

Sistemas de posicionamiento de objetos mediante tecnología Bluetooth Low Energy Beacon

Rubén Arce

12 de diciembre de 2020

Índice

1. Memoria descriptiva	4
1.1. Antecedentes y objeto del proyecto	4
1.2. Ambito de aplicación	5
1.3. Análisis de soluciones al tracking de objetos	5
1.3.1. Wifi	6
1.3.2. GPS	7
1.3.3. Bluetooth Low Energy - Beacon	7
1.4. Análisis de soluciones a la subida de datos	9
1.4.1. MQTT	9
1.4.2. HTTP post	10
1.4.3. ESP Now	10
1.5. Resultados finales	11
1.6. Planificación	12
2. Memoria justificativa	12
2.1. Cálculos justificativos de la instalación	12
2.2. Cálculo de distancia por RSSI	13
2.2.1. Rssi	13
2.2.2. Trilateración y posicionamiento	16
2.3. Cálculo de consumos energéticos	17
2.4. Saturación espectro de frecuencia	19
2.5. Cálculo de ganancia de antenas	20
3. Planos	23
3.1. Planos mecánicos	23
3.2. Plano eléctricos	23
4. Pliego de condiciones	23
4.1. Prescripciones técnicas generales	23
4.1.1. Normativa relativa a radiofrecuencia	23
4.1.2. Normativa relativa a bluetooth y wifi	24
5. Presupuestos	25
5.1. Precios unitarios	25
5.2. Presupuestos Parciales	25
5.2.1. Placa de circuito impreso emisor beacon	25
5.2.2. Placa de circuito impreso receptor o gateway	26
5.2.3. Desarrollo e instalación	26
5.3. Presupuestos Total	26

5.4. Factores económicos y financieros	27
5.4.1. TIR y VAN	27
6. Bibliografía	27

Índice de figuras

1. Detección de personas aplicando redes wifi	6
2. Trama de bytes de cabecera de modo iBeacon (Apple)	8
3. Modo Beacon Edison (Google)	9
4. Diagrama explicativo del una red de ESP32	11
5. Diagrama de GANTT	13
6. Prueba de campo, medición RSSI de Beacons a 2 y 3 metros .	15
7. Variaciones de rssi entre beacons a distancias iguales	15
8. Trilateración con tres equipos escuchando al mismo Beacon .	16
9. Posicionamiento de los beacons en carros de supermercado .	17
10. Diferencia entre antena de media o cuarto de λ	21
11. Tipos de antena en función del espectro de emisión	22
12. Tipos de antena durante las pruebas de campo	22

Índice de cuadros

Comparativa de opciones de posicionamiento	11
Comparativa de opciones de subida de datos a Internet	12
Consumos energéticos ESP32	18
Frecuencia de envío frente a consumo medio	18
Frecuencia de envío frente a consumo medio	18
Rangos de frecuencias por regiones del mundo	19
Potencia y alcance BLE	24
Tabla de precios Emisor Beacon	25
Tabla de precios receptor o gateway	26
Tabla de precios desarrollo e instalación	26
Presupuesto general	26
Flujos de caja de la inversión, VAN y TIR	27
Flujos de caja de la inversión, VAN y TIR	27

1. Memoria descriptiva

1.1. Antecedentes y objeto del proyecto

Este proyecto surge como respuesta a la necesidad de poder localizar un número elevado de equipos en constante movimiento con exactitud en un espacio cerrado.

Se pretende conseguir los siguientes objetivos:

1. Estudio sobre las distintas alternativas para llevar a cabo este tracking de objetos de una forma sencilla y sin requerir de una inversión grande.
2. Análisis de las tecnologías existentes para la monitorización en interiores.
3. Estudio del parámetro RSSI como medida de la potencia de una señal y cálculo de la distancia entre equipos.
4. Desarrollo de un sistema de visualización mediante un mapa sobre el que poder ver los equipos en movimiento.
5. Diseño de hardware específico para la aplicación requerida.
6. Programación tanto del equipo emisor como del receptor así como del algoritmo de visualización.
7. Pruebas de campo y comprobación del rendimiento del equipo.

Una vez fijado el alcance del proyecto se puede empezar a planificar el mismo y buscar la mejor solución posible, por ello surgen los siguientes objetivos derivados de los primeros para poder sacar el producto al mercado:

1. Precio muy competitivo.
2. Producto estándar y de fácil aplicación.
3. Sencillez de instalación por un usuario no técnico.
4. Poco o nulo mantenimiento.
5. Producto seguro y que preparado para superar los marcados UL y CE así como protecciones frente a ESD.

1.2. Ambito de aplicación

El tracking de objetos en espacios cerrados está incrementando su popularidad debido a que es una arma de publicidad muy poderosa que demandan los grandes centros comerciales para llevar a cabo estudios de marketing y poder analizar el comportamiento de sus clietes.

Además de esta aplicación el mayor nicho de mercado es aplicado a no tener que tocar objetos para interactuar con ellos, esto teniendo en cuenta los tiempos que corren es una necesidad de numerosas empresas privadas, ayuntamientos y empresas estatales.

A modo de resumen se engloban los principales ámbitos de aplicación de esta tecnología:

1. Marketing: Estudios de mercado y de necesidad de los clientes. Elaboración de un "heat map", o mapa de las zonas con más afluencia de gente.
2. Sanidad: Monitorización de pacientes en planta.
3. Seguridad: Únicamente los empleados con autorización y proximidad podrán llevar a cabo acciones, esto tiene sentido a la hora de no tener que dar una llave a cada empleado que pueda copiarse.
4. Vandalismo: Conociendo la localización de los equipos dentro de un local cerrado en el momento en el que se deja de situar un elemento en el mapa se puede dar la voz de alarma ante un robo.
5. Propaganda y nueva forma de publicidad: Activar acciones en función de la localización en determinados puntos de interés permite llevar a otro nivel las ideas de los publicistas.

Vemos por tanto que hay numerosas aplicaciones y demanda de este producto tecnológico, es por ello por lo que se procede a explorar cual es la forma más adecuada para llevarlo a cabo e implementarlo.

1.3. Análisis de soluciones al tracking de objetos

Se plantean dos problemáticas, en primer lugar se busca llevar a cabo el seguimiento de elementos en movimiento, y por el otro se ha de enviar esta información de alguna forma al sistema correspondiente para que lleve a cabo el análisis de los datos. Esta última acción es esencial en el proceso,

es lo realmente interesante desde el punto de vista del cliente final de esta tecnología. En lo que respecta a la obtención de datos de posición relativa de objetos o personas se presentan las siguientes opciones:

1.3.1. Wifi

La posibilidad de llevar a cabo el tracking mediante la escucha de wifis es una posibilidad, para ello sería necesario en primer lugar que se colocara un móvil en cada uno de los objetos a identificar. Esto es aceptable en el caso de monitorización de personas pero inasumible para objetos.

El procedimiento consistiría en llevar a cabo un barrido de direcciones MACs que generan los móviles cuando tienen el wifi activado, es decir que este sistema no funcionaría en el caso de que una persona lleve puestos los datos del móvil únicamente.

Otra desventaja es el hecho de que al tener un equipo buscando wifis la información personal del propietario, es decir, localización, fecha, hora a la que se intentó conectar y la dirección MAC que identifica y relaciona un móvil a una persona queda expuesta. Se han de tener en cuenta la política de privacidad vigente, empleando esta tecnología para llevar a cabo el tracking se incumpliría.



Figura 1: Detección de personas aplicando redes wifi

La única solución al problema es que se ha de pedir permiso formal a la persona para poder llevar a cabo el tratamiento de sus datos, cosa que es difícil puesto que se desconoce quien va a llevar a cabo el uso del equipo.

El artículo 29 de privacidad de datos de la comunidad europea dice lo siguiente: “WiFi-tracking, depending on the circumstances and purposes of the data collection, such tracking under the GDPR is likely either to be

subject to consent, or may only be performed if the personal data collected is anonymised” Es por ello por lo que se tendrá en cuenta como opción aunque haya numerosos puntos en contra de implementar un sistema como este.

1.3.2. GPS

La tecnología por excelencia para llevar a cabo el seguimiento de objetos o personas es el GPS, la principal desventaja que presenta es el elevado consumo energético comparado con el wifi o el bluetooth.

Mantener un módulo GPS encendido y pretender llegar a una autonomía de años es a día de hoy imposible, es por ello por lo que o se emplea un teléfono móvil para llevarlo a cabo, cosa inviable si se pretende monitorizar objetos y no personas en movimiento, o el tiempo de refresco de los datos ha de ser muy lento, del orden de horas, cosa de nuevo inviable para la aplicación que se presenta.

Se ha de tener en cuenta también el aumento de precio que supondría un módulo GPS sumado a la antena que lleva consigo de dimensiones nada despreciables. Es por ello por lo que esta tecnología se tendrá en cuenta pero no es la más adecuada para la problemática presente.

1.3.3. Bluetooth Low Energy - Beacon

La tecnología Bluetooth es un estandar industrial aplicado a conexiones inalámbricas, este permite transferir grandes cantidades de información en distancias cortas a bajas velocidades. Puede ser enfocado a conexión punto a punto o como es nuestro caso llevar a cabo una red de equipos que emiten en modo broadcast.

La potencia de emisión va desde los -20 dBm (0.01 mW) hasta los +20 dBm (100 mW). Cuanta mayor potencia de emisión mayor consumo energético del dispositivo pero también conseguiremos una mayor distancia.

La forma de envío de datos que más encaja dentro de la tecnología BLE (Bluetooth Low Energy) es Beacon o baliza, un dispositivo que transmite una señal de bluetooth cada cierto tiempo y es visible por cualquier otro equipo que escuche en esa misma frecuencia. La principal ventaja es que no es necesario llevar a cabo la conexión al equipo que escucha. Existen varios tipos de beacons:

1. iBeacon: Fue la primera tecnología BLE Beacon desarrollada por Apple, permite leer y emitir en modo broadcast para cualquier dispositivo que disponga de Bluetooth low energy. Es un protocolo propietario, es decir es un estandar cerrado. Los iBeacons disponen de los siguientes identificadores:
 - UUID: Se basan en enviar el indentificador único de dispositivo, una cadena de caracteres de 16 bytes que permite caracterizar a cada equipo.
 - Major: Número entero de 0 a 65535, se usa para identificar grupos, un ejemplo sería asignar un Major común para todos los beacons de una misma planta o habitación.
 - Minor: Es también un número entero de 0 a 65535 que se emplea para distinguir un beacon específico dentro de un grupo, entendiéndose como grupo aquellos beacons con mismo valor de Major.

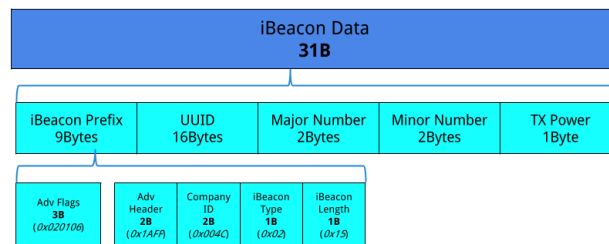


Figura 2: Trama de bytes de cabecera de modo iBeacon (Apple)

2. Eddystone: Creado por Google es un protocolo de código abierto. A diferencia del protocolo anterior este permite transmitir:
 - URL: Un url propio de una web, de esta forma se evita la necesidad de tener que contar con una app instalada.
 - UID: Similar al UUID del iBeacon, este parámetro identifica al beacon y permite llevar acciones individuales.
 - TML: Permite enviar información relativa al beacon como por ejemplo el porcentaje de batería o valores de sensores.

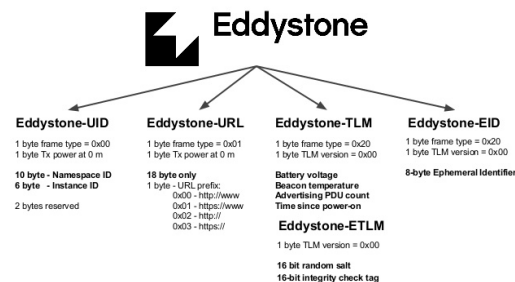


Figura 3: Modo Beacon Edison (Google)

3. AltBeacon: Es un protocolo de código abierto que surge como resultado de las incompatibilidades de las dos tecnologías anteriores, la ventaja principal es que permite más flexibilidad de modificaciones así como compatibilidad entre sistemas operativos.

1.4. Análisis de soluciones a la subida de datos

Una vez exploradas las opciones de posicionamiento de los equipos se llevará a cabo el estudio de posibilidades de subida de estos datos a la nube, es por ello por lo que se contemplan varias opciones:

1.4.1. MQTT

MQTT es un protocolo estándar aplicado principalmente al IoT (Internet of Things). Está basado en publicación y suscripción con un servicio de mensajería push, los mensajes se publican en los topics en los que los distintos dispositivos se encuentran escuchando. La base de la comunicación es el Broker, encargado de dar soporte a todos los topics, los clientes inician una conexión TCP/IP con él que se mantiene abierta constantemente hasta que el cliente la finaliza. Se emplean los puertos 1883 o 8883 con seguridad TLS. Cada mensaje tiene un QoS (Quality of service), es el mecanismo de calidad del servicio, o lo que es lo mismo es la forma de gestionar la robustez de los mensajes entre clientes ante los fallos de conectividad.

- QoS 0: Envío una única vez
- QoS 1: Mensaje enviado hasta que se garantiza que se entrega.
- QoS 2: Garantizado que cada mensaje se entrega al suscriptor por una única vez.

Esta es una opción para que los equipos que escuchan a los beacons y envían la información a un mismo topic en el que el sistema de visualización está escuchando.

1.4.2. HTTP post

A través del protocolo de transferencia de hipertexto se puede llevar a cabo una petición POST, consiste en que un servidor acepte los datos recibidos por el microcontrolador. La ventaja es que con el HTTP Post solo se mantiene la conexión abierta al hacer la conexión, luego se desconecta hasta la siguiente vez en la que se vuelvan a publicar datos. Otra ventaja es que mediante peticiones se pueden llevar a cabo varias a distintos servidores, por el contrario con MQTT solo se puede enviar información a aquellos que estén suscritos al mismo topic. El principal inconveniente es que está demostrado que en una red 3G una petición post es del orden de 93 veces más lenta que un mensaje MQTT, con el consiguiente consumo energético que esto conlleva. Otro inconveniente es el hecho de que se requiera de un servidor con una API o endpoint constantemente escuchando a los distintos posts.

1.4.3. ESP Now

Se plantea la opción de que no todos los equipos que escuchan a los beacons no tengan internet, es por ello por lo que se baraja llevar a cabo una red de elementos que escuchan y que envían a un único concentrador encargado de enviar esta información a internet por cualquier otro método. Es decir, se contempla la posibilidad de establecer una red de elementos que escuchan, para ello se emplea un protocolo de comunicación rápido denominado ESP-NOW, este tiene las siguientes características:

- Encriptación de las comunicaciones.
- Hasta 250 Bytes de payload o mensaje a enviar.
- Rapidez de comunicación entre esp

La idea sería la siguiente:

- a) El equipo que lleva a cabo el barrido y búsqueda de beacons escanea e intenta conectarse a internet por wifi.

- b) Si lo consigue publica los datos, en el caso de que falle enviará por ESP NOW la información que no puede subir a internet a otro equipo en su misma red que si que pueda.
- c) Este segundo hará lo mismo hasta que finalmente haya uno que si que pueda subir estos datos.



Figura 4: Diagrama explicativo del una red de ESP32

1.5. Resultados finales

Una vez analizadas las dos problemáticas y las distintas soluciones a cada una de ellas se ha confeccionado la siguiente tabla en la que se puede ver una comparativa entre cada una de ellas.

Por un lado está la forma en la que poder medir las distancias de los equipos con respecto a los equipos que escuchan, se contemplaban las siguientes opciones:

Tecnología	Coste	Complejidad	Distancia	Consumo energético
GPS	Elevado	Baja	Ilimitada	Muy alto
Wifi	Medio	Media	100 m	Alto
Bluetooth	Bajo	Media	100 m	Muy bajo

El claro ganador en este caso es el Bluetooth debido principalmente al precio que supondría llevar a cabo una red de estas características además del consumo energético tan bajo hace que el mantenimiento de los equipos sea casi inexistente.

Recordemos que una de las premisas iniciales era que los equipos requirieran de poco cuidado por parte del cliente, empleando esta tecnología se puede conseguir que solo sea necesario cambiar una pila una vez al año.

En lo que respecta a la comunicación de estos datos de distancia entre equipos a internet se ha reunido de nuevo en la siguiente tabla un resumen con las opciones y los puntos a favor y en contra de cada una de las tecnologías.

Tecnología	Velocidad de datos	Coste	Complejidad
MQTT	Elevada	No	Baja
HTTP POST	Baja	Medio	Baja
ESP NOW	Media	No	Alta

La elección en este caso está mucho más ajustada, en el caso de que se pueda conectar a todos los equipos que escuchan a internet el ganador será la opción de MQTT puesto que la forma más fácil de llevar a cabo el envío de datos.

En el caso de que no llegue la señal wifi a todos los puntos en los que se decida llevar a cabo el tracking de objetos surge un problema puesto que perderemos esos datos, la solución es hacer que este equipo, que no tiene conexión a internet, envíe los datos por ESP NOW a otro que si que sea capaz de subir tanto su información como la de su compañero al broker por MQTT.

Puesto que se pretende llevar a cabo un sistema válido para toda la casuística de instalaciones se han contemplado ambas opciones y la implementación real llevará a cabo los dos métodos.

Es decir que la única opción desechada ha sido la conexión directa con un servidor mediante HTTP debido a que, en primer lugar sería necesario programar un servicio que escuchara en este endpoint y luego sería necesario hostearlo para que disponga de una IP pública estática y sea accesible desde cualquier parte del mundo.

1.6. Planificación

Para sintetizar el proceso de desarrollo del proyecto técnico se empleará un diagrama GANTT, en la figura 5 podemos ver la evolución del desarrollo del mismo así como la duración exacta de cada etapa.

2. Memoria justificativa

2.1. Cálculos justificativos de la instalación

En este apartado de llevará a cabo el estudio de la viabilidad del proyecto desde el punto de vista técnico, para lo cual se contemplará un estudio del rssi

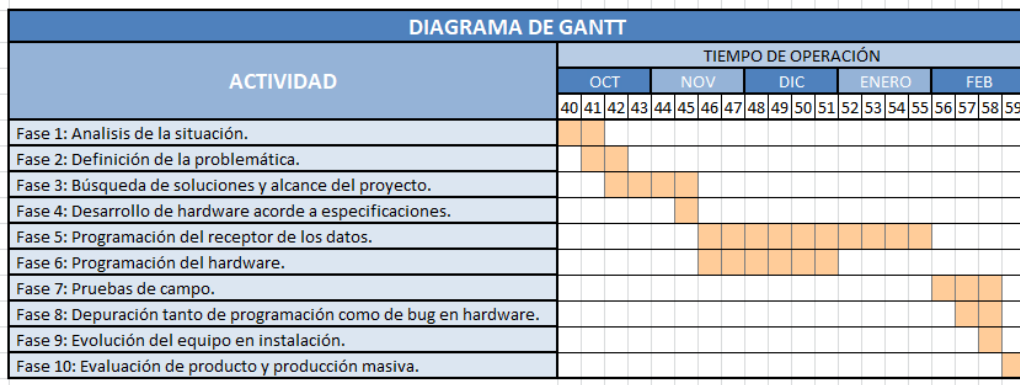


Figura 5: Diagrama de GANTT

como forma de medir distancia, un análisis de la previsión energética de los equipos, un análisis de las frecuencias y ganancias de las antenas empleadas.

2.2. Cálculo de distancia por RSSI

2.2.1. Rssi

El RSSI (Received signal strength indicator) es un indicador de la energía o potencia recibida en un mensaje de radio, está asociado con la atenuación de la señal, cuanto más pequeña es su valor menor atenuación. Este valor está presente no solo en Bluetooth sino también en el Wifi (2,4 GHz) o en las bandas de radio industriales, científicas y médicas, las denominadas ISM (desde 433MHz a 458.5MHz y desde 860MHz a 960MHz)

De las muestras obtenidas en pruebas de campo con bluetooth se puede concluir que se puede llegar a estimar la distancia a partir de los valores de rssi con un error que disminuye cuanto más alejados se encuentren los elementos a medir.

Los rangos del RRSI se obtiene bien por aproximaciones teóricas o bien por experimentación, esto es debido a que es fuertemente alterado por las condiciones del medio en el que se encuentre. Es importante mencionar también que este parámetro es medido a través de un hardware que rara vez tiene un comportamiento idéntico, eso explica las fluctuaciones también.

Los modelos de cálculo del RRSI se basan en la pérdida de señal en el espacio, como sabemos la potencia de la señal disminuye con el cuadrado

de la distancia. Esta ecuación de Friis para la transmisión libre en el espacio es una fórmula teórica, existen aproximaciones obtenidas por métodos empíricos:

$$P_L(d)[dB] = P_L(d_0)[dB] + 10n * \log_{10} \frac{d_i}{d_0} \quad (1)$$

Siendo $P_L(d_0)$ la pérdida de propagación a 1 metro y n es una constante que depende del medio, será igual a 2 si se encuentra en el espacio libre sin obstáculos ni reflexiones o dispersiones de señal.

Para calcular este parámetro 'n' se ha de aplicar la siguiente fórmula, como podemos ver para llevar a cabo el cálculo se han de tomar valores empíricos de potencias:

$$n = \frac{P_L(d_i) - P_L(d_0)}{10n * \log \frac{d_i}{d_0}} \quad (2)$$

Por lo tanto, y una vez obtenidos los valores de potencia a distintas distancias podemos obtener la ganancia de la señal recibida:

$$RRSI[dBm] = -10n * \log_{10} d + A[dBm] \quad (3)$$

Disponiendo ya del valor de la constante de pérdidas, d , calculado con la ecuación (2) y los valores de rssi medidos desde la antena receptora a 1 metro de distancia, (3), podemos obtener:

$$d = 10^{\frac{-(RRSI-A)}{10n}} \quad (4)$$

Llevados a cabo los cálculos por parte del equipo que escucha a los distintos beacons podemos calcular la distancia real a cada uno de ellos. En el caso de que se solapen y dos receptores escuchen el mismo beacon será necesario llevar a cabo el proceso de trilateración expuesto a continuación. Para comprobar la fluctuación del parámetro del rssi se ha llevado a cabo la toma de este parámetro a los largo de un periodo de tiempo largo y los resultados a 2 metros y a 3 metros se encuentran en la figura 6 respectivamente.

Podemos ver que hay pequeñas fluctuaciones y es por ello por lo que será necesario implementar un sencillo filtro para evitar el ruido electromagnético que hemos visto anteriormente.

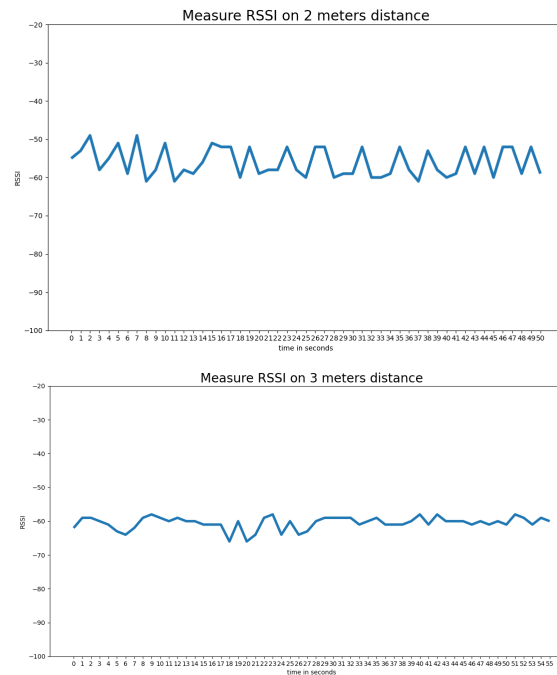


Figura 6: Prueba de campo, medición RSSI de Beacons a 2 y 3 metros

Otra prueba llevada a cabo ha sido la de incrementar el número de iBeacons y situarlos a la misma distancia del equipo que escucha, los resultados son los siguientes:

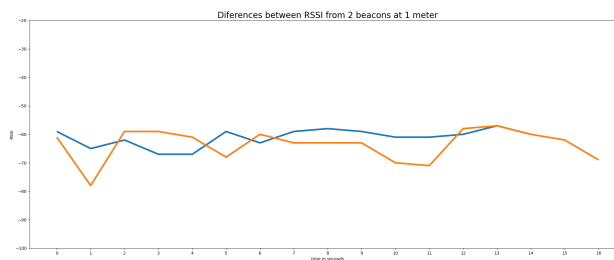


Figura 7: Variaciones de rssi entre beacons a distancias iguales

Podemos ver de nuevo que las diferencias son notables, esto fianza la necesidad de implementar un filtro que no falsee las medidas y cree distancias incoherentes puntuales entre los equipos.

El filtro más habitual para este tipo de aplicaciones es el denominado Kalman Filter:

$$RSSI_{suavizado} = \alpha * RSSI_n + (1 - \alpha) * RSSI_{(n-1)} \quad (5)$$

Otra opción que experimentalmente ha dado buenos resultados es la de seleccionar los 20 valores anteriores, obtener la media y si se separa más de un 40 % el valor nuevo lo rechaza. Con esto consigo eliminar las fluctuaciones indeseadas.

2.2.2. Trilateración y posicionamiento

Una vez obtenidas las distancias a los distintos equipos que receptores es necesario llevar a cabo el posicionamiento exacto de los mismos, para ello se emplea la trilateración:

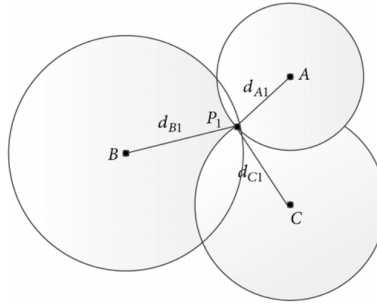


Figura 8: Trilateración con tres equipos escuchando al mismo Beacon

Para ello hemos de resolver las siguientes ecuaciones básicas sobre la distancia entre recta y un punto en una circunferencia:

$$d_{A1} = \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2} \quad (6)$$

$$d_{B1} = \sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2} \quad (7)$$

$$d_{C1} = \sqrt{(x - x_C)^2 + (y - y_C)^2} \quad (8)$$

Llevando a cabo la simplificación obtenemos un sistema de ecuaciones que permite calcular la distancia relativa a cada uno de los equipos que escuchan. En el anexo de software se muestran los resultados con mayor detalle, en la figura 9 podemos ver un adelanto del posicionamiento de carros de la compra en un supermercado.

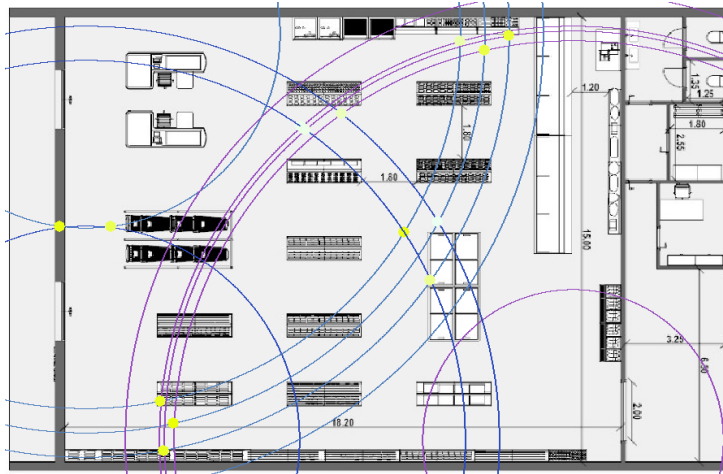


Figura 9: Posicionamiento de los beacons en carros de supermercado

2.3. Cálculo de consumos energéticos

El procesador empleado tanto para el equipo emisor como para el receptor disponen de los siguientes modos de funcionamiento:

- Active Mode, 160-260mA. Los dos cores del procesador encendidos así como el procesador ULP, RTC, Wifi, Bluetooth, Radio, Peripherals.
- Sleep mode: 3-20mA Activos los dos cores, el coprocesador ULP coprocesador y el RTC, inactivos el Wifi, Bluetooth, Radio y periféricos.
- Light sleep mode: La CPU está pausada apagando los pulsos de su reloj interno, sin embargo, el RTC y el coprocesador ULP se mantienen activos. Esto supone consumo menor que en los anteriores modos de funcionamiento, se puede llegar a los 0.8mA.
- Deep sleep mode, tanto la CPU como gran parte de la RAM así como todos los periféricos se mantienen apagados. Las únicas partes activas son los RTC de los periféricos y de la CPU (incluyendo el ULP) y su memoria interna. El chip consume en torno a los 0.15 mA si se mantiene encendido el ULP y 10µA si no. En el modo deep sleep todo se encuentra apagado por ello los datos de la memoria del rtc se pierden puesto que se encuentra en reinicio el uP.

- Hibernation mode: A diferencia del modo deep sleep el oscilador de 8MHz y el ULP se encuentran apagados, no es posible almacenar nada de información. Tan solo el RTC funcionando con el reloj de baja velocidad puede funcionar. En este modo de funcionamiento el micro consume sobre los 2.5µA.

Modo del ESP32	Consumo energético
Wi-Fi Tx a 13dBm 21dBm	160 260mA
Wi-Fi/BT Tx a packet 0dBm	120mA
Wi-Fi/BT Rx and listening	80 90mA
Sleep mode	3-20mA
Light sleep mode	0,8mA
Deep sleep mode	0,15 mA - 10µA
Hibernation mode	2,5µA

A la hora de llevar a cabo la decisión sobre como llevar a cabo el protocolo de comunicación se ha de tener en cuenta el consumo de los equipos, en especial en lo que respecta a los beacons.

Es por ello por lo que se ha optado es por dormir el equipo durante 58 segundos, despertarlo, enviar su trama bluetooth y luego dormirlo hasta la siguiente vez que despierte. Con esto conseguimos un consumo que varía en función de la frecuencia de envío, en las siguiente tablas se puede ver un análisis en función del tiempo y en consecuencia la duración media de las baterías. Se ha puesto como ejemplo a una frecuencia de envío de 10 minutos.

Frecuencia de envío	Consumo energético
1 min	2,415 mA
5 min	0,495 mA
10 min	0,255 mA
15 min	0,175 mA
30 min	0,095 mA

Tipo de batería	Capacidad (mAh)	Autonomía(días) f=10 min	Autonomía(días) f=5 min
Pila CRC 2032	240 mAh	39	20
Pila AA	2500 mAh	409	210
Batería Li-Ion	1600 mAh	261	135

2.4. Saturación espectro de frecuencia

Partiendo de la premisa inicial de que a menor frecuencia de señal emitida mayor distancia vamos a conseguir en las comunicaciones y de que, por el contrario, cuanto menor frecuencia menor volumen de datos es posible. La tecnología bluetooth usa la frecuencia de 2.4GHz ISM (2400 to 2483.5 MHz), esta banda permite una buena relación de compromiso entre distancia y volumen de datos a transmitir. El espectro de frecuencia es amplio y cada banda tiene su aplicación, dentro de las telecomunicaciones distinguimos las siguientes opciones:

- Banda ISM: Son las bandas de radio industriales, científicas y médicas, están reservadas a nivel internacional para estos usos y pueden usarse sin licencias por parte de gobiernos. El uso de esta banda conlleva que todo equipo emisor ha de estar protegido frente a interferencias dentro de su mismo rango, es decir han de ser tolerantes a errores.

Desde el microondas y el mando del garaje hasta el bluetooth, NFC y wifi son ejemplos de tecnologías que emplean este rango que se encuentra comprendido desde 6.78 MHz hasta 244 GHz en distintos tramos, un ejemplo de tramos serían los siguientes:

Rango de frecuencia	Bandwidth MHz	Center Frequency MHz	Allocation
6.765 - 6.975 MHz	0.03	6.78	Locally
13.553 - 13.567 MHz	0.014	13.56	Global
26.957 - 27.283 MHz	0.326	27.18	Global
40.66 - 40.7 MHz	0.04	40.68	Global
433.05 - 434.79 MHz	1.74	433.92	EU RU, Africa
902 - 928 MHz	26	915	Americas
2400 - 2500 MHz	100	2450	Global
5725 - 5875 MHz	150	5800	Global
24 - 24.250 GHz	250	24.125 GHz	Global
61 - 61.5 GHz	500	61.250 GHz	Locally
122 - 123 GHz	1000	122.5 GHz	Locally
244 - 246 GHz	2000	245 GHz	Locally

- Banda no ISM: Para usos no licenciados: Son aquellas que no requieren permisos especiales de las autoridades para su uso. A nivel mundial el 2,4GHz está dentro de las frecuencias de libre utilización con ciertas limitaciones en algunos países.

Es por ello por lo que al ser libres podemos tener emitiendo a nuestros equipos sin preocuparnos por la legislación existente, la gran versatilidad para transmitir también conlleva un mayor número de equipos en este ancho de banda y mayores dificultades.

La frecuencia de 2.4 GHz con su estándar 802.11 b/g/n ha llegado al límite de su capacidad, se han detectado incluso caídas del 30 % en áreas urbanas. La banda ISM de 2.4GHz es, sin lugar a dudas, la que soporta un uso más intensivo, ya que es utilizada en diferentes estándares de redes Wi-Fi (IEEE 802.11b/g/n) y Bluetooth, (IEEE 802.15.1), llegando en muchas ocasiones a su completa saturación.

Hemos de tener en cuenta que llevar a cabo una red de cientos de equipos que emitan en frecuencias similares puede llegar a congestionar el sistema o incluso dejarlo inutilizado. A pesar de los riesgos y basándose en estudios que comprueban la saturación admisible se opta por continuar con el proceso debido al volumen de datos que se emite es absurdamente bajo.

2.5. Cálculo de ganancia de antenas

Una antena convierte la energía eléctrica del transmisor en energía electromagnética y viceversa, las antenas pueden ser para recibir, para transmitir o ambas. La localización de la antena, las dimensiones y el diseño pueden afectar drásticamente en el funcionamiento óptimo de la red de beacons. Las antenas típicas en aplicaciones de radiofrecuencia con bluetooth son de -10dBm a 10dBm.

El denominado path loss o atenuación de la señal de radio es la reducción de la densidad de potencia de una onda durante la propagación en el espacio. Este parámetro es esencial a la hora de poder establecer una red de bluetooth de estas dimensiones. Las dimensiones de la antena se pueden llegar a obtener mediante:

$$\lambda_0(m) = \frac{v_0(m/s)}{f(Hz)} = \frac{2,998 * 10^8}{2,4 * 10^9} = 12,49cm \quad (9)$$

Para la aplicación que se plantea existen dos tipos de antenas:

- Antenas monopolo $\lambda/4$: Menor tamaño pero menor eficiencia.
- Antenas dipolo $\lambda/2$: Mayor tamaño pero mejores resultados.

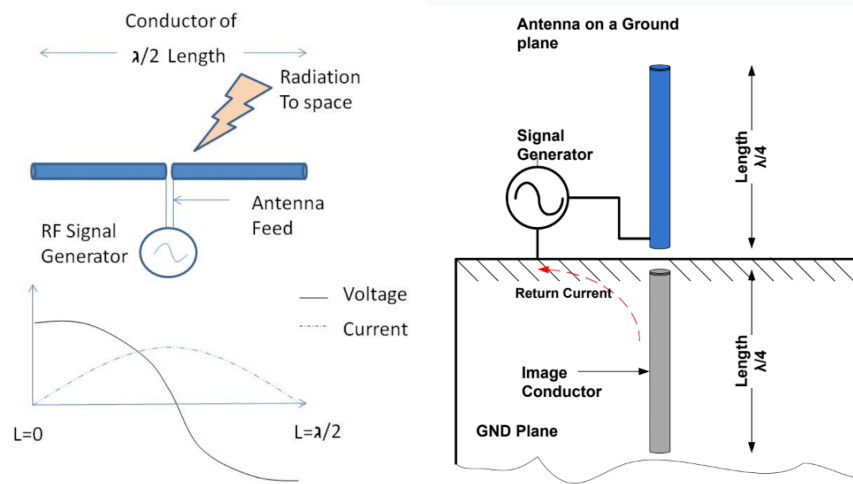


Figura 10: Diferencia entre antena de media o cuarto de λ

Además se ha de tener en cuenta que las antenas atienden a su diagrama de radiación, es decir, al espectro tridimensional de emisión, según la forma de radiación podemos distinguir:

- Antenas isotrópica: Emite con la misma densidad en todas las direcciones.
- Antenas omnidireccionales: Emite en torno a un solo plano isotrópico.
- Antena directiva: Concentra la energía radiada tan solo en una dirección del espacio.

Dentro del mundo de las antenas existen numerosos modelos u opciones que se enumeran a continuación:

1. Antenas de cable, son las más sencillas de todas y como su propio nombre indica es un simple cable soldado a la PCB de una dimensión determinada, esta longitud corresponde con la de una antena monopolo $\lambda/4$. El cable aporta el mayor rendimiento y rango de radiofrecuencia debido a sus dimensiones y a su caracter flexible, moldeable y orientable sin importar la posición de la tarjeta.
2. Antena PCB, es una pista en el propio circuito impreso que puede tener numerosas formas, a diferencia de la de cable esta solo se encuentra en el espacio 2D. Tienen menos eficiencia que las anteriores y requieren más espacio pero son incluso más baratas.

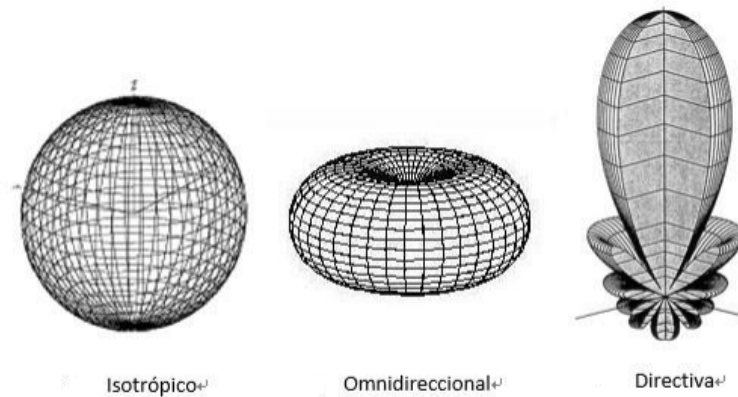


Figura 11: Tipos de antena en función del espectro de emisión

3. Antena de chip, este tipo de antena es una tarjeta o módulo que ocupa menos espacio que cualquiera de las anteriores y tiene un rendimiento intermedio entre ambas otras dos opciones.

Se han llevado pruebas de campo con distintos modelos y distintas posiciones dentro de la caja, a continuación se muestran las antenas con las que se han llevado a cabo las pruebas reales.



Figura 12: Tipos de antena durante las pruebas de campo

Las conclusiones obtenidas son que las antenas pcb de $\lambda/2$ obtiene más uniformidad en las medidas a igual distancia, las antenas de cable son las que mayor rango ofrecen pero también son las menos discretas. En definitiva la antena es algo esencial y más allá del modelo elegido prioriza más el hecho de que todos los equipos de la red dispongan de exactamente el mismo modelo.

3. Planos

3.1. Planos mecánicos

Los planos catalogados como mecánicos son denominados así debido a que son la estructura de plástico que sostiene y protegen a la electrónica de las condiciones ambientales y de contacto directo con las personas.

En el anexo de diseño mecánico se especifica con mayor detalle el procedimiento y el prototipado con impresora 3D. Se presentan dos planos:

- Chasis de receptor o gateway
- Chasis de emisor o beacon

3.2. Plano eléctricos

Los circuitos eléctricos de la electrónica desarrollada que se presentan son los siguientes:

- Esquemático del emisor beacon y esquemático del receptor ESP32
- PCB circuito del emisor beacon y PCB circuito del receptor ESP32

En el anexo de diseño eléctrico se explican con mayor detalle.

4. Pliego de condiciones

4.1. Prescripciones técnicas generales

4.1.1. Normativa relativa a radiofrecuencia

- Real Decreto 123/2017, de 24 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento sobre el uso del dominio público radioeléctrico.
- Real Decreto 188/2016, de 6 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento por el que se establecen los requisitos para la comercialización, puesta en servicio y uso de equipos radioeléctricos, y se regula el procedimiento para la evaluación de la conformidad, la vigilancia del mercado y el régimen sancionador de los equipos de telecomunicación.
- Orden IET/614/2015, de 6 de abril, por la que se modifica la Orden IET/787/2013, de 25 de abril, por la que se aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencias.

- Esto viene recogido en la orden ERC/DEC/(01)07.
- Ley 9/2014, de 9 de mayo, General de Telecomunicaciones.
- Orden CTE/23/2002, de 11 de enero, por la que se establecen condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones por operadores de servicios de radiocomunicaciones.

4.1.2. Normativa relativa a bluetooth y wifi

Se ha de tener en cuenta que para poder emplear dispositivos bluetooth se ha de respetar los estándares

- IEEE 802.15.1 define Bluetooth 1.x, que puede alcanzar velocidades de 1 Mbps;
- IEEE 802.15.2 recomienda prácticas para utilizar la banda de frecuencia de 2.4 GHz (en convivencia con el wifi)
- IEEE 802.15.3 ofrece velocidades de banda ancha (20 Mbps) con Bluetooth;
- IEEE 802.15.4 es un estándar que define el nivel físico y el de control de acceso al medio para redes de área personal con tasas bajas de datos (low-rate wireless personal area network, LR-WPAN). Es el estándar más actual

Se ha de tener en cuenta también la clase del dispositivo que queda recogida en la siguiente tabla:

Clase	Potencia	Alcance aproximado
Clase 1	100 mW / 20 dBm	100 m
Clase 2	2,5 mW / 4 dBm	5 - 10 m
Clase 3	1 mW / 0 dBm	1 m
Clase 4	0,5 mW / -3 dBm	0,5 m

En nuestro caso y teniendo en cuenta la aplicación se ha optado por emitir en los 20 dBm de tal forma que no se aplica mucha normativa porque la potencia isotrópica radiada equivalente total será inferior a 100 mW.

5. Presupuestos

5.1. Precios unitarios

La tabla de precios se va a elaborar en distintas unidades que corresponden al precio por separado de cada una de las PCBs que se han elaborado.

5.2. Presupuestos Parciales

5.2.1. Placa de circuito impreso emisor beacon

Componente	Cantidad	Precio unitario
Resistencia metálica SMD 0805 1k 10	1	0,009 €
Resistencia metálica SMD 0805 10k 10	1	0,009 €
Condensador cerámico SMD 0805 0,1uF	1	0,005 €
Condensador cerámico SMD 0805 10uF	1	0,016 €
Regulador tensión LDO AMS1117-3.3V	1	0,098 €
Microcontrolador ESP32-WROOM-32D	1	2,840 €
Led SMD 0805 verde	1	0,013 €
Led SMD 0805 rojo	1	0,013 €
Led SMD 0805 naranja	1	0,015 €
Batería Litio Ion	1	1,520 €
TOTAL	1	4,009 €

5.2.2. Placa de circuito impreso receptor o gateway

Componente	Cantidad	Precio unitario
Resistencia metálica SMD 0805 1k 10	1	0,009 €
Resistencia metálica SMD 0805 10k 10	1	0,009 €
Condensador cerámico SMD 0805 0,1uF	1	0,005 €
Condensador cerámico SMD 0805 10uF	1	0,016 €
Regulador tensión LDO AMS1117-3.3V	1	0,098 €
Microcontrolador ESP32-WROOM-32D	1	2,840 €
Led SMD 0805 verde	1	0,013 €
Led SMD 0805 rojo	1	0,013 €
Led SMD 0805 naranja	1	0,015 €
Pinheader conector para programación	1	0,113 €
UART-TTL herramienta de desarrollo	1	1,540 €
Power Module AC-DC HI-LINK 3.3V	1	2,830 €
Screw terminal P=5.08mm	1	0,097 €
USB Mini B Female	1	0,108 €
JST Connector P=2mm	1	0,039 €
Jumper connector	1	0,017 €
TOTAL		7,763 €

5.2.3. Desarrollo e instalación

Componente	Cantidad (h)	Precio unitario €
Diseñador hardware placas circuito impreso	10	50
Desarrollador software sistema embebido	350	40
Programador full stack web developer	100	50
Instalador de equipos, oficial de 1ª	2	35

5.3. Presupuestos Total

El presupuesto total se compone de la suma de los presupuestos parciales:

Unidad	Cantidad	Precio
Placa de circuito impreso beacon o emisor	1	40
Placa de circuito impreso receptor o gateway	1	50
Desarrollo e instalación	1	35
Total		1234€
	IVA 21 %	6534€
		6534€

Por lo tanto el presupuesto total con iva asciende a la cantidad de 1234123 4123 y veintimeil euros.

5.4. Factores económicos y financieros

Para llevar a cabo el estudio de viabilidad económica se ha confeccionado la siguiente tabla donde podemos ver los flujos de caja así como la inversión inicial del proyecto:

-	Periodo 0	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3
Inversión/gastos	1200€	4134€	4134€	4134€
Flujos de caja	1200€	4134€	4134€	4134€

Se ha de tener en cuenta que esto es un proyecto real y que los gastos son reales y surgen de pago de las cuotas de autónomos, electricidad y gasolina que supone trabajar desde casa. Con todo esto y fijando una cuota de COK o coste de oportunidad de capital o mínima rentabilidad admisible para afrontar la realización del proyecto. Se ha establecido de un 10 %.

5.4.1. TIR y VAN

El análisis de la tasa de interés de retorno y del valor actual neto son los recogidos en la tabla inferior:

TIR	234,42 €
VAN	34 %

6. Bibliografía

- Web oficial del estándar Bluetooth
- Ejemplo de una empresa que tiene un equipo similar al desarrollado
- BOE - Orden CTE/23/2002, de 11 de enero, por la que se establecen condiciones para la presentación de determinados estudios y certificaciones por operadores de servicios de radiocomunicaciones.
- BOE - Ley 9/2014, de 9 de mayo, General de Telecomunicaciones.
- Documentación sobre el editor de texto Latex empleado
- Documentación sobre el microcontrolador ESP32 Espressif
- Ejemplos de código del esp-software development kit