



ESCUELA DE INGENIERÍA DE FUENLABRADA

GRADO EN INGENIERÍA DE ROBÓTICA SOFTWARE

TRABAJO FIN DE GRADO

Detección de transmisores radiofrecuencia con drones
utilizando aprendizaje por refuerzo.

Autor: Cristian Sánchez Rodríguez

Tutor: Dr. Roberto Calvo Palomino

Curso académico 2022/2023

Agradecimientos

ToDo

Madrid, 30 de junio de 2023

Cristian Sánchez Rodríguez

Resumen

En la actualidad, la ciencia ha avanzado a pasos agigantados con respecto a las soluciones tecnológicas. Uno de los campos más beneficiados, es la robótica, también gracias a que abarca una inmensa variedad de campos donde se pueden desarrollar soluciones eficientes y robustas.

Por otro lado, ha surgido un nuevo paradigma con el uso de drones, o sistemas aéreos provistos de sensores y actuadores, que amplían el espectro de uso para herramientas tecnológicas, permitiendo abordar los problemas desde nuevas perspectivas. En este proyecto, el foco de estudio se centra en los *Unmanned Air Vehicles* (UAV), ya que se busca automatizar todo el proceso de manejo del mismo.

De este modo, surge la idea de realizar este Trabajo de Fin de Grado (TFG), juntando lo mejor de ambos mundos, soluciones autónomas con dispositivos aéreos tremendamente adaptables a las circunstancias del problema.

Concretamente, el objetivo ha sido robotizar un dron, con el fin de rastrear y navegar hacia una señal de Radio Frecuencia (RF), mediante el uso de distintos algoritmos robóticos, con el fin de compararlos entre sí y determinar cual desempeña mejor su papel.

Acrónimos

RAE Real Academia Española

TFG Trabajo de Fin de Grado

UAV *Unmanned Air Vehicles*

UAS *Unmanned Aerial Systems*

GCS *Ground Control Station*

SUAV *Small Unmanned Air Vehicle*

LOS *Line Of Sight*

IA Inteligencia Artificial

RF Radio Frecuencia

ROS *Robot Operating System*

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Robots	2
1.1.1. Drones	3
1.2. Inteligencia artificial	5
1.2.1. Aprendizaje por refuerzo	6
1.3. Señales	7
1.4. Síntesis	7
2. Objetivos	8
2.1. Descripción del problema	8
2.2. Metodología	9
2.3. Plan de trabajo	9
3. Plataformas de desarrollo y herramientas utilizadas	11
3.1. Lenguajes de programación	11
3.1.1. Python	11
3.1.2. C++	12
3.2. <i>Robot Operating System</i> (ROS)	12
3.2.1. Gazebo 11	13
3.2.2. Rviz	13
3.3. Plataformas de programación	14
3.3.1. Visual Studio Code	14
3.3.2. Github	14
3.4. Módulos	15
3.4.1. OpenCV	15
3.4.2. Matplotlib	15
3.4.3. PX4 autopilot	16
3.5. Iris	16

4. Diseño	17
4.1. Preparación del entorno	17
4.1.1. JdeRobot - drones	17
4.1.2. Teleoperador	18
4.2. Señales	22
4.2.1. Aproximación de Friis	22
4.2.2. Módulo python de Friis	23
4.2.3. Aplicación de Friis	25
5. Conclusiones	26
5.1. Objetivos cumplidos	26
5.2. Requisitos satisfechos	26
5.3. Balance global y competencias adquiridas	26
5.4. Líneas futuras	26
6. Anexo	27
Bibliografía	29

Índice de figuras

1.1. Robótica industrial VS robótica móvil	2
1.2. Definición de robot	2
1.3. Historia de los drones	3
1.4. UAS	4
1.5. Clasificación de aprendizaje máquina	5
1.6. Aprendizaje por refuerzo	6
1.7. Modelo de Friis	7
3.1. Esquema ROS Noetic	12
3.2. Ejemplo de uso de Gazebo	13
3.3. Ejemplo de uso de Rviz	13
3.4. VS Code logo	14
3.5. Ejemplo de uso OpenCV (detección de bordes)	15
3.6. Aplicación hecha en Matplotlib	15
3.7. PX4 Autopilot logo	16
3.8. Iris drone en Gazebo 11	16
4.1. 3DR Iris simulado	18
4.2. Primera versión del teleoperador	19
4.3. Versión final del teleoperador	20

Listado de códigos

3.1. Hello world en Python	11
3.2. Hello world en C++	12
4.1. Main de center to center app	21
4.2. Main de center to center app	24

Índice de cuadros

6.1. Anexo con las fuentes de donde se han obtenido las imágenes para este
proyecto 28

Capítulo 1

Introducción

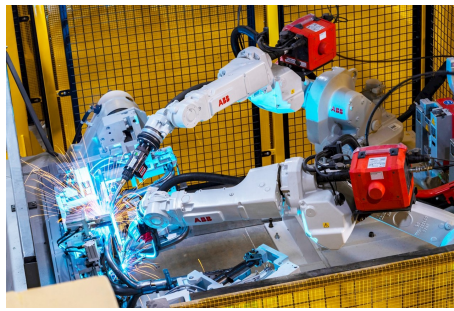
En la actualidad, la tecnología forma parte de nuestro día a día. Prácticamente, constituye un elemento imprescindible para llevar a cabo cualquier actividad, sea profesional o cotidiana. ¿Su función? solucionar problemas para hacernos la vida más sencilla.

Con esto en mente, se presenta la robótica, pero **¿qué es la robótica?**. Según la Real Academia Española (RAE), la robótica se define cómo *“técnica que aplica la informática al diseño y empleo de aparatos que, en sustitución de personas, realizan operaciones o trabajos, por lo general en instalaciones industriales.”* (Real Academia Española, s.f., definición 2) [1]. Sin embargo, no es precisa, por ello una definición más concreta podría ser, ciencia que engloba diversas ramas tecnológicas, encargada del estudio y diseño de dispositivos mecánicos, provistos de sensores y actuadores, capaces de realizar tareas a través de la extracción y posterior procesamiento de la información, con el fin de generar respuestas adecuadas para resolver determinados problemas [2].

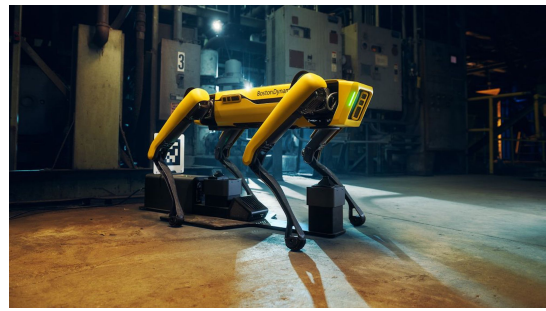
Dentro de la robótica, existen diversas maneras de clasificar, sin embargo, una de las más comunes esta relacionada con la movilidad del dispositivo, esto es, si el mecanismo se puede desplazar por su entorno o no, por tanto se distingue lo siguiente:

1. **Robótica industrial:** que involucra mecanismos fijos, capaces de realizar tareas de manera rápida, precisa y eficiente. Como es el caso de los brazos robóticos [3].
2. **Robótica móvil:** la cual abarca el resto de dispositivos no mencionados, que engloba múltiples entornos y aplicaciones, como pueden ser, robótica aérea, terrestre y submarina [4].

Como tal, la robótica es especialmente buena a la hora de resolver tareas repetitivas, peligrosas, delicadas y en ambientes problemáticos (conocidas como las 4 D's, *dull, dirty, dangerous and dear*) [5]. Sin embargo, uno de los problemas más complicados



(a) Robot industrial ABB



(b) Robot móvil Spot

Figura 1.1: Robótica industrial VS robótica móvil

de abordar, es el **contexto**, es decir, la capacidad de entender y adaptarse a las circunstancias del problema. Es ahí, donde se presenta el segundo gran protagonista, la Inteligencia Artificial (IA) [6].

Pero antes de entrar en materia, primero hay que definir los conceptos básicos uno a uno, como: ¿qué es exactamente un robot? ¿qué tipo de robot usaremos? ¿en qué consiste la IA y que emplearemos? ¿cómo funcionan las señales que rastreamos? entre otras cuestiones.

1.1. Robots

Un robot es un dispositivo provisto con **sensores**, o elementos capaces de extraer información del entorno (por ejemplo una cámara), **actuadores**, o elementos que permiten al dispositivo realizar acciones (por ejemplo un motor), y una **unidad de procesamiento**, que se encarga de generar acciones a través de la información obtenida con los sensores, todo ello mediante algoritmos [7].

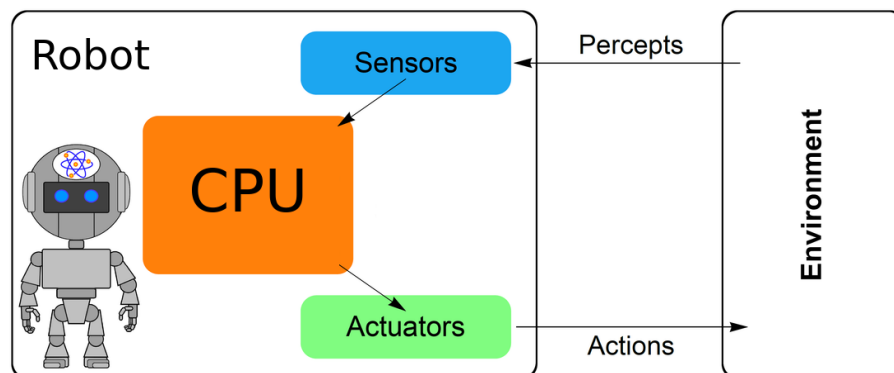


Figura 1.2: Definición de robot

Según el problema que se quiera resolver conviene usar unos u otros. En nuestro caso buscamos un robot con capacidad de navegar, preferiblemente grandes distancias y que pueda tomar medidas de la intensidad de una señal. De este modo, para el primer punto se tenían dos opciones, o bien un robot terrestre, o bien un robot aéreo. Para el segundo punto no influye ya que se podía incluir el sensor en cualquier dispositivo.

Finalmente, y dadas las características del problema, se opta por la solución aérea, ya que permite barrer grandes superficies sin depender de la orografía terreno.

1.1.1. Drones

Los *Unmanned Aerial Systems* (UAS) tienen origen en la primera guerra mundial, con el biplano llamado **Kettering bug**. Se trataba de un torpedo que era lanzado desde una carretilla, capaz de volar de forma no tripulada, hasta que se liberaba de sus alas y caía sobre el objetivo [8]. Más tarde, entre la primera y segunda guerra mundial (1935), se diseñó el **Queen Bee**, de donde surgió el termino “*drone*”, como abeja macho en busca de la reina, que se trataba de un avión no tripulado, con el fin de servir de objetivo para realizar prácticas de artillería aérea [9]. Sin embargo, no fue hasta **Operation Aphrodite**, en la segunda guerra mundial, donde realmente se vió el primer dron radio tripulado, con el fin de poder volar en entornos “sucios” o dirty, dado el nuevo paradigma de las bombas atómicas [10].



(a) Kettering Bug



(b) Queen Bee



(c) Aphrodite Operation

Figura 1.3: Historia de los drones

Existen múltiples avances y ejemplos posteriores, pero en la actualidad podemos definir un **UAS** teniendo en cuenta lo siguiente:

1. **Ground Control Station (GCS)**: es la estación de tierra o el elemento encargado de controlar la nave.
2. **Comunicación**: conecta y gestiona la transmisión de datos entre el UAV y la GCS, mediante **data links**, o canales de transmisión.
3. **UAV**: hace referencia directamente a la aeronave.

[11] [12] [13]

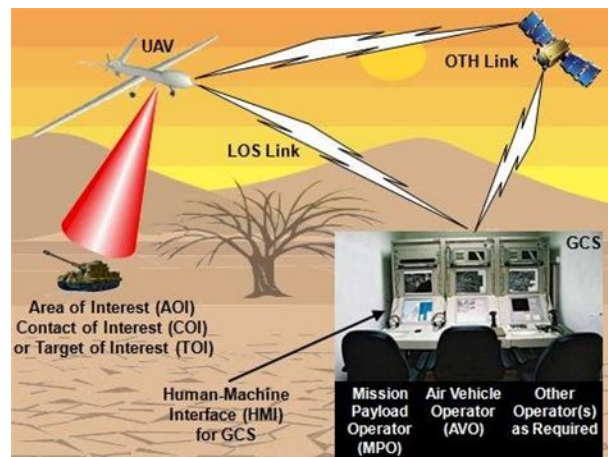


Figura 1.4: UAS

También cabe destacar que hay variedad de drones, según su peso y capacidad de carga de pago, o elementos que sea capaz de cargar, lo cual influye en la **legislación** detras de su uso (de forma general, cuanto mayor sea el peso, más legislación debe cumplir y mayores restricciones de uso tiene) [14]. Por ello, el dispositivo seleccionado es de la categoría más inferior o tambien denominados *Small Unmanned Air Vehicle* (SUAV).

Tal y como fue mencionado, la gran ventaja del uso de vehículos aéreos es poder evitar las irregularidades del terreno, sin embargo, hay ligados al uso de estos dispositivos ciertos problemas, como son el clima, la carga de pago que afecta a la autonomía (peso de las baterías), los interiores (afectan a la señal GPS), entre otros. Esto, se debe tener en cuenta de cara a la resolución del problema.

1.2. Inteligencia artificial

El segundo pilar mencionado en este TFG, es el de la IA, pero, ¿de dónde surge esto?. Quizás, la primera pregunta que se buscó responder fue la siguiente **¿Puede una máquina pensar?**, formulada en “*Computing Machinery and Intelligence*” (Alan Turing, 1950), de donde surgió el famoso test de Turing, entre otras ideas [15]. La búsqueda de la IA enfrentó desafíos iniciales debido a la incapacidad de las primeras computadoras para almacenar datos y su elevado precio. Sin embargo, en 1956, se presentó el primer programa de IA llamado **Logic Theorist** en el **Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence** [16]. Con el tiempo, la IA progresó con mejores algoritmos y mejoras en la capacidad de las computadoras. A pesar de esto, lograr los objetivos finales de la IA, como comprender el lenguaje humano y el pensamiento abstracto, sigue siendo un desafío a día de hoy [17].

En general, la IA es capaz de abordar los siguientes problemas:

1. **Predicción:** que busca adelantar una respuesta precisa, con ciertos datos de entrada. Por ejemplo, predecir el precio de una vivienda en función de sus metros cuadrados.
2. **Clasificación:** que engloba datos en grupos según sus características. Como puede ser, detectar rostros de personas en imágenes.
3. **Aprendizaje:** Que busca resolver un problema a base de prueba y error, mediante un sistema de recompensas. Como por ejemplo, el juego del ajedrez, donde se busque ganar en el menor número de movimientos posibles.

[18]

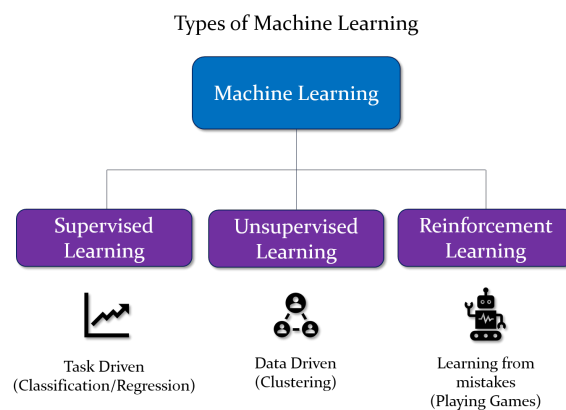


Figura 1.5: Clasificación de aprendizaje máquina

1.2.1. Aprendizaje por refuerzo

Dada la naturaleza de nuestro problema, el enfoque se basará en el aprendizaje por refuerzo, donde se planteará un sistema de **recompensas y penalizaciones**, que enseñará al robot a tomar las mejores acciones posibles [19].

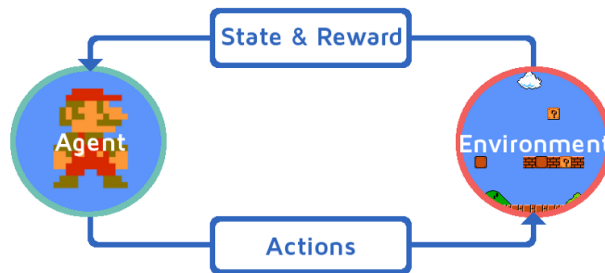


Figura 1.6: Aprendizaje por refuerzo

Cabe destacar que, este enfoque está directamente extraído de la **psicología** y el estudio del comportamiento, donde en función de recompensas y castigos se induce al aprendizaje en distintas tareas, como por ejemplo, enseñar a jugar al ping pong a dos palomas [20] [21].

Concretamente, se hará uso de la metodología **Q-Learning**, que busca generar una tabla numérica donde cada fila se interprete como un estado del robot, que puede ser su posición; y cada columna sea una determinada acción, como puede ser moverse hacia algún lugar. De este modo, y una vez construida la tabla (que se rellena con números en función de las recompensas y penalizaciones), el robot solo tiene que identificar en que estado se encuentra y elegir la columna con mayor valor numérico, lo que se traducirá en la mejor acción para dicho estado [22].

1.3. Señales

Es el último elemento presente en el problema, que es la fuente de datos que se empleará para construir la inteligencia del robot. En este caso, hablamos de las señales, concretamente de señales **RF**, como son por ejemplo Wi-Fi, radio FM, 4G, 5G, entre otros tipos de señales.

En particular, se usará la aproximación de **Friis**, que ofrece un método para calcular la potencia de la señal de un receptor, en función de la potencia del transmisor, las ganancias del transmisor y el receptor, la longitud de onda (que determina el tipo de señal que es), la distancia entre ambos, el medio en el que se encuentren y un factor de pérdidas asociado al sistema empleado [23] [24] [25].

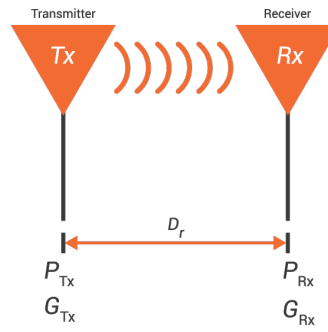


Figura 1.7: Modelo de Friis

1.4. Síntesis

Como conclusión de este capítulo, queda unir las piezas que conforman este puzzle, pero no sin antes mencionar algunos proyectos relacionados, donde se destaca el uso conjunto de drones y robótica para la creación de un módulo ROS, en el que se engloban las comunicaciones para programar un sigue-persona [26], junto con el uso de estas aeronaves en síntesis con la IA, para lograr la navegación en interiores de la misma [27]

En nuestro caso, se usará el mencionado dispositivo del tipo SUAV, provisto de un receptor RF como sensor, y los motores propios como actuadores. Se le agregarán algoritmos sistemáticos para compararlos con soluciones Q-Learning, en la tarea de resolver la detección y posterior navegación al origen de una señal RF, la cual será simulada mediante la aproximación de Friis.

Capítulo 2

Objetivos

Una vez presentado el contexto y el punto de partida del problema, el siguiente paso es definir el fin y los pasos a seguir para su resolución.

2.1. Descripción del problema

Tal y como se comentó previamente, los drones son una herramienta tremendamente versátil, ya que permiten solventar los inconvenientes orográficos de forma sencilla, y pueden ser provistos de múltiples sensores, lo que incrementa su adaptabilidad para solucionar un gran abanico de retos ingenieriles.

Dicho esto, el foco de este TFG consistirá en adaptar el funcionamiento de un dron, mediante los medios que nos proporciona la robótica, para detectar una señal RF estática y navegar hasta ella. Todo ello, con el uso exclusivo de un sensor capaz de detectar la intensidad de la señal, lo que permite al dispositivo navegar tanto en exteriores como en interiores. Además, se realizará una comparativa a cerca del rendimiento de diversos algoritmos, donde se incluirán algoritmos de IA, con el fin de determinar el método más óptimo para resolver el problema. Esto puede ser especialmente útil en labores de rastreo e identificación de objetivos.

Para ello, se establecen los siguientes objetivos:

1. Uso y comprensión de la herramienta de simulación Gazebo 11, para estudiar el comportamiento de un cuadracóptero. Todo ello a través de ROS Noetic, mediante el paquete MavROS, que permite la comunicación con el dron mediante ROS.
2. Desarrollo de una aplicación OpenCV, enfocada a teleoperar el dispositivo, empleando RVIZ para la visualización y el tratamiento del código.

3. Estudio de la propagación de señales y los diferentes parámetros involucrados, con el fin de desarrollar una aplicación responsiva (usando el módulo matplotlib), que simule el comportamiento de una señal, modificando sus características en tiempo real. Todo ello, a través del desarrollo de un módulo personalizado de Python, capaz de generar mapas de señales que siguen la aproximación de Friis.
4. Implementación conjunta de los puntos tratados previamente, con el fin de crear escenarios personalizados, sobre los que probar diversos algoritmos.
5. Desarrollo y testeo de diferentes algoritmos, con el fin de realizar comparativas y concluir que aproximación resuelve mejor.

2.2. Metodología

Este trabajo, comenzó oficialmente en Septiembre de 2022, aunque se pusieran en común las ideas a principios del verano, y se concluye a finales de Septiembre de 2023.

La metodología para llevarlo a cabo fue la siguiente:

1. Reunión de control semanal o cada dos semanas vía Teams con el tutor, donde se realizaba una valoración del estado del proyecto y se establecían los futuros puntos a seguir.
2. Uso de la metodología Kanban, para la organización de los objetivos a corto plazo.
3. Uso y desarrollo guiado del código y otros recursos, a través de un repositorio común, así como publicaciones ocasionales del estado del proyecto en un blog, todo ello mediante Github.

2.3. Plan de trabajo

Para concluir este capítulo, los pasos seguidos han sido:

1. Etapa inicial, donde tras establecer los objetivos del proyecto, se empezó por investigar el estado del arte del uso de drones para aplicaciones robóticas. Posteriormente, se realizó una instalación del modelo del dron, para que funcionará mediante ROS y sus herramientas.

2. Primeros pasos en el TFG. Una vez establecidos los objetivos y teniendo el dron funcional en ROS, lo primero fue realizar una serie de aplicaciones sencillas, que permitieran teleoperar al dron. El punto era realizar movimientos que posteriormente se trasladarían a los algoritmos finales del proyecto, como por ejemplo, desplazarse entre centros de celdas. Para ello:
 - Se estudió la comunicación MavROS, y se desarrolló un controlador compatible para enviar ordenes al dron.
 - Se empleó openCV para el desarrollo de una interfaz gráfica intuitiva con la que controlar el dispositivo.
 - Se agregó una cámara al modelo SDF para previsualizar desde la aplicación.
 - Se desarrolló una serie de funciones para observar el funcionamiento del programa, mediante la herramienta RVIZ.
3. El siguiente punto consistió en el estudio de las señales RF a través de la ecuación de Friis, el desarrollo de un módulo python que aplicase la teoría, y la creación de otra aplicación de previsualización mediante matplotlib.
4. El último punto relacionado con el desarrollo, fué la síntesis de los dos pasos previos, donde a través de ROS y sus herramientas, se desarrollaron diferentes algoritmos que se apoyaban en el módulo previo, para poder resolver el problema de detectar y navegar hasta una señal mediante un dron. Todo ello realizando diversas comparativas para poder extraer conclusiones.
5. Finalmente, se realizó la redacción de la memoria.

Capítulo 3

Plataformas de desarrollo y herramientas utilizadas

Para hacer realidad todo lo mencionado en capítulos anteriores, se usaron diversos recursos ingenieriles que hicieron posible el proyecto. A continuación, se detallará cada uno de ellos.

3.1. Lenguajes de programación

3.1.1. Python

A día de hoy, considerado el lenguaje de programación más popular [28], se ideó en 1991 por Guido van Rossum y se desarrolló en la Python Software Foundation [29]. Es interpretado, es decir, usa un programa que traduce las líneas de código para la máquina en tiempo de ejecución (lo cual lo hace más intuitivo pero menos eficiente). Además, permite la programación orientada a objetos en alto nivel, lo que ofrece gran dinamismo a la hora de usarlo [30] [31].

Debido a su amplia popularidad, podemos acceder a una gran variedad de módulos y utilidades desarrollados por la comunidad, los cuales se integran perfectamente en la resolución de nuestro problema. Entraremos en más detalles en apartados posteriores.

```
#!/usr/bin/env python

if __name__ == "__main__":
    print("Hello world!")
```

Código 3.1: *Hello world* en Python

3.1.2. C++

Seguido muy de cerca en fama, se encuentra el lenguaje de programación creado por Bjarne Stroustrup, en los laboratorios Bell en 1971. En este caso es compilado, lo que implica la traducción y enlazado previo a la ejecución. De corte más eficiente que Python, también permite la programación orientada a objetos. Se sitúa a medio camino entre un lenguaje de alto nivel y uno de bajo nivel [32].

```
#include <iostream>

int main(int argc, char ** argv) {
    std::cout << "Hello World!" << std::endl;
    return 0;
}
```

Código 3.2: *Hello world* en C++

3.2. ROS

Si se habla de robótica, se habla de ROS, ya que es el medio predilecto para el desarrollo de soluciones de este ámbito, pero, ¿qué es exactamente ROS?.

Se trata de un *middleware*, es decir, una infraestructura software situada entre el sistema operativo y el desarrollador, que incluye una serie de módulos y funcionalidades enfocadas al desarrollo de aplicaciones robóticas [33] [34]. La idea detrás, busca estandarizar soluciones que no dependan de los drivers de cada sensor y actuador presentes. De forma general, se trata de una arquitectura basada en nodos que se comunican entre sí, transmitiendo una serie de mensajes propios, a través de canales compartidos llamados *topics*.

Entre las herramientas usadas en este proyecto, se encuentran las siguientes.

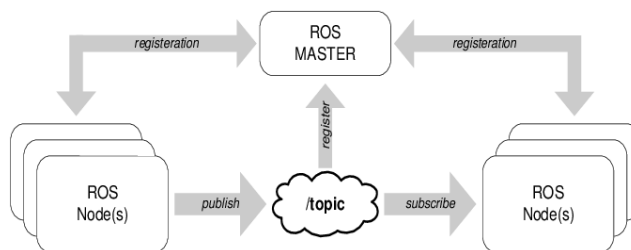


Figura 3.1: Esquema ROS Noetic

3.2.1. Gazebo 11

Se trata del simulador sobre el cual se desarrolla el proyecto. Concretamente consta de un conjunto de módulos optimizados para desarrollar aplicaciones robóticas, a través del previamente mencionado ROS [35].

Esta herramienta, nos permite visualizar en directo, el comportamiento del dron frente a los diversos escenarios que se planteen.

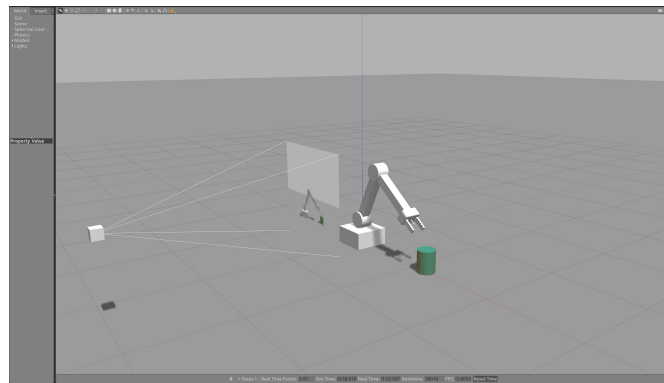


Figura 3.2: Ejemplo de uso de Gazebo

3.2.2. Rviz

Por el otro lado, se encuentra *rviz*, que es un visualizador 3D diseñado para la depuración de aplicaciones ROS [36].

En nuestro caso, nos permitirá ver como se dispersa la señal RF, que trayectoria y orientación sigue el dron, que efecto tiene sobre la señal la presencia de obstáculos, y otras tantas opciones.

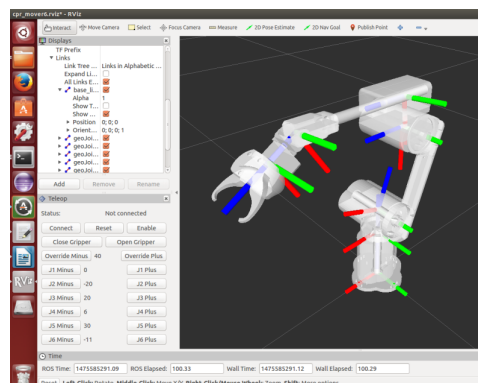


Figura 3.3: Ejemplo de uso de Rviz

3.3. Plataformas de programación

3.3.1. Visual Studio Code

Entre las plataformas usadas para programar, *Visual Studio Code*, o mejor conocido como *VS code*, es un editor de código ligero, funcional tanto en Linux, Windows y macOS [37].

Su principal ventaja, es que es altamente personalizable a el tipo de desarrollo software que se desee realizar. Todo ello a través de las múltiples extensiones que ofrece, así como la conexión directa y fluida con plataformas como Github, que se detallarán a continuación.

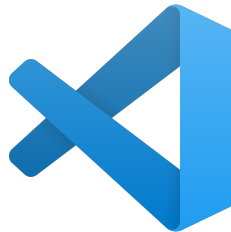


Figura 3.4: VS Code logo

3.3.2. Github

Github nace de la herramienta **git**, creada por Linus Torvalds (desarrollador de Linux), que es un sistema de control de versiones, que funciona a grandes rasgos a través de repositorios (o lugares donde se almacenan los sistemas de versiones de forma local), y commits (que permiten actualizar la version del código almacenado del repositorio) [38].

Sabiendo esto entonces, ¿qué es github?. Consiste en trasladar la idea de, en vez de tener repositorios locales, que estén distribuidos en una plataforma online, donde además se permita el desarrollo conjunto de aplicaciones de manera distribuida.

Por ello, el papel que toma en este proyecto es de vital importancia, ya que asegura un seguimiento y una seguridad, de cara a tener copias de seguridad, donde todo el que desee puede acceder a ver en que punto se encuentra el TFG pueda hacerlo.

3.4. Módulos

3.4.1. OpenCV

Es una biblioteca software de python, enfocada a visión artificial, que dispone de métodos para desarrollar interfaces gráficas de manera intuitiva [39].

Inicialmente se usó para esto último, por su sencillez y porque se implementó una cámara al dron, de cara a una posible extensión de su funcionalidad en algún punto del proyecto.



Figura 3.5: Ejemplo de uso OpenCV (detección de bordes)

3.4.2. Matplotlib

Presentada por John Hunter en 2002, se usó como biblioteca python alternativa a la anterior mencionada. La gran diferencia radica en que está diseñada para trabajar con estructuras numéricas del tipo array (muy compatible con Numpy ¹), lo que permite ofrecer una gran visualización y una interfaz responsiva [40].

En el caso concreto del proyecto, se usó para desarrollar interfaz gráfica, que simula y muestra el comportamiento de una señal RF, permitiendo modificar los parámetros de la ecuación en tiempo real.

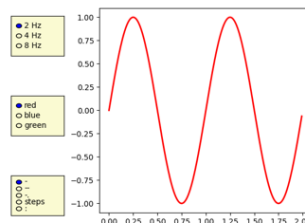


Figura 3.6: Aplicación hecha en Matplotlib

¹<https://numpy.org/about/>

3.4.3. PX4 autopilot

Es la capa de software que permite hacer funcionar las aeronaves con sus componentes, esto es a través del controlador de vuelo, que a efectos prácticos se trata del cerebro del sistema, es decir, interconecta los sensores y actuadores, permitiendo comandar diversas acciones [41] [42].

Este sistema, usa un conocido protocolo de comunicaciones llamado **MAVLink**, que se encarga de gestionar la comunicación entre el controlador de vuelo y la GCS. En nuestro caso, y como queremos desarrollar aplicaciones mediante ROS, debemos añadir una capa más, que se encarga de traducir los mensajes ROS a mensajes compatibles con el protocolo MAVLink, y de esto se encarga **MAVROS** [43] [44].



Figura 3.7: PX4 Autopilot logo

3.5. Iris

Es el nombre de la aeronave usada para solucionar los problemas planteados. En síntesis, es un dron cuadracóptero provisto de una cámara y un sensor de RF simulado. Dicha aeronave es cortesía de **JdeRobot**, que es un conjunto de herramientas pensadas para desarrollar aplicaciones robóticas [45].

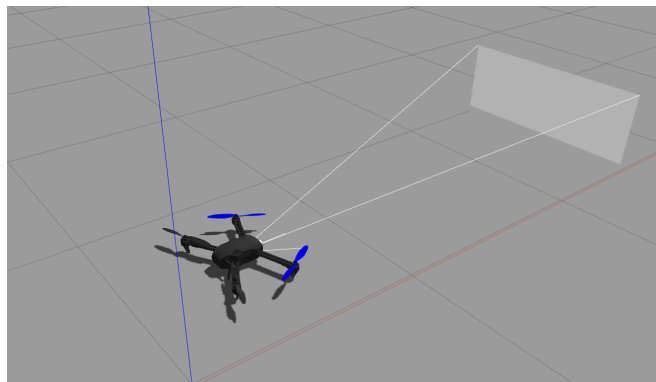


Figura 3.8: Iris drone en Gazebo 11

Capítulo 4

Diseño

Tras haber puesto en contexto todo lo anterior, en este capítulo se expondrá, de forma detallada, el proceso seguido para conseguir que un dron detecte y navegue hacia una señal RF.

Además, se mostrará el desarrollo de una aplicación responsiva, que simula el comportamiento de una señal (en un espacio libre de obstáculos), basada en la aproximación de Friis.

Por último, se buscará determinar cuál de los métodos empleados es mejor y por qué, a través de diversas métricas comparativas que se expondrán en detalle posteriormente.

4.1. Preparación del entorno

Lo primero que se debía conseguir, era un entorno de simulación compatible con ROS, así como un sistema de control de versiones, que nos permitiera mantener la trazabilidad y los backups a mano. Por ello, se estableció un repositorio común en GitHub y se usó el paquete de herramientas dispuesto por **JdeRobot**.

4.1.1. JdeRobot - drones

Gracias a esta plataforma, se pudieron obtener los modelos y los módulos necesarios para simular en Gazebo 11 el desempeño de un cuadracóptero, provisto de un sistema autopilot PX4.

El modelo usado es el **3DR Iris simulado**, con un plugin de una cámara frontal. Este dispositivo utiliza MAVROS para realizar la comunicación, lo que nos permite enviar y recibir mensajes ROS compatibles con el protocolo de comunicaciones típico de estas aeronaves, MAVLink.



Figura 4.1: 3DR Iris simulado

4.1.2. Teleoperador

Ya propiamente hablando de resolver el problema planteado, la primera aproximación propuesta fue hacer una interfaz gráfica simple, que permitiera enviar órdenes a la aeronave.

Para ello, inicialmente se debía conseguir enviar mensajes de forma programática. Por tanto, se diseñó un **script controlador** encargado de la comunicación directa con el **controlador de la aeronave**, para enviar y recibir diversos datos vía MAVROS. De igual modo, se debían satisfacer una serie de requisitos que aseguraran el correcto funcionamiento del sistema:

1. La comunicación debe darse a **más de 2Hz**, para evitar cambios indeseados en el funcionamiento interno del controlador PX4 (de la aeronave).
2. Antes de realizar cualquier comunicación, **debe asegurarse que el estado es “connected”**, lo que significa que el dron esta armado y en modo *OFFBOARD* (nuestra aeronave posee 7 modos distintos, *HOLD*, que mantiene la posición, *RETURN*, que vuelve al punto de despegue, *MISSION*, que permite cargar rutas programadas con anterioridad, *TAKEOFF*, habilita el despegue, *LAND*, habilita el aterrizaje, *FOLLOW ME*, que permite seguir objetivos, y *OFFBOARD*, que permite comandar al dron sin necesidad de GPS, lo que es útil de cara al desarrollo de aplicaciones robóticas) [46].

3. Una vez esta conectado, se deben **enviar datos** (velocidades en nuestro caso) al controlador PX4, con el fin de **evitar el cierre de la conexión**. Estos datos carecen de utilidad más que la de asegurar dicha conectividad.
4. Por último, y antes de enviar cualquier posición, velocidad o comando (distintos modos de actuación), se debe comprobar siempre que el **modo activo** es *OFFBOARD* y que el dron esta **armado** (listo para volar). En caso contrario, se debe solicitar al controlador, mediante servicios, dichas especificaciones.

Por tanto, con todo esto funcionando de forma correcta, la manera de generar comportamientos en el dron en sí, es mediante *topics*. Concretamente, los que genera MAVROS automáticamente cuando se lanza todo el sistema. Tal y como se comentó en apartados previos, estos *topics* sólo admiten mensajes ROS, lo que encapsula el mensaje real transmitido al controlador PX4, que solo es compatible con MAVLINK.

En nuestro caso, enviaremos posiciones (PoseStamped), velocidades (Twist) y comandos (servicios formados por mensajes personalizados, creados por MAVROS, con formato ROS). Esto, nos permitirá conectar el resto de aplicaciones con el script controlador, mediante *topics* comunes, de forma que se encargue de enviar la acción final al dron, mientras el resto de scripts se encarguen de resolver otras tareas.

De este modo, inicia el desarrollo propiamente dicho del **teleoperador**. El teleoperador, se diseñó con el fin de generar comportamientos que se usarían en las fases finales del TFG. Sin embargo, en la primera versión, tan solo se buscó construir una interfaz gráfica sencilla, capaz de enviar ordenes usando ROS que, en última instancia, llegasen al dron y produjesen diversos comportamientos, tales como **moverse y girar**, a través de sliders.

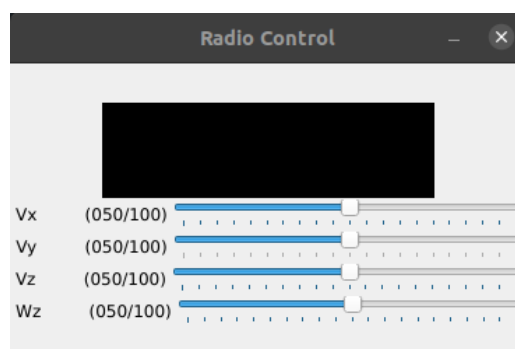


Figura 4.2: Primera versión del teleoperador

En el siguiente paso, se buscó programar **comportamientos predefinidos**, es decir, acciones predeterminadas tales como desplazarse distancias concretas en ciertas direcciones, o girar un número específico de grados en un sentido u otro. Para ello, se diseñó una ampliación sobre la interfaz anterior, en la que se añadió un **botón por cada acción** concreta desarrollada, además de una **imagen de la cámara frontal** en directo. Es importante destacar la acción de moverse de distancias específicas, ya que se empleará en los algoritmos posteriores.

Finalmente, y continuando con lo anterior, se intentó afinar el comportamiento de las acciones predefinidas, para hacer que el dron se desplazase de celda en celda, concretamente de **centro en centro**. La idea es que, el dron solo tomará medidas de la señal en posiciones concretas y no en movimiento. Además, se agregaron **marcadores en rviz**, para determinar las celdas visitadas (con colores aleatorios), junto con otro marcador que muestra la trayectoria que sigue la aeronave.

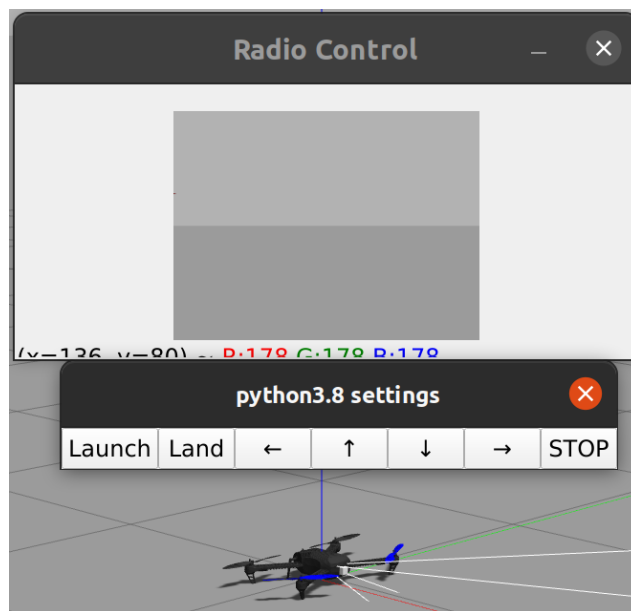


Figura 4.3: Versión final del teleoperador

A continuación, se muestra el “*main*” de la aplicación mencionada:

```

if __name__ == '__main__':
    try:
        rospy.init_node(NODENAME, anonymous=True)

        # Msgs
        ## Subscribers
        image_sub = rospy.Subscriber(IMAGE_TOPIC, Image, callback = image_cb)
        current_pos_sub = rospy.Subscriber(LOCAL_POSE_TOPIC, PoseStamped,
            callback = current_pos_cb)

        ## Publishers
        pos_pub = rospy.Publisher(RADIO_CONTROL_POS_TOPIC, PoseStamped,
            queue_size=10)
        cmd_pub = rospy.Publisher(RADIO_CONTROL_CMD_TOPIC, Px4Cmd,
            queue_size=10)

        # -- OPENCV -- #
        cv2.namedWindow(WINDOWNAME)

        # Buttons
        cv2.createButton('Launch', launch_button, None, cv2.QT_PUSH_BUTTON, 1)
        cv2.createButton('Land', land_button, None, cv2.QT_PUSH_BUTTON, 1)
        cv2.createButton('←', left_button, None, cv2.QT_PUSH_BUTTON, 1)
        cv2.createButton('↑', front_button, None, cv2.QT_PUSH_BUTTON, 1)
        cv2.createButton('↓', back_button, None, cv2.QT_PUSH_BUTTON, 1)
        cv2.createButton('→', right_button, None, cv2.QT_PUSH_BUTTON, 1)
        cv2.createButton('STOP', stop_button, None, cv2.QT_PUSH_BUTTON, 1)

        cv2.waitKey(0)
        cv2.destroyAllWindows()
    except rospy.ROSInterruptException:
        pass

```

Código 4.1: Main de center to center app

Donde, tras inicializar el nodo ROS, se definen por un lado los **suscriptores**, encargados de recibir los datos de la cámara y la posición del dron (usando MAVROS), los **publicadores**, cuya función es enviar posiciones y/o comandos al script controlador, y por último la **interfaz gráfica** diseñada con **OpenCV**, donde se define la ventana y los botones con las diversas acciones predefinidas ¹.

¹Código completo en https://github.com/RoboticsLabURJC/2022-tfg-cristian-sanchez/blob/main/src/teleop/scripts/c2c_control.py

4.2. Señales

Continuando con el proyecto, entramos en el segundo gran bloque, las señales RF. Este apartado, fue especialmente relevante, ya que nos permitió desarrollar una aplicación reactiva, con la meta de generar entornos sobre los que probar soluciones robóticas.

Pero, antes de entrar en detalle, conviene familiarizarse con algunos conceptos básicos sobre el procesamiento de señales:

1. **Señal:**
2. **Dominio temporal:**
3. **Dominio de la señal:**
4. **ADC:**
5. **RSSI:**
6. **SNR:**
7. **Frecuencia:**
8. **TX:**
9. **RX:**

Definidos estos términos, nuestro objetivo fue obtener un modelo capaz de calcular la **propagación de la señal**, es decir, —.

4.2.1. Aproximación de Friis

Por ello, se optó por emplear la aproximación de Friis, que nos proporciona una sencilla fórmula sobre la cual modelizar nuestro problema.

(insertar fórmula)

Donde cada término significa lo siguiente:

1. **Ganancias:**
2. **Valor lambda:**

3. Distancia (d):

4. Factor L: (Insertar tabla)

Además, empleando este método, podemos modelizar las **pérdidas de una señal** estimadas durante su propagación, a través de la siguiente ecuación:

(insertar ecuación path loss)

Sin embargo, para nuestro caso no es relevante (aunque se añadió al módulo).

4.2.2. Módulo python de Friis

Una vez realizadas las pruebas iniciales, se buscó compactar todo, en un lugar accesible para cada aplicación que lo necesitase.

De este modo, surgió la idea de crear un módulo python que se encargará de modelizar un mapa de señales. Para ello, se diseñó una clase cuyo constructor se encarga de recibir por parámetros, las variables implicadas en las ecuaciones de Friis. Además, se debe especificar las dimensiones del mapa y su resolución (que afecta al tamaño de celda).

Básicamente, primero se crea un objeto de la clase Friis donde se especifican las características de la señal y el mapa, el cual genera un mapa sin información. Luego, se selecciona el tipo de modelo que se quiera usar (propagación o pérdidas, este último no está testado), pasando las coordenadas de la señal por parámetros, el cual retornará el mapa relleno con los valores asociados a las ecuaciones de Friis. A continuación se muestra un ejemplo de uso:

```
#!/usr/bin/env python
import friss as fr

if __name__ == '__main__':
    friis_object = fr.Friss(power_tras=10.0,
                           gain_tras=1.5,
                           gain_recv=2.0,
                           freq=fr.FREQ_WIFI,
                           losses_factor=1.0,
                           losses_path=2.0,
                           world_sz=(10,10),
                           resolution=1.0)

    signal_map = friis_object.model_power_signal(origin=(5,3))
```

Código 4.2: Main de center to center app

En este código, se puede ver que se está generando un mapa 10x10 con resolución 1 (es decir, cada celdilla es de 1x1), de una señal WIFI, donde el transmisor emite a 10 W, con una ganancia de 1.5, el receptor posee una ganancia de 2, un factor de pérdidas (L) de 1, es decir, sin pérdidas, y por último, el exponente n (*path-loss exponent (PLE)*) con un valor de 2, que representa el espacio vacío. Luego se genera el mapa de propagación de la señal, indicando que la fuente se encuentra en las coordenadas (5,3).

Sin embargo, este módulo posee otras funcionalidades útiles para trabajar con él. Como son:

1. ***reset_world***: modifica el mapa que hubiera, estableciendo todos sus valores a cero.
2. ***get_world_sz***: retorna las dimensiones del mapa.
3. ***set_values***: modifica las características de la señal simulada.

Recordar que aunque se modifiquen los parámetros, se debe modelar de nuevo el mapa para ver los resultados.

Por último, se busco extender la funcionalidad del módulo, de manera que fuera posible incluir obstáculos en el mapa. La idea era crear un método capaz de posicionar obstáculos en el mapa de la señal, y simular su efecto en la señal.

Para ello, se buscó trazar proyecciones desde la señal hasta los bordes del obstáculo, de forma que se generase un polígono con los bordes del mapa. Posteriormente, se revisó que puntos se encontraban dentro del polígono (que no fueran propiamente parte del obstáculo), a través de un algoritmo basado en el número de intersecciones del punto con el perímetro del polígono, trazando una línea horizontal y hacia la derecha. CITAAAAAAR!!!. Por último, para cada punto dentro del polígono se le aplicó un factor de pérdida al valor almacenado de la señal, de manera que se simulase el efecto del obstáculo.

(imagenes de los obstáculos)

La idea fue abrir puertas a nuevos entornos más complejos y realistas, sobre los que poder probar diversas soluciones, en nuestro caso, para testear el efecto de un muro en el camino del dron a la señal.

(código ejemplo obstáculos)

4.2.3. Aplicación de Friis

ToDo...

Capítulo 5

Conclusiones

ToDo...

5.1. Objetivos cumplidos

ToDo...

5.2. Requisitos satisfechos

ToDo...

5.3. Balance global y competencias adquiridas

ToDo...

5.4. Líneas futuras

ToDo...

Capítulo 6

Anexo

A continuación se muestran las referencias a las figuras de este trabajo junto con la fuente de la que han sido obtenidas:

Referencia imágenes	Fuente de la que se ha obtenido
??	1. https://revistaderobots.com/robots-y-robotica/que-es-la-robotica/?cn-reloaded=1 2. https://www.elindependiente.com/vida-sana/2018/01/22/los-robots-que-nos-cuidaran-en-2050/ 3. https://www.iguanarobot.com/wp-content/uploads/2021/03/429190-1.jpg 4. https://www.robotexplorador.com/ 5. https://www.edsrobotics.com/blog/robots-autonomos-que-son/
??	1. https://www.hogarmania.com/hogar/economia/como-elegir-mejor-robot-aspirador.html 2. http://automata.cps.unizar.es/robotica/Morfologia.pdf 3. https://www.aarp.org/espanol/salud/enfermedades-y-tratamientos/info-12-2013/cirugia-robotica-beneficios-riesgos.html 4. https://www.nobbot.com/mars-home-planet-reto-mundial-colonizar-marte/
??	https://elpais.com/eps/2023-05-27/robots-que-sienten-lo-que-tocan.html
??	http://www.technovelgy.com/ct/Science-Fiction-News.asp?NewsNum=455
??	https://www.medicalexpo.es/prod/hocoma/product-68750-438408.html
??	https://exoesqueleto/pediatrico/puede/comercializar

??	1. https://altertecnia.com/exoesqueletos-mejorar-productividad/ 2. https://www.eafit.edu.co/innovacion/spinoff/natural-vitro/PublishingImages/banner%20-exoesqueleto.jpg 3. https://www.marsibionics.com/atlas-pediatric-exo-pacientes/ 4. https://exoesqueleto-militar
??	1. https://shop.bihar.coop/es/inicio/34-exoesqueleto-flexible.html 2. https://exoesqueleto/rigido/movilidad
??	https://person-pose-keypoints
??	https://www.st.com/content/st_com/en/stm32cubeide.html
??	1. https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814017735791 2. https://cjme.springeropen.com/articles/10.1186/s10033-020-00465-z
??	https://www.atriainnovation.com/que-son-las-redes-neuronales-y-sus-funciones/
??	https://esquema/arbol/decision
??	https://movenet/pose/estimation
??	https://www.analyticsvidhya.com/blog/2022/03/pose-detection-in-image-usi
??	https://developers.google.com/mediapipe/solutions/examples

Cuadro 6.1: Anexo con las fuentes de donde se han obtenido las imágenes para este proyecto

Bibliografía

- [1] Real Academia Española. *robótico*, ca. <https://dle.rae.es/rob%C3%B3tico#WYTncqf>, 2023.
- [2] Revista de Robots. *Robótica. Qué es la robótica y para qué sirve*. <https://revistaderobots.com/robots-y-robotica/que-es-la-robotica/?cn-reloaded=1>, 2023.
- [3] geeksforgeeks. *Industrial Robots*. <https://www.geeksforgeeks.org/industrial-robots/>, 2022.
- [4] geeksforgeeks. *Mobile Robots*. <https://www.geeksforgeeks.org/mobile-robots/>, 2022.
- [5] Bernard Marr. *The 4 Ds Of Robotisation: Dull, Dirty, Dangerous And Dear*. <https://bernardmarr.com/the-4-ds-of-robotisation-dull-dirty-dangerous-and-dear/>, 2021.
- [6] Daniel Dworakowski and Goldie Nejat. Robots understanding contextual information in human-centered environments using weakly supervised mask data distillation, 2020.
- [7] Jiefei Wang and Damith Herath. *What Makes Robots? Sensors, Actuators, and Algorithms*, pages 177–203. Springer Nature Singapore, Singapore, 2022.
- [8] National Museum of the United States Air Force. *Kettering Aerial Torpedo “Bug”*. <https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/Fact-Sheets/Display/Article/198095/kettering-aerial-torpedo-bug/>, 2023.
- [9] de Havilland Aircraft Museum. *de Havilland DH82B Queen Bee*. <https://www.dehavillandmuseum.co.uk/aircraft/de-havilland-dh82b-queen-bee/>, 2023.

- [10] Mason B. Webb. *Operation Aphrodite*. <https://warfarehistorynetwork.com/article/operation-aphrodite/>, 2014.
- [11] srmconsulting. ¿UAV, UAS, RPA, dron... como llamarlos? <https://srmconsulting.es/blog/uav-uas-rpa-dron-como-llamarlos.html>, 2021.
- [12] Brett Daniel. *Ground Control Stations: The Lifeblood of Remotely Piloted Aircraft*. <https://www.trentonsystems.com/blog/ground-control-stations>, 2020.
- [13] R. K. Nichols; H.C. Mumm; W.D. Lonstein; C. M. Carter; and J.P. Hood. *Chapter 13: Data Links Functions, Attributes and Latency*. New Prairie Press, 2018.
- [14] SAFEDroneFlying. *drone regulations*. <https://www.safedroneflying.aero/en/drone-guide/drone-regulations>, 2023.
- [15] A. M. Turing. Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59(236):433–460, 1950.
- [16] Leo Gugerty. Newell and simon’s logic theorist: Historical background and impact on cognitive modeling. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50:880–884, 10 2006.
- [17] Rockwell Anyoha. *The History of Artificial Intelligence*. <https://sitn.hms.harvard.edu/flash/2017/history-artificial-intelligence/>, 2017.
- [18] datacamp. *Classification in Machine Learning: An Introduction*. <https://www.datacamp.com/blog/classification-machine-learning>, 2022.
- [19] Prateek Bajaj. *Reinforcement learning*. <https://www.geeksforgeeks.org/what-is-reinforcement-learning/>, 2023.
- [20] Prateek Bajaj. *Reinforcement and Punishment*. <https://pressbooks.online.ucf.edu/lumenpsychology/chapter/operant-conditioning/>, 2023.
- [21] B.F. Skinner. *Operant Conditioning*. <https://pressbooks-dev.oer.hawaii.edu/psychology/chapter/operant-conditioning/>, 2023.
- [22] OpenStax and Lumen Learning. *Reinforcement Learning Explained Visually (Part 4): Q Learning, step-by-step*. <https://towardsdatascience.com/reinforcement-learning-explained-visually-part-4-q-learning-step-by-step-b65> 2023.

- [23] Mathuranathan. *Friis Free Space Propagation Model*. <https://www.gaussianwaves.com/2013/09/friss-free-space-propagation-model/>, 2013.
- [24] ECIT Engineering. *Friis Free Space Propagation Model Example*. https://www.youtube.com/watch?v=E-_oGNF3S-0, 2022.
- [25] antenna theory. *The Friis Equation*. <https://www.antenna-theory.com/basics/friis.php>, 2015.
- [26] Pedro Arias Pérez. *Infraestructura de programación de robots aéreos y aplicaciones visuales con aprendizaje profundo*. https://gsyc.urjc.es/jmplaza/students/tfm-drones-followperson-pedro_arias-2022.pdf, 2022.
- [27] Md Moin Uddin Chowdhury, Fatih Erden, and Ismail Guvenc. Rss-based q-learning for indoor uav navigation, 2019.
- [28] Tiobe. *TIOBE Index for August 2023*. <https://www.tiobe.com/tiobe-index/>, 2023.
- [29] SohomPramanick. *History of Python*. <https://www.geeksforgeeks.org/history-of-python/>, 2022.
- [30] Python Source Foundation. *What is Python? Executive Summary*. <https://www.python.org/doc/essays/blurb/>, 2023.
- [31] Bryce Limón. *Compiled vs interpreted language: Basics for beginning devs*. <https://www.educative.io/blog/compiled-vs-interpreted-language>, 2022.
- [32] SohomPramanick. *History of C++*. <https://www.geeksforgeeks.org/history-of-c/>, 2022.
- [33] IBM. *What is middleware?* <https://www.ibm.com/topics/middleware>, 2023.
- [34] ROS. *ROS - Robot Operating System*. <https://www.ros.org/>, 2023.
- [35] Gazebo. *About Gazebo*. <https://gazebo-sim.org/about>, 2023.
- [36] ros visualization. *RVIZ*. <https://github.com/ros-visualization/rviz#readme>, 2023.
- [37] Visual Studio Code. *Getting Started*. <https://code.visualstudio.com/docs>, 2023.

- [38] HTG. Stuff. *What Is GitHub, and What Is It Used For?* <https://www.howtogeek.com/180167/htg-explains-what-is-github-and-what-do-geeks-use-it-for/>, 2016.
- [39] OpenCV. *About*. <https://opencv.org/about/>, 2023.
- [40] KattamuriMeghna. *Python / Introduction to Matplotlib*. <https://www.geeksforgeeks.org/python-introduction-matplotlib/>, 2023.
- [41] Peter Karanja. *How Drone Controllers Work (Explained for Beginners)*. <https://www.droneblog.com/drone-controller/>, 2023.
- [42] PX4 User Guide. *PX4 Autopilot User Guide (main)*. <https://docs.px4.io/main/en/>, 2023.
- [43] PX4 User Guide. *MAVLink Messaging*. <https://docs.px4.io/main/en/middleware/mavlink.html>, 2023.
- [44] PX4 User Guide. *ROS 1 with MAVROS*. <https://docs.px4.io/main/en/ros/ros1.html>, 2023.
- [45] JdeRobot. *JdeRobot*. <https://jderobot.github.io/>, 2023.
- [46] PX4 Autopilot. *Autonomous and Manual Modes*. https://docs.px4.io/main/en/getting_started/flight_modes.html, 2023.