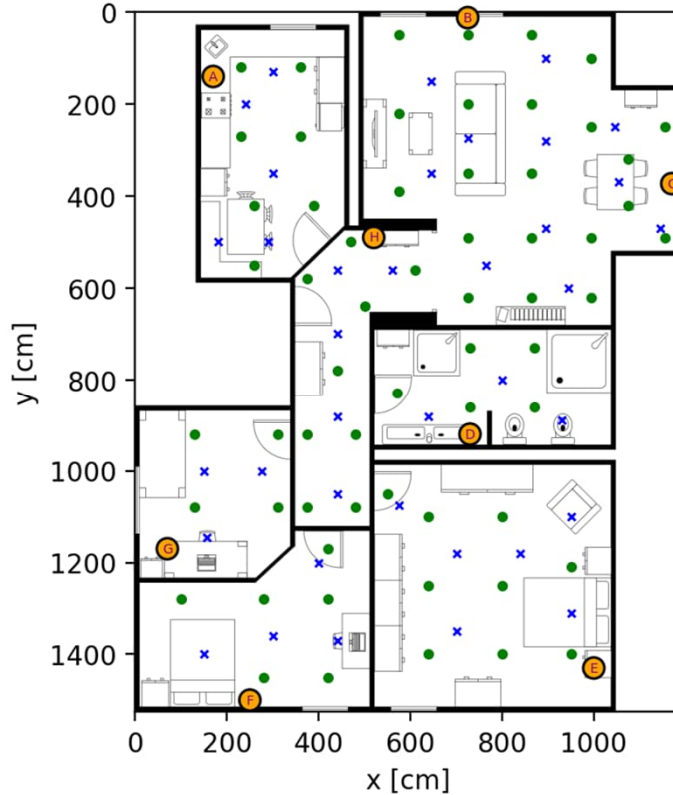
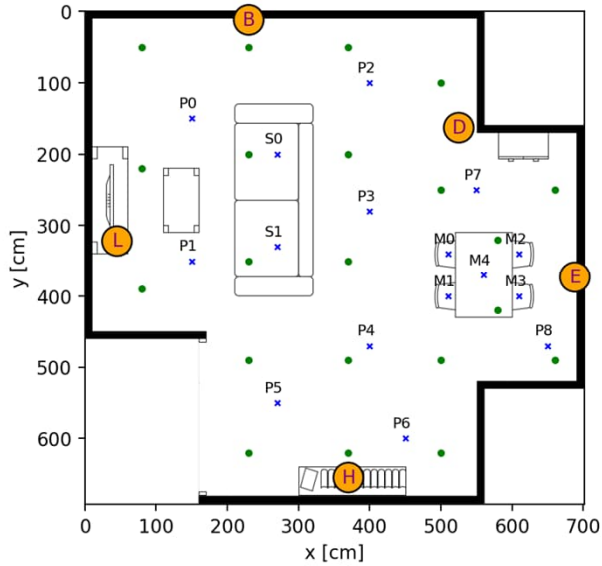


Ventana de integración: $RSSI_i = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=0}^{m-1} RSSI_i^j, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\}$

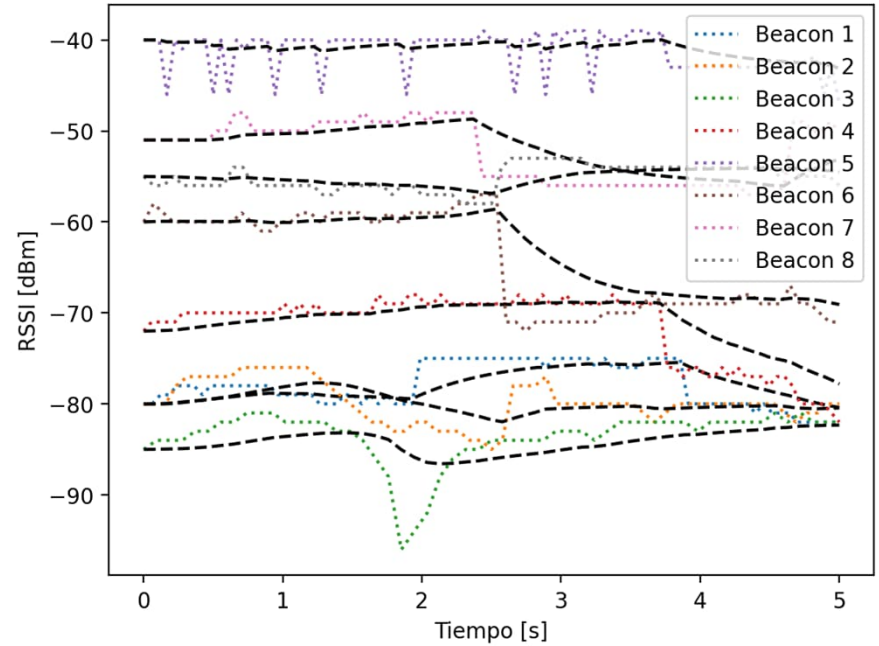
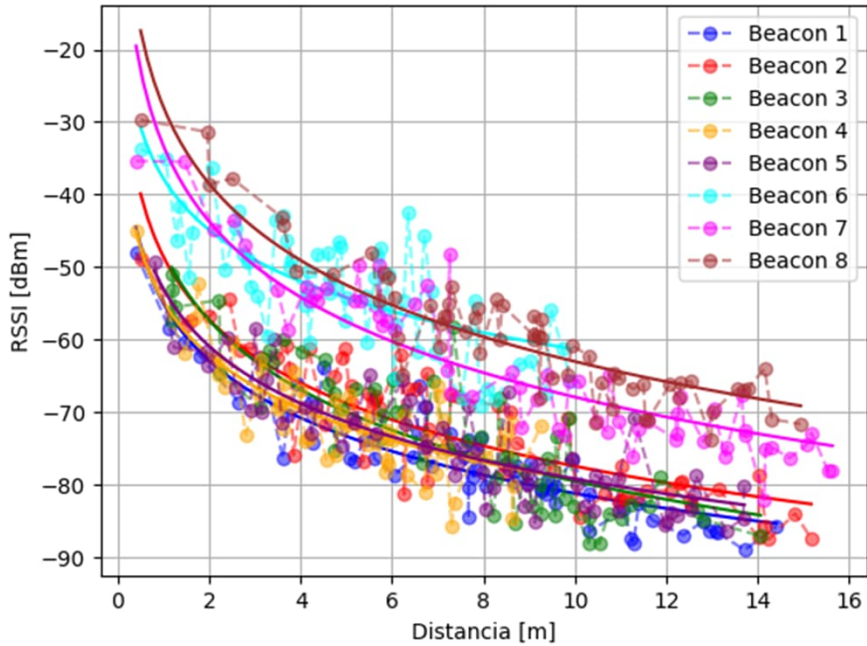
Escenarios: Sala y Planta



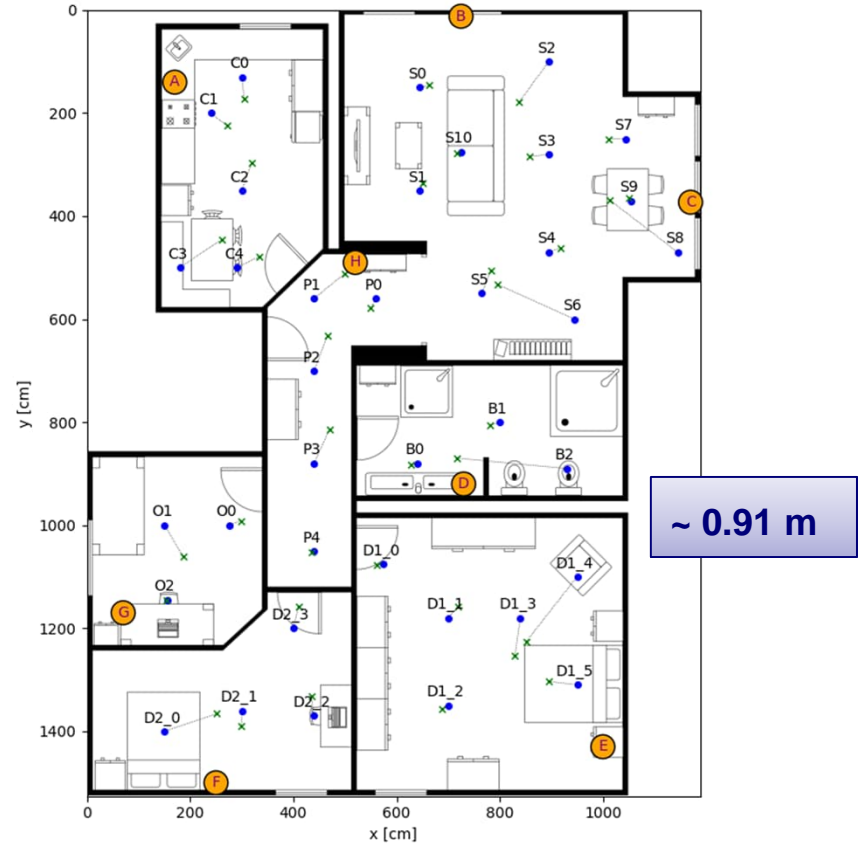
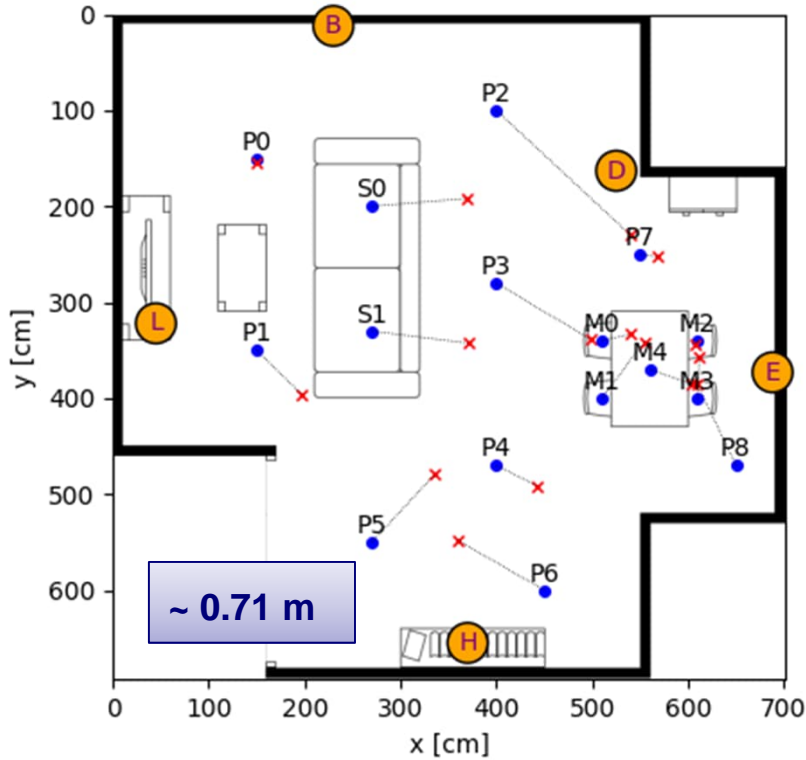
Campañas de adquisición



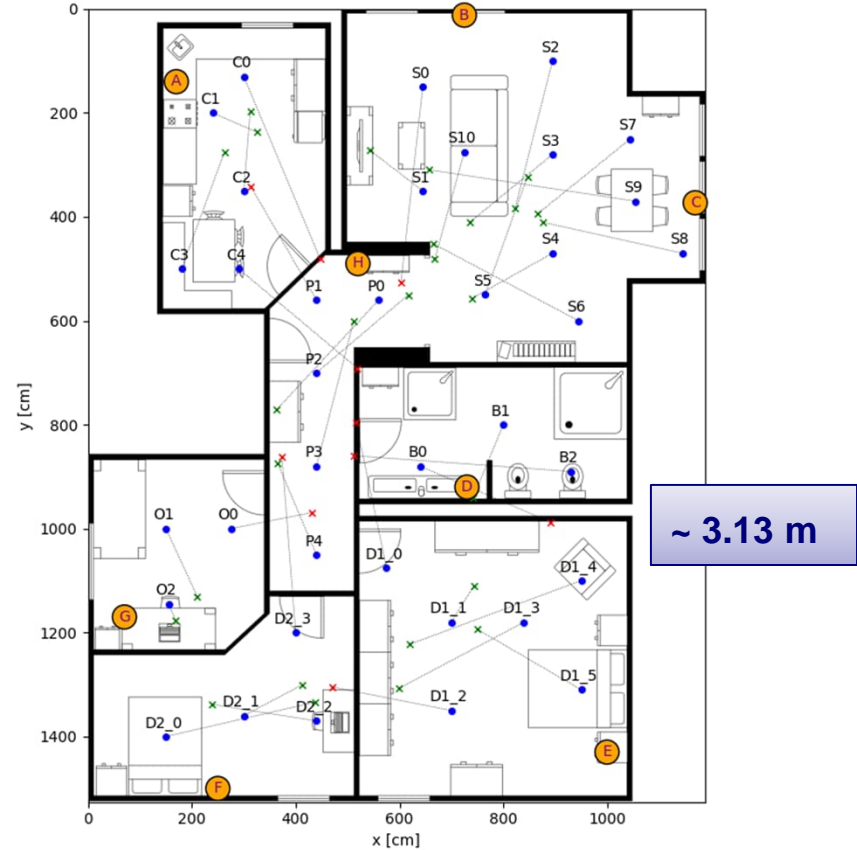
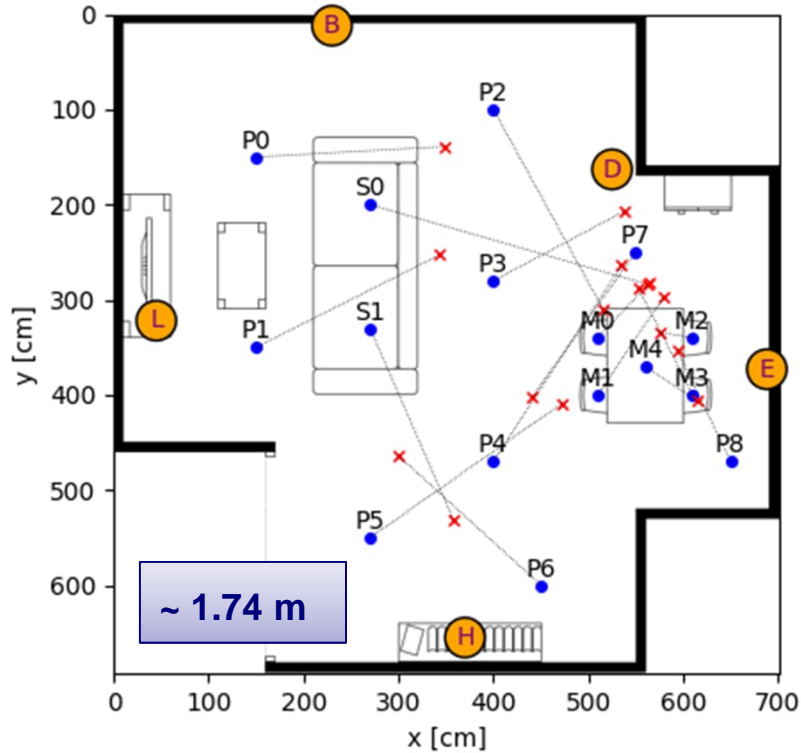
Calibración y *fingerprints*



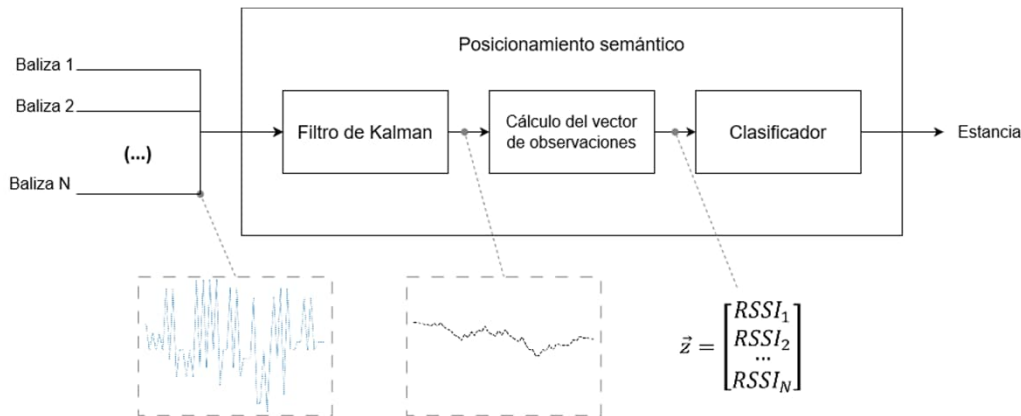
Error de localización (mejor caso)



Error de localización (peor caso)

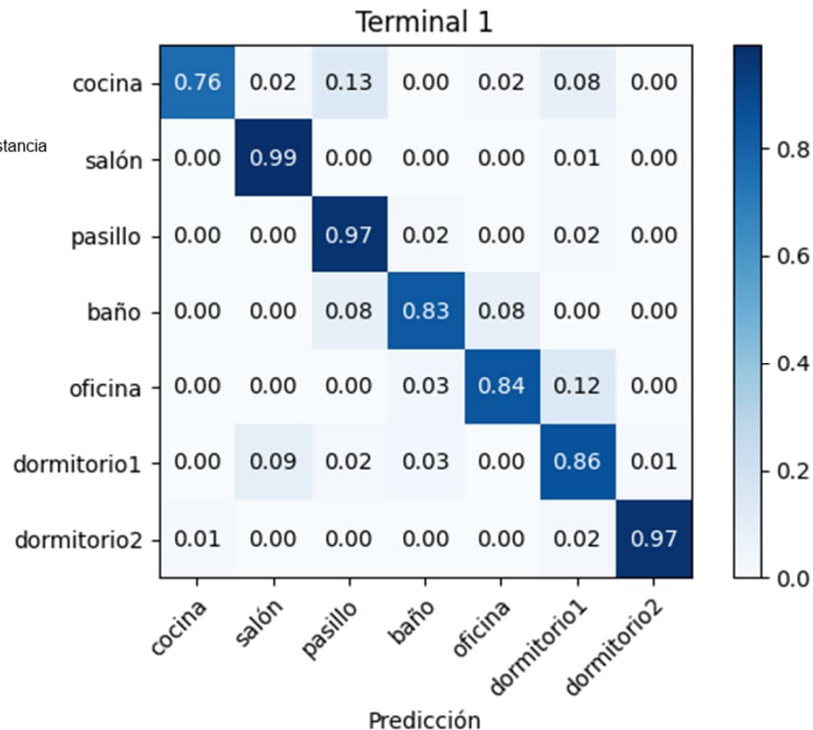


Posicionamiento semántico

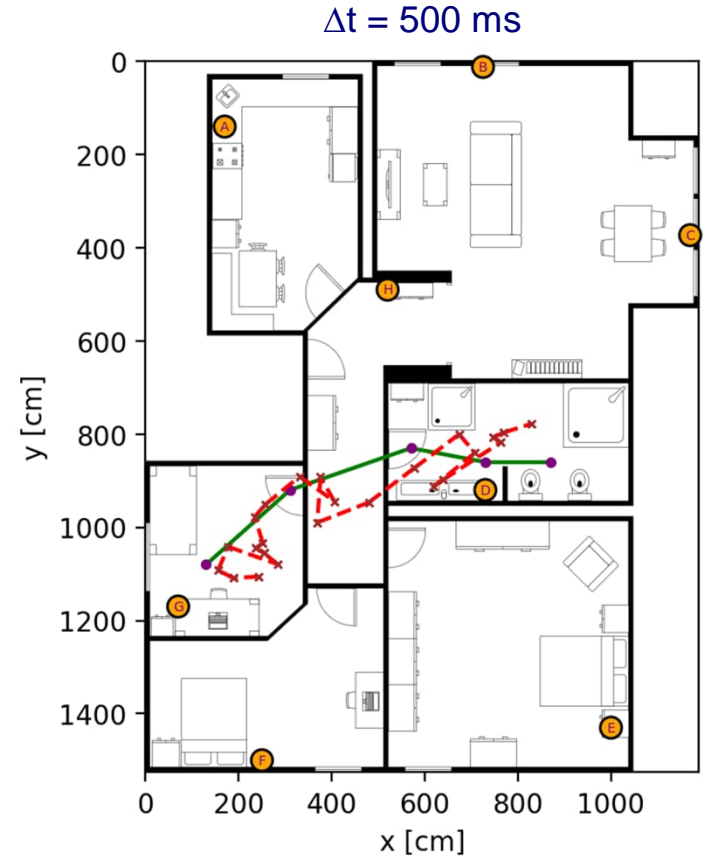
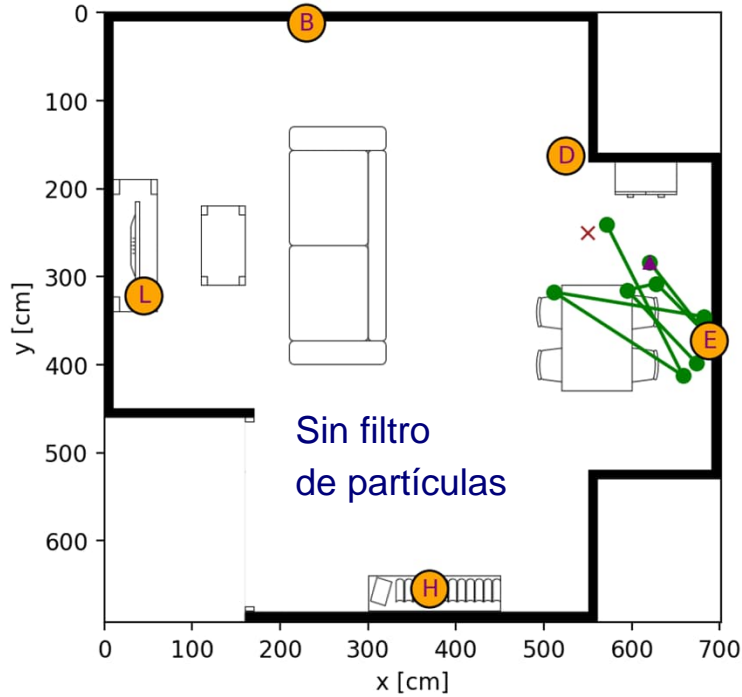


Clasificador:

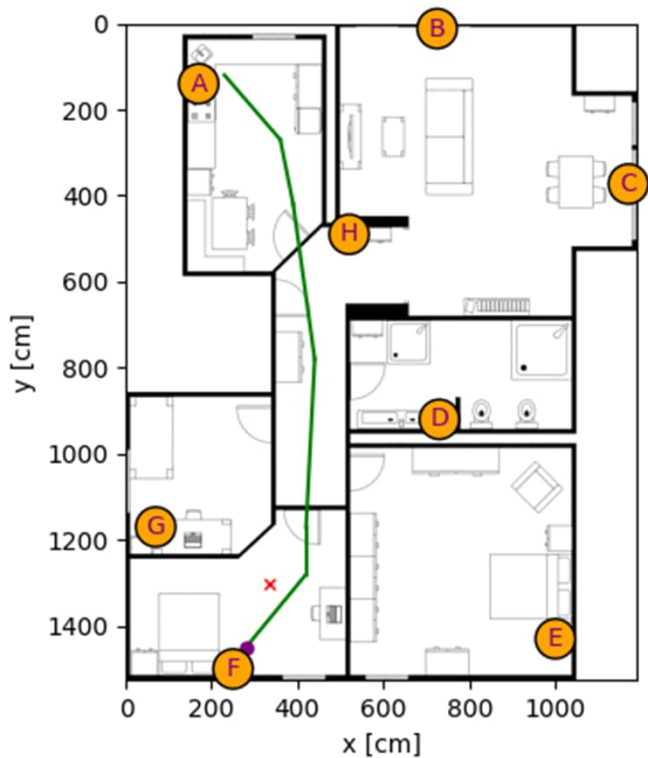
- Máquina de Soporte Vectorial (SVM)
- Kernel lineal; C = 0.001
- Set de entrenamiento: *fingerprints*
- Set de validación: capturas estáticas



Seguimiento del terminal

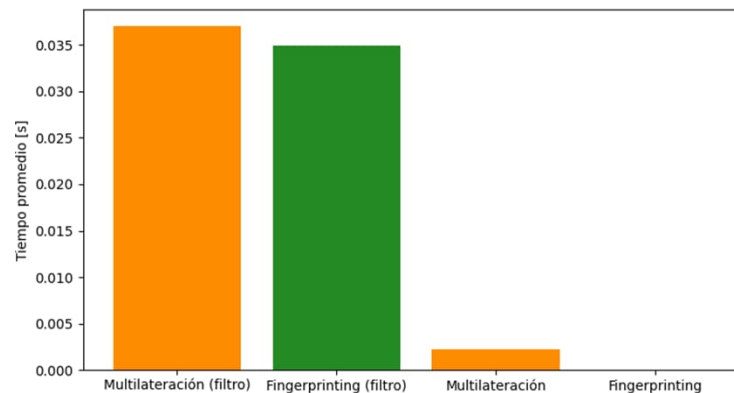
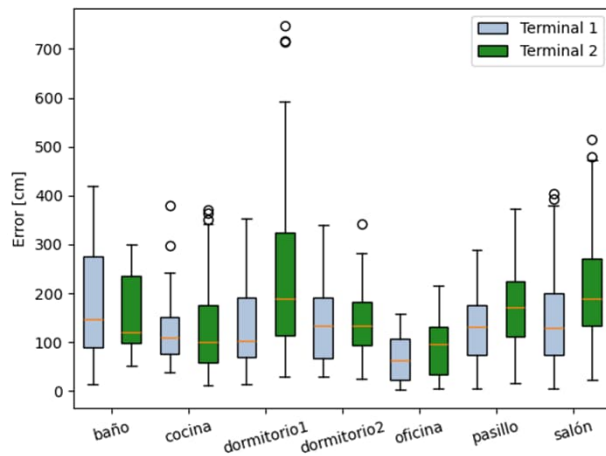


Seguimiento del terminal



Resultados y validación

Objetivo	Método de verificación	Umbral	Resultado
Error del RTLS	Testeo	< 2.5 m	~ 1.5 m
Uso de ToF	Inspección	-	NO
Producción de datasets	Inspección	-	SÍ
Latencia	Testeo	< 100 ms	~ 40 ms
Error de clasificación	Testeo	< 20 %	~ 9 %
Tecnologías estándar	Inspección	-	SÍ



Conclusiones

- a. Separar el filtro de partículas del kernel de posicionamiento da flexibilidad
- b. Desarrollar un IPS con BLE es fácil y económico
- c. Introducir ToF requiere estudiar bien tanto el hardware como el *stack* software
- d. Las tecnologías web permiten desarrollar un sistema fácilmente escalable, extendible, mantenible y actualizable

Trabajo futuro

1. Introducir ToF al esquema de procesamiento
2. Correcciones del sesgo del sistema
3. Fusión de datos del sensor inercial de los terminals
4. Métodos de autocalibración
5. Métodos de optimización de la constelación de balizas y la parametrización del sistema

Universitat Oberta
de Catalunya

UOC

 UOC.universitat
 @UOCuniversidad
 UOCuniversitat
