



GRADO EN INGENIERÍA DE ROBÓTICA SOFTWARE

Escuela de Ingeniería de Fuenlabrada

Curso académico 2023-2024

Trabajo Fin de Grado

Navegación Autónoma de drones basado en
inteligencia artificial y aprendizaje por refuerzo

Autor: Bárbara Villalba Herreros

Tutor: Dr. Roberto Calvo Palomino



Este trabajo se distribuye bajo los términos de la licencia internacional CC BY-NC-SA International License (Creative Commons AttributionNonCommercial-ShareAlike 4.0). Usted es libre de *(a) compartir*: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato; y *(b) adaptar*: remezclar, transformar y crear a partir del material. El licenciador no puede revocar estas libertades mientras cumpla con los términos de la licencia:

- *Atribución.* Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatante.
- *No comercial.* Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.
- *Compartir igual.* Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.

Agradecimientos

En primer lugar quería agradecer a todas las personas que han sido parte de este camino y trayectoria, agradezco a mis tres familias por apoyarme y no dejarme rendirme en ningún momento.

Mención especial a mi pareja Renato Luigi por estar a pie de cañón en todo momento ayudando, apoyando, y escuchando, no me olvidaré de las charlas que teníamos en el coche mientras cenábamos. También quería agradecer a mi padre por sus charlas telefónicas de vuelta a casa, en donde me intentaba ayudar con sus ideas. Además de mi madre, mi hermana y abuelos por estar siempre a mi lado.

En segundo lugar, quiero mencionar a mi cuñado Angelo Vincenzo por ser compañero de carrera y poder haber compartido una variedad de recuerdos que nunca olvidaré.

Además de agradecer a mi tutor Roberto por la paciencia que ha tenido durante el desarrollo de este trabajo y brindarme ánimos en el camino.

Finalmente, dar las gracias a las personas que no pueden estar en estos momentos.

*A alguien especial,
que está en el cielo, Vincenzo.
Bárbara Villalba*

Resumen

La revolución tecnológica ha tenido un impacto sin precedentes en el mundo de la robótica, desde los robots industriales en las fábricas hasta tener robots capaces de entablar conversaciones con personas. Dentro del mundo de la robótica, la navegación autónoma emerge una de las áreas más emocionantes como la navegación autónoma de drones con sistemas de inteligencia artificial, permitiendo que los vehículos aéreos no tripulados no solo ejecuten tareas preprogramadas, sino que también sean capaces de aprender la adaptación de entornos dinámicos y cambiantes. Convirtiendo a estos pequeños vehículos en un gran desafío en el mundo de la robótica aérea. Los drones pueden ser programados para realizar tareas específicas por ejemplo mapear terrenos en aplicaciones cartográficas o entregar suministros médicos en zonas de difícil acceso.

A parte de la navegación autónoma, la inteligencia artificial permite a los drones por ejemplo ser entrenados para reconocer patrones y objetos en su entorno lo que les puede permitir realizar tareas como la identificación de personas en situaciones de búsqueda y rescate o la detección de anomalías en infraestructuras con algoritmos de aprendizaje automático. Sin embargo, a pesar de estos avances, la navegación autónoma e inteligencia artificial en drones sigue siendo un área de investigación debido a la necesidad de algoritmos de aprendizaje más robustos que en un futuro próximo se podrá llegar a cumplir con éxito.

Con este Trabajo de Fin de Grado demostraremos que la navegación autónoma de drones es capaz de tener un comportamiento autómato en entornos realistas y complejos de carreteras tomando decisiones en tiempo real para alcanzar sus objetivos de manera eficiente y segura. Para poder lograr esto, se explorarán y se implementarán técnicas de algoritmos de aprendizaje autómato y de inteligencia artificial con un enfoque en particular en el aprendizaje por refuerzo utilizando entornos de simulación de Airsim.

Acrónimos

UAV *Unmanned Air Vehicle*

UAS *Unmanned Air System*

GCS *Ground Control Station*

AI *Inteligencia Artificial*

Airsim *Aerial Informatics and Robotics Simulation*

AGV *Automated Guided Vehicles*

AMR *Autonomous Mobile Robots*

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Robótica aérea	6
1.1.1. Historia de los drones	6
1.1.2. Componentes de un UAS	8
1.1.3. Aplicaciones de drones dentro del mundo de la robótica	9
1.2. Inteligencia Artificial	10
Bibliografía	13

Índice de figuras

1.1.	Definición de robot.	2
1.2.	Robótica Industrial vs Robótica de servicio.	2
1.3.	AMR vs AGV.	3
1.4.	Nuro	4
1.5.	Espectáculo de drones	5
1.6.	Historia de los drones	7
1.7.	Ilustración de UAS	8
1.8.	Ilustración del test de Turing	10
1.9.	Ilustración de una red neuronal	11
1.10.	Clasificación de Machine Learning	12

Listado de códigos

Listado de ecuaciones

Índice de cuadros

Capítulo 1

Introducción

En la última década, la evolución tecnológica ha provocado una transformación radical en nuestra forma de vivir, trabajar y relacionarnos desempeñando la tecnología un papel fundamental en el avance de la sociedad e impulsando una serie de innovaciones que se extienden desde la invención de la rueda hasta la era digital contemporánea.

Entre las diversas ramas de la tecnología, la robótica se destaca como una de las más prometedoras. Apareciendo como disciplina durante la década de los años 60 teniendo un crecimiento exponencial en las últimas décadas. Dos figuras clave en el desarrollo de la robótica fueron Jorge Deva (1921-2011) y José Engarberare (1925-2015) considerados como padres de la robótica, quienes crearon el brazo robótico llamado Unimate¹

Definiendo así la robótica como ciencia interdisciplinaria que combina diversas ramas de la ingeniería y ciencias de la computación, se encarga de la concepción, creación, funcionamiento, estructuración, fabricación y uso de los robots. Así, un robot es un conjunto de sistemas informáticos que incluyen sensores, actuadores y ordenadores. Estos elementos permiten al robot ser programado para cumplir objetivos específicos y adaptarse a su entorno. Los sensores con los que está equipado el robot, como cámaras, LIDARs y sensores láser, le permiten recoger datos de su entorno. Los actuadores proporcionan al robot la capacidad de movimiento, mientras que los ordenadores ejecutan el software, es decir, los algoritmos diseñados para llevar a cabo tareas específicas como la navegación autónoma, la detención de objetos o manipulación de objetos con sensores táctiles y de fuerza. Estas tareas que pueden desempeñar pueden ser peligrosas, delicadas, sucias o monótonas (conocidas como las 4D's: dull,dirty, dangerous and dear)²

¹Unimate: <https://www.invent.org/blog/inventors/George-Devol-Industrial-Robot/>

²4Ds:<https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/10/16/the-4-ds-of-robotization-dull-dirty-dangerous-and-dear/?sh=40bb6cec3e0d>

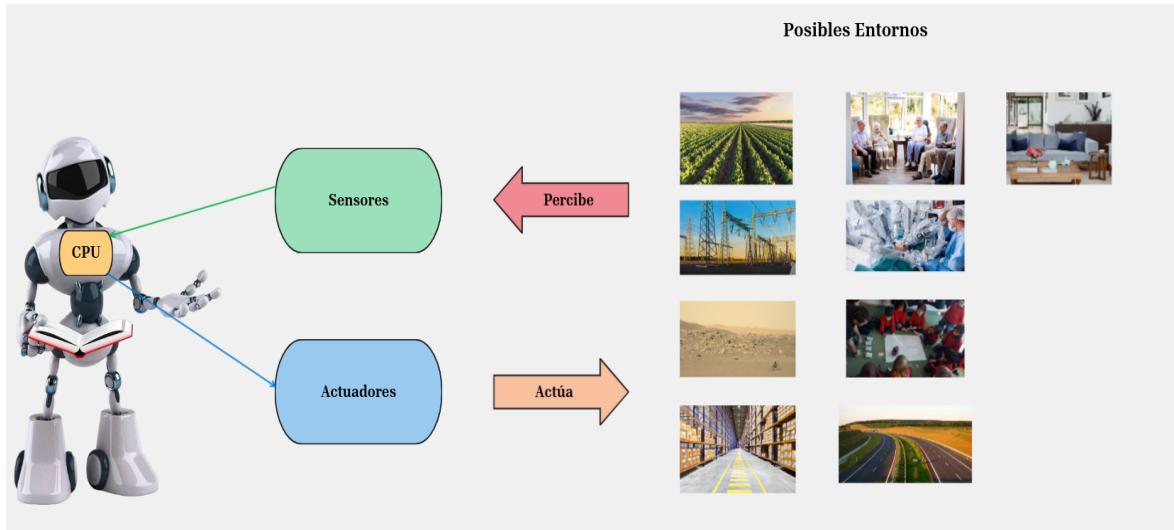


Figura 1.1: Definición de robot.

La robótica se puede dividir de diferentes formas, sin embargo la más común es entre robótica industrial y robótica de servicio:

- **La robótica industrial:** Son los que se encargan del diseño, desarrollo de brazos robóticos y manipuladores. El entorno de trabajo de este tipo de robots es un entorno controlado, estando en áreas protegidas por seguridad del operario. Sus tareas suelen ser pick and place, soldadura, ensamblado de piezas, pintado, manipulación, etc.
- **La robótica de servicio:** Abarca entornos no controlados y más difíciles que los robots industriales, por ejemplo: conducción autónoma, vigilancia, seguridad, sanidad, educación y más tareas.



Figura 1.2: Robótica Industrial vs Robótica de servicio.

En la categoría de robótica de servicio se encuentra los vehículos autónomos terrestres y aéreos. Ambos constan de sensores capaces de obtener información de su entorno, dentro de los vehículos autónomos terrestres podemos tener los vehículos denominados AGV y AMR, principalmente su objetivo es mover mercancía dentro de almacenes dentro de entornos industriales.

La gran diferencia entre los AGV y AMR³ esta en la forma como realizan la navegación, los robots que son AGV tienen caminos preestablecidos, esto quiere decir que tienen marcadores por el suelo facilitando su navegación pero esto conlleva a una desventaja que sería la creación de todo el entorno de trabajo por ejemplo con líneas pintadas.

En cambio los robots AMR son un tipo de vehículos autónomos más sofisticados que no necesitan marcadores en su entorno y equipados de más sensores que pueden realizar la evitación de obstáculos utilizando técnicas de navegación variadas como SLAM⁴.

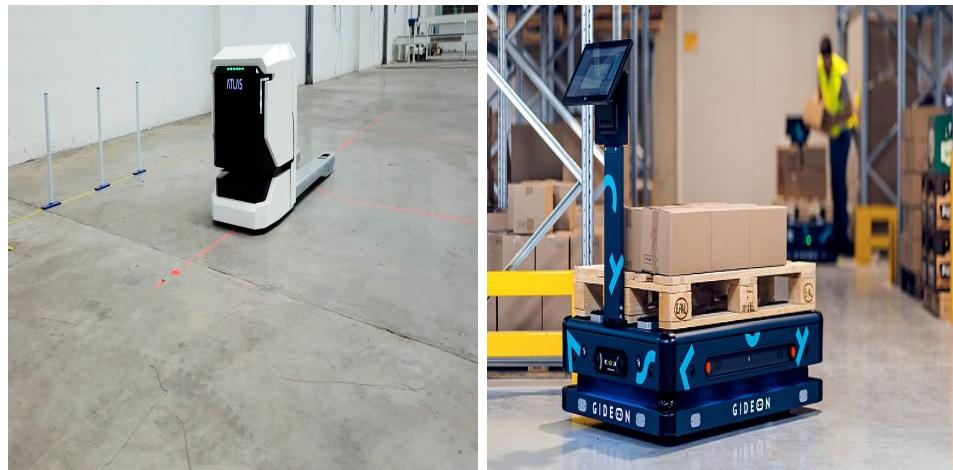


Figura 1.3: AMR vs AGV.

También dentro de los vehículos autónomos podemos tener coches autónomos dando servicio en restaurantes o repartiendo comida como el robot Nuro⁵. Este robot está equipado de sensores como una cámara estéreo de 360 grados para poder visualizar a su alrededor, LIDAR para detectar obstáculos, permitiendo realizar navegaciones autónomas con facilidad. Consta de un sistema de software denominado Nuro Driver⁶ basado en IA y cálculos personalizados. Este software garantiza una conducción segura

³AGV-VS-AMR:<https://mobile-industrial-robots.com/es/blog/agv-vs-amr>

⁴SLAM:<https://agvrobotics.es/navegacion-slam/>

⁵Nuro: <https://www.nuro.ai/>

⁶Nuro Driver: <https://medium.com/nuro/the-nuro-driver-1b17847fd261>

y robusta para poder administrar las operaciones de entrega de manera efectiva.



Figura 1.4: Nuro

Junto a los vehículos autónomos terrestres existen los aéreos, como los drones. Estos vehículos se están convirtiendo en una herramienta versátil por su autonomía, estabilidad y la capacidad de carga útil. Además, han demostrado ser útiles en situaciones donde el acceso del ser humano puede llegar a ser peligroso y de difícil acceso, como la inspección de infraestructuras, el seguimiento de incendios o la vigilancia de fronteras. Aparte de estas tareas, también los drones han abierto nuevas posibilidades en el mundo del entretenimiento con espectáculos que combinan luces y coreografías aéreas. Estos eventos están ganando popularidad en eventos deportivos, conciertos o festivales.

Los espectáculos de drones incluyen formaciones complejas y deben ser sincronizadas creando figuras en el cielo cautivando al público demostrando el potencial artístico y técnico de esta tecnología.



Figura 1.5: Espectáculo de drones

1.1. Robótica aérea

Dentro del campo de la robótica aérea tenemos los drones. Podemos definir un dron, como vehículo aéreo no tripulado (UAV), es un tipo de aeronave que puede operar sin la necesidad de un piloto humano a bordo. Estos dispositivos pueden ser manejados de manera remota por un operador humano o pueden seguir una ruta preestablecida.

1.1.1. Historia de los drones

El origen de los drones se remonta a la Primera Guerra Mundial con el biplano Kettering Bug. Este era un torpedo no tripulado de 240 kg (con una envergadura de 4,5 m, una longitud de 3,8 m y una altura de 2,3 m)⁷ era propulsado por un motor alternativo. Podía volar de forma autónoma hasta un punto específico, donde soltaba sus alas y caía en “caída libre”⁸.

Avanzando en la historia, en 1935 se desarrolló el DH.82 Queen Bee⁹. Este era un blanco aéreo sin piloto que era controlado por radio. De hecho, parece que el término “dron” se originó a partir del nombre, que se refiere a la abeja macho que realiza un vuelo en busca de la abeja reina y luego fallece.

Durante la Segunda Guerra Mundial, quizás el más conocido fue el V-1 “Flying Bomb”¹⁰, el primer misil de crucero operativo del mundo, en donde su sistema de guía preestablecido incluía una brújula magnética que monitoreaba un autopiloto con giroscopios. También en este periodo, destacaremos el *Project Aphrodite* [Frisbee, 1997], fue un programa que tenía como objetivo convertir bombarderos en bombas voladoras no tripuladas que eran controladas por radio. Más adelante estos bombarderos no tripulados se utilizaron para volar a través de nubes de hongo después de las pruebas nucleares.

Destacando más UAVs, tenemos la familia Teledyne Ryan Firebee/Firefly¹¹, estos sistemas generalmente se lanzaban desde el aire y se recuperaban mediante una combinación de paracaídas y helicópteros. El Lockheed D-21 fue uno de los sistemas más impresionantes durante la Guerra Fría. Este UAV fue impulsado por estatorreactor

⁷KetteringBug:<https://www.nationalmuseum.af.mil/Visit/Museum-Exhibits/Fact-Sheets/Display/Article/198095/kettering-aerial-torpedo-bug/>

⁸KetteringBug:<https://daytonunknown.com/2023/06/30/the-kettering-bug-the-worlds-first-drone/>

⁹QueenBee:<https://dronewars.net/2014/10/06/rise-of-the-reapers-a-brief-history-of-drones/>

¹⁰V-1”FlyingBomb”:<https://migflug.com/jetflights/the-v1-flying-bomb/>

¹¹TeledyneRyanFirebee/Firefly:<https://www.designation-systems.net/dusrm/m-34.html>

con velocidades mayores que Mach 3¹². En la Edad Moderna, destacamos El Condor [Alavarez, 2016], fue el primer UAS en utilizar navegación GPS y tecnología de aterrizaje automático y el Predactor¹³. En la época dorada, gracias a los avances anteriores se pudo desarrollar sistemas militares esenciales que han demostrado su valor y el desarrollo de vehículos aéreos no tripulados pequeños (small UAV). Este ultimo ha despertado un gran interés significativo resaltando como puntos de entrega al mercado civil.

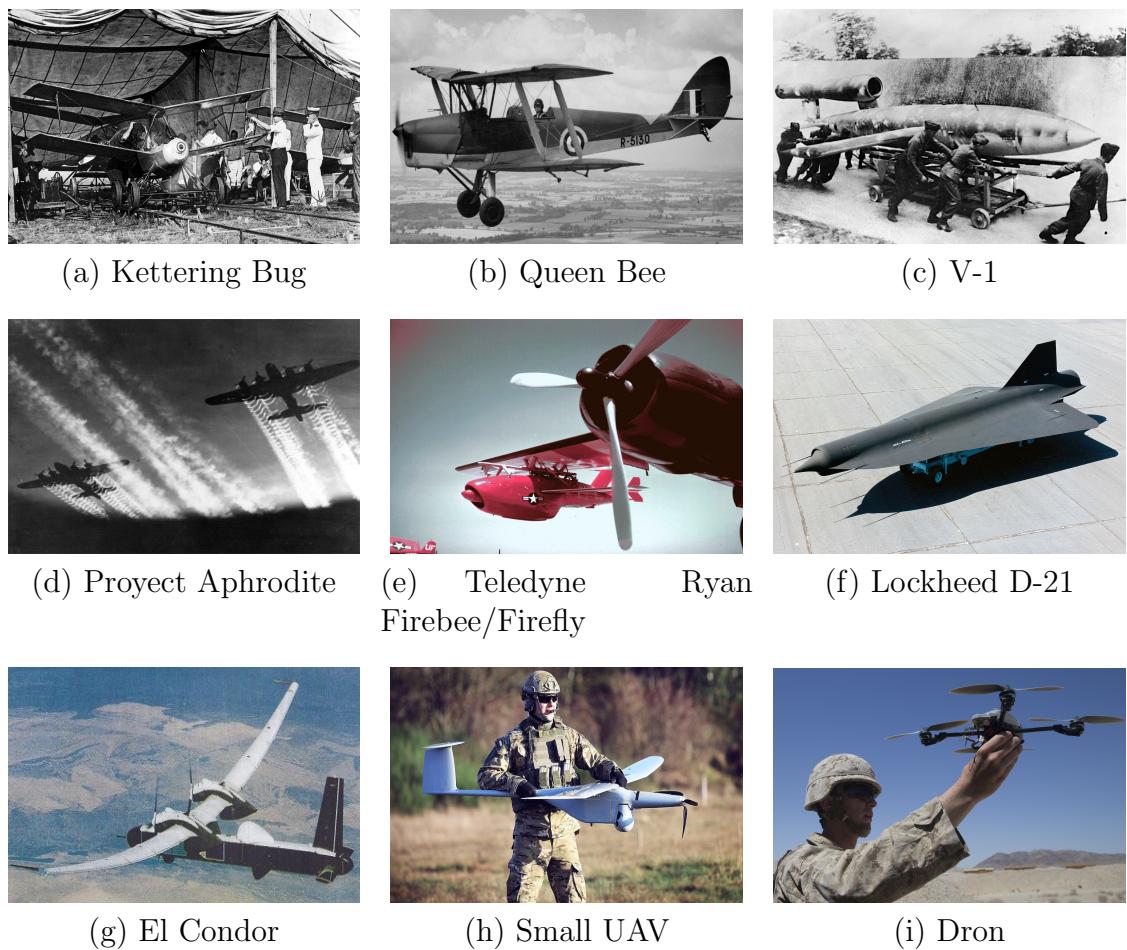


Figura 1.6: Historia de los drones

¹²LockheedD-21:<https://www.marchfield.org/aircraft/unmanned/d-21-drone-lockheed/>

¹³Predactor:<https://www.airforce-technology.com/projects/predator-uav/?cf-view>

1.1.2. Componentes de un UAS

Como hemos descrito anteriormente en la historia, podemos definir UAS como :

1. **UAV:** Vehículo aéreo no tripulado
2. **Ground Control Station (GCS):** Se trata de una estación de control terrestre o marítimo que proporciona el control de la aeronave
3. **Comunicaciones:** Consiste en la gestión de datos y conectividad entre el UAV y la GCS a través de links o canales de transmisión. Dentro de las comunicaciones podemos tener 2 tipos:
 - **Line-of-Sight (LOS):** Requiere una linea directa de visión entre el transmisor y el receptor, es decir, sin obstáculos físicos
 - **Beyond-Line-of-sight (BLOS):** Permite tener una transmisión más allá de la linea de visión directa. En otras palabras, tanto el transmisor como el receptor no necesitan estar en la linea de vision directa. Entre ellos puede haber comunicación satelital.

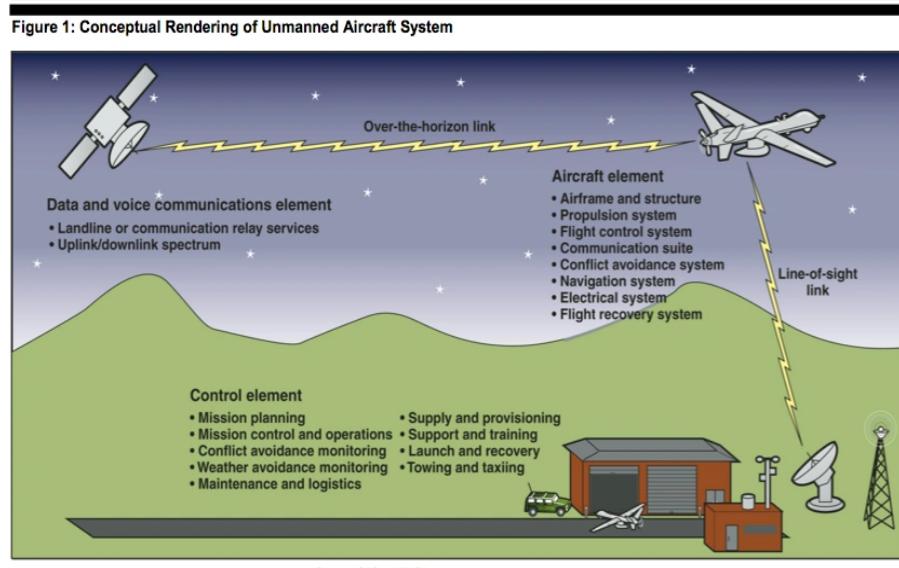


Figura 1.7: Ilustración de UAS

1.1.3. Aplicaciones de drones dentro del mundo de la robótica

Dependiendo de las tareas a realizar, los drones pueden variar en tamaño, peso y capacidad de carga útil y también por su marco legislativo. Es importante destacar que la elección del dron adecuado dependerá en gran medida de las necesidades específicas de la tarea en cuestión.

Por lo tanto, es esencial tener en cuenta estos factores al seleccionar un dron para un propósito específico. Una de las grandes ventajas del uso de vehículos aéreos son que pueden realizar tareas con mayor rapidez y eficacia que los humanos en determinadas situaciones por ejemplo en lugares peligrosos o inaccesibles, como zonas catastróficas o terrenos escarpados, lo que permite una mejor supervisión y recopilación de datos. Aunque presentan desventajas como la seguridad, a medida que los drones se vuelven más comunes en nuestro día a día, aumentan los riesgos asociados al mal uso, ya que pueden provocar interferencias con el espacio aéreo, colisiones. Pueden verse afectados con determinadas condiciones climatológicas, también en interiores (señales GPS), entre otros.

En relación con la robótica y los drones, hay múltiples ejemplos de aplicaciones, como por ejemplo “*follow person*” [Vasconcelos and Vasconcelos, 2016] el cual consiste en detectar y moverse al ritmo de la persona. Otro tipo de aplicación podría ser la entrega de paquetes mediante el proyecto de Amazon PrimeAir [Jung and Kim, 2017]. Además de estas aplicaciones, los drones también se utilizan en una variedad de campos como la agricultura con el uso de la Inteligencia Artificial, detectando plagas, malas hierbas o plantación.

En resumen, los drones son una tecnología emergente con un potencial significativo para transformar una variedad de industrias. Sin embargo, también plantean desafíos únicos que deben ser abordados a medida que se integran más plenamente en nuestra sociedad. Con el desarrollo continuo de la tecnología de los drones y la evolución de las regulaciones, es probable que veamos un aumento en la variedad de las aplicaciones de los drones en el futuro.

1.2. Inteligencia Artificial

La inteligencia artificial ha tenido un crecimiento considerable en estos últimos años, desde la prueba de Turing propuesta por Alan Turing (1950) “Computing Machinery and Intelligence”¹⁴, que consistía en un experimento en el cual una persona entablaba una conversación y tenía que averiguar al final del experimento si se trataba de una persona o una máquina, gracias a este experimento impulsó el desarrollo de máquinas que pueden imitar el comportamiento humano hasta llegar al punto de cuestionarnos de sí se trata de una máquina o un humano, hasta en la actualidad con el desarrollo de la navegación autónoma de vehículos a través del aprendizaje o chatbots como ChatGPT o Bing.



Figura 1.8: Ilustración del test de Turing

Dentro de la IA, tenemos las redes neuronales artificiales, que consisten en imitar el comportamiento del cerebro humano a través de neuronas y las conexiones que puede haber en ellas. Una de las grandes aplicaciones de las redes neuronales centrandonos en la robótica puede ser el reconocimiento visual en los vehículos autónomos para reconocer las señales de tráfico o fijándonos en drones, pueden desempeñar tareas a través con redes neuronales de búsqueda y rescate, proporcionando una vista aérea en la cual puedan localizar personas perdidas o en peligro.

¹⁴Computing Machinery and Intelligence: <https://www.cse.chalmers.se/~aikmitr/papers/Turing.pdf>

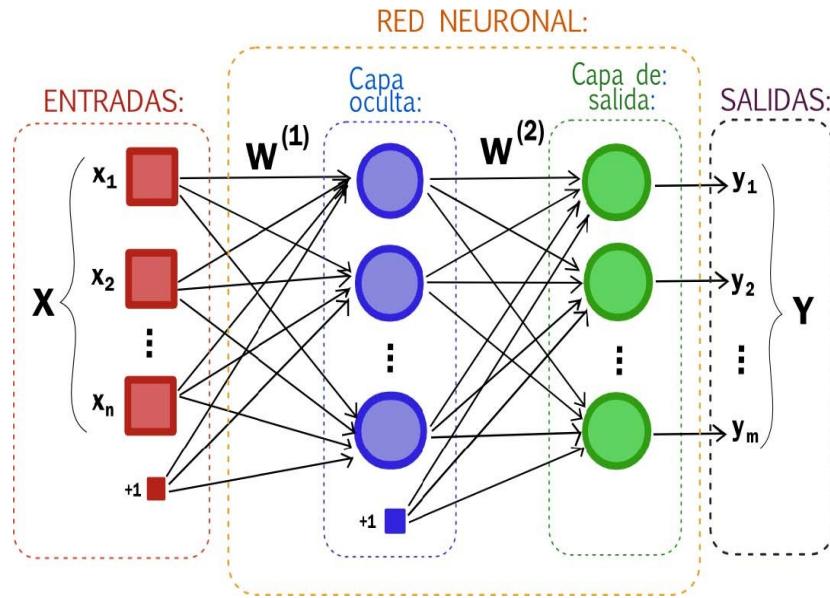


Figura 1.9: Ilustración de una red neuronal

Existen múltiples formas de clasificar la Inteligencia Artificial, pero si nos centramos en el Machine Learning, se pueden clasificar de la siguiente forma:

1. **Aprendizaje Supervisado:** Consiste en tener un conjunto de datos de entrada y su salida correspondiente y a través del algoritmo de aprendizaje pueda “aprender” la relación que hay entre la salida y el conjunto de entradas. Las aplicaciones de este tipo de aprendizaje se dividen en regresión y en clasificación.
 - **Regresión:** Un ejemplo de regresión, podemos tener la predicción del valor de la velocidad lineal y angular de un robot móvil a partir de los datos de los sensores de distancia (sónar) ubicados en el frontal del robot, de esta manera el robot podría predecir su propia trayectoria y navegar de una manera más eficiente
 - **Clasificación:** un ejemplo de clasificación podemos tener la predicción del tipo de animal a partir de una imagen en color.
2. **Aprendizaje no Supervisado:** Consiste en únicamente tener un conjunto de datos de entrada y no tener datos de salida, con el fin de que el algoritmo de aprendizaje detecte patrones y estructuras de interés del conjunto de datos proporcionados. Podemos tener como aplicaciones en este tipo de aprendizaje el clustering (segmentación) y también se utiliza en menor medida como método para reducir la dimensionalidad de los datos. Un ejemplo de clustering, podríamos tener un robot que obtenga de sus sensores datos de su entorno, por ejemplo, la

temperatura, la humedad, la luz, etc. Con este tipo de algoritmo se podría agrupar todos estos datos en diferentes clústeres. Cada clúster representaría un “estado” del entorno lo cual de esta manera el robot podría entender mejor su entorno y adaptar su comportamiento en consecuencia.

3. **Aprendizaje por Refuerzo:** Este tipo de aprendizaje consiste tener un algoritmo que aprenda a desarrollar la tarea encomendada a base de un esquema de recompensas y penalizaciones ante las decisiones que toma el algoritmo en cada una de las iteraciones.

Como ejemplo de aplicación podemos tener QT-Opt [Kalashnikov et al., 2018], desarrollado por Google en 2018, consiste en un brazo manipulador robótico el cual el robot aprende a manipular el objeto y aprender su propia estrategia de agarre.

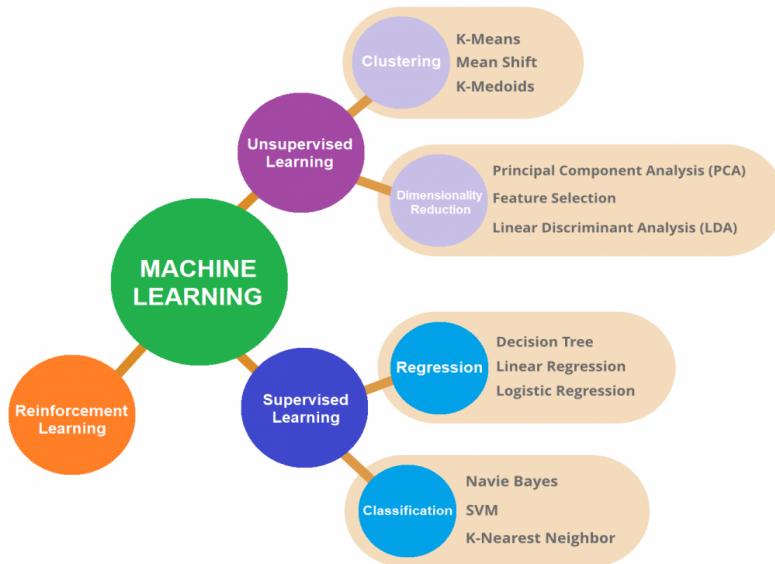


Figura 1.10: Clasificación de Machine Learning

Bibliografía

[Alavarez, 2016] Alavarez, D. A. R. (2016). The condor uav system.

[Dong et al., 2012] Dong, W., Man-Wen, L., Wei-Tian, Z., Xing-Gang, W., Xiang, B., Wen-Qing, C., and Wen-Yu, L. (2012). Yolop: You only look once for panoptic driving perception. *Machine Intelligence Research*, 19:253–266.

[Frisbee, 1997] Frisbee, J. L. (1997). Proyect aphrodite.

[Jung and Kim, 2017] Jung, S. and Kim, H. (2017). Analysis of amazon prime air uav delivery service. *Journal of Knowledge Information Technology and Systems*, 12:253–266.

[Kalashnikov et al., 2018] Kalashnikov, D., Irpan, A., Pastor, P., Ibarz, J., Alexander Herzog, E. J., Quillen, D., Holly, E., Kalakrishnan, M., Vanhoucke, V., and Levine, S. (2018). Qt-opt: Scalable deep reinforcement learning for vision-based robotic manipulation. pages 1–23.

[Vasconcelos and Vasconcelos, 2016] Vasconcelos, F. and Vasconcelos, N. (2016). Person-following uavs. pages 1–9.