



TRABAJO FIN DE MÁSTER
MÁSTER EN INGENIERÍA INFORMÁTICA

Lazarillo - Robot guía

Plataforma robótica de código abierto para uso general

Autor

Adrián Morente Gabaldón

Director

Juan José Ramos Muñoz



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍAS INFORMÁTICA Y DE
TELECOMUNICACIÓN

Granada, septiembre de 2022

Lazarillo - Robot guía: Plataforma robótica de código abierto para uso general

Adrián Morente Gabaldón

Palabras clave: robot, embebido, *IoT*, *Linux*, web, C++

Resumen

Lazarillo se trata de una plataforma libre de código abierto pensada para provisionar un robot que actúa como guía de caminos para los visitantes que acuden a la ETSIIT.

Este dispositivo embebido consta de un sistema operativo hecho a medida además de diversas aplicaciones para su uso, e internamente una arquitectura software que permite extender sus funcionalidades a todos los desarrolladores interesados.

En cuanto a *IoT*, la plataforma consta de métodos de conectividad que permiten al dispositivo ser administrado por un técnico desde un portal web, pudiendo así realizar actualizaciones o gestiones varias.

Lazarillo - Robot guide: Open-source multipurpose robotic platform

Adrián Morente Gabaldón

Keywords: robot, embedded, *IoT*, *Linux*, web, C++

Abstract

Lazarillo is a free & open-source platform for provisioning a robot that shall behave as a path guide for the ETSIT's visitors.

This embedded device contains a custom-made operating system in addition to some assorted applications. Internally, it contains a software architecture that allows any interested developers to extend its functionalities.

Regarding *IoT*, the platform includes connectivity methods that make a technician able to manage or upgrade the device through a web portal.

Yo, **Adrián Morente Gabaldón**, alumno de la titulación Máster en Ingeniería Informática de la **Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación de la Universidad de Granada**, con DNI 77139229N, autorizo la ubicación de la siguiente copia de mi Trabajo Fin de Grado en la biblioteca del centro para que pueda ser consultada por las personas que lo deseen.

Fdo: Adrián Morente Gabaldón

Granada a 9 de septiembre de 2022.

Agradecimientos

Poner aquí agradecimientos...

Índice general

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 13 |
| 2. Estado del arte | 15 |
| 3. Especificación y requisitos | 25 |
| 3.1. Requisitos generales | 25 |
| 3.1.1. Licencias | 25 |
| 3.1.2. Especificaciones | 26 |
| 3.2. Objetivos opcionales | 28 |
| 4. Implementación | 31 |
| 4.1. Requisitos generales | 31 |
| 4.1.1. Licencias y compartición del software | 31 |
| 4.2. Sistema operativo | 31 |
| 4.3. Arquitectura de Lazarillo | 32 |
| 4.3.1. Servicios internos | 32 |
| 4.3.2. Componentes externos | 33 |
| 5. Trabajos futuros | 35 |
| 5.1. Sistema operativo | 35 |
| 5.2. Servicios propios | 35 |
| 5.3. Portal web de administración | 35 |
| 5.4. Otros | 35 |
| 6. Conclusiones | 37 |

Capítulo 1

Introducción

Lazarillo se trata de una plataforma robótica abierta cuyo propósito es proporcionar una arquitectura solvente y extensible que permita añadir nuevas características y utilidades, además de facilitar el acceso a su gestión y mantenimiento.

Contiene un sistema operativo abierto basado en GNU/Linux y *The Yocto Project*, además de distintos servicios implementados con lenguajes de programación diferentes, mostrando así la interoperabilidad del software. Goza de conectividad inalámbrica, la cual facilita la conexión con herramientas externas para su gestión. Asimismo, el proyecto también consta de un panel web de administración desde el cual se pueden enviar acciones remotas al robot.

Aunque se trata de una plataforma extensible y de propósito múltiple, el uso inicial para el que fue ideado es el de actuar como **asistente** y **guía** dentro de un espacio cerrado (ya podemos ver que el título asignado al proyecto es un pequeño guiño a la literatura española). Sin embargo, el *stack* de herramientas y arquitectura que se han ido confeccionando durante su desarrollo, se podrían utilizar fácilmente para cualquier proyecto de propósito general que aúne dispositivos embebidos con *IoT* y administración remota de éstos.

Capítulo 2

Estado del arte

Dado que a lo largo de este documento estaremos hablando sobre dispositivos embebidos, *Internet de las cosas* y plataformas inteligentes (como robots), antes deberemos situarnos un poco en el contexto actual para revisar qué hay en el horizonte, teniendo en cuenta tanto software como hardware y limitaciones técnicas.

¿Qué es un “robot”?

Comencemos analizando la definición de la palabra **robot**, que según el *IEEE* (*Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos*, asociación mundial de expertos dedicada a la normalización del desarrollo en diversas áreas técnicas [1]), no *es algo fácil de definir*, pero una buena aproximación sería “una máquina autónoma capaz de percibir el entorno, realizando cálculos para la toma de decisiones y acciones que aplica en el mundo real” [2].

Un ejemplo de estos es la *Roomba* de la marca *iRobot*, la conocida aspiradora robótica que recorre las habitaciones de la casa de forma totalmente autónoma realizando una limpieza (más o menos a fondo) de ésta [3]. Los cálculos que realiza este dispositivo han de serle suficientes para recorrer la casa de forma eficiente, esquivando obstáculos y cubriendo la mayor superficie posible de la vivienda. Para este tipo de computaciones, un dispositivo robótico ha de valerse de sensores de proximidad (u otros), cámaras, etc.

Otro ejemplo mucho más claro de robot lo encontramos en **Pepper** [?] (obra de *SoftBank Robotics*), un computador con apariencia *humanoide* con hasta 20 grados de libertad que acepta interacción a través de una pantalla táctil, además de incorporar **reconomiento vocal** en 15 lenguajes diferentes. Por si fuera poco, a través del **reconocimiento facial** que hace de los usuarios es capaz de inferir su estado emocional.

Si bien el conjunto de avances de inteligencia artificial que realizan los robots de este tipo son espléndidos, no hace falta irse a un plano tan alto para hablar de robótica; ni aunar medidas tan avanzadas de detección y reacción ante el entorno, que también pueden ser usadas por elementos inteligentes que sin em-

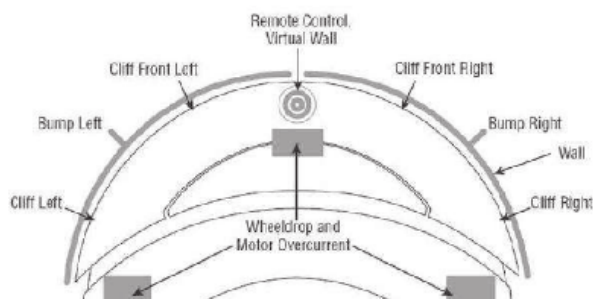


Figura 2.1: Ejemplo de sensores en una *Roomba* - Fuente: *ResearchGate* [4]

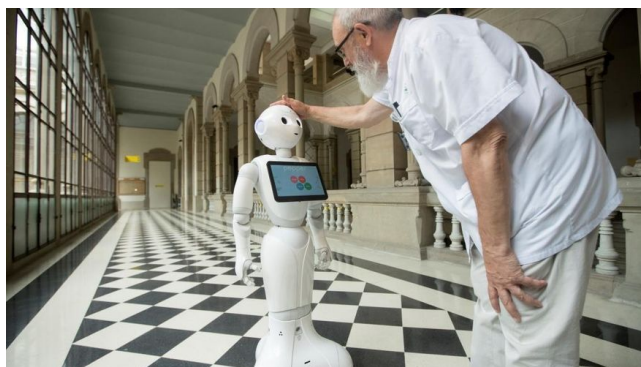


Figura 2.2: El robot humanoide Pepper proporciona atención a los pacientes en hospitales de Barcelona, brindándoles apoyo moral y entretenimiento - Fuente: *Noticias de Navarra* [?]

bargo no llegan a ser considerados como “robots”. Podemos encontrar un ejemplo en el *Autopilot*, que es como llama la compañía automovilística de vehículos eléctricos *Tesla* a su sistema de conducción automática [5]. Los complejísimo algoritmos de **visión computacional** que tienen lugar en el vehículo a la hora de observar el entorno en busca de otros coches, peatones, señales y obstáculos; también pasan por un entrenamiento de modelos de inteligencia artificial intenso. La diferencia en el uso de estos, es que (al menos actualmente), aún no existe la conducción plenamente autónoma, y por seguridad aún se requiere que haya un conductor al volante. ¿Podríamos entonces establecer el límite entre lo que es un “robot” y lo que no en función de si es necesaria la interacción humana?

Responder a ésto es siempre complejo pero interesante, así que me gustaría concluir esa pregunta volviendo al artículo de “What is a Robot?” del *IEEE* [2] con la divertida respuesta de *Joseph Engelberger*:

“No sé cómo definir un robot, ¡pero sé reconocer uno cuando lo veo!”

¿Qué necesito para hacer un robot?

Si quisiéramos crear un nuevo robot, son varios los campos de conocimiento que deberíamos tener en cuenta. Para empezar, la **electrónica** es algo esencial, ya que su base será la que permitirá controlar el movimiento del dispositivo a través de pulsos de corriente, además de dotarlo de los periféricos de detección y comunicación que hemos mencionado previamente. Por otro lado, el campo de la **informática** permitirá extender las funcionalidades de este robot dotándole de un sistema operativo y añadiendo aplicaciones sobre la capa abstracta tejida por la electrónica.

Si hablamos de hardware, podemos empezar por adquirir una plataforma móvil ya preparada para su uso. Lo primero que puede pensar cualquiera es tomar una como la *Roomba*, cuya movilidad y detección de obstáculos ya está implementada, y sobre ella añadir los componentes y prestaciones que queramos. El problema en cuanto a ésto es que se trata de una **plataforma cerrada**. No disponer del código fuente hace que no podamos extender el robot como queramos, y así el fabricante se reserva los derechos de su uso.

Si no podemos asumir el presupuesto de una plataforma ya montada o simplemente queremos hacer pruebas y divertirnos con la experiencia, hoy en día es fácil y asequible acceder a componentes electrónicos con los que crear pequeños robots y artefactos caseros. Un ejemplo de *núcleo* para ésto sería una placa de *Arduino*, que por unos 20 o 30 euros contiene las conexiones para añadirle módulos de cámara, altavoces, servomotores y cualquier cosa que se nos ocurra [6].

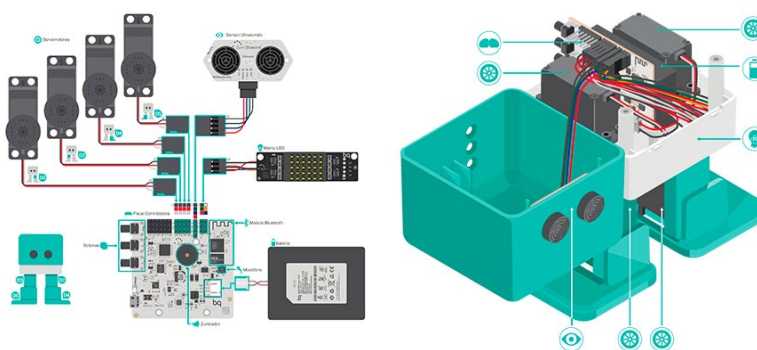


Figura 2.3: Zowi, ejemplo de robot basado en Arduino mas sensores - Fuente: Balara [7]

Esta placa de desarrollo contiene un microcontrolador que permite ser programado en código C muy fácilmente, pero está limitado a eso. Si queremos utilizar un sistema que nos permita gestionar más cosas que la simple ejecución de un código, como un sistema operativo completo, deberíamos dar el salto a algo más parecido a un ordenador común, para lo que puede servirnos la conocida

Raspberry Pi [8]. Existen otras alternativas de la misma gama provenientes de *Asus* o de *NXP* [9], pero nos ceñiremos a la primera ya que está muy enfocada al sector educativo y al público joven y goza de una comunidad muy numerosa. Lo que todos estos dispositivos comparten son diversas conexiones a través de las cuales podemos añadir los elementos que mencionábamos previamente para nuestro proyecto de robot, además de permitirnos acceso a la configuración de su sistema operativo (o incluso podemos confeccionar uno a nuestra medida, como veremos en el siguiente apartado).

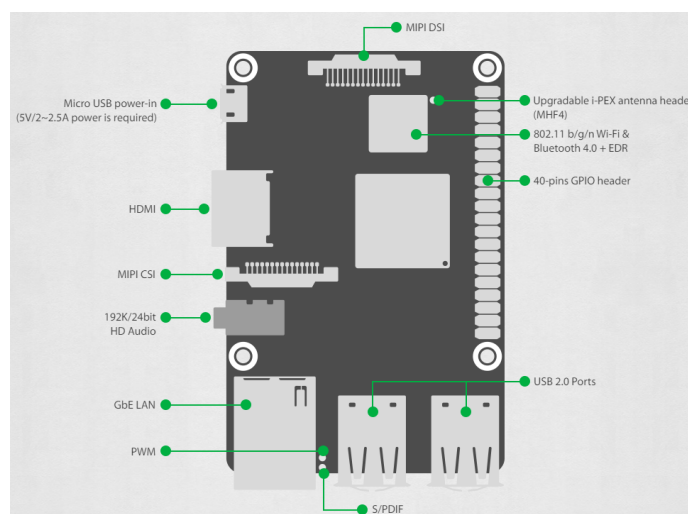


Figura 2.4: *Tinker board*, la alternativa de *Asus* - Fuente: *Asus.com* [10]

Sistema operativo, el cerebro del robot

Continuando con la *Raspberry*, el ordenador monoplaca en torno al cual podríamos construir nuestro robot, pasemos ahora a hablar del sistema operativo. Para esta placa en cuestión existe uno muy aclamado por la gente llamado **Raspbian** [11], basado en *Debian*, una conocida distribución de *GNU/Linux* que viene de los propios creadores de la *RPi* y dispone de todo lo necesario para formar un sistema de operativo completo, incluyendo hasta interfaz gráfica y aplicaciones de escritorio.

Contando con instalar en la tarjeta de memoria un sistema operativo ya montado como éste, podríamos seguir adelante con la conexión de periféricos que conformarán nuestro robot, o quizás nos interese más detenernos un momento a decidir si realmente queremos usar opciones como *Raspbian* o preferimos tener algo personalizado y a nuestra medida.

Para los más aventureros, existe la posibilidad de diseñar y compilar un sistema operativo propio (aunque también basado en *GNU/Linux*) con herramientas como **Buildroot** [12] y **The Yocto Project** [13]. Se tratan de frameworks que permiten compilar una distribución *Linux* a medida según las necesidades del

dispositivo embebido en cuestión seleccionando las piezas que lo conforman como si de un puzzle se tratase. Por ejemplo, un robot que no tenga pantalla pero sí informe al usuario mediante efectos sonoros puede prescindir de todos los paquetes gráficos; igual que otro que no necesite conectarse a un router de forma inalámbrica no necesita tener instalados todos los paquetes correspondientes a la gestión de *WiFi*.

Por un lado, tenemos la decisión entre utilizar un sistema operativo ya compilado o diseñarlo como hemos comentado. Si miramos el estudio que realizó *Mads Doré Hansen* en su paper *Yocto or Debian for Embedded Systems* [14] podemos matizar nuestra respuesta en consideración.

“*Debian* es bueno para pruebas rápidas y entornos de escritorio con memorias grandes y requisitos bajos de mantenimiento. *Yocto* es bueno para entornos personalizados con soporte a distintas plataformas hardware de poca memoria y que requieren trazabilidad y reusabilidad.

Sobre *Debian*, también menciona que al ser conveniente para pruebas rápidas, muchos equipos de desarrollo comienzan su trabajo en la plataforma embebida utilizándolo, posponiendo tanto el paso a utilizar *Yocto* para diseñar un sistema propio, que terminan postergándolo infinitamente y no lo realizan nunca. Un argumento a favor de ellos es que la **curva de aprendizaje** de *Yocto* es grande, dado que requiere compilar todo el sistema para la arquitectura destino, mientras que opciones como *Debian* seguramente ya dispongan de paquetes pre-compilados.

Por ahora, nos conformaremos con saber de la existencia de estas alternativas. Más adelante comentaremos cuál nos resulta más conveniente para el caso que nos ocupa.

Programación del robot

Pasemos ahora a hablar de **software**. ¿Qué herramientas necesita un desarrollador para programar su robot? Pues bien, indagando un poco podremos ver que realmente no dista mucho de codificar cualquier otro software convencional.

En el artículo de *Codete* citado [15], listan por orden de volumen de uso los lenguajes de programación más utilizados para robótica. Podemos ver que todos los lenguajes ahí presentes son de uso general, y que cualquier experiencia que ya podamos tener por ejemplo con *Python* para desarrollo web, nos puede servir para iniciarnos en el mundo de la robótica. Otro ejemplo es *Java*, que si bien también es usado extensamente para aplicaciones de escritorio entre otras, aporta herramientas y librerías que pueden ser muy útiles para recepción y procesamiento de imágenes.

Sin embargo, de acuerdo con dicho artículo, el más ampliamente usado es *C* y *C++*, ya que permiten un manejo más eficiente de la memoria y un procesamiento a bajo nivel más cercano al hardware. Además, estos lenguajes colaboran

directamente con la API del sistema operativo, utilizando las propias librerías ya presentes en el dispositivo.

Por otro lado, cuando se habla de robótica suele salir a colación **ROS** (*Robot Operating System*) [16], un proyecto de **código abierto** que incluye un conjunto de librerías y herramientas con las que no es necesario *reinventar la rueda* para adentrarse en la programación de robótica. En diversos artículos podemos encontrar razones por las que utilizar **ROS** (como en [17]):

- Se trata de un sistema agnóstico para lenguajes. Permite comunicar un robot programado en *C++* con otro hecho en *Python*, por ejemplo.
- Es ligero y de propósito general para cualquier finalidad que tenga el robot en cuestión.
- Contiene herramientas de simulación que facilitan el desarrollo del robot antes de requerir el uso físico de electrónica real (lo que puede suponer un ahorro en costes de material).

Para un uso modesto, quizá el aspecto más interesante de utilizar **ROS** puede resultar la comunicación entre distintos **nodos**. Podemos entender como *nodo* cada una de las partes independientes del robot que colabora con el resto. Para un robot hipotético que se desliza sobre el suelo y que mueve los brazos para agarrar cosas, podríamos distinguir entre sus nodos la plataforma móvil, las manos, las cámaras que observan el entorno y un largo etcétera. En cuanto a cómo se comunican estos nodos, podemos plantearlo como un problema de comunicación de distintos servicios cualesquiera. Veamos esto en el siguiente apartado.

¿Cómo se comunican los nodos de un robot?

Como anticipábamos, podemos entender cada **nodo** como un servicio independiente que se comunica con el resto a través de algún mecanismo integrado en el sistema operativo.

Imaginemos que tenemos un nodo **principal** que representa el cerebro del robot, y que por tanto es el encargado de ordenar al resto de nodos (*secundarios*) la siguiente acción que deben realizar. Si cada uno de estos elementos es un servicio independiente como hemos dicho, es necesario un método de comunicación para que el principal notifique a los demás mediante un mensaje. Si buscamos métodos de **comunicación entre procesos**, seguramente el primer resultado que obtengamos sea **IPC**, cuyas siglas (*Inter-Process Communication*) en castellano significan exactamente “comunicación entre procesos” [18]. En la siguiente figura podemos ver una comparativa de las dos formas de comunicación posibles en este ámbito: *Shared memory* y *Message Passing*

El método de comunicación mediante **IPC** más inmediato es el uso de *Shared memory* o **memoria compartida**, que consiste literalmente en reservar un espacio de la memoria lógica para que todos los procesos cooperantes hagan uso de un espacio común donde leer y escribir variables compartidas. Si bien ésto es ágil y rápido, mi experiencia trabajando con esta metodología en proyectos

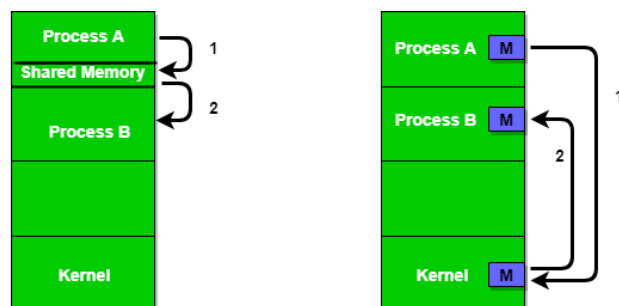


Figura 2.5: Formas de comunicación *IPC* - Fuente: *GeeksforGeeks.org* [18]

grandes es que si no se tiene especial cuidado a la hora de diseñar qué datos intervienen y su procedencia, a largo plazo esto produce un gran **acoplamiento** en el software involucrado.

Por otro lado, *Message Passing* (**paso de mensajes**) consiste en habilitar un búfer compartido a nivel de kernel en el que pueden escribir y leer los procesos interesados. La diferencia con la **memoria compartida** es que en ésta se pueden utilizar directamente las variables del lenguaje de programación escogido, mientras que con **paso de mensajes** lo que se hace es escribir objetos completos con un identificador de mensaje. Así, lo que hacen los servicios para leer información es iterar sobre dicho búfer buscando si los identificadores de mensaje presentes son de su interés o no. Con esta aproximación, es sencillo enviar mensajes *1:1* (de un servicio a otro) o *1:n* (*multicast* o *broadcast*) entre servicios concretos.

Dejando *IPC* a un lado y volviendo a *ROS*, que antes mencionábamos que es un set de librerías y herramientas bien amplio, destaquemos ahora que también contiene formas de comunicación entre nodos, e incluso su documentación contiene tutoriales sobre cómo empezar a trabajar en ello (como encontramos en [19], donde enseñan cómo partir con un modelo **publicación-suscripción** en lenguaje *C++*).

Este patrón también conocido como *PubSub* se trata de una forma de **mensajería asíncrona** para integrar microservicios en una arquitectura software. O como detallan en *Amazon AWS* [20]: “para usar en arquitecturas *serverless* o basadas en **microservicios**”.

El funcionamiento de éste es simple y permite implementar **arquitecturas basadas en eventos**:

- Un **servicio** se suscribe a un **tópico**, como lo haría un usuario de la televisión por cable a los canales cuyo contenido le interese.
- Otro servicio **publicará mensajes** en dicho tópico, de forma que el primero los recibirá inmediatamente.
- Esta mecánica se generaliza con tantos servicios y tópicos como sea necesario.

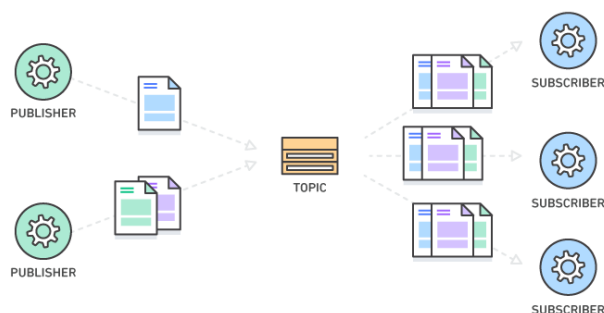


Figura 2.6: Mecánica *PubSub*. Dos servicios publican sobre un mismo tópico para que otros tres reciban su contenido inmediatamente - Fuente: *Amazon AWS* [20]

Sobre *PubSub*, encontramos también el **servicio de mensajería MQTT**, que funciona de forma similar. En la imagen siguiente, vemos que ahora se sitúan al **publicador** y al **suscriptor** a ambos lados de un **bróker**, que es el responsable de notificar a cada uno de los servicios suscritos cuando se ha añadido un mensaje a su tópico de interés.

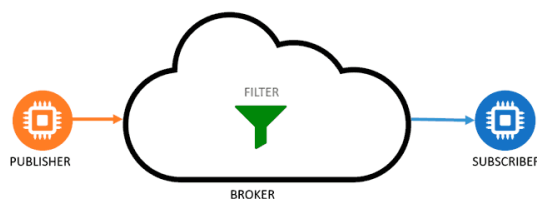


Figura 2.7: Mensajería *MQTT* con patrón **publicador/suscriptor**. El bróker intermedio es quien recibe los mensajes que van a cada tópico y notifica a cada servicio suscrito. - Fuente: *Luis Llamas* [?]

En mi experiencia, el modelo *PubSub* es el más cómodo de utilizar una vez que el proyecto ya está preparado para trabajar en él y añadir funcionalidades, además de gozar de una gran **escalabilidad**, ya que añadir nuevos mensajes, tópicos y servicios es totalmente transparente y práctico. Bien es cierto que para no reinventar la rueda, es conveniente utilizar librerías que ya implementen este paradigma, como *Redis* o *ROS*, que mencionábamos antes.

Si bien hemos visto que *ROS* puede servir para cualquiera que quiera iniciarse en la robótica, *Redis* es una herramienta muy interesante a tener en cuenta para intercomunicar los distintos nodos o procesos que tendrán lugar en el dispositivo. Se trata de un **almacén de estructuras de datos** que puede actuar como base de datos, caché o bróker de mensajes; que se mantiene en memoria principal, por lo que es volátil a la par que muy rápida [21]. Además, implementa el paradigma *PubSub*, permitiendo realizar suscripciones a tópicos y/o publicar mensajes sobre ellos. Automáticamente, los programas que utilicen alguna librería de *Redis* son notificados cuando un mensaje es publicado en un

tópico al que están suscritos [22].

Dejemos aquí la enumeración y descripción de los distintos módulos software que nos pueden servir para programar el susodicho robot. En apartados posteriores estudiaremos cada una de las decisiones tomadas al respecto.

Conectividad del robot

Para terminar con el *Estado del Arte*, veamos por último qué opciones hay a la hora de comunicar nuestro robot con la red exterior, en caso de que necesitemos enviar telemetría, recibir órdenes remotas o incluso recabar datos para un servidor.

La primera alternativa que nos encontramos se trata del conocido protocolo **HTTP** (*HyperText Transfer Protocol*), que utilizamos a diario cuando consultamos cualquier web a través de nuestro ordenador o teléfono móvil. De acuerdo con la documentación de *Mozilla* [25], es un protocolo de escritura cliente-servidor donde la comunicación es iniciada por el **cliente**, es decir, el interesado en recibir los datos (normalmente una página web). La particularidad de este protocolo es que cada conexión termina en cuanto el servidor provee una respuesta completa al cliente. Veámoslo en la siguiente figura:

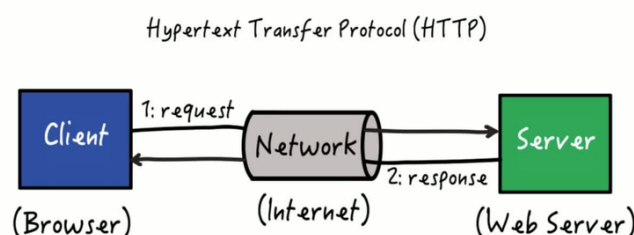


Figura 2.8: Funcionamiento del protocolo *HTTP*. Un cliente realiza una petición a través de la red, el servidor recolecta los datos necesarios, los envía al cliente y finaliza la conexión. - Fuente: *Research hubs* [?]

Una alternativa que encontramos hoy en día al clásico *HTTP* es el protocolo **WebSockets**, que de acuerdo con la documentación para desarrolladores de *Mozilla*: “es una tecnología que permite abrir una sesión de comunicación **interactiva** entre el cliente y el servidor” [24].

Las diferencias entre éste y el anterior son:

- La conexión en *HTTP* finaliza con cada respuesta exitosa, mientras que en *WebSockets* es interactiva, permaneciendo abierta entre el cliente y el servidor, sin necesidad de reabirla para cada nueva petición.
- *WebSockets* es una tecnología **basada en eventos**, por lo que no es necesario realizar lecturas periódicas de cara al otro extremo ya que los mensajes enviados por éste *notifican* al servicio que la utiliza.

- La comunicación es **bidireccional**: una vez que se establece la conexión, tanto el cliente como el servidor pueden mandarse mensajes entre sí transparentemente sin necesidad de renegociar el canal de conexión.

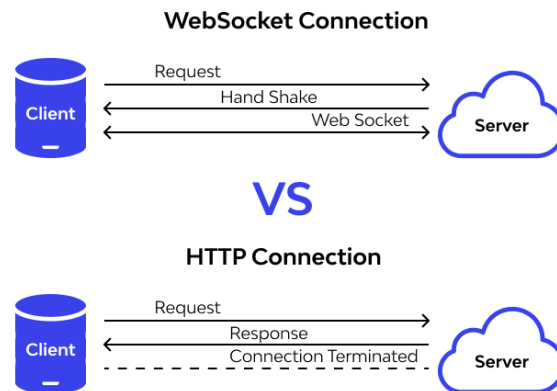


Figura 2.9: La diferencia entre la conexión en *WebSocket* y *HTTP* la vemos en la última línea de cada diagrama. En el primer caso el canal permanece abierto y en el segundo se cierra tras la respuesta del servidor. - Fuente: *Wallarm.com* [?]

Para terminar con esta sección, cabe recordar también otra vez *MQTT*, que pese a no ser un protocolo como tal, permitirá orquestar los robots en torno a un servidor de forma que puedan compartir un canal de **mensajería push** sobre un servidor acordado. Este elemento actuaría como **nodo principal** que podría publicar en distintos tópicos, y los robots actuarían como nodos **secundarios** y suscritos.

Si bien siempre es posible indagar un poco más en todas las alternativas y tecnologías que tenemos disponibles a día de hoy, pasemos de una vez a enumerar los requisitos que regirán el desarrollo de este proyecto.

Capítulo 3

Especificación y requisitos

Pasemos ahora a describir de la forma más detallada posible cada uno de los requerimientos que conforman la idea del proyecto, planteando del mismo modo alternativas o aspectos que sería de agrado incluir, si bien no forman parte de la especificación inicialmente. Las decisiones tomadas, así como las soluciones implementadas, serán detalladas en el capítulo siguiente, si bien a lo largo de éste mismo pueden surgir necesidades cuya solución se detalle directamente.

Se desea disponer de una plataforma robótica extensible, libre y abierta; que permita una buena ampliación de nuevas características mediante software. Además, se propone la implementación de un uso concreto para esta plataforma, y es que dicho robot sirva como **guía de caminos** para sus usuarios finales en un **entorno controlado**. En este capítulo listaremos los distintos requisitos y puntualizaremos sobre cada una de las decisiones tomadas para satisfacerlos.

3.1. Requisitos generales

Los requerimientos aquí listados comprenderán cosas tanto de procedimientos para el desempeño del proyecto (como pueden ser la visibilidad y su legislación) hasta las funcionalidades más concretas que se esperan del producto final.

3.1.1. Licencias

Se tratará de un proyecto de software **libre** y de **código abierto**. Para ello, se publicará bajo una licencia *GPLv3* en un repositorio público en *Github*.

Además de *Github*, existen otras alternativas de repositorios públicos que permiten utilizar *git* para control de versiones (como *Bitbucket* y *Gitlab* entre otras). El porqué de utilizar *Github* es meramente por aprovechar la licencia *premium* que se provee a los estudiantes de la UGR simplemente por matricularse; permitiendo así tener algunos repositorios privados a su disposición [23].

Con el código público y la licencia elegida, cualquier usuario podrá descargar el software, compilarlo, ejecutarlo e incluso añadir modificaciones al código para ser probadas e integradas en la plataforma final. Para ello, en el propio repositorio se pondrá a disposición de los interesados una documentación que explique cómo replicar el entorno tanto de desarrollo como de compilación.

3.1.2. Especificaciones

El término *plataforma robótica* puede ser demasiado amplio para su manejo, por lo que en esta sección detallaremos más a fondo algunos de los puntos más interesantes, así como los factores de éxito que harían de **Lazarillo** un producto útil y diferencial con respecto a las alternativas ya existentes.

Extensibilidad

Ya que se desea disponer de una plataforma extensible cuyo comportamiento y características puedan ampliarse a través de software, se debe dotar al robot de una arquitectura que permita este crecimiento, conteniendo en ella servicios (o módulos) independientes que puedan incluirse o no en función de la aplicación específica que vaya a cumplir el robot.

Para ello, sería interesante disponer de una arquitectura basada en **micro-servicios** donde cada uno de ellos cumple un propósito muy concreto y se comunica con el resto sin generar acoplamiento. Para esto es de imperativa necesidad utilizar un paradigma de comunicación en el cual sea transparente añadir datos y servicios.

Por otro lado, ha de asegurarse que existe la **interoperabilidad**, la cual representa que una arquitectura que incluye distintas plataformas de hardware y diferentes sistemas software (implementados con lenguajes de programación variados) cooperan bien entre sí.

Veamos un ejemplo rápido para ilustrar el párrafo anterior: si el programa que recibe los datos de un servidor web está programado en *Python* y debe transmitirlos al servicio que toma las decisiones de movimiento (programado en *C++*); el paradigma de comunicación que los conecta ha de ser **agnóstico en el lenguaje** y que dicha operación sea efectiva de forma transparente.

Conectividad

Como plataforma inteligente y conectada que utiliza el paradigma del **edge computing**, sabemos que el robot ha de ser un dispositivo embebido con conexiones al exterior como *Bluetooth* y/o *WiFi*. Que éstas vengan implícitas en la plataforma hardware utilizada facilitará mucho el trabajo, ya que nos ahorramos el hecho de tener que soldar componentes. En cuanto a plataformas hardware, en el apartado del **Estado del Arte** ya comentamos algunas alternativas y opciones. Utilizaremos para ésto una *Raspberry Pi Model 3 B*, que pese a no ser

el último modelo de la marca *Raspberry*, es la que tengo a disposición en casa. Además, satisface las necesidades de conectividad que comentábamos.

Por otro lado, en cuanto al requisito de computación en el borde, la plataforma deberá contener uno o más servicios que permitan la comunicación con el exterior, de una forma u otra, además de enviar y recibir mensajes. El robot deberá habilitar un canal de comunicación **persistente** y **bidireccional** que le permitan tanto a él como al servidor enviarse eventos entre sí.

Interfaz y experiencia de usuario

El robot contará con una pantalla táctil con la que proveerá la información necesaria al usuario (en función de las aplicaciones que necesite o decidan integrarse en el robot). Cualquier pantalla táctil que permita su conexión con la *Raspberry* debería servir, por lo que no entraremos a detallar limitaciones hardware. Para la interacción del usuario, el sistema contará con una **aplicación embebida de entorno gráfico** que permita el uso del robot.

Dado que *Lazarillo* se pretende que actúe como **guía**, otra característica que sería de agradecer en la plataforma tiene que ver con la **reproducción de sonidos** que faciliten la comunicación con el usuario, así como la **accesibilidad**. No todo el mundo goza de capacidad visual o simplemente no están habituados a interfaces táctiles, por lo que emitir alertas y sonidos descriptivos facilitaría llegar a más usuarios de forma plena y satisfactoria.

Gestión experta y mantenimiento

Como hemos comentado en secciones anteriores, el robot gozará de hardware provisto de conectividad inalámbrica. En este punto haremos uso de esta característica para ofrecer un método de mantenimiento, supervisión y gestión del robot, por parte de alguna "mano experta". Necesitaremos un método de administración de los distintos robots existentes desde un portal web externo a ellos. Un técnico encargado de gestionar los robots, accederá a una web alojada en un servidor a través del protocolo común de *HTTP*.

Inicialmente, este portal web servirá para listar los dispositivos conectados (es decir, los robots que han sido provisionados con el software de *Lazarillo* y se encuentran en funcionamiento), pero posteriormente permitirá enviar acciones remotas desde el servidor al robot (como reinicios, actualizaciones de software, acciones concretas a realizar por el robot, etc.).

Es deseable que la interfaz web sea sencilla y usable. Además, sería de agradecer que ésta pueda visualizarse correctamente en **dispositivos móviles**, ya que ampliaría el rango de posibilidades de gestión de los dispositivos robóticos.

Movilidad

El factor determinante que diferenciará a nuestro robot de un sistema empujado inmóvil será la capacidad de desplazarse por el entorno. Ya sea para un uso u otro, el robot deberá venir dotado de un sistema hardware que le permita avanzar por el plano, conteniendo elementos como **motores** y **ruedas** o **cintas móviles**.

Además, si se desea que el robot sea **inteligente** y reconozca el entorno por el que se está moviendo, deberá dotarse de algún sistema de reconocimiento como **sensores de proximidad** o **cámaras**. Respecto a esto, si queremos seguir el paradigma de *edge computing* como venimos comentando, el procesamiento de estas señales podría realizarse en el servidor en lugar de en el propio robot, lo que también liberaría a la plataforma hardware del robot de una buena parte de la computación.

Para acotar el alcance del proyecto y que sea asumible para un trabajo de este calibre, inicialmente la movilidad podrá estar basada en hacer **seguimiento de líneas** sobre el suelo.



Figura 3.1: Ejemplo de robot móvil autónomo - Fuente: *Robotnik*

3.2. Objetivos opcionales

En esta sección enumeraremos y describiremos sucintamente qué otras ideas surgieron durante el momento de *brainstorming* del proyecto, y que si bien son opcionales para su desempeño, realmente aportarían algún valor al producto final.

Movilidad autónoma

Un factor que haría de **Lazarillo** un producto totalmente independiente y útil sería que no necesitase de caminos guiados para desplazarse. Se valoraría la instalación en sí mismo de los mapas cerrados en que se ubicaría durante su desempeño, así como un mecanismo de **geolocalización** en el espacio. Contando con esto, el robot mantendría una comunicación persistente con el servidor

informando en *tiempo real* de la ubicación actual.

Capítulo 4

Implementación

En este capítulo comentaremos a fondo las decisiones tomadas que hemos comentado previamente en base a la especificación, además de describir las implementaciones propuestas con las distintas tecnologías utilizadas. Pondremos el foco no solo en el **software implícito en el robot** sino también a los componentes desarrollados externos a él, pero que también conforman la arquitectura completa de la plataforma, como lo son el **sistema operativo**, el **panel web de administración** y otras herramientas involucradas. Las ideas que por una razón u otra no hayan llegado a implementarse a tiempo, serán definidas en profundidad en apartados posteriores.

Para elaborar este capítulo de una forma más legible y entendible, seguiremos una estructura muy similar a la propuesta en el capítulo 3 de **Especificación de requisitos**.

4.1. Requisitos generales

4.1.1. Licencias y compartición del software

En cuanto a licencias y permisos del proyecto, como se anticipó se usarán diversos **repositorios** en *Github*, que aparecen listados a continuación y descritos en función del contenido (que se elaborará más tarde):

- *lazarillo-embedded*: [?]
- *lazarillo-admin-frontend*: [?]
- *lazarillo-admin-backend*: [?]
- *meta-lazarillo*: [?]
- *documentacion-tfm*: [?]

4.2. Sistema operativo

Para dotar a la *Raspberry* de un sistema operativo ligero, extensible y hecho a medida, decidimos obviar sistemas ya existentes como *Raspbian* (S.O. de culto

para la mayoría de usuarios de este computador) (TODO: ref a Raspbian) y confeccionar el nuestro propio a través de una herramienta libre y gratuita como es *The Yocto Project* (TODO: ref a yocto).

¿Por qué omitimos un sistema operativo que ya existe?

Pues bien, la respuesta es fácil. *Raspbian* es un sistema operativo de uso general que permite utilizar la *Raspberry* como cualquier ordenador normal, ya sea para ofimática, desarrollo de software, consumo de recursos multimedia o incluso videojuegos. Esto provoca que el sistema operativo en cuestión venga con demasiado *bloatware* (TODO: poner en el glosario) preinstalado de base; y llevaría más tiempo modificar la imagen de *Raspbian* para que no contenga todo el software no deseado que confeccionar un sistema operativo a medida.

Además, deseamos que el robot solo muestre una aplicación embebida en pantalla en lugar de un entorno de escritorio normal, por lo que podemos prescindir de este entorno completo y configurar nuestro nuevo sistema para que solo muestre una aplicación y ahorre tiempo en el arranque.

4.3. Arquitectura de Lazarillo

En esta sección enumeraremos los distintos servicios y módulos específicos creados para Lazarillo y describiremos el propósito para el que han sido programados.

(TODO: insertar diagrama de arquitectura)

4.3.1. Servicios internos

Veamos ahora una breve explicación del propósito que satisfacen los módulos software internos del robot.

lazarillo-hmi

La tecnología usada por esta aplicación, se ha decidido que sea el framework de *Qt*, que pese a tener modalidades de licencias de pago, permite un uso *open source*. Además, se trata de una tecnología con una amplia comunidad, una documentación muy rica y un gran soporte para dispositivos embebidos. Por otro lado, dispongo de amplia experiencia con dicha herramienta, lo que agiliza enormemente el tiempo de desarrollo.

Se trata de la aplicación que muestra la interfaz táctil al usuario.

messages-definition

Este módulo no es en sí un servicio sino una **librería** donde se definen los mensajes que utilizan internamente el resto de servicios para comunicarse.

service-base

Este módulo define el esqueleto abstracto de cada uno de los servicios del robot. Heredando el comportamiento de esta librería, cada uno de los nuevos servicios se ahorran procedimientos rutinarios como instanciar la conexión con la base de datos y el bróker de mensajería.

web-gateway

Este servicio es el *puerto de entrada* a Lazarillo. Realiza la comunicación mediante *Websockets* con *lazarillo-admin*, el portal web a través del cual un técnico puede administrar los distintos robots. *Web-gateway* actúa como intérprete de los mensajes provenientes del *socket* y los publica en la mensajería interna del robot (basada en *Redis*) para informar al resto de servicios de cualquier acción emitida por el servidor.

4.3.2. Componentes externos

Como venimos comentando, además del software embebido en el robot, disponemos de otros módulos externos a él que completan la plataforma.

lazarillo-admin

Este es el título asignado al servicio web que tanto venimos comentando a lo largo de este documento, a través del cual podemos visualizar y gestionar los distintos robots conectados al servidor.

Está programado con *NodeJS* (TODO: ref a node) y utiliza librerías para hacer las veces de servidor con *HTTPS* (para la web) y con *Websockets* (para la comunicación con el robot).

Capítulo 5

Trabajos futuros

Un buen *brainstorming* sobre el desarrollo de una idea novedosa y (se supone que) útil siempre es motivador y consigue animar a un programador a llevar la idea a la práctica, intentando la consecución del mayor número de requisitos posibles. Sin embargo, el tiempo siempre es uno de los factores más determinantes a la hora de dictaminar cómo de lejos se llega con el proyecto.

Dicho esto, en este capítulo comentaremos cuáles de las ideas iniciales no llegaron a finalizarse a tiempo para la entrega del proyecto, y cuáles se decidieron postergar en el tiempo para un futuro desarrollo.

Cabe destacar que dada la naturaleza libre del proyecto, cualquier interesado o interesada podría continuar con la parte del desarrollo que más le interese; ya que esta idea nació como una herramienta abierta a la que poder contribuir y de la que cualquiera pueda sacar utilidad.

Entrando ya en materia, dividiremos este capítulo en breves secciones relacionadas con las ya vistas en el capítulo de **Implementación**, detallando los cabos sueltos que hayan quedado en cada uno de ellos.

5.1. Sistema operativo

5.2. Servicios propios

5.3. Portal web de administración

5.4. Otros

TODO: rellenar secciones (tras terminar capítulo de Implementación)

Capítulo 6

Conclusiones

Bibliografía

- [1] IEEE.org, “IEEE - Advancing Technology for Humanity.” Enlace: <https://www.ieee.org/>.
- [2] IEEE - Robots, “What Is a Robot? Top roboticists explain their definition of robot.” Enlace: <https://robots.ieee.org/learn/what-is-a-robot/>.
- [3] iRobot, “Robots aspiradores Roomba.” Enlace: https://www.irobot.es/es_ES/roomba.html.
- [4] D. Mukherjee, A. Saha, P. Mendapara, D. Wu, and Q. M. J. Wu, “A cost effective probabilistic approach to localization and mapping,” 07 2009.
- [5] Tesla, “Artificial Intelligence Autopilot.” Enlace: <https://www.tesla.com/AI>.
- [6] Arduino Store, “Arduino Boards.” Enlace: <https://store.arduino.cc/collections/boards>.
- [7] Balara, “Zowi BQ, el robot didáctico de Clan.” Enlace: <https://www.balara.es/zowi-robot-bq-clan/>.
- [8] Raspberry Pi, “Products store.” Enlace: <https://www.raspberrypi.com/products/>.
- [9] NXP, “i.MX Applications Processors.” Enlace: https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/arm-processors/i-mx-applications-processors:IMX_HOME.
- [10] Asus.com, “Tinker Board.” Enlace: <https://www.asus.com/es/Networking-IoT-Servers/AIoT-Industrial-Solutions/All-series/Tinker-Board/>.
- [11] Raspberry Pi, “Raspbian - Operating system images.” Enlace: <https://www.raspberrypi.com/software/operating-systems/>.
- [12] Buildroot, “Making Embedded Linux Easy.” Enlace: <https://buildroot.org/>.
- [13] The Yocto Project, “It’s not an embedded Linux distribution, it creates a custom one for you..” Enlace: <https://www.yoctoproject.org/>.
- [14] Mads Doré Hansen, “Yocto or Debian for Embedded Systems,” 08 2017. Enlace: https://www.prevas.dk/download/18.58aaa49815ce6321a327da/1506087244328/Yocto_Debian_Whitepaper.pdf.

-
- [15] Codete, “8 top programming languages for robotics.” Enlace: <https://codete.com/blog/top-8-programming-languages-for-robotics>.
 - [16] ROS.org, “Why ROS?.” Enlace: <https://www.ros.org/blog/why-ros/>.
 - [17] NIRYO, “8 reasons why you should use ROS for robotics projects.” Enlace: <https://service.niryo.com/en/blog/8-reasons-use-ros-robotics-projects>.
 - [18] GeeksforGeeks, “Inter Process Communication (IPC).” Enlace: <https://www.geeksforgeeks.org/inter-process-communication-ipc/>.
 - [19] ROS.org, “Writing a Simple Publisher and Subscriber (C++).” Enlace: <http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials/WritingPublisherSubscriber%28c%2B%2B%29>.
 - [20] Amazon AWS, “Pub/Sub Messaging.” Enlace: <https://aws.amazon.com/es/pub-sub-messaging/>.
 - [21] Redis.io, “Introduction to Redis.” Enlace: <https://redis.io/docs/about/>.
 - [22] Redis.io, “How to use pub/sub channels in Redis.” Enlace: <https://redis.io/docs/manual/pubsub/>.
 - [23] Github.com, “GitHub pricings.” Enlace: <https://github.com/pricing>.
 - [24] Mozilla Developer, “WebSockets Protocol,” 2022.
 - [25] Mozilla Developer, “HTTP Protocol,” 2022.