

Capítulo 4.

Descripción de la arquitectura propuesta.

En este capítulo se procederá a describir la arquitectura, tanto hardware como software, propuesta para llevar a cabo el análisis de diferentes algoritmos que permitan la localización de un dispositivo Bluetooth en un espacio interior como puede ser, por ejemplo, un centro comercial.

4.1. Hardware

Para poder llevar a cabo la estimación de la posición, se ha optado por la configuración que puede contemplarse en la figura 4.1. En ella se observan los dispositivos electrónicos utilizados para la obtención de la información necesaria como para poder ubicar un objetivo en el interior de un edificio. Estos se corresponden con los siguientes elementos:

Nodo principal: se corresponde con una tarjeta PC104 ejecutando una distribución de GNU/Linux. En su interior, se encontrará la aplicación encargada de procesar la información enviada por los nodos de localización así como de gestionar la comunicación con los mismos.

Nodo de localización: está compuesto por un sistema microprocesador de bajo coste que implementa un módulo Bluetooth serie así como diversos puertos de entrada y salida digitales.

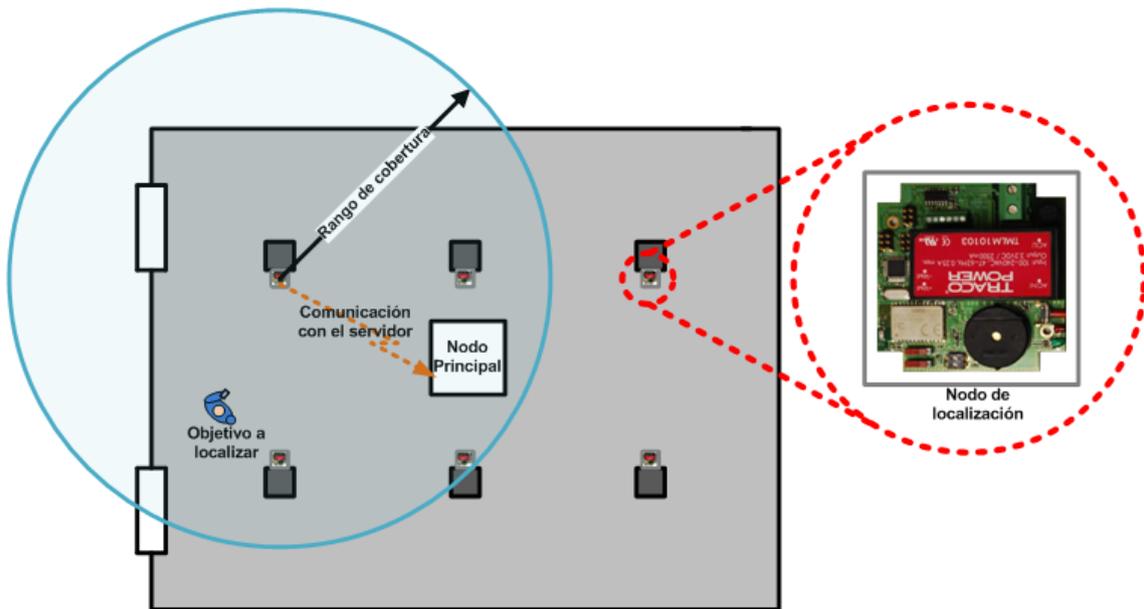


Figura 4.1.1. Representación orientativa del sistema propuesto.

El funcionamiento básico del sistema propuesto se basa en la utilización del parámetro RSSI obtenido durante el proceso de descubrimiento de la norma Bluetooth para poder hacer una estimación de la posición del objetivo a localizar. Por tanto, la misión del nodo de localización será obtener este valor la repetición continuada de ciclos de descubrimientos. Una vez que dicho valor es conocido, se encapsulará en un paquete para su posterior envío al servidor. Dicho paquete contendrá, además del valor RSSI, más información necesaria para el correcto funcionamiento de la estimación de la posición. Una vez que los datos se encuentren en el servidor, la aplicación principal se encargará de traducirlos a unas coordenadas estimadas (\hat{x}, \hat{y}) .

4.1.1. *Nodo principal*

El nodo principal tiene como finalidad la ejecución de una aplicación que permita obtener una estimación de la posición de un dispositivo en base de los datos recogidos de los diferentes nodos de localización ubicados a su alrededor. Por tanto, se requiere de un sistema que presente una gran capacidad de cómputo. Por este motivo, se ha decidido optar por un ordenador industrial en formato PC/104+. Este dispositivo se adapta perfectamente a las exigencias de cómputo y, además, posee una gran conectividad al estar dotado de diversos puertos series y USB. Esto permite establecer una arquitectura base para servicios con diversa finalidad. En la figura 4.2 se puede observar una imagen del dispositivo.

Las características principales son:

- *Procesador AMD Geode LX800 de bajo consumo y una frecuencia de 500 MHz.*
- *512 MB de memoria DDR-RAM.*
- *4 puertos serie.*
- *4 puertos USB.*
- *Conectividad Bluetooth a través de un dongle.*
- *Puerto Ethernet.*
- *Socket para Compact Flash.*
- *Soporte para sistemas operativos GNU/Linux.*
- *Capacidad para ejecutar complejos algoritmos de procesamiento.*

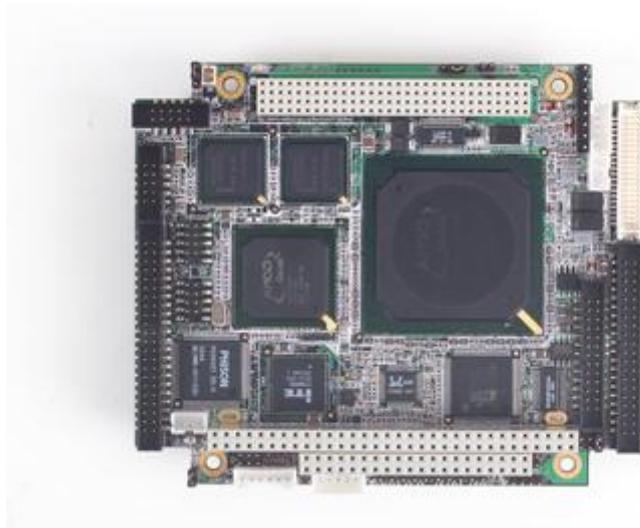


Figura 4.1.2. Fotografía de la tarjeta PC/104+ usada como nodo principal.

Con respecto a la conectividad Bluetooth, esta se aporta a través de un dongle comercial USB que cumple con la especificación Bluetooth v.2.1. Se ha optado por este diseño por dos razones. La primera de ellas, es el ahorro económico que supone este tipo de componentes frente a módulos comerciales con interfaz de conexión serie. El segundo motivo se debe a que la mayor parte de módulos Bluetooth comerciales utilizan una implementación propietaria de la torre de protocolos de Bluetooth. Esto limita en gran medida la configuración y gestión de las comunicaciones. Por el contrario, los dongles USB tan sólo implementan el controlador radio y la banda base, el resto de capas se implementarán de manera software en el sistema operativo. Esto permite el poder hacer uso de la torre de protocolos conocida como BlueZ. Esta se corresponde con un proyecto de código libre que implementa la torre de protocolos de Bluetooth. Para su utilización, se suministra una biblioteca de funciones que permiten realizar tareas tales como el cambio de modo de funcionamiento, establecimiento de conexiones RFCOMM, ejecutar un proceso de descubrimiento o cambiar el rol de un dispositivo

en una comunicación. Además, otorga un gran control sobre parámetros característicos de Bluetooth.

Finalmente, para gobernar el nodo principal se ha optado por una distribución de GNU/Linux por ser un sistema operativo de libre distribución, con herramientas de desarrollo libre y por su compatibilidad con la pila BlueZ.

4.1.2. Nodo de localización

El nodo de localización se corresponde con un sistema microcontrolador de bajo coste cuya tarea radica en realizar continuamente procesos de descubrimiento para determinar el nivel de señal que le llega desde el objetivo a localizar y desde otros nodos de localización diferentes. De esta forma se consigue obtener la información necesaria para la estimación de la posición. Para ello, los datos recogidos de la zona donde se encuentren, se empaquetarán en una trama y se enviarán al nodo principal para su posterior procesamiento.



Figura 4.1.3. Fotografía de un nodo de localización.

La idea de realizar un sistema microcontrolador de bajo coste radica en el hecho de que para poder efectuar una estimación de la posición es necesario tener información diferente con respecto al menos tres puntos diferentes. Por ello, el número de nodos de localización que se deberán usar en una misma área puede resultar elevado, según la precisión que se requiera. En consecuencia, el coste económico de producción del nodo debe permanecer lo más bajo posible para así poder usar un mayor número de los mismos en el despliegue de la arquitectura.

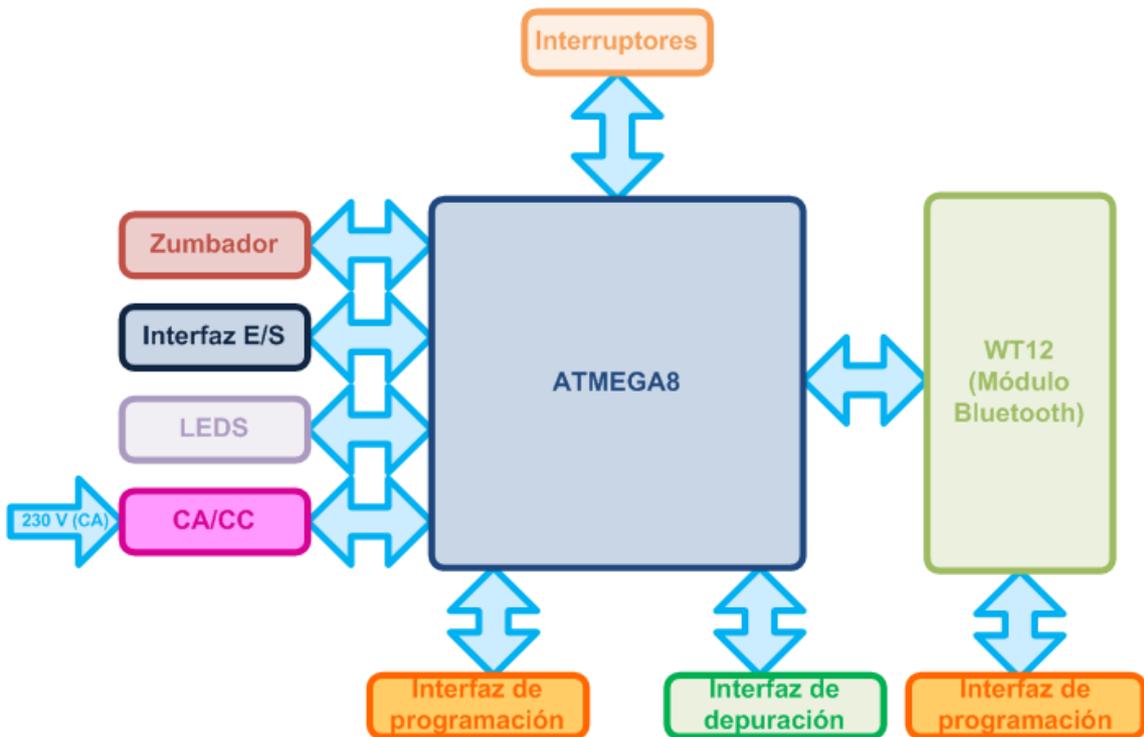


Figura 4.1.4. Diagrama de bloques del nodo de localización

En la figura 4.1.4 se puede observar un diagrama de bloques de los distintos componentes que forman el nodo de localización. En él se puede comprobar que se han utilizado los componentes básicos para dotar de funcionalidad al nodo de localización. La inclusión del zumbador, así como del puerto de entradas y salidas digitales, se ha hecho para poder dotar de una finalidad secundaria al nodo de localización. Un ejemplo de esta podría ser la activación del zumbador al detectar que el objetivo localizado se encuentra en una zona restringida o la inclusión de sensores que permitan registrar datos como la temperatura de la sala o la detección de humo y transmitir dichos datos al nodo principal para llevar un control de los mismos.

4.1.2.1. Microcontrolador ATMEGA 8

El ATMEGA8 es un microcontrolador de 8 bits de bajo consumo realizado en tecnología CMOS y basado en la arquitectura AVR RISC. Además, al ser capaz de ejecutar instrucciones en un solo ciclo de reloj, logra un rendimiento cercano a 1 MIPS por MHz, lo que permite optimizar el consumo de energía frente a la velocidad de procesamiento.

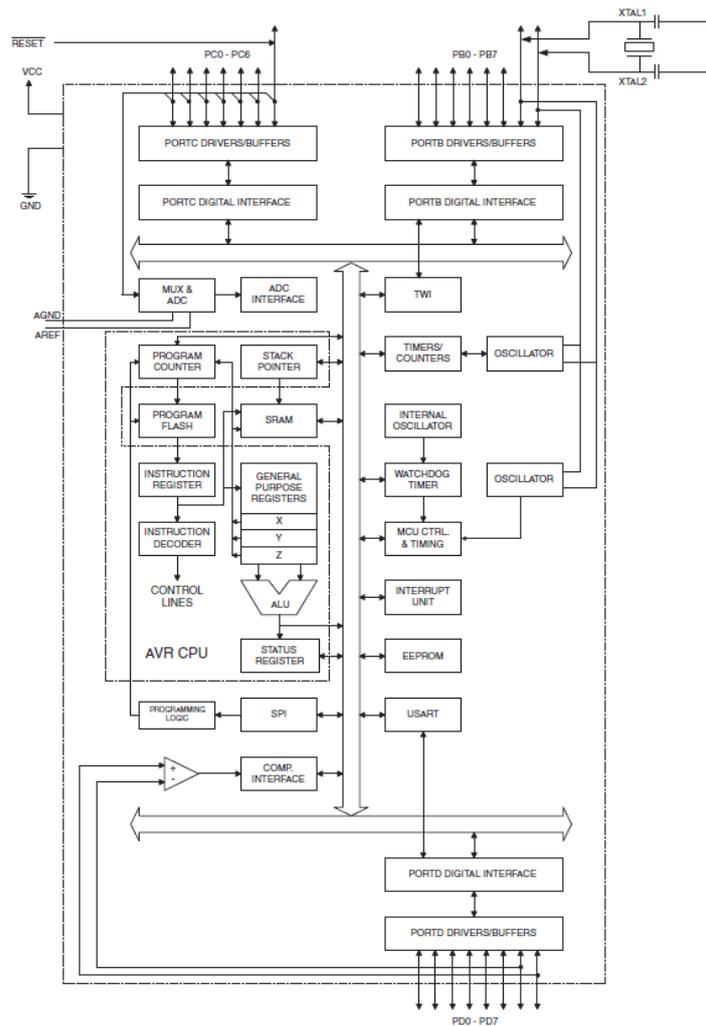


Figura 4.1.5. Diagramas de bloque del ATMEGA8.

Las principales características que posee son:

- *Arquitectura RISC.*
- *Memoria:*
- *8 KB de memoria Flash para programa*
- *512 B de EEPROM.*
- *1 HB de RAM interna*
- *Periféricos:*
- *2 temporizadores/contadores de 8 bits.*
- *1 temporizador/contador de 16 bits.*
- *Contador de tiempo real con oscilador externo.*
- *3 canales PWM.*
- *6 canales ADC de 10 bits.*

- *Temporizador Watchdog con oscilador separado*
- *Comparador analógico.*
- *Interfaz de conexión:*
- *23 puertos de entradas/salidas digitales.*
- *I2C.*
- *USART programable.*
- *SPI maestro/esclavo.*
- *Características especiales:*
- *Power-on-Reset.*
- *Oscilador interno RC que puede ser calibrado.*
- *5 modos de funcionamiento.*

4.1.2.2. Módulo Bluetooth Bluegiga WT12

El Bluegiga WT12 es un módulo Bluetooth que cumple con la versión de la especificación 2.1. Contiene todo lo necesario para poder implementar una comunicación Bluetooth: interfaz radio, antena y la torre de protocolos Bluetooth completa. Su principal función será la de iniciar procesos de descubrimientos detectando el objetivo a localizar así como a los diversos nodos de localización que puedan existir en su rango de cobertura.

Las principales características del módulo son:

- Rango hasta 300 metros.
- Antena integrada o conector UFL.
- Tasa de transmisión de hasta 3 Mbps.
- Cumple RoHS.
- Soporte Scatternet.
- USB interface (2.0 compatible).
- Soporte 802.11.
- Memoria Flash 8Mb.
- UART con modo bypass.

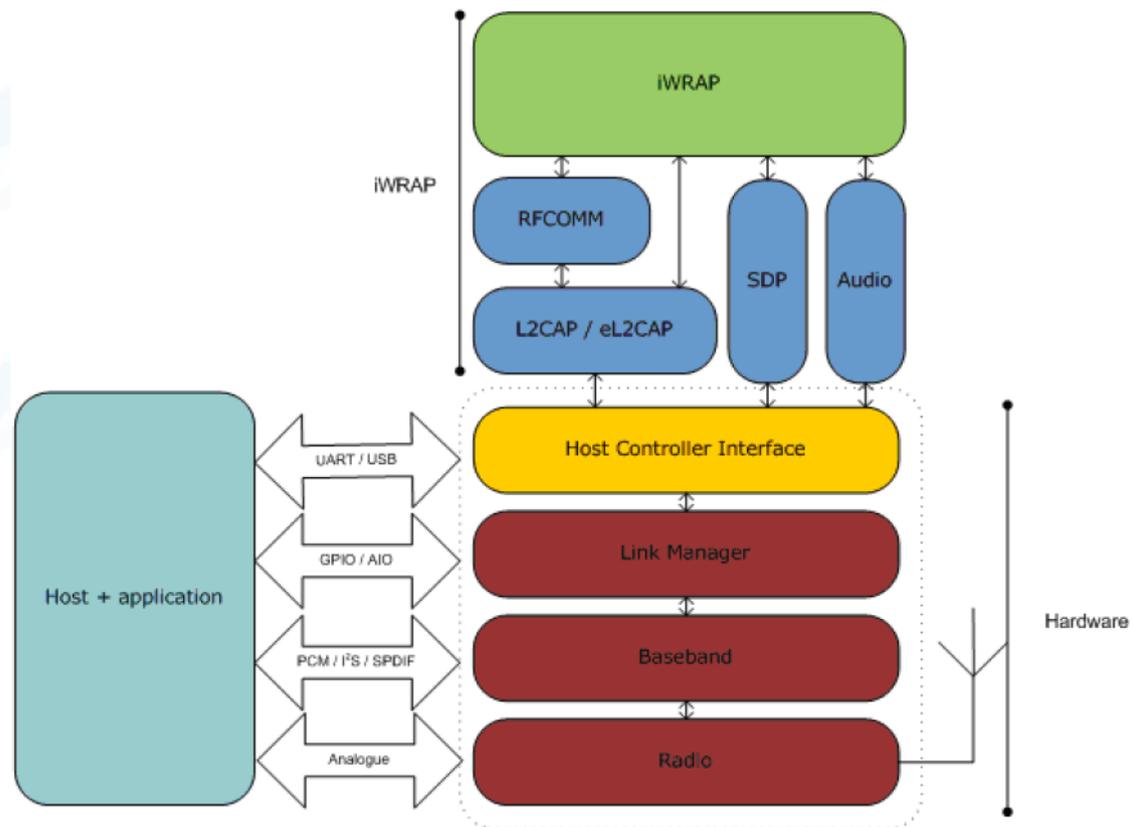


Figura 4.1.6. Ubicación de iWrap en la torre de protocolos Bluetooth.

Otra de las características de este módulo, es que está equipado con un firmware propietario denominado iWrap que permite abstraer al usuario de la torre de protocolos Bluetooth. De esta forma, a través de comandos ASCII se pueden efectuar tareas tales como descubrir dispositivos, establecer una comunicación a nivel RFCOMM o configurar aspectos como el código de acceso de descubrimiento o IAC. Con esta solución, se evita el usar un microprocesador que actúe de host para correr la pila de protocolos

Dicha pila posee compatibilidad con los siguientes perfiles Bluetooth:

- A2DP: modo fuente y sumidero.
- AVRCP.
- Identificación de dispositivo.
- Puerto Serie, soportando los dos tipos de dispositivos.
- Manos libres.
- DUN
- OPP
- FTP
- PBAP

- HDP
- SSP

4.1.2.2.1. Configuración del módulo

Para poder llevar a cabo una correcta comunicación, es necesario configurar el módulo Bluetooth correctamente. Para ello, será necesario enviarle una serie de comandos para su correcta configuración.

El primer comando que se deberá enviar al módulo será "SET CONTROL MUX 1\n", éste permite utilizar un modo de funcionamiento especial del módulo WT-12A que se caracteriza por no hacer distinción entre el modo comandos y el modo datos que utiliza el iWRAP. La ventaja de este modo es que permite mantener dos o más conexiones simultáneas con diferentes dispositivos de un modo sencillo. Para su correcto funcionamiento, es necesario utilizar el siguiente formato de trama:

Longitud [bits]	Nombre	Descripción	Valor
8	SOF	Comienzo de trama	0xBF
8	LINK	Identificador del enlace	Enlace de datos: 0x00-0x08 Enlace de control: 0xFF
6	FLAGS	Banderas de la trama	0x00
10	LENGTH	Tamaño del campo de datos	-
0-800	DATA	Datos	-
8	nLINK	Final de la trama	{{LINK} XOR 0xFF}

Tabla 4.1.1. Formato de trama en el modo multiplexado.

Como se puede observar en la tabla 4.1.1, todos los comandos que vayan desde el equipo que actúe como host hacia el módulo, deberán enviarse con el formato de trama descrito. Por su parte, la respuesta a los diferentes comandos así como los datos recibidos desde uno o varios equipos remotos, serán enviados con el mismo formato de trama.

La ventaja del modo multiplexado es que no se necesita hacer un intercambio especial entre el modo comando y el modo datos, sino que todos los datos y comandos son transmitidos del mismo modo. Esto permite un gran ahorro de tiempo en escenarios multipuntos, donde, en el peor de los casos, un cambio de modo podría tardar hasta dos segundos. También supone una gran ventaja en escenarios donde existen muchas conexiones activas recibiendo datos

simultáneamente. En estas situaciones, el cambio de modo puede resultar en la pérdida de datos debido al coste de tiempo que supone.

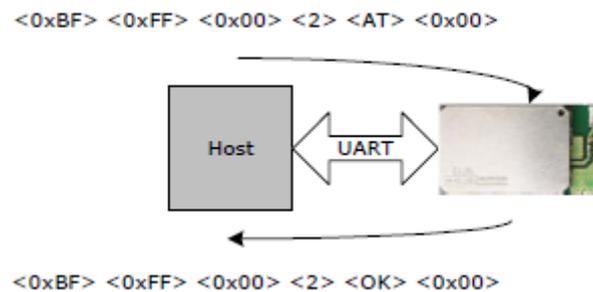


Figura 4.1.7. Comunicación Host-iWRAP-Host.

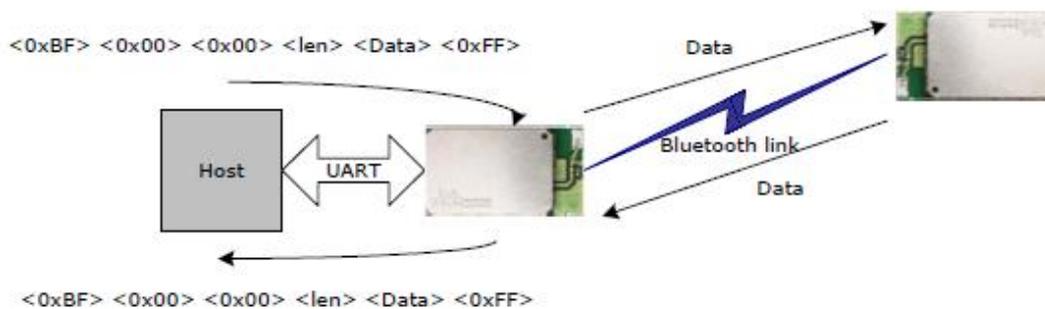


Figura 4.1.8. Comunicación Host-iWRAP-Dispositivo remoto y viceversa.

El resto de comandos de inicialización deberán enviarse a la pila de protocolos iWRAP con el formato del modo multiplexado y se corresponderán con:

- **"SET BT LAP 9e8b05"**: este comando permite modificar el valor del IAC, estableciendo un valor reservado para así garantizar que el funcionamiento del sistema no interfiere con el resto de dispositivos Bluetooth existentes en la sala. Además permite establecer un nivel de seguridad mayor, debido a que al colocar un código de descubrimiento limitado, los nodos de localización y el nodo principal no podrán ser descubiertos por el resto de terminales, salvo que estos efectúen un descubrimiento con dicho valor.
- **"SET BT PAGEMODE 3 1000 0"**: mediante esta orden, se configura el módulo Bluetooth como visible y conectable. Además, se indica que el valor del temporizador asociado a un error en el establecimiento de una conexión sea de 2,56 segundos. Este valor se obtiene de multiplicar el parámetro $1000_{16} = 4096_{10}$ por 0.625 ms.

- **"SET BT POWER 3 3 3"**: fija el nivel de potencia en el proceso de descubrimiento a 3dBm, que se corresponde con el máximo posible. De esta forma, se asegura que se puede cubrir el máximo rango de espacio, lo que posibilitará espaciar los nodos de localización una mayor cantidad.
- **"SET CONTROL CONFIG 0 001F"**: Este comando establece el modo entrelazado de descubrimiento y de establecimiento de conexión.
- **"SET CONTROL ECHO 4"**: permite eliminar el "echo" generado por el software iWRAP al enviarle un comando a través del puerto serie.

Finalmente, mencionar que la comunicación con el microcontrolador se efectuará a través de un puerto USART, utilizando una velocidad de 115200 bps y un formato de comunicación 8N1, es decir, 8 bits, sin paridad y un bit de parada.

4.2. Software

Desde el punto de vista del funcionamiento del sistema, se ha dividido en dos partes diferenciadas la aplicación. Una primera parte, está destinada a la implementación de un protocolo que permita la obtención de los datos necesarios. Mientras que la segunda parte, está enfocada al análisis de diferentes algoritmos de estimación de la posición.

4.2.1. Aplicación principal

Este programa será ejecutado en el nodo principal y será el responsable de interactuar con los nodos de localización, así como de obtener los valores RSSI procedentes del descubrimiento de dichos nodos. Con el objetivo de minimizar la posible interferencia que pudieran generar los nodos de localización al efectuar el descubrimiento a la vez, se ha optado por diseñar un protocolo propio que permita a un nodo en exclusiva efectuar un proceso de descubrimiento, mientras, los restantes nodos quedan a la espera. Para conseguir este objetivo, la aplicación principal se encarga de descubrir a todos los terminales que posee en su rango de cobertura. Tras ello, cederá el turno al primer nodo descubierto mediante el envío del comando "START". De esta forma, el nodo de localización que lo reciba, saldrá del reposo, indicando tal acción mediante el envío de un comando "OK", e iniciará un proceso de descubrimiento del que obtendrá los nodos que posee a su alcance y el valor de la potencia con el que recibe la respuesta de los mismos. Una vez, finalizado el proceso de descubrimiento, el nodo de localización generará una trama con toda la información necesaria y se lo enviará de vuelta al nodo principal. Una vez éste haya guardado en un fichero la trama recibida,

El protocolo diseñado consta de los siguientes mensajes:

Nombre	Formato	Descripción
START	START	Este comando sirve para iniciar un proceso de descubrimiento en un nodo de localización. Actúa como una entrada externa en la máquina de estados que permite sacar al nodo de localización del reposo y llevarlo al estado de búsqueda de dispositivos.
OK	OK	Indica un asentimiento positivo
RSSI	RSSI + N° Dispositivos descubiertos + Dir_BT Disp_1 + Valor RSSI_1 + Dir_BT Disp_2 + Valor RSSI_2 +	Trama que contiene los datos necesarios para efectuar la localización de un dispositivo. Está compuesta por el número de terminales descubiertos y a la dupla (dirección Bluetooth, valor RSSI) asociados a los dispositivos encontrados.
CIERRE	CIERRE	Permite cerrar una comunicación con la aplicación principal.

Tabla 4.2.1. Comandos del protocolo utilizado entre el nodo principal y los nodos de localización.

Por tanto, la aplicación principal deberá implementar este protocolo. Con este objetivo, se ha diseñado como se puede comprobar en la figura 4.2.3, donde se representa el diagrama de flujo de dicha aplicación.

Con respecto al fichero generado, este presentará el siguiente formato:

- **Dirección Bluetooth Origen:** se corresponde con la dirección Bluetooth del nodo que ha enviado la trama RSSI.
- **Trama RSSI:** se almacena la trama RSSI enviada por el nodo de localización remoto tal y como ha sido enviada.

Fichero de almacenamiento:
 <Dir BT origen> <trama RSSI>
 00:07:80:93:9A:FE RSSI 2 00:02:5b:0a:6e:52 -78 00:07:80:93:9a:ff -73
 00:07:80:93:9A:FF RSSI 3 00:02:5b:0a:6e:52 -71 00:07:80:93:9a:fe -71 00:07:80:90:c8:1a -84

Figura 4.2.2. Formato del fichero de almacenamiento.

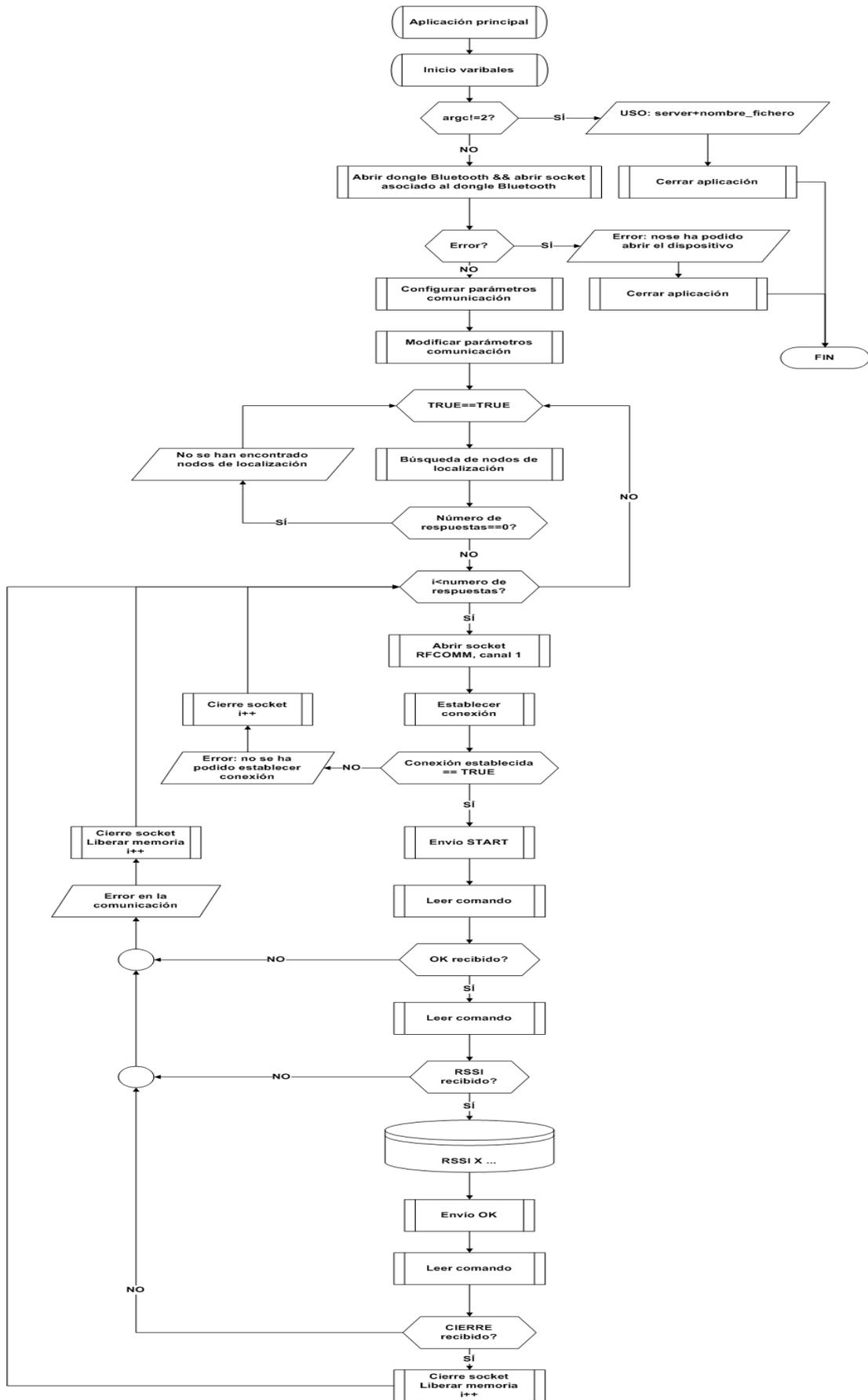
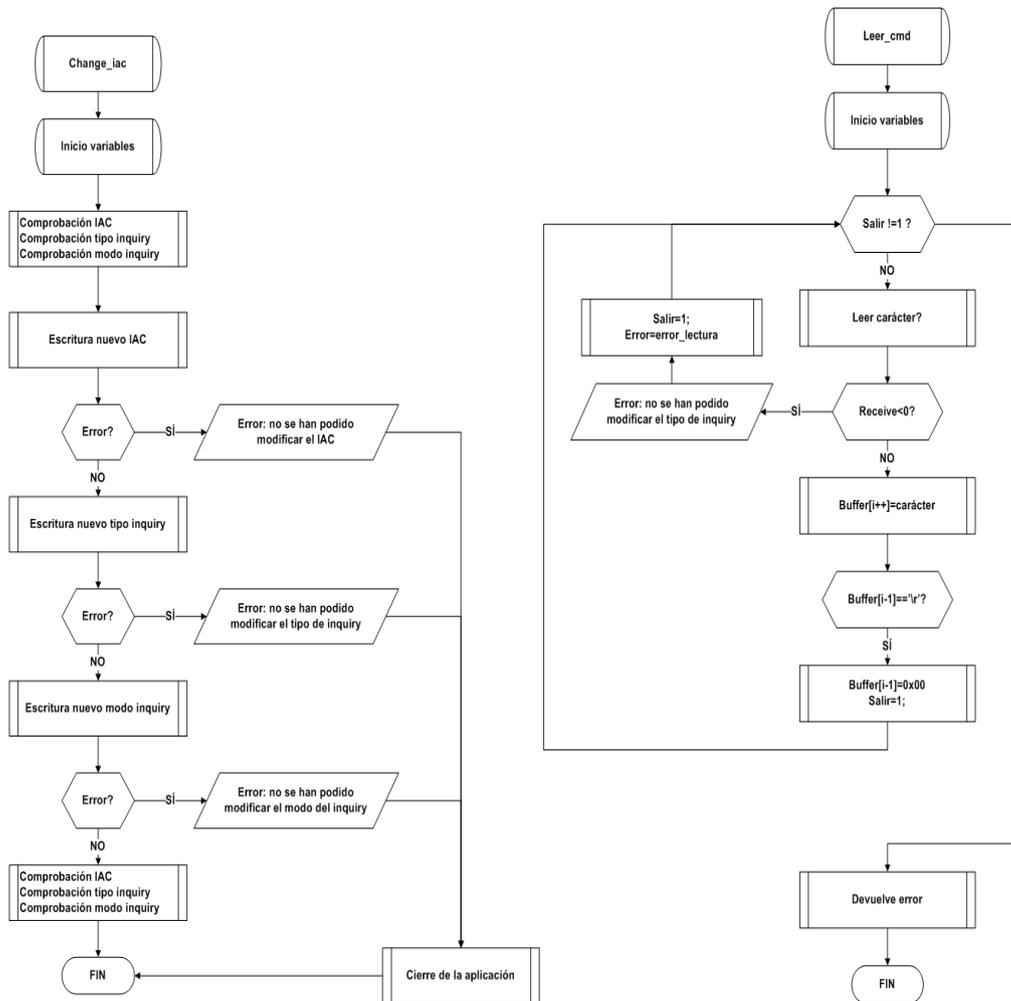


Figura 4.2.3. Diagrama de flujos de la aplicación principal.



.Figura 4.2.4 Diagrama de flujo de las funciones secundarias de la aplicación principal.

4.2.2. Firmware nodo de localización

La programación del nodo de localización se ha basado en una máquina de estados finita que implementa el protocolo especificado en la sección de la aplicación principal. Además, será necesario un paso previo donde se inicializará el hardware de la tarjeta correctamente.

Por tanto, el primer paso que deberá efectuar el programa diseñado será la correcta inicialización de los pines del microcontrolador usado en el nodo de localización. Estos se corresponderán con los siguientes valores:

- **Pin PBO:** se corresponde con el diodo LED rojo. Se debe configurar como un pin de salida, si se coloca un cero lógico en dicho pin, el LED estará apagado y si se fija un uno lógico, el estado del LED será encendido.

- **Pin PB1:** está asociado al zumbador existente en la tarjeta. Se tiene que configurar como un pin de salida, si se coloca un cero lógico en dicho pin, el zumbador estará apagado y si se fija un uno lógico, pitará.
- **Pin PD6:** está relacionado con el pin de reset del módulo Bluetooth. Este pin es activo a nivel bajo. Por defecto, los pines del microcontrolador Atmega8 al fijarse como salida se establecen a nivel bajo, por lo que será necesario inicializar este pin con un uno lógico. De esta forma, el módulo saldrá del reset hardware y podrá operar con normalidad. Si fuese necesario dar un reset hardware al módulo durante el funcionamiento normal del dispositivo, este se debería efectuar como sigue:

```
PORTD=(0<<PD6);
```

```
Delay_ms(10);
```

```
PORTD=(1<<PD6);
```

El retraso introducido es necesario para permitir al módulo WT12-A detectar que se ha producido un reset hardware.

A continuación será necesario inicializar los periféricos que se van a utilizar del microcontrolador y el módulo Bluetooth. La configuración del módulo se realizará en base a los parámetros de configuración especificados en la sección 4.1.2.2.1 del documento. Tras el proceso de inicialización y configuración, se podrá iniciar la máquina de estados en el estado "RESTAURAR".

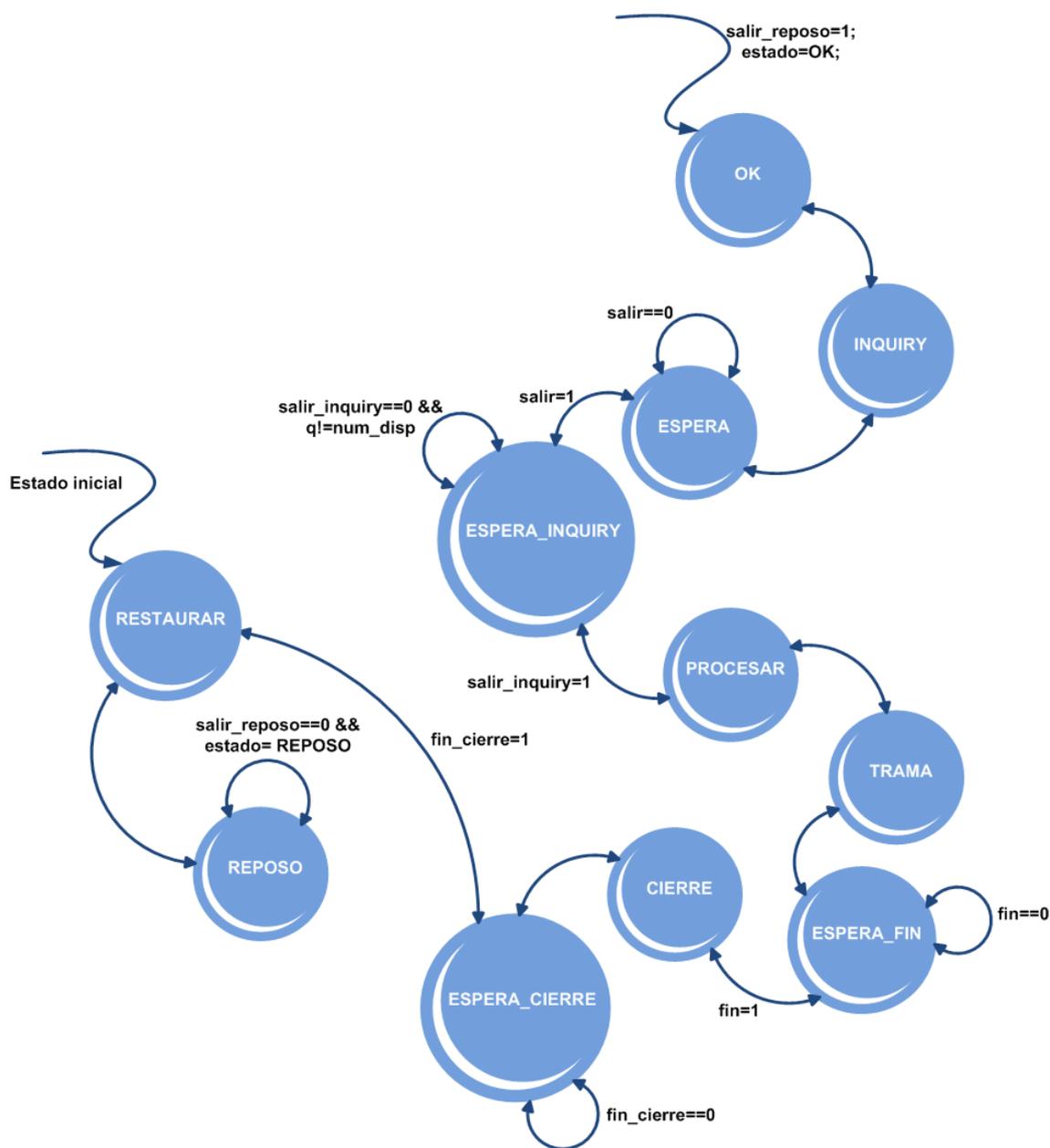


Figura 4.2.5. Máquina de estados del nodo de localización.

Como se puede comprobar en la figura 4.2.5, la máquina de estados del nodo de localización está compuesta por once estados diferentes. A continuación se describirá cada uno de estos.

- **RESTAURAR.** Este estado se utiliza para inicializar las variables de memorias utilizadas durante la ejecución. De esta forma, en la primera y restantes ejecuciones las variables estarán iniciadas con un valor adecuado.
- **REPOSO.** Se corresponde con un estado donde el microcontrolador la única tarea que está efectuando es un envío cada segundo del comando de configuración "SET BT

PAGEMODE 3 1000 0", debido a un problema detectado en el módulo Bluetooth. Éste tras ser detectado, pierde la configuración de la visibilidad, por lo que es necesario reconfigurar dicho parámetro cada cierto tiempo. Por otro lado, se estará pendiente de recibir a través de un enlace RFCOMM, por parte de la aplicación principal, el comando START. La única forma de salir de este estado, es mediante la recepción por la USART del comando START, que implicaría modificar el estado actual de la máquina con el valor del estado OK.

- **OK.** Se trata de un estado de transición cuya única misión es transmitir por el enlace 0x00, que se corresponde con el identificador del canal donde ha iniciado la comunicación el nodo principal, el comando "OK" a modo de asentimiento positivo. Tras el envío de dicho comando, se procederá a saltar al estado "INQUIRY".
- **INQUIRY.** Es un estado de transición cuya finalidad radica en transmitir por el enlace 0xFF, destinado al envío de comandos al módulo Bluetooth, el comando "INQUIRY 5". Mediante este comando, se le indica a la capa HCI de la pila de protocolos iWRAP que realice un proceso de descubrimiento con una duración de 5 veces 1,28 segundos. En consecuencia, el período total de descubrimiento será de 6,4 segundos. Se ha elegido este valor porque la probabilidad de descubrir a todos los nodos de localización en el rango de cobertura es próxima al 100%, como puede observarse en la figura 4.2.6. Tras el envío de dicho comando, se procederá a saltar al estado "ESPERA".

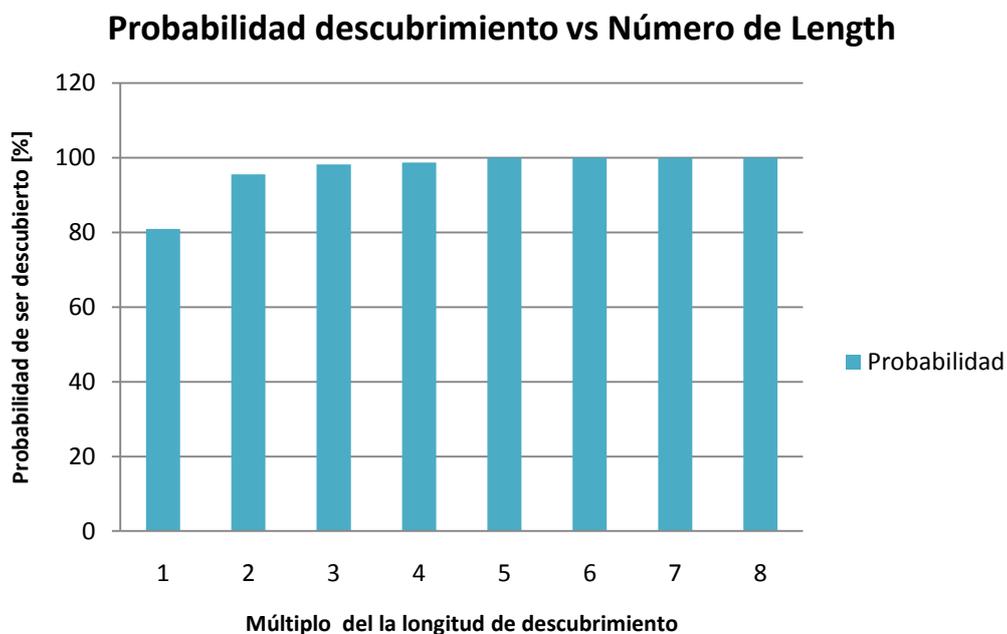


Figura 4.2.6 Probabilidad de descubrir a todos los dispositivos en función de la longitud del proceso de descubrimiento.

- **ESPERA.** Este estado permite esperar a que el módulo WT12-A devuelva todos los resultados obtenidos durante el proceso de descubrimiento. En esta situación, mientras se espera a recibir el resultado final, el microcontrolador irá almacenando cada uno de los resultados parciales devueltos para posteriormente procesarlos. Una vez se recibe confirmación de que el descubrimiento de dispositivos ha finalizado mediante la recepción del comando "INQUIRY x", donde la x representa al número de dispositivos descubiertos, se procede a pasar al estado ESPERA_INQUIRY.
- **ESPERA_INQUIRY.** Este segundo estado de espera, se introduce para filtrar los resultados finales devueltos por el módulo Bluetooth. Esto se debe a que estos resultados tan sólo aportan información sobre la dirección Bluetooth y la clase del dispositivo remoto descubierto, información que ya ha sido almacenada durante el estado "ESPERA" gracias a los descubrimientos parciales que devuelve. La condición de salida de este estado, será que el número de comandos del tipo "INQUIRY 00:11:22:33:44:55 123456" sea igual al número de dispositivos descubiertos previamente. En ese momento, la máquina de estado evolucionará hacia el estado PROCESAR.
- **PROCESAR.** En este estado se realiza el procesamiento de los resultados parciales devueltos por el módulo Bluetooth. La información que se saca de estos se corresponde con la dirección Bluetooth y el valor RSSI con el que se ha recibido la señal. Esta información se copia a una matriz donde se almacenan para su posterior envío. La finalización de este procesamiento conlleva el salto al estado "TRAMA".
- **TRAMA.** La construcción de la trama se realiza en este estado. Para ello, se añade a un buffer destinado a la transmisión de órdenes, el comando "RSSI", seguido del número de dispositivos descubiertos. A continuación se concatena a dicho buffer la dirección Bluetooth y el valor RSSI asociado a cada dispositivo remoto. Una vez generada la trama en el buffer de transmisión, se procede a su envío por el canal RFCOMM establecido previamente hacia el nodo principal. A continuación, la máquina de estado evoluciona hacia el estado "ESPERA_FIN".
- **ESPERA_FIN.** Se corresponde con un estado donde el nodo de localización espera un asentimiento positivo por parte de la aplicación principal, que indicará que la trama RSSI ha llegado correctamente y se ha podido almacenar en disco correctamente. Para ello, cuando se recibe el comando "OK", la rutina de interrupción lo detectará y pondrá la variable fin a uno. De esta forma, al volver a la función principal del firmware, la máquina de estado irá al estado "CIERRE".

- **CIERRE.** Se trata de un estado de transición cuya única misión es transmitir por el enlace 0xFF, que se corresponde con el identificador del canal donde ha iniciado la comunicación el nodo principal, el comando "CIERRE" para finalizar la comunicación. Tras el envío de dicho comando, se procederá a saltar al estado "ESPERA_CIERRE".
- **ESPERA_CIERRE.** Se corresponde con un estado donde el nodo de localización espera el cierre de la comunicación por parte del nodo principal. Cuando éste cierre el socket asociado al canal RFCOMM, el módulo Bluetooth lo detectará y enviará el comando "NO CARRIER O ERROR 0", indicando que ya no existe conexión disponible y que no se ha producido ningún tipo de error. La detección de esta orden en la rutina de interrupción asociada a la recepción de la USART, actualizará la variable fin_cierre, permitiendo que la máquina de estados pueda ir al estado "RESTAURAR" para devolver los valores iniciales a las diferentes variables utilizadas y se puede repetir el proceso nuevamente al recibir un nuevo comando START.

Finalmente, con el objetivo de aclarar el funcionamiento de la máquina de estados diseñada, en el apéndice A se presentan los pseudocódigos de los diferentes estados así como de las funciones utilizadas en la programación del microcontrolador.

4.2.3. Matlab

Finalmente, la última parte del software diseñado para la localización de un objetivo en un recinto ubicado en el interior de un edificio ha sido implementada en Matlab. De esta forma, tras recolectar la información necesaria mediante los nodos de localización y los nodos principales, se pueden estudiar diferentes algoritmos de estimación de la posición y comparar los resultados obtenidos para determinar el algoritmo que mejor se adapta al entorno estudiado. Este estudio se ha realizado con el objetivo de determinar el algoritmo que presenta menor error cuadrático medio en la estimación de la distancia. Para llevar a cabo dicha comparación, se ha utilizado como figura de mérito el error cuadrático medio de la posición estimada con respecto a la posición real debido a que permite hacerse una idea de lo bien o mal que se ajusta el algoritmo a la realidad, ecuación 4.2.1. En ella, los términos \hat{x}_t e \hat{y}_t , representan las coordenadas estimadas, mientras que los términos x_t y y_t , hacen referencia a las coordenadas reales del objetivo.

$$E_{rms} = \sqrt{(\hat{x}_t - x_t)^2 + (\hat{y}_t - y_t)^2}$$

Ecuación 4.2.1. Expresión para el cálculo del error cuadrático medio.

Con respecto al software diseñado para Matlab es necesario realizar dos distinciones. Por un lado, es necesario caracterizar el medio físico de propagación para determinar la atenuación que sufre la señal al viajar por dicho medio. Esto se debe a que en interiores, la propagación de la señal de radiofrecuencia se puede ver afectada por factores tales como la propagación multitrayecto, las variaciones de la temperatura o la aparición de sombras debidas al mobiliario del recinto. Por tanto, el valor RSSI de la señal se hace dependiente del entorno por donde se propaga. No obstante, en la comunidad científica está aceptado en base a evidencias empíricas que parece razonable modelar el RSS para cualquier valor de la distancia en una localización particular como una variable aleatoria distribuida logarítmico-normal con un valor medio dependiente de la distancia. En base a este modelo, la ecuación de propagación resultante quedaría como:

$$P_r(d)[dBm] = P_0(d_0)[dBm] - 10 \cdot n_p \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma$$

Ecuación 4.2.2. Ecuación de propagación que contempla el canal de propagación

Donde $P_0(d_0)[dBm]$ es un valor de potencia de referencia conocida en dBm a una distancia d_0 desde el transmisor, n_p es el exponente de pérdidas en el trayecto que mide el ratio en el que el RSS disminuye con la distancia y su valor depende del entorno de propagación específico, X_σ es una variable aleatoria gaussiana con media cero y desviación σ y registra el efecto aleatorio de las zonas sombreadas, es decir, de las zonas carentes de cobertura.

El principal problema de esta caracterización es que requiere un modelado del entorno donde se está llevando a cabo la localización, lo que provocaría tener que realizar un estudio exhaustivo de cada uno de los posibles recintos donde este sistema se aplicase. Para evitar este problema, se ha realizado un mecanismo de calibración dinámico que será explicado en el epígrafe 4.2.3.1., denominado “*Caracterización del medio físico de propagación*”.

En segundo lugar, una vez que se ha podido realizar una correcta conversión entre los valores RSSI recibidos y un valor de distancia, se puede efectuar la estimación de la posición del objetivo mediante el uso de alguno de los algoritmos propuestos. El objetivo de estudiar varios algoritmos radica en comprobar cómo funcionan cada uno de ellos en diferentes situaciones.

4.2.3.1. *Caracterización del medio físico de propagación*

Como se ha comentado anteriormente, para poder estimar la posición del objetivo es necesario disponer primeramente de un mecanismo de caracterización del medio. Puesto que el uso de la ecuación 4.2.2, provoca un estudio detallado de cada uno de los medios, se ha optado por un sistema de calibración dinámico. Para ello, se necesita disponer de los valores RSSI entre el objetivo a localizar y los nodos de localización y, además, los valores RSSI entre los distintos nodos de localización. De esta forma, se pretende realizar una estimación del medio físico que compense las condiciones de propagación del canal. La ventaja de utilizar este método es que no se requiere de una etapa previa en la que se realice un proceso de aprendizaje, como ocurriría en el caso de usar una red neuronal, o de una etapa previa de caracterización que permita obtener un mapa de valores RSSI en función de la posición. Por tanto, el sistema podrá calibrar dinámicamente el medio en base a las mediciones obtenidas desde los nodos de localización, compensando automáticamente las condiciones observadas por cada una de ellas.

Por su parte, esta conversión será ejecutada en el lado del nodo principal debido al elevado coste computacional que conlleva y a la necesidad de minimizar lo máximo posible el coste económico del nodo de localización. Por este último motivo, no resultaría conveniente efectuarla en él; puesto que esto implicaría tener que utilizar un microcontrolador con mayor capacidad de cálculo, lo que provoca un incremento del precio.

Si se considera la disponibilidad de m nodos de localización, todas ellas en el rango de cobertura de las demás, cuya distancia a un punto tomado como origen de coordenadas de un sistema cartesiano sea conocida, se pueden definir los siguientes elementos:

- **Matriz D :** se corresponde con una matriz que contiene sobre la distancia que separa los diferentes nodos de localización. De tal forma que el elemento d_{ij} , hace referencia a la distancia existente entre el nodo de localización i y el nodo j . Cabe destacar que esta matriz deberá ser simétrica, puesto que se cumplirá que $d_{ij} = d_{ji}$. Además, los elementos de la diagonal principal de la matriz deberán ser cero, puesto que la distancia de un nodo de localización con respecto al mismo es cero.
- **Matriz R :** hace referencia a una matriz que almacenará los valores RSSI recibidos con respecto a cada nodo de localización. Esto supone que el elemento r_{ij} contenga información sobre la potencia de señal recibida por el

nodo de localización i con respecto al nodo j . Debido a la aleatoriedad presente en el proceso de medida del valor RSSI y a las características cambiantes del entorno, no tiene por qué cumplirse que el elemento $r_{ij} = r_{ji}$. Al igual que en el caso de la matriz D , la diagonal principal deberá ser nula.

- **Matriz T :** esta matriz actuará como una matriz de transformación, ya que debe ser la responsable de convertir los valores RSSI obtenidos durante los procesos de descubrimientos en medidas de distancias. Por tanto, el elemento t_{ij} de dicha matriz se corresponderá con el valor que permitirá mapear el valor RSSI obtenido por el nodo de localización i del nodo j en una medida de la distancia que separa dichos nodos.
- **Matriz E :** se trata de una matriz que almacenará las diferencias existentes entre la matriz D , que posee la distancia real entre los diferentes nodos, y la matriz resultante del producto de $T \cdot R$.

Con estos elementos definidos, el problema de caracterizar el medio se basaría en minimizar la expresión del error entre la distancia real y la inferida, es decir, se buscaría hacer los elementos de la matriz E lo más pequeño posibles, tendiendo a cero en el límite. De forma general, el error se puede expresar como:

$$E = \|D - TR\|^2$$

Ecuación 4.2.3. Expresión del error cometido en el proceso de calibración.

Puesto que la norma euclídea de una matriz A dada se determina como la raíz cuadrada del radio espectral de la matriz $A^H A$, es decir:

$$\|A\|_2 = \sqrt{\lambda_{\max} \cdot (A^H A)} = \langle \text{suponiendo matrices reales} \rangle = \sqrt{\lambda_{\max} \cdot (A^T A)}$$

Ecuación 4.2.4. Definición de la norma espectral de una matriz dada.

Donde el término λ_{\max} hace referencia al autovalor máximo de la matriz $A^T A$. Si se aplica este hecho a la matriz E y se iguala a cero el resultado se obtiene el siguiente resultado:

$$\begin{aligned} E = \|D - TR\|^2 &= \lambda_{\max}([D - TR])^T ([D - TR]) = 0 \Rightarrow (D^T - (TR)^T)(D - TR) \\ &= D^T D - D^T TR - R^T T^T D + (TR)^T TR \Rightarrow \\ \Rightarrow D^T D &= D^T TR + (TR)^T D - (TR)^T TR = (D^T - (TR)^T)TR + (TR)^T D \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow D^T D - (TR)^T D &= (D^T - (TR)^T)TR \Rightarrow (D^T - (TR)^T)D = (D^T - (TR)^T)TR \Rightarrow D = TR \Rightarrow \\ \Rightarrow T &= DR^T(RR^T)^{-1} \end{aligned}$$

Ecuación 4.2.5. Desarrollo matemático efectuado para derivar la expresión de la matriz de transformación T

Es decir, se puede determinar la matriz de transformación T sin más que resolver un sistema de ecuaciones lineales. Una vez determinada la matriz T, para transformar en medidas de distancias los valores RSSI generados por el objetivo en los diferentes nodos de localización bastará con efectuar la siguiente operación:

$$d_n = Tr_n$$

Ecuación 4.2.6. Cálculo del vector de distancias estimado en base a la matriz de transformación T.

Donde d_n , se corresponde con el vector de distancias estimado en el instante n y r_n , hace referencia a un vector columna con los valores RSSI que el objetivo a localizar ha generado en los nodos de localización y es recibido por el nodo principal.

4.2.3.2. Algoritmos de estimación de posición

El objetivo último de los algoritmos de estimación de la posición que se van a presentar a continuación es, dado un conjunto de medidas de distancias obtenidos como se ha indicado en el epígrafe anterior, encontrar la localización de un nodo objetivo.

En este estudio, la atención recaerá sobre los algoritmos de un único salto, es decir, aquellos que requieren la interacción del objetivo con un único nodo de localización. Los algoritmos utilizados para dicho estudio se describirán en las subsecciones posteriores.

4.2.3.2.1. Multilateración

Como se describió en el capítulo 2, la multilateración consiste en un método de posicionamiento basado en la intersección de, al menos, tres círculos centrados cada uno de ellos en las coordenadas (x, y) de los correspondientes nodos de localización, véase la figura 4.2.7. La intersección de estos círculos se corresponderá con la posición del objetivo.

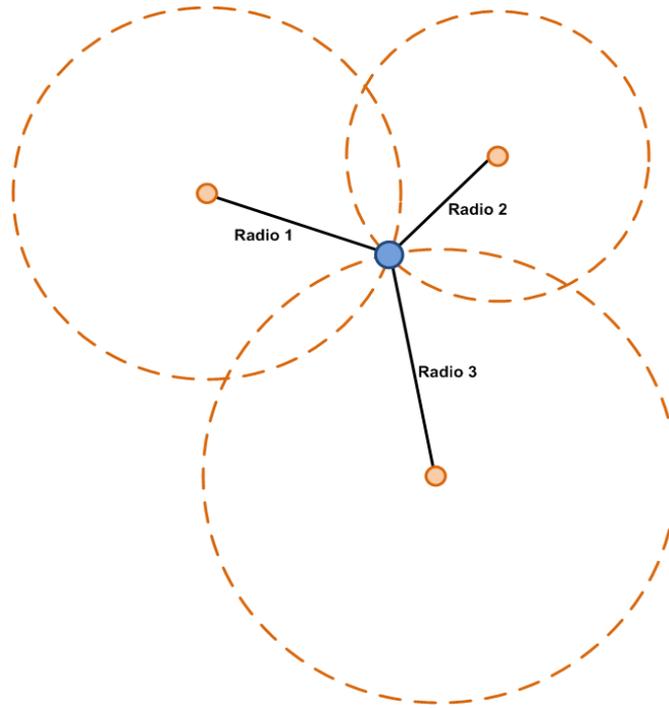


Figura 4.2.7. Representación gráfica del método multilateración.

En consecuencia, si se define el parámetro e_i como el error cometido entre la distancia medida y la distancia resultante de estimación de la posición, se obtiene:

$$e_i = r_{it} - \widehat{r}_{it} = r_{it} - \sqrt{(\widehat{x}_t - x_i)^2 + (\widehat{y}_t - y_i)^2}$$

Ecuación 4.2.7. Expresión del error cometido entre la posición real y el nodo i -ésimo.

Donde r_{it} representa la distancia medida por el nodo de localización i -ésimo con respecto al objetivo, las coordenadas $(\widehat{x}_t, \widehat{y}_t)$, la posición estimada del objetivo y (x_i, y_i) , las coordenadas conocidas del i -ésimo nodo de localización.

Puesto que la idea es obtener un estimador de la posición que sea lo más exacto posible, lo ideal sería que la diferencia existente entre la distancia medida y la distancia estimada fuese nula. En consecuencia, se puede hacer el término $e_i = 0$, resultando el siguiente desarrollo:

$$\begin{aligned} e_i = 0 &\Rightarrow r_{it} - \sqrt{(\widehat{x}_t - x_i)^2 + (\widehat{y}_t - y_i)^2} = 0 \\ r_{it} &= \sqrt{(\widehat{x}_t - x_i)^2 + (\widehat{y}_t - y_i)^2} \\ r_{it}^2 &= (\widehat{x}_t - x_i)^2 + (\widehat{y}_t - y_i)^2 \\ r_{it}^2 &= \widehat{x}_t^2 + x_i^2 - 2\widehat{x}_t x_i + \widehat{y}_t^2 + y_i^2 - 2\widehat{y}_t y_i \\ r_{it}^2 - x_i^2 - y_i^2 &= \widehat{x}_t^2 + \widehat{y}_t^2 - 2\widehat{x}_t x_i - 2\widehat{y}_t y_i \end{aligned}$$

Ecuación 4.2.8. Manipulación algebraica de la expresión del error.

Tras operar, se ha llegado a una expresión en la que las variables que desean determinarse no poseen una relación lineal. Éstas se encuentran elevadas al cuadrado, lo que impide utilizar las técnicas de resolución de sistemas lineales. Este inconveniente, se puede resolver si referenciamos todas las medidas a un mismo nodo, el cual puede ser el nodo principal sin pérdida de generalidad. Si denominamos por N mayúscula a dicho nodo, se obtiene que:

$$\begin{aligned} & (r_{it}^2 - x_i^2 - y_i^2) - (r_{Nt}^2 - x_N^2 - y_N^2) \\ &= (\hat{x}_t^2 + \hat{y}_t^2 - 2\hat{x}_t x_i - 2\hat{y}_t y_i) - (\hat{x}_t^2 + \hat{y}_t^2 - 2\hat{x}_t x_N - 2\hat{y}_t y_N) \\ r_{it}^2 - r_{Nt}^2 - (x_i^2 - x_N^2) - (y_i^2 - y_N^2) &= 2(x_N - x_i)\hat{x}_t + 2(y_N - y_i)\hat{y}_t \end{aligned}$$

Ecuación 4.2.9. Expresión final del algoritmo multilateración.

Si se reordena la expresión en forma matricial, se observa el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\begin{bmatrix} 2(x_N - x_1) & 2(y_N - y_1) \\ 2(x_N - x_2) & 2(y_N - y_2) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_N - x_{N-1}) & 2(y_N - y_{N-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_t \\ \hat{y}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1t}^2 - r_{Nt}^2 - (x_1^2 - x_N^2) - (y_1^2 - y_N^2) \\ r_{2t}^2 - r_{Nt}^2 - (x_2^2 - x_N^2) - (y_2^2 - y_N^2) \\ \vdots \\ r_{(N-1)t}^2 - r_{Nt}^2 - (x_{N-1}^2 - x_N^2) - (y_{N-1}^2 - y_N^2) \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A\hat{r} = b \Rightarrow A^T A\hat{r} = A^T b \Rightarrow \hat{r} = (A^T A)^{-1} A^T b$$

Ecuación 4.2.10. Desarrollo matemático para la obtención de la posición estimada.

Como se puede comprobar, se consigue obtener una solución en el sentido de los mínimos cuadrados de dicho sistema de ecuaciones lineales. Esto se debe a que la solución hallada minimiza la norma del error $E = \|A\hat{r} - b\|$, que era lo que se buscaba desde un comienzo. Por su parte, el sistema siempre tendrá solución debido a que el producto $A^T A$, siendo A una matriz real, da lugar a una matriz simétrica y, por definición, una matriz simétrica siempre es invertible.

Por tanto, la posición estimada se hallará mediante el cómputo de la siguiente expresión:

$$\hat{r} = (A^T A)^{-1} A^T b$$

Ecuación 4.2.11. Expresión final de la posición estimada.

4.2.3.2.2. Algoritmo Min-Max

Resolver la ecuación 4.2.11 es bastante costoso debido a las operaciones matriciales en punto flotante que se requieren. Por este motivo, surge el algoritmo Min-Max, que se corresponde con una variante de la multilateración. En este caso, la idea consiste en construir un rectángulo que actúa de frontera para cada nodo de localización. Dicho rectángulo se encontrará centrado en las coordenadas (x, y) de cada nodo. En concreto, las esquinas de cada uno de estos rectángulos coincidirán con el siguiente valor:

$$(x_i - d_i, y_i - d_i) \times (x_i + d_i, y_i + d_i)$$

Ecuación 4.2.12. Expresión de las coordenadas de los rectángulos fronteras.

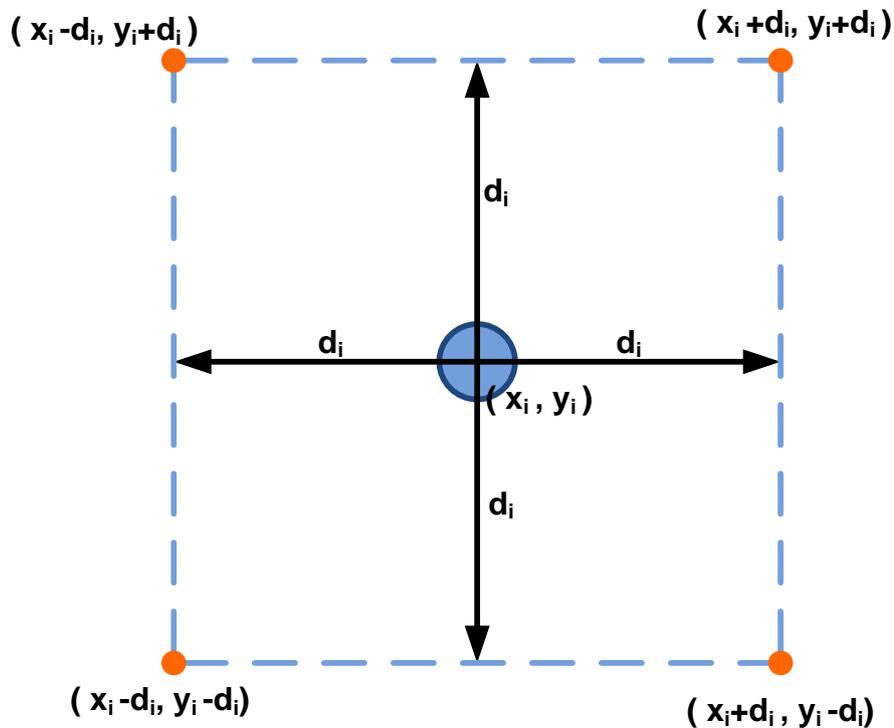


Figura 4.2.8. Construcción del rectángulo frontera.

La posición estimada se obtiene como el centro de la intersección de estos rectángulos. Para ello, basta con determinar el mínimo de todas las coordenadas máximas y el máximo de todas las coordenadas mínimas, es decir:

$$\left[\max_i(x_i - d_i), \max_i(y_i - d_i) \right] \times \left[\min_i(x_i + d_i), \min_i(y_i + d_i) \right]$$

Ecuación 4.2.13. Coordenadas del rectángulo intersección.

En consecuencia, la posición final se obtiene como el promedio de las coordenadas de las esquinas. La ventaja de este método es que requiere una baja complejidad de cálculo, puesto que únicamente se realizan operaciones de suma y comparaciones.

4.2.3.2.3. Algoritmo Multilateración iterativo

Se trata de una variante del algoritmo de multilateración. En este caso, lo que se hace es utilizar éste para una estimación inicial de la posición. Tras dicho cálculo, el valor obtenido se utiliza como semilla de un proceso iterativo, donde se somete la posición estimada a un proceso de refinamiento.

Para ello, se define una función de error parcial f_i relativa a cada nodo de localización tal y como sigue:

$$f_i = \frac{1}{d_i} \cdot \left(d_i - \sqrt{(x_i - \widehat{x}_e)^2 + (y_i - \widehat{y}_e)^2} \right)$$

Ecuación 4.2.14. Expresión del error parcial relativo al nodo de localización i-ésimo.

Donde d_i representa la distancia estimada mediante la calibración del canal de propagación, (x_i, y_i) son las coordenadas del nodo de localización i-ésimo y $(\widehat{x}_e, \widehat{y}_e)$ son las posiciones estimadas mediante el algoritmo de multilateración.

La función global del error será:

$$f = \sum_{i=1}^N f_i = \sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i} \cdot \left(d_i - \sqrt{(x_i - \widehat{x}_e)^2 + (y_i - \widehat{y}_e)^2} \right)$$

Ecuación 4.2.15. Expresión del error global.

Gracias a esta definición, se puede definir un vector Δ de incremento como sigue:

$$\Delta = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T f$$

Ecuación 4.2.16. Definición de la matriz de desplazamiento Δ .

Donde B se corresponde con ∇f , es decir,

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta \widehat{x}_e} & \frac{\delta f_1}{\delta \widehat{y}_e} \\ \frac{\delta f_2}{\delta \widehat{x}_e} & \frac{\delta f_2}{\delta \widehat{y}_e} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\delta f_N}{\delta \widehat{x}_e} & \frac{\delta f_N}{\delta \widehat{y}_e} \end{pmatrix}$$

Ecuación 4.2.17. Definición de la matriz B.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta f_i}{\delta \widehat{x}_e} &= \frac{1}{d_i} \cdot \frac{x_i - \widehat{x}_e}{d_i - \sqrt{(x_i - \widehat{x}_e)^2 + (y_i - \widehat{y}_e)^2}} \\ \frac{\delta f_i}{\delta \widehat{y}_e} &= \frac{1}{d_i} \cdot \frac{y_i - \widehat{y}_e}{d_i - \sqrt{(x_i - \widehat{x}_e)^2 + (y_i - \widehat{y}_e)^2}} \end{aligned} \right\}$$

Ecuación 4.2.18. Cálculo de las derivadas parciales de la matriz B.

Finalmente, el último paso del algoritmo será actualizar la posición inicial estimada con una versión escalada del desplazamiento indicado por la matriz Δ . Este proceso se repetirá hasta conseguir que el error global sea inferior a un cierto valor.

$$\widehat{r}_e = \begin{pmatrix} \widehat{x}_e + \gamma \Delta x \\ \widehat{y}_e + \gamma \Delta y \end{pmatrix}$$

Ecuación 4.2.19. Expresión final de la posición estimada.

4.2.3.2.4. Aproximación mecánica. Algoritmo de Malguki

El algoritmo de Malguki está basado en un símil mecánico, los nodos de localización se consideran como masas que están unidas entre ellas mediante una fuerza elástica similar a la de un muelle. Por tanto, cada muelle representa una restricción para la posición del nodo y su fuerza está relacionada con la distancia estimada que une dichos nodos. Cuando los nodos se ubican en la posición determinada por el conjunto de distancias estimadas, entonces los muelles no deberán efectuar ningún tipo de fuerza que corrija dicha posición. No obstante, si el nodo estuviera desplazado con respecto a la posición estimada, entonces los muelles actuarían ejerciendo una fuerza sobre dicho nodo tal que permitiese trasladarlo hacia la posición estimada. Para mayor detalle, véase la figura 4.2.9 De esta forma, el error global de la posición se reducirá al mínimo. Con este proceso, se consigue reducir la energía elástica de todo el sistema cuando los nodos se encuentran en su posición final.

Si se representa por \vec{r}_i a la posición ocupada por el i-ésimo nodo de localización, entonces la fuerza elástica \vec{m} producida por todos los muelles se podrá determinar como la suma de cada una de las fuerzas, es decir:

$$\vec{m} = \sum_{i=1}^N \vec{m}_i = \sum_{i=1}^N (d_i - |\vec{r} - \vec{r}_i|) \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|} = \sum_{i=1}^N \psi(u_i) \hat{r}_i$$

$$\psi(u_i) = u_i = d_i - |\vec{r} - \vec{r}_i|$$

Ecuación 4.2.20. Definición de la fuerza elástica \vec{m} y del campo escalar $\psi(u_i)$.

Los términos que aparecen en la ecuación 4.2.20, se corresponde con:

- \vec{m}_i : se corresponde con la fuerza elástica ejercida por el i-ésimo nodo de localización sobre el nodo objetivo.
- d_i : distancia estimada del nodo del nodo de localización i-ésimo con respecto al objetivo que se desea localizar.
- $|\vec{r} - \vec{r}_i|$: módulo de la distancia existente entre el i-ésimo nodo de localización y el objetivo cuya posición se desea estimar.
- $\hat{r}_i = \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}$: vector unitario que marca la dirección relativa del objetivo a posicionar frente al i-ésimo nodo de localización.
- $\psi(u_i)$: se corresponde con una función escalar que depende de la relación $d_i - |\vec{r} - \vec{r}_i|$. Para el caso de la fuerza elástica mencionada en el párrafo anterior, esta función se corresponde con $\psi(u_i) = u_i$.

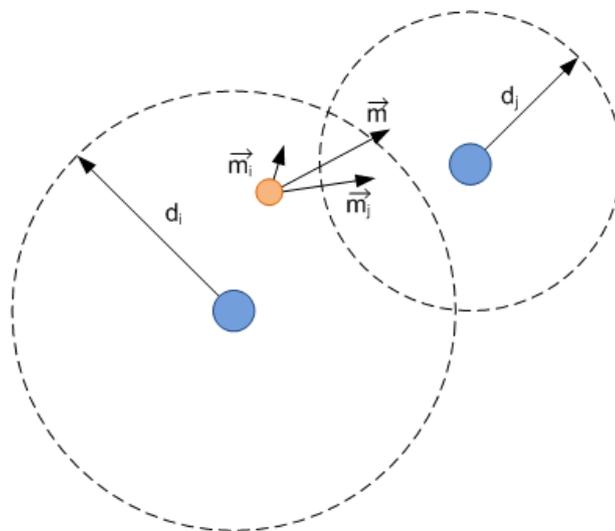


Figura 4.2.9. Definición de la fuerza elástica en el objetivo a localizar en base a dos nodos de localización.

El objetivo principal de este algoritmo es minimizar el error global dado ϕ por la suma de todos los errores parciales ϕ_i . Esta tarea se puede llevar a cabo de una forma eficaz teniendo en cuenta que la fuerza elástica total \vec{m} tiene la misma dirección y sentido opuesto que el gradiente de la función del error. En consecuencia, para una posición de la estimación dada por \vec{r} , la fuerza \vec{m} mostrará en qué dirección debe corregirse ésta para reducir el error asociado. El vector nuevo de fuerza será indicado mediante un vector desplazamiento $\Delta\vec{r}_i$, usando un parámetro (γ) como factor de conversión. El valor de γ puede necesitar ser actualizado durante cada iteración del algoritmo para asegurar la convergencia del mismo. Este hecho es necesario para evitar los posibles valles que la función de error pueda presentar. Puesto que en ese caso, si el valor de γ fuese demasiado elevado, el algoritmo podría saltarse el mínimo de la función y no llegar a converger nunca.

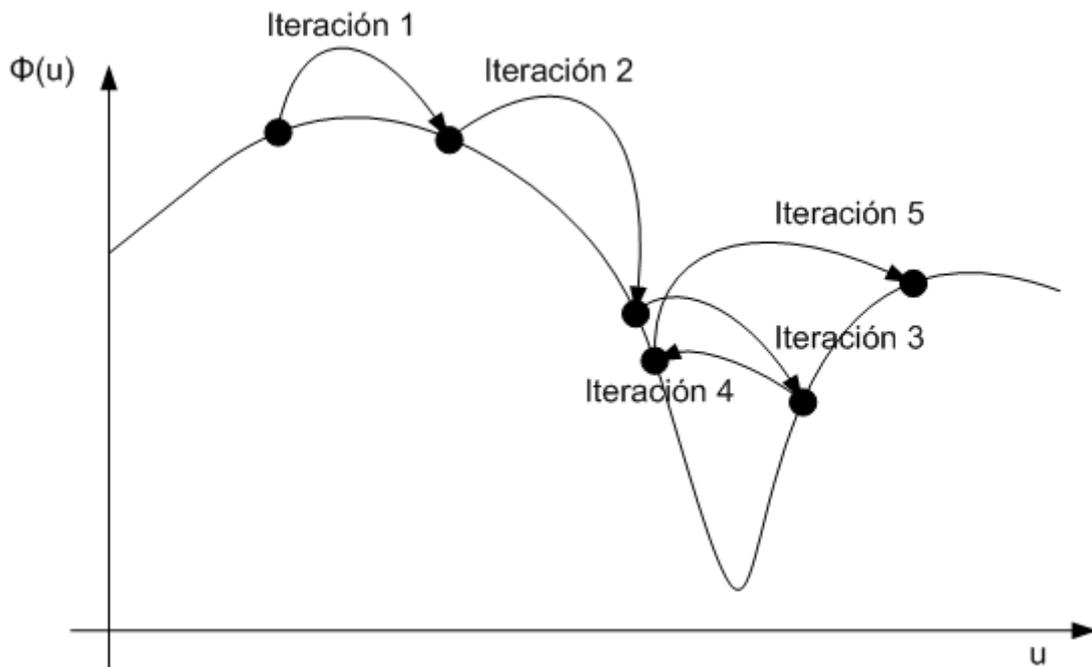


Figura 4.2.10. Ejemplo de un valor γ mal ajustado y de cómo el algoritmo no puede alcanzar el mínimo de la función de error.